

Aplicación de un modelo hidrológico distribuido en una cuenca urbana.

Avances

Pablo Tomás Stehli^a, Juan Francisco Weber^a, Leandro Redin Vestena^b.

^a Laboratorio de Hidráulica – Dpto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba Universidad Tecnológica Nacional.

^b Laboratório de Hidrologia, Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava - Paraná – Brasil.

E-mail: pablo_stehli@hotmail.com – jweber@civil.frc.utn.edu.ar - lvestena@unicentro.br

RESUMEN: El trabajo consiste en la aplicación del modelo espacialmente distribuido TREX en una cuenca urbana. Para lo anterior, en primer lugar se realiza la modelación con TREX de una cuenca urbana teórica. Esta cuenca, también es modelada con el modelo semi-distribuido SWMM. A ambos modelos, se los ingresa con los mismos parámetros de infiltración, lluvia y rugosidad. Los resultados muestran que ambos modelos tienen respuestas similares, observándose una mayor facilidad y rapidez en la creación del modelo a simular con TREX.

Sin embargo, TREX no modela bocas de tormenta ni conducciones, las cuales son elementos hidráulicos comunes en cuencas urbanas. Por lo anterior, se procede a la modificación del código fuente de TREX para que el mismo modele las bocas de tormenta en sus distintos tipos. Para el modelado de las conducciones se establece un procedimiento de trabajo en conjunto entre TREX y SWMM.

Finalmente, con el objetivo de la modelación de la cuenca del Rio Cascavel, en el estado de Paraná, Brasil, se procede a realizar una modelación de prueba en un sector específico de esta cuenca con el fin de evaluar el funcionamiento de TREX previamente modificado y del procedimiento establecido. No se encontraron inconvenientes en el funcionamiento de TREX modificado y el procedimiento establecido se consideró correcto. De esta forma se han obtenido resultados espacialmente distribuidos en la cuenca con una gran rapidez y facilidad para generar el modelo. Resta automatizar el ingreso de los distintos elementos que forman el modelo SWMM.

INTRODUCCIÓN

El avance de las urbanizaciones en las cuencas es un problema cada vez más acentuado. La infraestructura instalada, muchas veces sin previsión o estudio previo, genera grandes cambios a los procesos hidrológicos que suceden en las mismas, a veces con consecuencias inesperadas para la población.

La modelación hidrológica de cuencas afectadas por urbanizaciones se vuelve cada vez más importante en la planificación, previsión de infraestructura, desarrollo de nuevos asentamientos y

localización de sectores críticos. Debido al desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los nuevos procesadores la modelación hidrológica distribuida se volvió más factible, incluso en ámbitos urbanos. Hay un apunte “clásico” en la modelación de cuencas urbanas, el cual presenta modelos donde la cuenca es dividida en distintas subcuencas con sus consiguientes características, el mayor exponente de este tipo de modelos es SWMM. Existen otros modelos distribuidos que dividen la cuenca en celdas, siendo totalmente distribuidos. A la vez, éstos pueden resolver las relaciones que los gobiernan celda a celda (CASC2D, TREX) o con las denominadas celdas geomorfológicas (modelo HIDRA).

En este trabajo se presentan los avances, con las técnicas y procedimientos realizados para aplicar el modelo hidrológico distribuido TREX en una cuenca fuertemente antropizada.

EL MODELO TREX

TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and eXport model) es un modelo bidimensional de escurrimiento, erosión y transporte de sedimentos y contaminantes (England et al, 2007; Velleux et al, 2008). Está basado en el modelo de cuencas CASC2D. Los procesos hidrológicos simulados son: precipitación, intercepción, infiltración y pérdidas por transmisión en el cauce, almacenamiento, flujo superficial y en canales y derretimiento de nieve.

Este modelo utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces, y a partir del balance, el flujo superficial. Este flujo está gobernado por las leyes de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento. TREX utiliza la aproximación de la onda difusiva unidimensional en cauces y bidimensional en la superficie de la cuenca, suponiendo que el flujo es turbulento y que la resistencia al flujo se puede describir utilizando la formulación de Manning (Stehli et al., 2012).

Para simular el proceso hidrológico, TREX plantea una solución numérica explícita de las ecuaciones de balance de masa mediante la segmentación de la cuenca en elementos cuadrados iguales, a los cuales se le asignan los parámetros relativos a las características de infiltración del suelo y coeficientes de rugosidad. Este modelo es de código libre, está escrito en el lenguaje de programación C y está disponible en la página web de la Universidad Estatal de Colorado, tiene una fuerte base física en la conceptualización de los procesos superficiales, pero no considera los procesos subsuperficiales y subterráneos (Jorquera et al., 2012).

A continuación, se describen resumidamente los procesos hidrológicos incluidos en el modelo TREX (Velleux et al., 2008).

El volumen bruto de precipitación (V_g) que llega a la superficie en función del tiempo, es igual a la intensidad de precipitación bruta (i_g) por el área de la región donde ocurre la precipitación (A_s). El volumen neto (V_n) resulta de descontarle al bruto el volumen interceptado (V_i). El balance se explicita en la ecuación (1).

$$\frac{\delta V_g}{\delta t} = i_g \cdot A_s \rightarrow V_n = V_g - V_i \quad (1)$$

Según el volumen interceptado sea mayor o menor al volumen bruto, habrá o no volumen neto de agua sobre la superficie de la cuenca. El volumen de precipitación neta también se puede expresar (2) como una tasa de precipitación neta (efectiva):

$$i_n = \frac{1}{A_s} \frac{\delta V_n}{\delta t} \quad (2)$$

Para definir la infiltración de agua en la superficie de la cuenca como así también en los cauces que la forman, el modelo TREX utiliza las relaciones de Green y Ampt (1911, citado por Chow et al., 1994).

$$f = K_h \cdot \left(1 + \frac{\psi(1-S_e)\theta_e}{F} \right) \quad (3)$$

donde K_h es la conductividad hidráulica, ψ es la altura de succión del frente de saturación (altura de succión capilar), S_e es el porcentaje de saturación efectiva del suelo, θ_e la porosidad efectiva del suelo, f la tasa de infiltración y F la altura de infiltración acumulada, vinculadas a través de:

$$f = \frac{dF(t)}{dt} \quad (4)$$

lo cual da lugar a una relación no lineal resuelta a través de un método iterativo (Chow et al., 1994).

La fracción de precipitación no retenida ni infiltrada genera un flujo superficial, tanto mantiforme (bidimensional) como en canales (unidimensional). El flujo superficial puede ocurrir cuando la profundidad del agua en el plano terrestre supera el umbral de almacenamiento de la depresión. Las ecuaciones de continuidad para el flujo en dos dimensiones gradualmente variado, sobre un plano rectangular en coordenadas (x , y) son:

$$\frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} = i_n - f + W = i_e \quad (5)$$

donde h es la altura de flujo superficial, W es un término fuente/sumidero (descarga/aporte unitario puntual), i_n es la intensidad de precipitación neta, obtenida a partir de (1), i_e es la intensidad de precipitación en exceso, y q_x , q_y son los caudales por unidad de ancho en la dirección x o y .

Suponiendo que el flujo es turbulento, la resistencia se puede describir utilizando la formulación de Manning (Chow et al. 1994) tanto para los flujos bidimensionales como unidimensionales. La ecuación (5) es discretizada en el espacio por el método de diferencias finitas, mientras que para la integración temporal se utiliza el método de Euler.

VALIDACIÓN DEL MODELO TREX PARA APLICARLO EN UNA CUENCA URBANA

Existen en la bibliografía escasos antecedentes de aplicación de un modelo hidrológico totalmente distribuido en una cuenca urbana, entre ellos se pueden citar las aplicaciones con el modelo Multi-Hydro (Giangola-Murzyn, 2013) el cual aún se encuentra en desarrollo. Por ello, se realizó la aplicación del modelo TREX y del modelo SWMM en un mismo ejemplo teórico.

Este ejemplo consiste en una pequeña cuenca urbana, la que está basada en un proyecto de sistematización de escurrimientos superficiales urbanos de un barrio real. Del trabajo mencionado, se tomaron como referencias las cotas de proyectos de los cordones cunetas, los puntos bajos donde se colocarían las bocas de tormenta y las áreas impermeables de la zona (viviendas, calles, etc.). De lo anterior, se estableció una cuenca de 0,145 km², compuesta de 13 manzanas regulares de 90 m x 90 m, 2 manzanas irregulares y calles de 10 m de ancho. La cuenca cuenta con 3 puntos de descarga.

En el modelo TREX se utilizaron los puntos de nivel del proyecto para elaborar el Modelo Digital de Elevación (MDE). A éste, se le realizó una sobreelevación de 15 cm a las manzanas para tener en cuenta el desnivel con respecto a las calles y una sobreelevación de 2 metros a los sectores correspondientes de viviendas. Con ayudas de imágenes satelitales se realizaron los mapas de tipo de suelo y uso de suelo. Se utilizó el modelo con 3 puntos de descarga (outlets) que se encuentran dentro del dominio. La resolución de la modelación fue de celdas de 5 metros de ancho.

En el modelo SWMM se delimitaron 104 subcuencas, a las cuales se definieron parámetros tales como: ancho, área, pendiente, punto de descarga, área permeable, flujo entre áreas, parámetros de infiltración y rugosidad. Se definieron también los 3 puntos de descarga (Figura 1).

En TREX, como se mencionó anteriormente, el modelo de infiltración utilizado es el de Green y Ampt, por lo que en SWMM se utilizó el mismo modelo, con parámetros similares. De la misma forma se utilizaron parámetros similares en las variables que comparten ambos modelos, como rugosidad de la cuenca (n de Manning) e intercepción vegetal y/o almacenamiento.

Es importante destacar, teniendo la misma base de datos, la rapidez y facilidad con que se elaboran los datos de ingreso para el modelo TREX en comparación con el modelo SWMM. Adicionalmente,

SWMM presenta la dificultad de establecer las relaciones hidrológicas entre las áreas permeables e impermeables. En cambio, en TREX esto no se debe establecer y el proceso se realiza automáticamente dependiendo del MDE. El porcentaje de área impermeable en SWMM de cada subcuenca se calculó con ayuda del GIS GRASS y se consideró que las áreas permeables e impermeables de las mismas descargan de manera independiente al punto de volcamiento (opción: outlet).

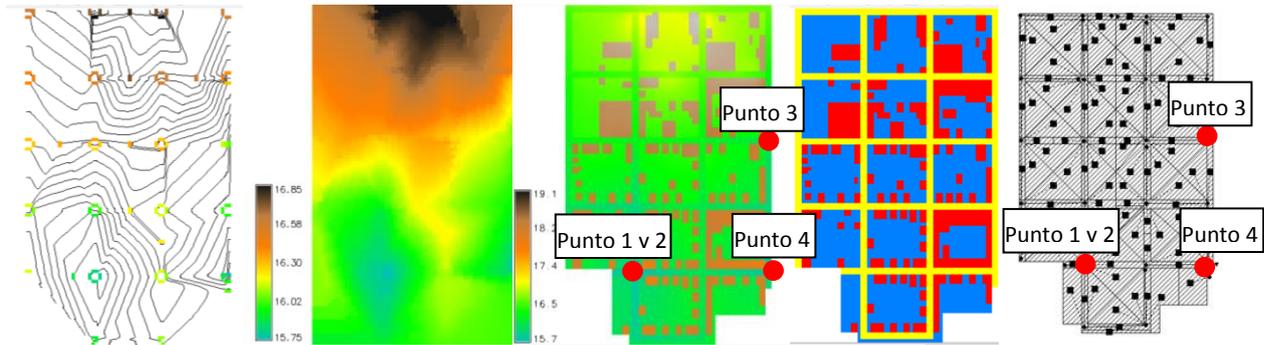


Figura 1.- De izquierda a derecha: Mapa de curvas de nivel (auxiliar), 2° MDE, 3° MDE con elevación de techos y sobre elevación de manzanas. 4° mapa de tipo de suelo. Por último modelo en SWMM.

En SWMM las calles fueron modeladas como subcuencas considerándose totalmente impermeables. Tanto éstas, como las correspondientes al amanzanamiento, descargan a un único conducto de sección triangular (que simula el par de cunetas paralelas al tramo de la calle) y éstos a su vez descargan a bocas de tormenta. En TREX se modela la cuenca completa con la opción de sólo simular celdas, es decir, sin simular canales.

Luego de realizar los modelos, a ambos se les aplicó la misma lluvia hipotética. Ésta, fue una lluvia uniforme en toda la cuenca con una duración de 10 horas y una intensidad constante de 25 mm/hora.

Al comparar los resultados de ambas modelaciones se encontró una correlación adecuada entre lo modelado con TREX y lo modelado con SWMM (Figura 2). Se observa que este ajuste depende principalmente de las relaciones de áreas impermeables que se definen en SWMM.

APLICACIÓN DEL MODELO TREX EN UNA CUENCA FUERTEMENTE ANTROPIZADA

El objetivo final del trabajo, es aplicar el modelo hidrológico distribuido TREX a la cuenca del Río Cascavel, situado en el municipio de Guarapuava, del estado de Paraná, Brasil (Figura 3). El río Cascavel es tributario del Río Jordão, el cual desagua en el Río Iguazú, afluente del Río Paraná (Gomes, 2014).

La cuenca del Río Cascavel, tiene un área aproximada de 81,03 km² y una pendiente media del 6,4 %. Su río principal recorre un trecho de cerca de 26,27 km. De su área total (55,68 km²), el 68,6 % se encuentra en el perímetro urbano oficial de Guarapuava. A su vez, el 81,77 % del perímetro urbano de Guarapuava se asienta sobre la cuenca del Río Cascavel.

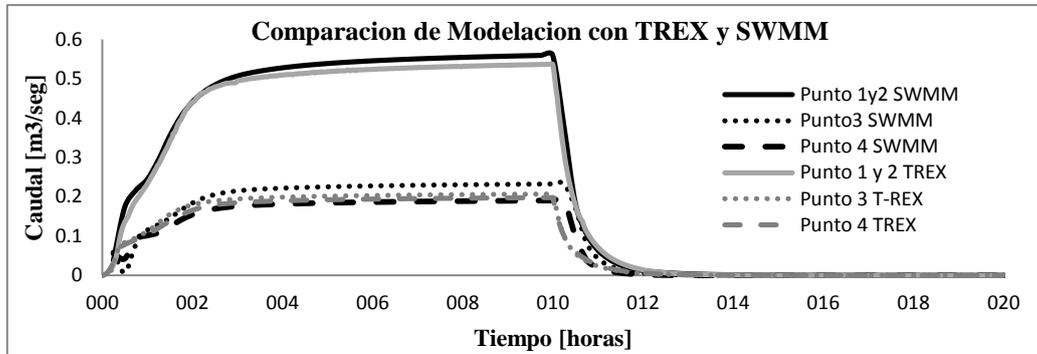


Figura 2.- Comparación de hidrogramas de respuestas para el mismo ejemplo obtenidos con TRES y SWMM.

Según censos de IBGE citados en Gomes (2014) Guarapuava en 1960 contaba con una población de 96.947 habitantes, de éstas, 80.585 personas (83,12 %) residían en la zona rural y solo 16.362 habitantes (16,88 %) en la ciudad. En cambio, en 2010 la población urbana trepó a 153.098 habitantes, que representa el 91,42 % de la población total del municipio. Esto significó un aumento de la superficie ocupada por la población urbana: de 7,89 km² en 1960 a 64,76 km² en 2011, produciéndose un aumento de un 820,8 % en la superficie urbanizada en un período de 51 años.

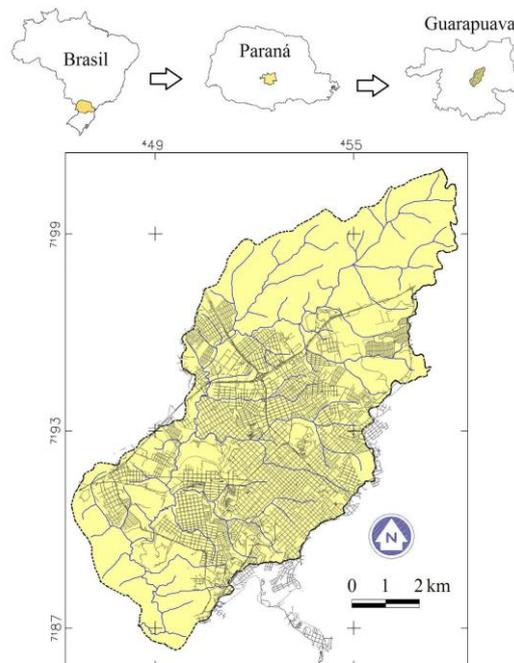


Figura 3.- Ubicación de la cuenca del Río Cascavel (Gomes, 2014).

Lo anterior, provocó múltiples asentamientos en lugares inadecuados, con sus consecuencias ante eventos climáticos, las cuales se buscan visualizar y analizar con la aplicación de un modelo espacialmente distribuido de eventos, en este caso TREX.

APLICACIÓN DE TREX

En primer lugar, se realizó la preparación de los mapas de ingreso para la cuenca del Rio Cascavel. En este paso, se encontró con el inconveniente de la existencia de bocas de tormenta en el radio urbano de Guarapuava; en primer lugar no existe documentación para identificar la ubicación y cantidad de bocas de tormenta y tampoco se puede conocer las conducciones cerradas donde se conducen los desagües urbanos. El otro inconveniente, surge del modelo TREX, el cual no modela las bocas de tormenta ni las conducciones cerradas.

Para resolver el primer problema, se realizó un recorrido virtual de la ciudad con ayuda de la herramienta Street View de Google Earth para identificar las bocas de tormenta, las cuales fueron verificadas por mediciones in situ con GPS. Lo encontrado, refleja una gran cantidad de bocas de tormenta, unas 1600 bocas de tormenta en aproximadamente el 50 % del área de la cuenca (Figura 4).

Para hacer frente al inconveniente de que TREX no modela las bocas de tormenta, se tuvo que desarrollar un procedimiento y herramientas complementarias para poder aplicar TREX a dicha cuenca.



Figura 4.- Izquierda: vista de una zona de la ciudad de Guarapuava en Street View. A la derecha identificación de las bocas de tormenta (en amarillo las ubicadas con Street View, en verde las ubicadas con GPS).

Por lo anterior, en primer lugar, se modificó el código fuente de TREX para que el mismo simule las bocas de tormenta. Las modificaciones fueron realizadas de forma tal que el programa presente siete opciones de modelación de outlets: outlets clásico de TREX, bocas de tormenta a cordón abierto en punto intermedio y en punto bajo, boca de tormenta horizontal en punto intermedio y punto bajo y boca de tormenta combinada en punto intermedio y punto bajo. A cada una de estas

bocas de tormenta se les puede indicar las características básicas que gobiernan las ecuaciones de las mismas.

En las bocas de tormenta a cordón abierto en un punto intermedio se estableció la ecuación de Guo (1997, presentada en Riccardi 2004) en la cual en primer lugar se calcula la longitud teórica de la boca de tormenta L_t en función del caudal total Q_0 la pendiente longitudinal S_l , el coeficiente de rugosidad de Manning n de la calle y la pendiente transversal S_t . Luego el caudal insumido Q_i en la boca de tormenta depende de la relación de la longitud teórica de la boca de tormenta y la real L_c .

$$L_t = 0,817 Q_0^{0.42} S_l^{0.30} \left(\frac{1}{\eta S_t} \right)^{0.5} \quad (6)$$

$$Q_i = Q_0 \left[1 - \left(\frac{L_c}{L_t} \right)^{1.8} \right] \quad (7)$$

En las bocas de tormenta a cordón abierto en punto bajo se utilizó la ecuación de Bertoni (1995, presentada en Riccardi 2004) la cual diferencia entre el funcionamiento como orificio o vertedero según la relación del tirante de agua con respecto a la abertura de la boca. Estas relaciones están en función de la longitud de la boca de tormenta L_c , el tirante de agua y_0 y la altura de boca de tormenta h . En las ecuaciones 8 y 9 se encuentran estas relaciones.

$$Q_i = 1,656 L_c y_0^{1.5} \quad (y_0 \leq 1.5 h) \quad (8)$$

$$Q_i = 0,67 L_c h [2 g (y_0 - h/2)]^{1/2} \quad (y_0 > 1.5 h) \quad (9)$$

Para aquellas bocas de tormenta horizontales que se encuentran en puntos bajos se estableció la relación de Neenah (1977, presentada en Riccardi 2004), la cual relaciona el tirante de agua y_0 , con un coeficiente adimensional K que depende de la pendiente transversal y la pendiente longitudinal. Para el caso, se fijó una pendiente transversal de 2,5 % de forma tal que el coeficiente K dependerá solamente de la pendiente longitudinal de la calle. La ecuación 10 muestra la relación de Neenah y la Figura 6 la relación obtenida para el coeficiente K , para una rejilla de un ancho de 0,45 m y un largo de 0,90 m. Tanto la ecuación 10 como la relación obtenida del K fueron ingresadas al código fuente de TREX.

$$Q_i = 0,205 K y_0^{5/3} \quad (10)$$

Para las bocas de tormenta horizontales situadas en puntos bajos se utilizó la relación de Guo (1997, descripta en Riccardi, 2004). En las relaciones descriptas se establecen nuevas variables; A_u es el área útil de la abertura horizontal y P_R es el perímetro vertedero de la reja. En las ecuaciones 11 y

12 se encuentran las relaciones dependiendo si la reja trabaja hidráulicamente como vertedero o como orificio.

$$Q_i = 1,656 y_0^{1.5} P_R \quad (y_0 \leq 1.792(A_u/P_R)) \quad (11)$$

$$Q_i = 2,91 y_0^{0.5} A_u \quad (y_0 > 1.792(A_u/P_R)) \quad (12)$$

Finalmente, también se ingresaron las relaciones para las bocas de tormenta combinadas. Para este tipo de bocas de tormenta, se utilizaron las mismas ecuaciones anteriormente descritas incorporando el procedimiento adecuado para el cálculo de las mismas: las que se encuentran en un punto intermedio se calcula en primer lugar el caudal interceptado por la rejilla, con el caudal excedente se calcula la longitud teórica de la boca de cordón abierto, luego la eficiencia de esta boca de tormenta y finalmente el caudal total insumido en la boca de tormenta mixta será la suma del caudal insumido por la rejilla más el caudal insumido por la boca de tormenta abierta. Para el caso de que esté ubicada en punto bajo se calcula el caudal insumido por los dos tipos de elementos (horizontal y vertical) de forma independiente y luego el caudal total es la suma de los dos caudales.

Para ingresar las relaciones anteriores en TREX se modificó la rutina de infiltración. De esta forma, se procedió con una estrategia similar a la realizada en el modelo Multi-Hydro. Pero, en este caso, las bocas de tormenta se diferencian según el tipo de suelo existiendo tres tipos preestablecidos: tipo de suelo 1, son bocas de tormenta verticales, tipo de suelo 2, bocas de tormenta horizontal y tipo de suelo 3, bocas de tormenta combinada. Por lo tanto la modificación realizada se diferencia del modelo Multi-Hydro, ya que en el último no se pueden distinguir entre los distintos tipos de boca de tormenta. Así mismo, vale aclarar que Multi-Hydro es un modelo que combina el modelo TREX y SWMM, por lo tanto, produce una serie de iteraciones para calcular el flujo que puede surgir ascendentemente desde un conducto. En nuestro procedimiento no se tiene en cuenta este efecto.

El procedimiento para ingresar las bocas de tormentas al modelo TREX modificado es el siguiente: se utiliza el mapa de tipo de suelo de TREX, donde en este caso se reservan los primeros 3 tipos de suelo para indicar las bocas de tormenta. En el archivo input, donde para modelar con el TREX original es necesario indicar 3 variables para definir las características de infiltración del suelo según el modelo de Green & Ampt (conductividad hidráulica, altura de succión y déficit de humedad), en nuestro caso para los 3 primeros tipos de suelo se indican las características de las bocas de tormenta; por ejemplo para una boca de tormenta vertical (tipo de suelo 1) en el lugar para indicar la conductividad hidráulica se ingresará la longitud de la boca de tormenta. De esta forma, si es necesario para la ecuación podemos ingresar tres características básicas de las bocas de tormenta.

Finalmente, la modificación realizada aprovecha las ventajas del modelo distribuido TREX, el cual no solo da como resultado los caudales en la salida de la cuenca sino que produce una serie de mapas a lo largo de la simulación. De estos mapas, se aprovecha el mapa de velocidad de infiltración y, con un pequeño software realizado para este caso, se obtienen los caudales a lo largo de la modelación insumidos por cada boca de tormenta.

Las modificaciones realizadas fueron probadas y verificadas con ejemplos teóricos encontrados en distintos libros especializados en la temática (Mays, 2001). Por ejemplo una de las verificaciones se observa en la Figura 5, correspondiente al ejemplo 5.8 del recientemente citado libro, en donde se modela una boca de tormenta abierta de 3,5 m de longitud, que se ubica en una calle con una pendiente longitudinal de 0,03 m/m con un caudal escurrido 0,08 m³/s y según el cálculo teórico el caudal insumido por la boca de tormenta es de 0,041 m³/s. En TREX modificado se obtuvo similar resultado.

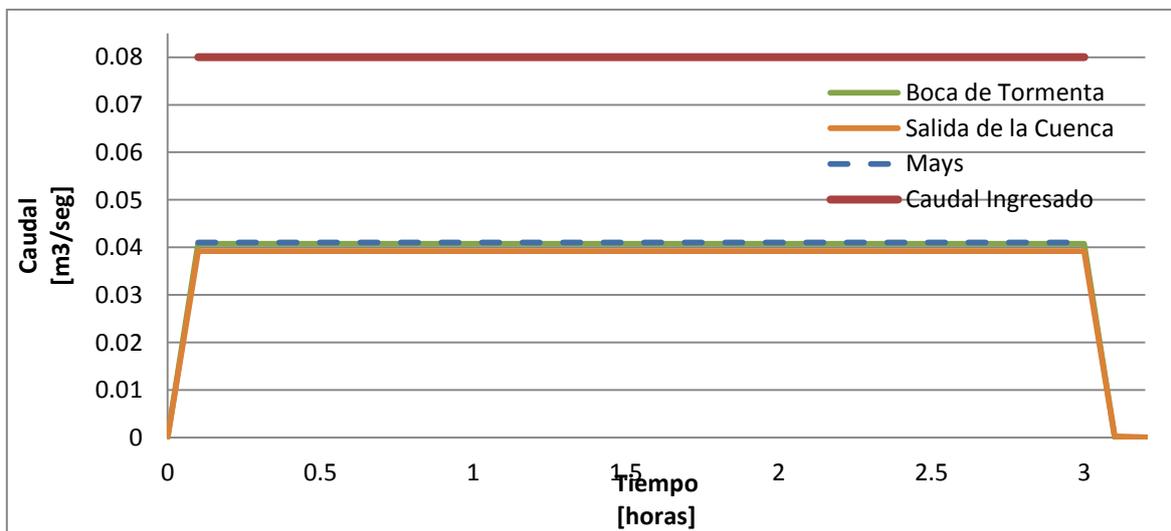


Figura 5.- Verificación de ecuaciones ingresadas en TREX con ejemplos teóricos. Se observa que es coincidente el caudal insumido por la boca de tormenta calculado por TREX y el que surge del cálculo teórico.

Luego de realizar y corroborar las modificaciones del software TREX se procedió a establecer un procedimiento para la modelación del sector urbano teniendo en cuenta que se modelarán los conductos cerrados con SWMM. El procedimiento fijado fue el siguiente: primero se modelará la cuenca con el modelo TREX teniendo en cuenta sólo el escurrimiento superficial en dos direcciones (sin canales) pero considerando todas las bocas de tormenta existentes. El ingreso de este modelo serán las lluvias históricas de la cuenca de Cascavel y se considerarán solamente las salidas producidas en cada boca de tormenta. Los cauces se modelarán teniendo en TREX como celdas de gran permeabilidad, es decir celdas en las que el caudal que llegará se infiltrará por completo. Luego se modelarán en SWMM los conductos en forma de malla cerrada, ya que se desconoce la

ubicación concreta de las conducciones. En SWMM también se modelarán los cauces. El ingreso de este modelo serán los caudales insumidos de cada boca de tormenta, como también el caudal “infiltrado” en cada celda ubicada en los cauces; datos obtenidos a través de la primera modelación realizada en TREX. Luego de este paso se calibrarán los parámetros volviendo a realizar el mismo procedimiento hasta que el ajuste entre los caudales medidos y los simulados sean aceptables.

Para realizar lo anterior, se realizaron programas ad-hoc para elaborar los archivos “input” de TREX y SWMM. Se realizó la extracción automática de los caudales de las celdas bocas de tormenta y cauces de TREX y la consecuente información de ingreso de SWMM.

Como primera aplicación del procedimiento antes descrito se presenta la modelación de un sector de la cuenca del Río Cascavel.

Se confeccionó el MDE, el mapa de uso de suelo y tipo de suelo de toda la cuenca (Figura 6). El MDE fue realizado con la ayuda de curvas de nivel establecidas con mediciones y relevamientos realizados en el lugar. El mapa de uso de suelo fue obtenido del trabajo realizado por Gomes (2014), quien clasifica el uso del suelo en vegetación arbórea/arbustiva, vegetación rastrera/cultivo, suelo expuesto/desnudo, áreas húmedas y áreas construidas. El mapa de tipo de suelo muestra que en la cuenca del Rio Cascavel existen tres tipos según la clasificación de EMBRAPA: *Neossolos*, *Latossolos Brunos* y *Organossolos* siendo la mayor parte de la cuenca cubierta por el *Latossolos* (Bhering & Santos, 2008).

El MDE fue modificado teniendo en cuenta las pruebas realizadas anteriormente con TREX en la cuenca urbana teórica; con la ayuda de la clasificación de las imágenes satelitales se establecieron los sectores construidos, en estos sectores el MDE se elevó 2 metros para simular el efecto de los techos. Luego con ayuda del mapa proveniente de Catastro se bajó el sector de calles (calzada y veredas) 0,15 metros para simular el efecto de que la calle se encuentra en una cota inferior que las manzanas.

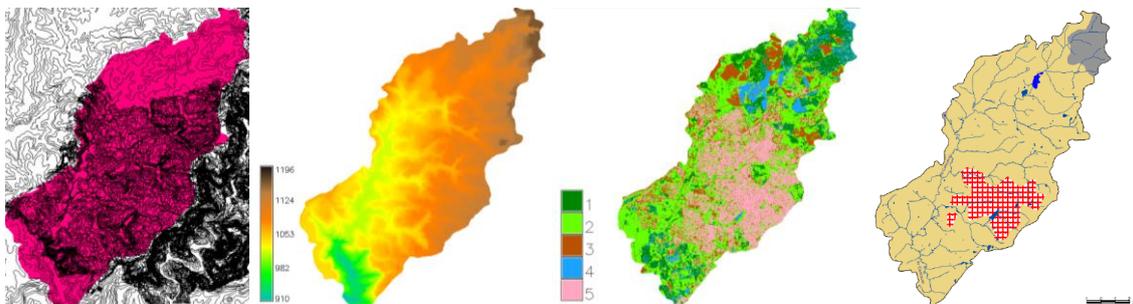


Figura 6.- Mapas de ingreso para la modelación de la cuenca de Cascavel en TREX. De izquierda a derecha: curvas de nivel de la cuenca utilizado para producir MDE, MDE, mapa de uso de suelo y mapa de tipo de suelo.

Luego, se focalizó en la modelación de un sector de la cuenca. Para ello se delimitó una subcuenca dentro de la cuenca de Cascavel con la ayuda de GRASS GIS. Con ayuda de GRASS también se localizaron las bocas de tormenta en este sector y la elevación de las mismas.

Una vez realizado lo anterior, se realizó la modelación hidrológica en TREX del sector de la cuenca con una lluvia teórica de 50 mm/h por 2 horas, con el objetivo de probar y mejorar el procedimiento fijado. La cuenca modelada tiene un área de 0,312 km², compuesta de 12476 celdas activas de 5 m x 5 m. Dentro de dicha cuenca existen 77 bocas de tormenta de las cuales existen de los distintos tipos anteriormente mencionados. Se realizó también para comparar la modelación de la misma cuenca en TREX pero sin modelar las bocas de tormenta.

Luego, se procedió a realizar el modelo en SWMM colocando las 77 bocas de tormenta con sus respectivos caudales. Las conducciones se tomaron de 0,8 m de diámetro, circulares. La dirección de las conducciones se estableció semi-automáticamente con ayuda del mapa de amanzanamiento y el modelo digital de elevación (Figura 7).

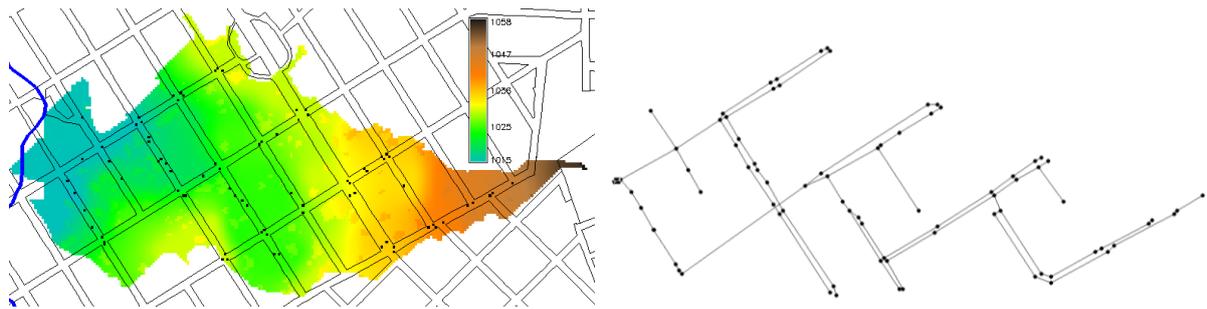


Figura 7.- Izquierda: visualización del MDE del sector a modelar. Las celdas negras corresponden a las bocas de tormenta. Derecha: modelo utilizado en SWMM.

La aplicación del modelo de prueba en TREX y SWMM no ha tenido mayores dificultades. Se observa como al incluir las bocas de tormenta el caudal pico de crecida del hidrograma se anticipa con respecto a la cuenca sin desagüe pluvial (Figura 8). También gracias al modelo espacialmente distribuido TREX se puede visualizar y analizar los resultados en la extensión de la cuenca (Figura 9).

CONCLUSIÓN

Se aplicó el modelo hidrológico TREX en un ejemplo sencillo de una cuenca urbana con buenos resultados. Éstos fueron comparados con los obtenidos para el mismo ejemplo con el modelo hidrológico SWMM y se observaron resultados similares con ambos modelos.

Se modificó el código fuente de TREX para que el mismo tenga la capacidad de modelar bocas de tormenta. Se incorporó en el código fuente las opciones para que el usuario pueda simular el efecto de bocas de tormenta del tipo vertical, horizontal o mixta. Se verificaron dichas modificaciones aplicando TREX a ejemplos teóricos presentes en bibliografía especializada. Posteriormente, se estableció un procedimiento en conjunto con los modelos TREX y SWMM para modelar de forma completa una cuenca urbana. Finalmente, se aplicó el modelo TREX modificado y el procedimiento propuesto combinando TREX con el modelo SWMM a un sector urbano de la cuenca del Río Cascavel. No se encontraron mayores dificultades en el funcionamiento de TREX ni en el funcionamiento de SWMM. El procedimiento propuesto se consideró correcto.

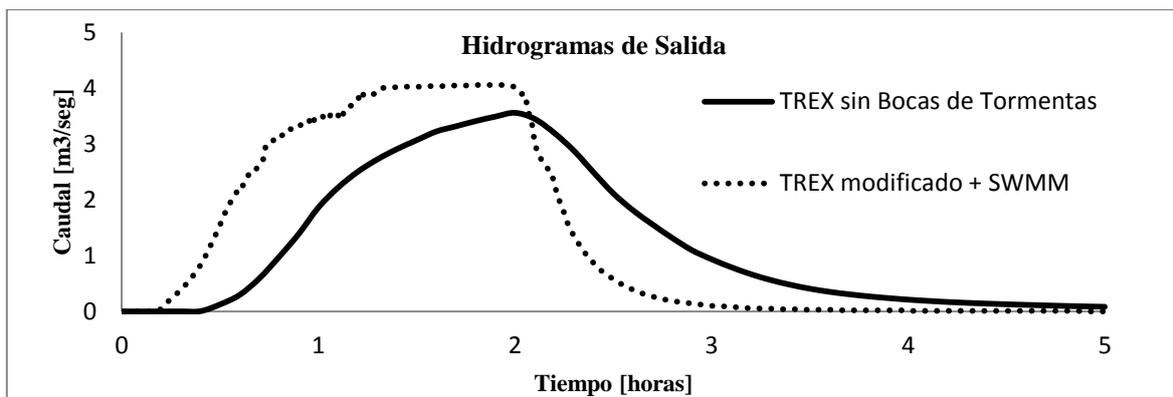


Figura 8.- Hidrogramas de salida de modelaciones realizadas.

Como trabajo futuros queda el de automatizar completamente el ingreso de datos tanto en SWMM luego de la corrida de TREX modificado.

Es de hacer notar que con el modelo TREX se pueden obtener resultados espacialmente distribuidos, los cuales poseen una cierta imprecisión que dependerá de la resolución elegida, pero con una gran rapidez y facilidad para generar el modelo si se cuentan con los datos de ingresos necesarios.

Por último, se modelará de forma completa la cuenca del Río Cascavel aplicando la metodología propuesta, calibrando los parámetros de los modelos ya que se contrastará los resultados obtenidos con eventos históricos observados en la cuenca.

Agradecimientos. Los autores del presente trabajo quieren manifestar su agradecimiento al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) de Brasil por el apoyo económico, como así también a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional (Argentina).

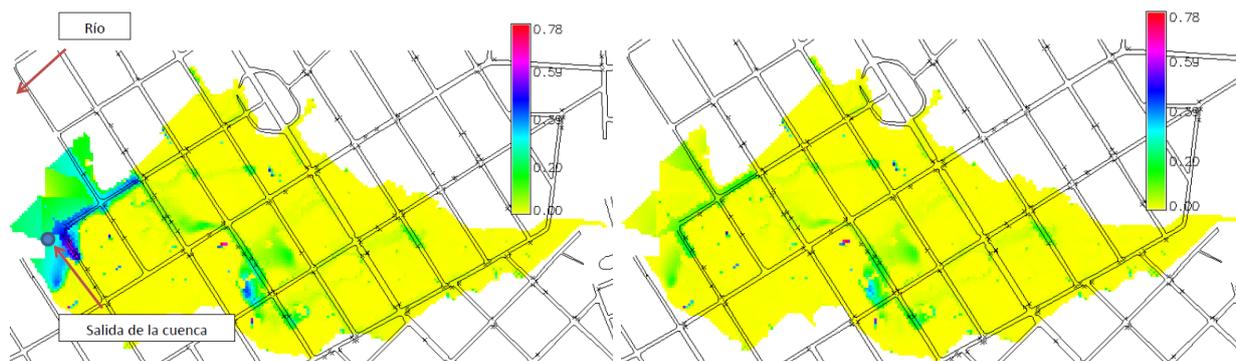


Figura 9.- Izquierda: Altura de escurrimiento [m] de la cuenca sin bocas de tormenta. Derecha: Altura de escurrimiento en la cuenca con la modelación de las boca de tormenta. Tiempo: 1,5 horas inicio de lluvia.

REFERENCIAS

Bhering, S.B. & Santos, H.G. (2008). Mapa de solos do estado do Paraná: legenda atualizada. Rio de Janeiro: Embrapa Florestas, Embrapa Solos, Instituto Agrônômico do Paraná, 74 p

Chow V.T., Maidment R., y Mays L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Mc Graw-Hill.

England, J., Velleux, M., Julien, P. (2007). “Two-dimensional simulations of extreme floods on a large watershed”. *Journal of Hydrology*, 347(1):229-241.

Giangola-Murzyn, (2013). “Modelación y parametrización hidrológica de la ciudad, resistencia a inundaciones”. Tesis de Doctorado. Université Paris-Est.

Gomes, E. de S. (2014). “A dinâmica hidrológica fluvial em bacias hidrográficas com diferentes taxas de impermeabilização do solo em Guarapuava/PR”. Dissertação como requisito de Mestre em Geografia, UNICENTRO, Guarapuava, Parana.

Jorquera E., Weber J.F., y Reyna S.M. (2012) “Revisión del estado del arte en la modelación hidrológica distribuida e integrada”. Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As.

Mays, W. M. (2001). *Stormwater Collection Systems Design Handbook*. Mc Graw-Hill.

Riccardi, G., (2004). *Hidrología en medios antropizados*. Libro electrónico. CURIHAM, FCEIA-UNR. <http://cvirtual.fceia.unr.edu.ar>.

Stehli P.T., Weber J.F., y Jorquera E. (2012) “Implementación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido de simulación de eventos”. Primer Encuentro de investigadores en formación en Recursos Hídricos. Ezeiza, Bs. As.

Velleux, M., England, J., Julien P. (2008). “TREX: Spatially Distributed Model to Assess Watershed Contaminant Transport and Fate”. *Science of the Total Environment*, 404(1):113-128.