

MODELACIÓN HIDRODINÁMICA DEL ARROYO MANGA

Verónica Garicoits (*)

Intendencia de Montevideo. Bachiller, Estudiante de Ingeniería Civil Hidráulica-Ambiental.

Gabriela Dupuy

Intendencia de Montevideo. Ing. Civil Hidráulica-Ambiental.

María Mena

Intendencia de Montevideo. Ing. Civil Hidráulica-Ambiental.



Dirección del autor principal (*): Intendencia de Montevideo 18 de Julio 1360 – Montevideo – Departamento de Montevideo – Uruguay. Tel.: 1950-1370. e-mail: vero.garicoits@gmail.com

RESUMEN

El Arroyo Manga se encuentra ubicado al noreste de Montevideo, siendo un afluente del Arroyo Carrasco, uno de los principales cursos del Departamento. Conforme a la problemática de inundaciones que se ha dado como consecuencia de los desbordes del arroyo, la Intendencia de Montevideo (IdeM) se propone generar una herramienta que permita simular el comportamiento hidrológico de la cuenca de aporte y la hidrodinámica del arroyo. Durante los años 2014 y 2015 y aplicando recursos propios, el Servicio de Estudios y Proyectos de la IdeM desarrolló un modelo en los software HEC-HMS y HEC-RAS, el cual permitió proponer medidas de control que apuntan a mejorar la conducción de las aguas y disminuir el alcance de las inundaciones, afectando una menor cantidad de viviendas.

Durante el 2014 el SEPS realiza los estudios de base para la cuenca del Arroyo Pantanoso utilizando la herramienta desarrolla en el marco del estudio conjunto entre la IdeM, el BID y el DHI, que consistió, entre otras cosas, en un modelo hidrodinámico para el arroyo desarrollado con el software MIKE URBAN.

En función de la potencialidad de continuar con la misma línea de trabajo, se decide crear un modelo hidrológico e hidrodinámico para el Arroyo Manga, 1D-2D en el software MIKE URBAN. Buscando profundizar el estudio del comportamiento general del arroyo frente a eventos extremos, comprender su hidrodinámica de forma más detallada y continuar proponiendo planes para el uso de suelos en las planicies de inundación, protegiendo el espacio propio del curso de agua y su escurrimiento natural.

En el presente trabajo se presenta un detalle de la metodología aplicada al caso de estudio, ventajas y desventajas de los modelos utilizados, los resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones.

Palabras Clave: Arroyo Manga, Comportamiento hidrodinámico del arroyo, Gestión del uso de suelo, Herramienta de modelación 1D-2D, Inundaciones.

INTRODUCCIÓN

La cuenca del arroyo Manga se ubica al Noreste del departamento de Montevideo, estando limitada al Oeste por la Av. José Belloni; al Norte por la Av. de las Instrucciones; al Sur por la cuenca del Arroyo Chacarita; al Sureste por la cuenca de la Cañada Canteras y al Noreste por la cuenca del Arroyo Toledo. Comprende un área de aporte de 33,7 km², siendo prácticamente rural en toda su extensión y las zonas urbanizadas de la cuenca se caracterizan, en su mayoría, por no presentar servicios de drenaje ni saneamiento.

El arroyo se encuentra comprendido en su totalidad dentro del Departamento, con aproximadamente 11.5 km de largo y desembocando en los Bañados de Carrasco.

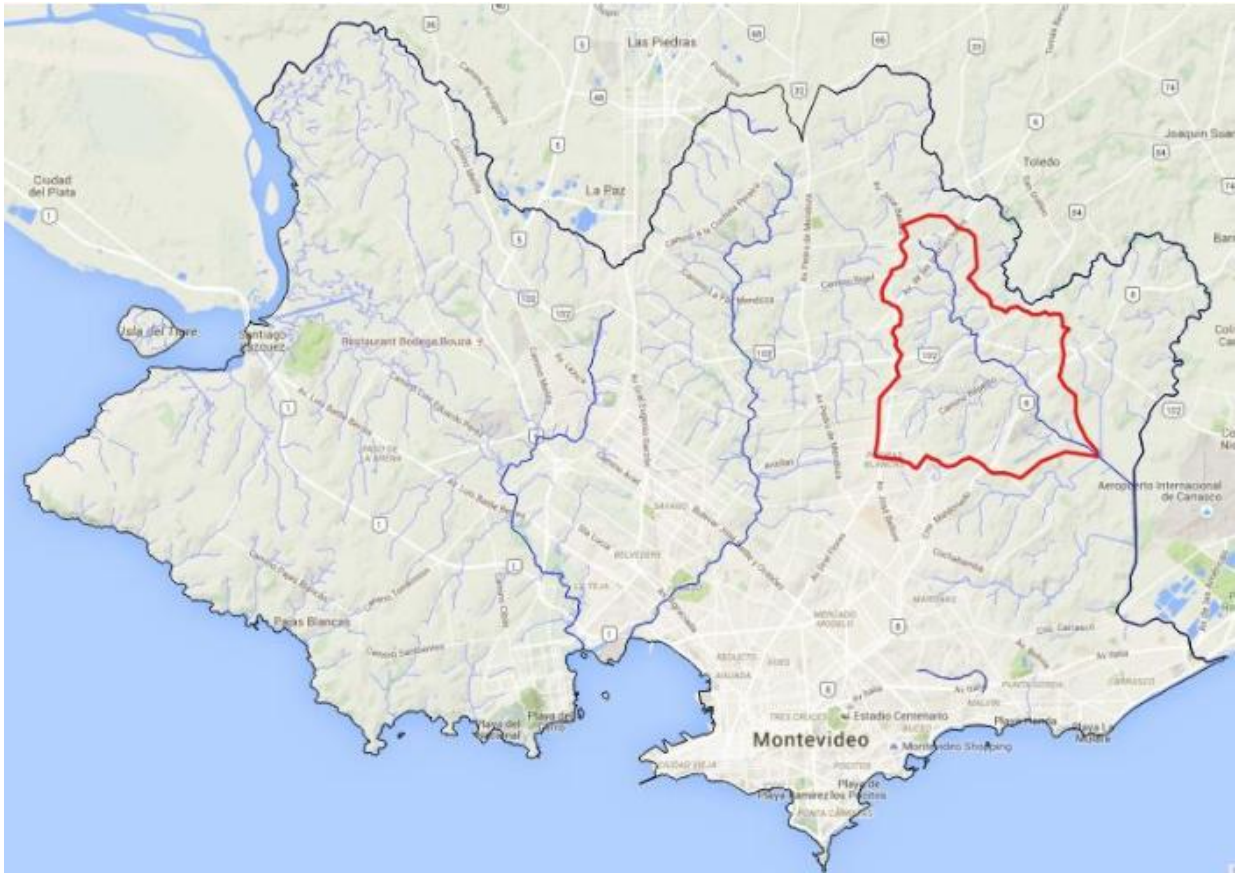


Figura 1.- Ubicación de la cuenca del arroyo Manga en el Departamento de Montevideo

Si bien la cuenca es caracterizada como rural y el arroyo actualmente cuenta con poca población en sus márgenes, la presencia de rellenos en la zona, reflejan una clara tendencia de ocupación de la cuenca. Las nuevas ocupaciones que modifican las planicies de inundación implican un aumento en la impermeabilización del suelo y una menor capacidad de infiltración de los suelos, aumentando la escorrentía e inundaciones en las zonas más vulnerables.

Por esta razón surge la necesidad de implementar un modelo hidrodinámico en una herramienta con reconocimiento a nivel mundial, que permite analizar el comportamiento hidráulico del arroyo. En particular esta herramienta permite obtener resultados en dos dimensiones y proporciona buenos elementos para llevar a cabo el análisis de las causas de inundación y de las posibles soluciones. Asimismo resulta de interés el análisis para cursos de agua urbanos que presentan problemas a nivel de gestión del uso de suelo.

Por otro lado, se cuenta con otro modelo para el arroyo en el HEC-RAS, por lo cual resulta inevitable la comparación entre ambos modelos, contemplando las ventajas y la complejidad que presenta cada uno, y analizando los resultados obtenidos con cada uno en función del grado de detalle requerido e implementado por cada software.

A continuación se describe la metodología empleada para la implementación del modelo hidrológico e hidrodinámico para el Arroyo Manga mediante el software MIKE URBAN, y se presenta brevemente la metodología utilizada para desarrollar el modelo en el HEC-RAS.

METODOLOGÍA

Antecedentes

Durante el año 2014, en el marco de los estudios de base definidos por la IdeM para la elaboración del Plan Especial de la cuenca del Arroyo Pantanoso, el BID incluye en su iniciativa "Ciudades Emergentes y Sostenibles" (CES) un proyecto en que participan en conjunto el BID, la IdeM y el DHI. En dicho proyecto, denominado "Pantanoso Flood Modelling Study in Montevideo, Uruguay" el DHI desarrolla un modelo 1D-2D en el MIKE URBAN, con el objetivo de analizar el comportamiento general del arroyo frente a eventos extremos y comprender su hidrodinámica con su característica zona de humedal y pantano.

Luego la herramienta desarrollada se calibró a partir del evento ocurrido los días 6 y 7 de Febrero del 2014. Para ello se contó con datos de lluvia aportados por los pluviómetros de la red pluviométrica recientemente instalada de la IdeM. Esta red cuenta con 15 puntos de medición continua de datos de lluvia, con lo cual se tiene una buena descripción, temporal y espacial del evento. Además de los datos de lluvia, se contaba con niveles de agua alcanzados en varios puntos críticos del cauce. Esta información de niveles se obtuvo del revelamiento llevado a adelante por el personal del SEPS, así como funcionarios del Centro Comunal Zonal N° 18 y del Centro Coordinador de Emergencias Departamental.

Luego de calibrar el modelo se realizó un análisis del impacto generado por la implantación de dos grandes emprendimientos en las márgenes del arroyo. Uno de ellos es la Unidad Alimentaria de Montevideo (UAM) y el otro es la industria aceitera Cousa. En función de los resultados obtenidos y con el fin de mitigar la creciente problemática de las inundaciones en una zona de importante desarrollo logístico, industrial y habilitación, se implementaron en el modelo diversas soluciones locales en la zona de Cousa.

Además se analizó la influencia del mantenimiento (o la falta del mismo) en la hidrodinámica del arroyo. Se concluyó que la sensibilidad de la respuesta del curso de agua frente a la falta de mantenimiento hace que la necesidad de limpieza, mantenimiento correctivo y preventivo sea de carácter inmediato.

A partir de los estudios mencionados anteriormente se adquirió experiencia en el uso del Mike Urban. Con el objetivo de continuar profundizando los conocimientos en dicho software y aplicarlo a casos de estudio que presentan problemática a nivel de inundaciones, es que se decidió generar un modelo para el arroyo Manga.

Por otro lado, durante el 2014 y parte del 2015 el SEPS realizó, con recursos propios, un modelo hidrológico-hidrodinámico en los software HEC-HMS (versión 3.5) y HEC-RAS (versión 4.1), respectivamente.

Para montar dicho modelo se realizó la caracterización de la cuenca y subcuencas de aporte lo cual implicó en primer lugar salidas de campo para un reconocimiento del lugar, identificar las secciones a relevar y marcar los niveles de agua ocasionados por las tormentas para luego calibrar y validar el modelo.

Luego de definir las secciones se llevo a cabo un revelamiento planialtimétrico en una extensión de 4 km del cauce, entre Camino Cerdeña y la Ruta 102, con el objetivo de confeccionar perfiles transversales que definieran el curso de agua en el software. Se elaboraron 15 secciones transversales del cauce, en las cuales se relevaron los cambios de pendiente, fondo del cauce, puntos en cada borde del cauce y puntos correspondientes a la planicie de inundación, así como también umbrales de viviendas linderas al arroyo. A su vez, se relevaron las obras de ingeniería civil (puentes/alcantarillas) que se encuentran sobre el arroyo, se tomaron las secciones aguas arriba y aguas abajo de cada puente, y se colocaron 8 mojones en la zona.

En segundo lugar las salidas de campo fueron sustanciales para determinar los parámetros físicos e hidrológicos que brindan información particular para llevar a cabo la modelación.

A partir de los parámetros calculados se implementaron y corrieron los modelos primero en el HEC-HMS y luego en el HEC-RAS. Por último se realizó un procesamiento de los resultados obtenidos del HEC al GIS, logrando de esta forma obtener las curvas de inundación para diferentes períodos de retorno.

Los modelos desarrollados en el Mike Urban y HEC para el A° Manga fueron calibrados, empleando la tormenta ya mencionada del 6 y 7 de Febrero del 2014, y validados utilizando los datos del evento sucedido el 2 de Noviembre del 2014.

Al igual que para el arroyo Pantanoso, con el modelo HEC-RAS se realizó un estudio de la influencia de la falta de mantenimiento sobre el cauce y su planicie. Además se estudiaron diversas soluciones estructurales y no estructurales, que permitan evitar o al menos disminuir los daños producidos por las inundaciones.

Descripción del modelo

El MIKE URBAN es un software de modelación hidráulica e hidrológica, integrado con GIS que combina tres modelos, uno hidrológico que permite calcular el aporte de subcuena trazada al cauce principal, otro 1D para representar las conducciones tanto del curso principal como de los afluentes y por último uno 2D el cual requiere de un Modelo Digital del Terreno (MDT), a partir del cual se pueden representar superficies de inundación cuando las conducciones se ven desbordadas.

Para desarrollar el modelo en el MIKE URBAN se utilizó la misma información de base utilizada para el montaje de los modelos HEC. En el modelo 1D se incluyen las 15 secciones transversales elaboradas a partir del relevamiento, conformando los 4km de cauce; además se incluyen 4 puentes y 9 subcuencas de aporte al cauce.

En ambas instancias de modelación hidrológica se optó por utilizar como método de pérdidas el modelo del NC del Soil Conservation Service (SCS), ya que es un método conocido y que ha sido empleado en otras oportunidades. En segunda instancia, la transformación precipitación-caudal se realizó empleando el método del Hidrograma Unitario del SCS.

Las tormentas de diseño ingresadas en el modelo hidrológico fueron calculadas a partir de la Ley de Montana. Se utiliza la misma tormenta para cada subcuena, la cual corresponde a la del Plan Director de Saneamiento de Montevideo, con una duración total de 6 horas, con paso de 5 minutos y el pico de máxima intensidad a la hora.

Por otro lado, para el montaje del modelo 2D se construyó un MDT a partir de datos de campo y curvas de nivel digitales cada 2 metros del departamento de Montevideo, necesario para el montaje del modelo 2D. Dicho modelo no incluye el cauce principal, ya que este ya se encuentra representado en el modelo 1D.

En la figura a continuación se presenta el esquema de trabajo de ambos software.

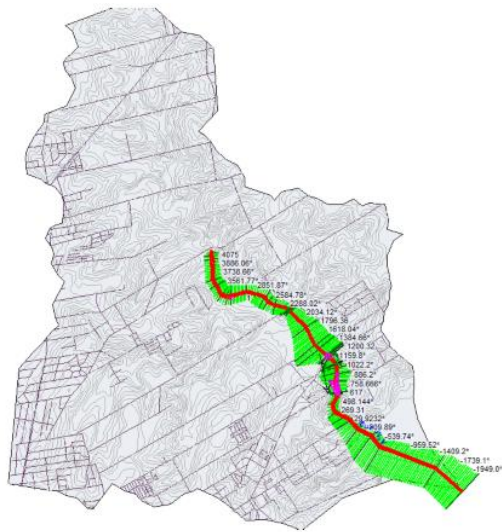


Figura 2.- Esquema de trabajo en el HEC-RAS

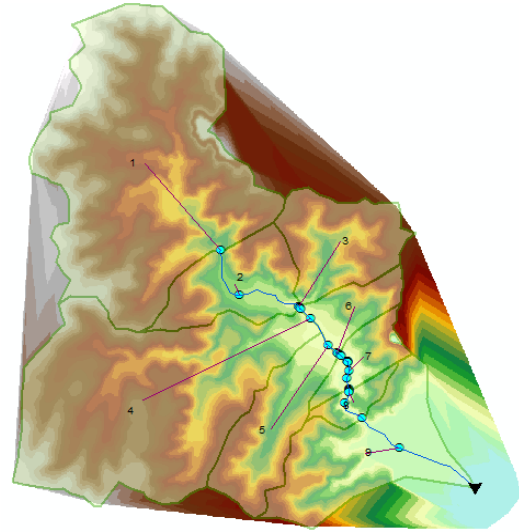


Figura 3.- Esquema de trabajo en el MIKE URBAN

Calibración

Luego de implementado el modelo se procedio a modificar el número de Manning, en función de fotos tomadas durante el relevamiento topobatimétrico e información bibliográfica (Ven Te Chow, 1994). A su vez se tomaron como base los coeficientes de Manning incorporados en el HEC-RAS para el cauce principal.

Para realizar la calibración se utilizó la tormenta sucedida el 7 de Febrero del 2014. Los datos fueron registrados por el pluviómetro mas cercano a la cuenca perteneciente a la Red Pluviometrica de la Intendencia de Montevideo, ubicado en el Centro Comunal Zonal N° 9 (Avenida 8 de Octubre 4700, esquina Marcos Sastre). Los niveles de agua alcanzados en varios puntos críticos fueron obtenidos por el personal del SEPS el 10 de febrero.

Si bien la tormenta del día 7 no supera los 5 años de periodo de retorno, si se considera la superposicion de eventos ocurridos en los dias previos, los cuales no fueron de gran intensidad pero si de larga duración, y la condición del suelo en la que se encontraba al momento de la tormenta, los resultados en la zona Metropolitana fueron devastadores.

De forma de representar la condicion de humedad del suelo se ingreso en el modelo una serie temporal de 20 dias, como se presenta en la figura a continuación.

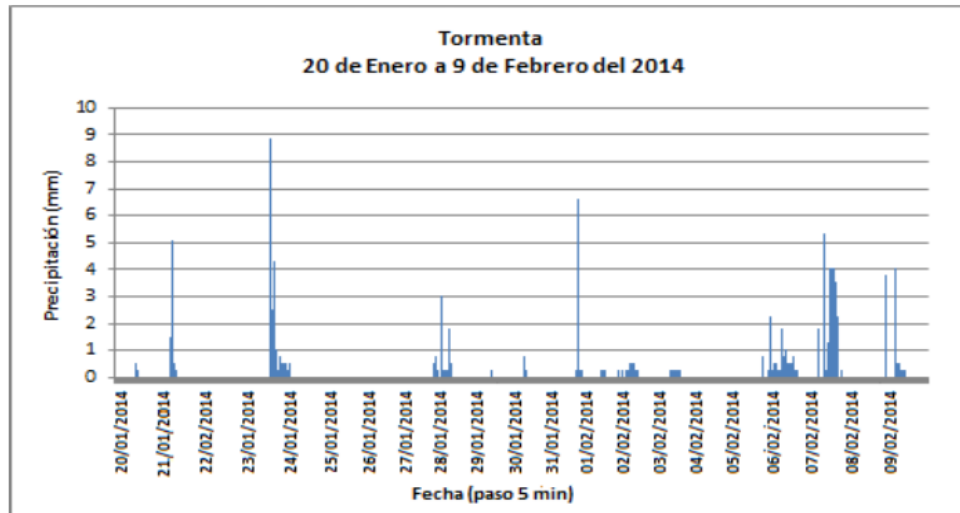


Figura 4.- Tormenta empleada para la calibración

Los puntos relevados de este evento fueron comparados con los resultados obtenidos con Mike Urban y además con los valores obtenidos previamente con HEC-RAS. A continuación se presenta una tabla comparativa presentando dichos valores.

ID	Nivel (m)		
	MIKE URBAN	HEC-RAS	Relevamiento
0	8.30	8.46	8.68
1	8.21	8.24	8.61
2	Limite de inundación		
3	7.95	8.06	8.23
4	8.19	8.03	8.26
5	8.11	8.19	8.31
6	9.50	9.38	9.32
7	9.66	9.38	9.07

Tabla 1.- Comparación de resultados entre ambos modelos y el relevamiento para Febrero 2014

ID	% Error		
	Mike-Relevamiento	Hec-Relevamiento	Mike-Hec
0	4.4	2.5	1.9
1	4.6	4.3	0.3
2	Limite de inundación		
3	3.4	2.1	1.4
4	0.8	2.8	2.0
5	2.5	1.4	1.0
6	2.0	0.6	1.3
7	6.5	3.4	3.0

Tabla 2.- Porcentaje de error entre ambos modelos y el relevamiento para Febrero 2014

Si bien los resultados obtenidos con el software Mike Urban presentan diferencias mayores que los obtenidos previamente con el HEC-RAS, resultan valores aceptables. Cabe destacar que el modelo en el

Mike Urban únicamente se modificaron los valores del número de Manning en el cauce principal pero en la planicie de inundación no fueron modificados.

Debido a esto se considera como una primera calibración, y se deben seguir tomando datos para continuar con el proceso de calibración del modelo.

A su vez, se obtuvo la superficie de inundación máxima para dicha tormenta, la cual se presenta en la figura a continuación en contraposición con la obtenida con el modelo en el HEC-RAS y las herramientas GIS. Las superficies coinciden de forma muy adecuada en la zona aguas abajo de la Ruta 8, aunque presentan mayores diferencias aguas arriba de la misma, siendo de mayor extensión la obtenida a partir del Mike Urban.



Figura 5.- Superficies de inundación para Febrero 2014 de ambos modelos (verde: Mike, marrón: HEC), y puntos de calibración

Validación

Luego de calibrar el modelo se procedió a validar el mismo a partir de la tormenta sucedida los días 2 y 3 de Noviembre. Se registró una lluvia de 91,11 mm a partir del mismo pluviómetro empleado en el proceso de calibración. Se estimó este evento como una tormenta con período de retorno menor a 1 año para una duración de 6 horas.

La fecha de inspección para esta lluvia fue realizada el 14 de Noviembre, la modelación se realizó para los dos días completos.

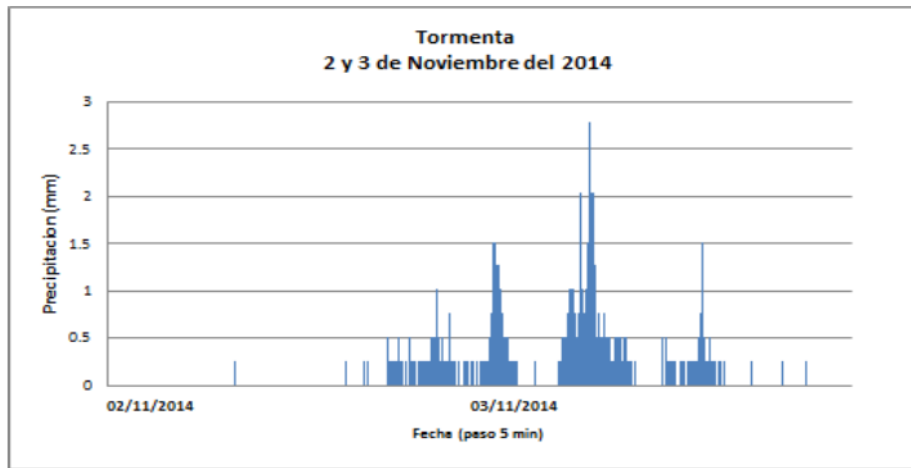


Figura 6.- Tormenta empleada para la validación

De igual forma que en el caso anterior, se compararon los resultados obtenidos con los valores relevados el 14 de Noviembre y con los valores resultantes del modelo HEC-RAS, así como también las superficies de inundación resultantes de ambos modelos. A continuación se presenta la tabla con los valores mencionados.

ID	Nivel (m)		
	MIKE URBAN	HEC-RAS	Relevamiento
0	7.70	7.57	7.55
1	7.60	7.41	7.61
2	7.43	6.93	6.64

Tabla 3.- Comparación de resultados entre ambos modelos y el relevamiento para Noviembre 2014

ID	% Error		
	Mike-Relevamiento	Hec-Relevamiento	Mike-Hec
0	2.0	0.3	1.7
1	0.2	2.6	2.5
2	11.9	4.4	7.2

Tabla 4.- Porcentaje de error entre ambos modelos y el relevamiento para Febrero 2014

Nuevamente se pueden observar diferencias mayores a partir de los resultados obtenidos con el Mike Urban frente a los del HEC-RAS, que alcanzan hasta el 10%. Si bien los resultados son aceptables, se debe continuar trabajando en la calibración y posterior validación del modelo.

Por último se presentan las superficies de inundación obtenidas a partir de ambos modelos junto con los puntos de medición durante el relevamiento, para la validación.



Figura 7.- Superficies de inundación para Noviembre 2014 de ambos modelos (verde: Mike, azul: HEC), y puntos de validación

En este caso se observan mayores diferencias entre ambas superficies aguas debajo de Ruta 8 en comparación con el evento de Febrero. Esto se puede deber a que la tormenta considerada posee un período de retorno menor que la anterior, y para eventos pequeños se requiere mayor precisión del MDT ya que las diferencias entre los resultados de ambos modelos comienzan a hacerse más visibles.

RESULTADOS

A continuación se presentan las superficies de inundación obtenidas mediante los dos modelos para 10 y 100 años de período de retorno. La superficie obtenida a partir del HEC-RAS requirió de post procesamiento, ya que los resultados no se presentan directamente como una superficie de inundación, si no como niveles de agua alcanzados, a diferencia del MIKE que luego de la corrida una forma de presentación de los resultados es a través de la mancha de inundación.



Figura 8.- Superficies de inundación obtenidas con el HEC-RAS (violeta) y MIKE URBAN (roja) - TR 100

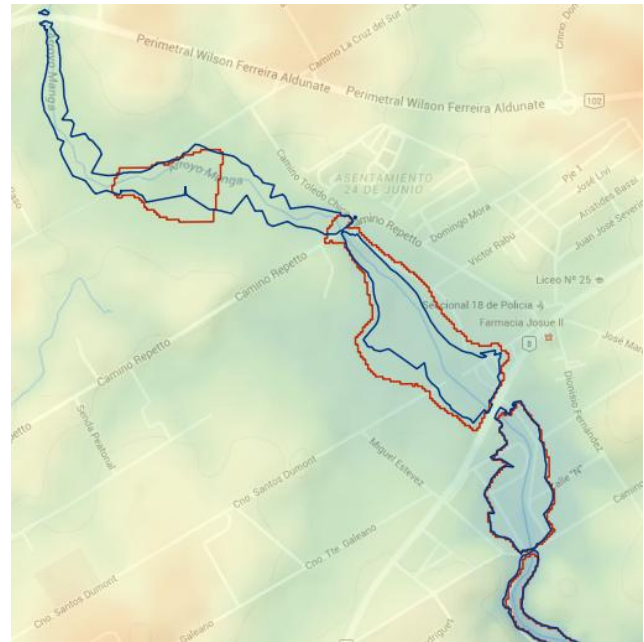


Figura 9.- Superficies de inundación obtenidas con el HEC-RAS (azul) y MIKE URBAN (naranja) - TR10

Como se puede observar, ambas superficies son muy similares y presentan el mismo comportamiento. Sin embargo, se observan mayores diferencias para la tormenta de Tr10 en comparación con los resultados para Tr100. Esto se debe a que el modelo digital del terreno (MDT) empleado en ambos modelos es diferente, ya que para el Mike Urban no se representa el cauce principal, si no que dicho cauce ya es considerado en el modelo 1D.

Ambos MDT fueron creados por separado, y aunque si bien se empleo la misma información, el MDT creado en primera instancia para el modelo en el HEC fue realizado con mayor grado de detalle, interviniendo y modificando el mismo en zonas donde se conocía que la representación obtenida no coincidía con la realidad. Además el software Mike Urban presenta gran sensibilidad frente a precisión del MDT, por lo tanto para tormentas con bajos períodos de retorno las diferencias entre los resultados son más notorias.

Por otro lado se presentan algunas ventajas y desventajas de cada uno de los modelos empleados

Ventajas

- MIKE URBAN:
 - Modelación 2D; un único modelo hidrológico-hidráulico; interfaz gráfica con ArcGIS embebida; gran potencialidad para extender estudios al Arroyo Carrasco y su bañado
- HEC-HMS/HEC-RAS:
 - Software de licencia libre; soporte a través de foros; gran nivel de aplicación a nivel mundial; de fácil manejo y familiarización

Desventajas

- MIKE URBAN:
 - Software bajo licencia; costo elevado; compleja familiarización
- HEC-HMS/HEC-RAS:
 - Modelación 1D; modelo hidrológico (HMS) separado del hidráulico (RAS), con lo cual requiere mayor nivel de trabajo; requiere de post procesamiento en GIS

		MIKE URBAN		
		Cno. Repetto	Ruta 8	Siete Cerros
Tr 100	Caudal (m ³ /s)	83.2	190.4	189.1
	Nivel (m)	11.1	9.2	7.8
Tr 10	Caudal (m ³ /s)	66.1	127.8	127.5
	Nivel (m)	10.4	8.7	7.16

Tabla 5.- Resultados para ciertos puntos a partir del Mike Urban

		HEC-RAS		
		Cno. Repetto	Ruta 8	Siete Cerros
Tr 100	Caudal (m ³ /s)	139.1	214.7	217.3
	Nivel (m)	10.5	9.1	8.9
Tr 10	Caudal (m ³ /s)	60.4	121.9	120.3
	Nivel (m)	9.6	8.4	7.0

Tabla 6.- Resultados para ciertos puntos a partir del HEC-RAS

Comparando el modelo implementado en el MIKE con el modelo en el HEC-RAS, se puede afirmar que se obtienen resultados similares en cuanto a los niveles obtenidos. Se observan caudales máximos del mismo orden en algunos puntos pero en otras zonas los valores presentan diferencias considerables. Es por esto que se debe continuar con el análisis del comportamiento del nuevo modelo implementado, así como también su calibración en la medida que se obtengan datos de eventos extremos.

CONCLUSIONES

Actualmente no se tienen mediciones de caudales o niveles para el arroyo, por lo cual es de gran importancia la información obtenida en relevamientos luego de los eventos. Si bien esta información no es tan precisa como si se tuvieran elementos de medición continua, fue fundamental ya que de otra forma no podría haber sido posible la calibración ni validación.

En primer lugar cabe destacar la importancia del MDT, que es la base del modelo 2D, y por lo tanto la información utilizada para crearlo refleja directamente la precisión de los resultados obtenidos. En particular, para la visualización de la superficie de inundación con el modelo HEC, se realizó un procesamiento posterior aplicando una herramienta SIG y un MDT, al cual se le incorporó información detallada, que implicó una mayor dedicación. Por el contrario, el MDT implementado en el MIKE todavía sigue en proceso de mejora, por lo cual es esperable que las superficies de inundación presenten diferencias.

En segundo lugar si bien también se identificaron diferencias en los niveles y caudales para las diferentes secciones del cauce, los resultados se mantienen en los mismos ordenes.

La implementación del modelo del arroyo Manga en Mike Urban sirvió como experiencia y proceso de aprendizaje que podrá ser replicada en próximos estudios. En particular, se prevé continuar analizando el Arroyo Carrasco, sus afluentes y los Bañados de Carrasco. Actualmente se está realizando el relevamiento de dicho arroyo y sus afluentes a través de un contrato con el BID y se estima que se tendrá el modelo en el correr del próximo año. El estudio del comportamiento en esta zona resulta de gran interés para la IdEM, y la utilización de esta herramienta es apropiada al tratarse de un software que incluye modelación bidimensional.