

# Revisión del estado del arte y estrategias en la modelación hidrológica distribuida en cuencas urbanas.

*Pablo Tomás Stehli<sup>a</sup>, Juan Francisco Weber<sup>a</sup>, Leandro Redin Vestena<sup>b</sup>.*

<sup>a</sup> Laboratorio de Hidráulica – Dpto. de Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba Universidad Tecnológica Nacional.

<sup>b</sup> 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 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 hidrológicas 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 aun así en ámbitos urbanos. Desde el punto de vista de la discretización espacial estos modelos pueden clasificarse fundamentalmente en modelos de celdas o de planos. Los modelos hidrológicos que dividen la cuenca en planos (SWMM, MIKE, etc.) son los más utilizados para el ámbito urbano. Sin embargo, por lo mencionado anteriormente con respecto a la aplicación de nuevas tecnologías a la hidrología, sumados la información satelital y de datos LiDAR se está empezando a analizar utilizar modelos hidrológicos distribuidos de celdas en el ámbito urbano.

El trabajo revisa las estrategias y aplicaciones que se presentan al aplicar un modelo hidrológico distribuido de celdas al ámbito urbano, como así también sus ventajas y problemas.

## INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrológico, busca representar los procesos involucrados en la transformación lluvia-escorrentía y la generación de caudales en una determinada cuenca. La modelación hidrológica comienza a principios del siglo XIX utilizándose para el diseño de obras hidráulicas y hasta mediados del siglo XX se limitó a expresiones matemáticas simples para representar mecanismos individuales involucrados en los procesos del ciclo hidrológico. En la década de los 60, con el advenimiento de la revolución digital, se realizó el primer intento por representar casi en su totalidad al ciclo hidrológico en una cuenca. Surge así el Stanford Watershed Model-

SWM de Crawford y Linsley en 1966 (Singh, 1995). Sin embargo, las computadoras disponibles eran caras y muy lentas respecto a los estándares actuales, por lo tanto los programas eran limitados en tamaño y complejidad (Beven, 2001). Como consecuencia, la modelación hidrológica fue planteada principalmente en forma agregada (Vieux, 2004). La aparición de computadoras más potentes, la mayor disponibilidad de datos distribuidos arealmente provenientes de sensores remotos y las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han permitido el desarrollo de este campo.

La hidrología urbana tiene un tratamiento especial, por sus diferencias con la hidrología rural. De este modo hay también diferentes estrategias en la modelación de estos ambientes y por lo tanto, se han generado modelos exclusivos para este tipo de modelaciones y también se han adaptado modelos concebidos para la hidrología rural al ámbito urbano.

La importancia de concebir modelos y estrategias de modelación específicas para este ámbito, reside en que las cuencas son cada vez más afectadas por los componentes urbanos, modificando escurrimiento en magnitud y dirección principalmente, generando a su vez que el tiempo en que se producen los escurrimientos máximos sean menores a los naturales. Lo último se observa principalmente, al ocurrir tormentas de variada intensidad que ocasionan inundaciones y anegamientos en sectores urbanos provocando pérdidas materiales y ocasionalmente humanas.

Se observa que en los modelos hidrológicos distribuidos aplicables en cuencas urbanas los mayores desafíos se presentan en la modelación de las áreas impermeables - permeables, red de drenaje, sectores de almacenamiento lagunas de retención, modelación de escurrimiento en calles, etc. En muchos casos los modelos son utilizados para diseñar, verificar o corregir elementos del sistema de drenaje, terraplenes, etc. Con la necesidad de aplicar las “buenas prácticas” en la gestión de cuencas urbanas como ser: techos verdes, hormigones porosos, lagunas de retención, cuencos de detención, etc. es necesario que los modelos hidrológicos cuenten con la flexibilidad necesaria para poder aplicar y evaluar la posible utilización de las mismas. Como así también el efecto de nuevos loteos, edificios, carreteras, etc.

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. De la misma forma podemos identificar al HEC-HMS (aunque más orientado a cuencas rurales), el modelo BELMUS y el MOUSE-MIKE (con sus distintos módulos). Cada subcuenca genera un escurrimiento que se convierte en el ingreso a la red de drenaje (canales abiertos o conducciones a presión) o puede que el modelo permita que el escurrimiento ingrese a una nueva subcuenca (caso de SWMM).

Existen otros modelos distribuidos que dividen la cuenca en celdas. A la vez se existen los modelos que resuelven las ecuaciones celda a celda (CASC2D, TREX) o con las denominadas celdas geomorfológicas (modelo HIDRA).

A continuación se presenta una breve síntesis de los modelos hidrológicos distribuidos de eventos aplicables a las zonas urbanas.

### *SWMM*

El programa SWMM (Storm Water Management Model) fue elaborado por la USEPA (U.S. Environmental Protection Agency). Este modelo ha sido especialmente desarrollado para la simulación de sistemas de desagües pluviales y cloacales en forma combinada o separada (EPA, 2005).

Este modelo permite interpretar el comportamiento hidrológico de las cuencas de aportes y la respuesta hidrodinámica del sistema de desagüe. Esta es la principal diferencia respecto de los modelos hidrológicos – hidráulicos estándares, los cuales no consideran las perturbaciones de aguas abajo hacia aguas arriba.

SWMM utiliza para el tránsito de los hidrogramas métodos hidrológicos e hidráulicos, estos últimos consideran las ecuaciones de Saint-Venant en su forma completa. La posibilidad de modelar el tránsito hidráulico resulta fundamental en la simulación de desagües donde las condiciones de aguas abajo influyan sobre el escurrimiento en el sistema, como por ejemplo en tramos de baja pendiente o aguas arriba de conductos de escasa capacidad.

SWMM está compuesto por diferentes módulos

- El Módulo Atmosférico, desde la cual se analiza la lluvia caída y los contaminantes depositados sobre la superficie del suelo, que se analiza en el Módulo de Superficie del Suelo. SWMM utiliza el objeto Pluviómetro para representar las entradas de lluvia en el sistema.
- El Módulo de Superficie del Suelo, que se representa a través de uno o más objetos cuenca. Estos objetos reciben la precipitación del Módulo Atmosférico en forma de lluvia o nieve; y generan flujos de salida en forma de infiltración para el Módulo de Aguas Subterráneas y también como escorrentía superficial y cargas de contaminantes para el Módulo de Transporte.

Las cuencas son unidades hidrológicas de terreno cuya topografía y elementos del sistema de drenaje conducen la escorrentía directamente hacia un punto de descarga. El usuario del programa es el encargado de dividir el

área de estudio en el número adecuado de cuencas e identificar el punto de salida de cada una de ellas. Los puntos de salida de cada una de las cuencas pueden ser bien nudos del sistema de drenaje o bien otras cuencas.

Las cuencas pueden dividirse en subáreas permeables (A2) y subáreas impermeables (A1+A3). Las áreas impermeables pueden dividirse a su vez en dos subáreas: una que contiene el almacenamiento en depresión (A1) y otra que no lo contempla (A2). El flujo de escorrentía desde una subárea de la cuenca puede fluir hacia otra subárea o por el contrario dos subáreas pueden drenar directamente hacia la salida de la cuenca.

- El Módulo de Aguas Subterráneas recibe la infiltración del Módulo de Superficie del Suelo y transfiere una parte de la misma como flujo de entrada para el Módulo de Transporte. Este módulo permite la simulación utilizando los objetos Acuíferos.

Para este módulo se puede optar entre el módulo de infiltración de Horton, Green & Ampt o el número de curva del SCS.

Cada una de las cuencas se trata como un depósito no lineal. La capacidad de este “depósito” es el valor máximo de un parámetro denominado almacenamiento en depresión, que corresponde con el máximo almacenamiento en superficie debido a la inundación del terreno, el mojado superficial de la superficie del suelo y los caudales interceptados en la escorrentía superficial por las irregularidades del terreno.

La escorrentía superficial por unidad de área,  $Q$ , se produce únicamente cuando la profundidad del agua en este “depósito” excede el valor del máximo almacenamiento en depresión, “ $dp$ ”, en cuyo caso el caudal de salida se obtiene por aplicación de la ecuación de Manning.

- El Módulo de Transporte contiene una red con elementos de transporte (canales, tuberías, bombas y elementos de regulación), unidades de almacenamiento y tratamiento que transportan el agua hacia los Nudos de Vertido o salidas del sistema. Los flujos de entrada de este Módulo pueden provenir de la escorrentía superficial, de la interacción con el flujo subterráneo, de los caudales sanitarios correspondientes a periodos sin lluvia, o de hidrogramas de entrada definidos por el usuario. Los componentes del Módulo de Transporte se modelan con los objetos Nudos y Conducciones.

Las conexiones son nudos del sistema de drenaje donde se conectan diferentes líneas entre sí. Físicamente pueden representar la confluencia de canales superficiales naturales, pozos de registro del sistema de drenaje, o elementos de conexión de tuberías. Los aportes externos de caudal entran en el sistema a través de las conexiones. El exceso de agua en un nudo se traduce en un flujo parcialmente presurizado mientras las conducciones conectadas se encuentren en carga. Este exceso de agua puede perderse completamente del

sistema o por el contrario estancarse en la parte superior para posteriormente volver a entrar de nuevo en la conexión.

Los conductos son tuberías o canales por los que se desplaza el agua desde un nudo a otro del sistema de transporte. Es posible seleccionar la sección transversal las distintas variedades de geometrías abiertas y cerradas definidas en el programa.

SWMM emplea la ecuación de Manning para establecer la relación entre el caudal que circula por el conducto ( $Q$ ), la sección del mismo ( $A$ ), su radio hidráulico ( $R_h$ ) y la pendiente ( $S$ ) tanto para canales abiertos como para conductos cerrados parcialmente llenos.

Para el caso del Flujo Uniforme y para el caso del Análisis mediante la Onda Cinemática se interpreta como la pendiente de la conducción. En el caso de emplear el Modelo de la Onda Dinámica se interpreta como la pendiente hidráulica del flujo (es decir, la pérdida por unidad de longitud).

### *BEMUS*

El modelo BEMUS (BElgrade Model of Urban Sewes) fue producido por el Instituto de Ingeniería Hidráulica, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Belgrado. El principal autor de este proyecto es el Prof. Miodrag Radojkovics. BEMUS es un modelo comercial. Ningún sitio web y/o manuales de uso están línea actualmente (Freni et al., 2003)

BEMUS es un modelo determinista distribuido. La totalidad de la cuenca analizada se divide en un número de zonas homogéneas más pequeñas; la superficie total de cada subcuenca se divide en áreas impermeables (techo, calles, veredas, etc) y permeables (parques, jardines, etc); el escurrimiento de cada una de estas superficies se calcula por separado, según sus porcentajes. Es posible definir que parte de los techos y de las demás áreas impermeables se drena directamente a la red de alcantarillado.

La transformación de las precipitaciones en precipitación efectiva se supone que es debido a la infiltración y la retención en la superficie. La infiltración en medios porosos insaturados se simula la solución de la ecuación de Richards como simplificación del método de Green-Ampt. Para analizar el flujo de superficie de cada subcuenca se sustituye la misma por dos áreas rectangulares equivalentes con una pendiente constante (igual a la pendiente media de la subcuenca), en la cual el agua fluye hacia la alcantarilla. Suponiendo un valor medio de la profundidad del agua en la sección transversal, la superficie de flujo 2D se puede suponer que es un flujo 1D, el

cual es descrito por las ecuaciones de conservación de masa y momento con la ecuación cinemática para un canal que de un ancho unitario

Un nuevo modelo ha sido desarrollado, por ahora se encuentra en lanzamiento, el modelo utiliza el mismo procedimiento escorrentía superficial de BEMUS, pero la simulación de flujo en tubería es completamente diferente completamente diferente ya que la realiza según las ecuaciones dinámicas completas. El modelo ha sido llamado SIPSON.

### *HYDROWORKS/INFOWORKS*

HydroWorks ofrece un modelado rápido, preciso y estable de los elementos clave de las aguas residuales y sistemas de alcantarillado. Ofrece una completa solución para el problema del modelado de los efectos de remanso y el flujo inverso, canales abiertos, alcantarillas maestras, conexiones de tuberías complejas y estructuras auxiliares.

HydroWorks ofrece completos vistas interactivas de datos mediante vistas en planta, cortes, hoja de cálculo y datos gráficos variables en el tiempo. El motor de simulación de HydroWorks proporciona un tiempo de ejecución secuencial automática y una solución numérica implícita, para optimizar el tiempo de ejecución y asegurar la estabilidad. Se puede realizar tanto simulaciones de eventos o continuas.

El modelo global de captación se divide en una serie de sub-cuencas. Cada sub-cuenca puede ser dividida en tipos de superficie. El modelado de la transformación precipitación-escorrentía esta dado por tres procesos simultáneos: pérdidas iniciales (almacenamiento depresión), pérdidas continuas (infiltración) y el enrutamiento de flujo superficial.

Para determinar la cantidad de precipitación que se transforma en escurrimiento y que llega al sistema de drenaje, luego de tener en cuenta las pérdidas iniciales, HydroWorks tiene la opción de utilizar varios modelos: un porcentaje fijo de escurrimiento, el modelo de infiltración de Horton, el modelo de escurrimiento de Wallingford, el número de curva del SCS o el modelo Británico de escurrimiento.

El flujo mantiforme que llega al sistema de drenaje puede ser modelado separadamente por cualquiera de los modelos que soporta HydroWorks: el modelo del Wallingford, Sprint, SWMM, etc.

Los conductos son representados como un vínculo/línea en la red, con una longitud definida entre dos nodos. Se define el ingreso y egreso de cada conducto como así también la pendiente (definida por la altura de sus nodos). Puede modelarse diferentes geometrías y se utiliza para la misma las ecuaciones de Saint-Venant

El HydroWorks ahora llamado InfoWorks, se actualiza constantemente. Es un software con licencia desarrollado “HR Wallington Software”.

### *MOUSE/MIKE*

MOUSE (MOdel for Urban SEwers) igual que HydroWork es un software comercial, producido por DHI Water & Environmen. Sin una licencia válida, MOUSE funciona como software Demo, que permite la edición de una pequeña red (DHI, 2000)

MOUSE es un modelo que simula el escurrimiento superficial, flujo en canales abiertos, flujo en tuberías, la calidad del agua y el transporte de sedimentos. MOUSE combina la hidrología compleja, la hidráulica, la calidad del agua y el transporte de sedimentos en una interfaz completamente gráfica fácil de usar. Es una aplicación de Windows de 32 bits diseñado específicamente para operar dentro de Microsoft Windows ® y Windows NT ®.

El paquete de MOUSE está organizado en varios módulos:

- MOUSE Runoff: modelos de escurrimiento superficial para aplicaciones en cuencas urbanas.
- MOUSE RDII (Rainfall Dependent Inflow & Infiltration): modelo hidrológico para simulación continua.
- MOUSE HD (Hydrodynamic Pipe Flow Model): modelo hidrodinámico con algunas limitaciones.
- MOUSE RTC (Real-Time Control): modelo hidrodinámico avanzado, dirigido especialmente a las tuberías.
- MOUSE LTS.

Los módulos anteriormente citados se combinan y se acoplan de distinta manera para poder modelar correctamente según el caso de estudio y sus necesidades. De esta forma es posible simular las precipitaciones, la evaporación (para modelo continuo), el humedecimiento, la infiltración (mediante la relación de Horton), el almacenamiento superficial, escurrimiento superficial y el flujo en tuberías.

En el modelo también se divide la cuenca en distintas áreas a la cual se le puede identificar los sectores impermeables y los no, y las demás características.

MOUSE también es utilizado acoplado a otros modelos como MIKE SHE, MIKE URBAN o MIKE FLOOD.

MIKE SHE es un modelo hidrológico distribuido aplicable tanto para cuencas urbanas como cuenca rurales. Esta orientado principalmente para simulaciones continuas, por lo que tiene en cuenta los procesos de precipitación, infiltración, evapotranspiración, escurrimiento superficial y en canales. Es un modelo totalmente distribuido que divide la cuenca en celdas.

MIKE URBAN y MIKE FLOOD no son modelos hidrológicos sino que simulan el flujo en tuberías y las inundaciones, respectivamente.

### *CASC2D/TREX*

El punto de partida para el desarrollo TREX (Two-dimensional Runoff, Erosion, and Export model) fue el modelo hidrológico CASC2D (CASCade of planes, 2-Dimensional). La estructura básica es un modelo basado en eventos que simula el flujo superficial, la erosión de la superficie del suelo y la deposición, flujo en canal y transporte de sedimentos a través de los cauces fluviales (England et al., 2007). Como parte del desarrollo de TREX, los componentes hidrológicos y de transporte de sedimentos de CASC2D se ampliaron de manera significativa y mejoraron para soportar el modelado de las inundaciones y las características químicas de transporte (Velleux et al., 2008).

El ciclo hidrológico en TREX comienza con la precipitación (pluvial y/o nival), una fracción de la misma quedará retenida en la vegetación, luego la precipitación excedente está disponible para infiltrar o escurrir superficialmente. En este modelo se utiliza la relación de Green y Ampt para definir la infiltración en la superficie del terreno y en los cauces. Si la tasa de precipitación supera la capacidad de infiltración, el agua se almacena en las depresiones del terreno hasta un determinado umbral que da comienzo al 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 (Jorquera et al, 2012).

CASC2D y TREX fueron pensados originalmente para cuencas rurales pero se encuentran varios trabajos en los cuales se aplican en cuencas urbanas con aceptables resultados. El inconveniente se presenta principalmente porque no modela los flujos en tuberías.

TREX y CASC2D son modelos de dominio público desarrollados por la Universidad Estatal de Colorado, Estados Unidos.



## *MULTI-HYDRO*

Multi-Hydro, es un modelo totalmente distribuido, que se está desarrollando actualmente en la Ecole des Ponts ParisTech. Presenta varios componentes que interactúan entre sí para simular los distintos procesos hidrológicos e hidráulicos que intervienen en una cuenca periurbana. Cada componente se basa en modelos existentes y ampliamente validados, y que son software de dominio público. Los procesos modelados son las precipitaciones, la escorrentía, la infiltración en suelos heterogéneos, y el drenaje en los sistemas de alcantarillado (Giangola-Murzyn, 2013).

El modelado de los procesos de superficie está realizado por TREX (citado anteriormente). Con este modelo se realiza la simulación de los procesos superficiales: precipitación, intercepción, almacenamiento, infiltración y escorrentía superficial.

El modelado del flujo en zona no saturada se realiza con VS2DT. Este modelo permite simular el flujo y transporte en medios porosos variablemente en una y dos dimensiones. El modelo VS2DT es un modelo de diferencias finitas que resuelve la ecuación de Richards para el flujo y la ecuación de advección-dispersión para el transporte de solutos.

Por último para la simulación de las redes de saneamiento se utiliza el modelo SWMM (también ya descrito anteriormente).

Multi-Hydro posee una interfaz gráfica para la preparación e importación de datos de modelación. El modelo se encuentra en desarrollo y todavía no es posible la obtención del mismo y de un manual en la web.

En la bibliografía se encuentra información de otros modelos distribuidos para zonas urbanas, algunos de éstos ya en desechos y otros en desarrollo, pero con poca información disponible.

## ESTRATEGIAS ACTUALES DE MODELACIÓN EN ZONA URBANAS.

En la actualidad, los avances en la modelación de zonas urbanas se dan principalmente por los desarrollos en los procesadores y las posibilidades que éstos brindan, como así también por la utilización de datos de imágenes satelitales.

Se presentan diversos aspectos importantes a tener en cuenta en las modelaciones urbanas y el comportamiento de los dos tipos de modelos descritos anteriormente (modelo que dividen la cuenca en celdas regulares y modelos que dividen la cuenca en subcuencas), teniendo en cuenta para las comparaciones el modelo SWMM y TREX, debido el primero por el extendido uso que se tiene del mismo y el segundo porque es el que se está tratando de explotar con todas sus potencialidades en el Laboratorio de Hidráulica de la UTN – FRC.

### *Utilización de SIG*

Los SIG son utilizados de manera significativa para la generación de archivos de entrada como así también para la visualización e interacción de los resultados dependiendo de los modelos.

En CASC2D, TREX y Multy-Hidro, los SIG cumplen un papel fundamental facilitando de manera importante la creación de los mapas de ingreso: delimitación de cuenca, generación de red de drenajes, mapas de tipo y uso de suelo, etc. Como así también la visualización de resultados pudiéndose visualizar la altura de escurrimiento, de infiltración y precipitación en cada paso de tiempo de modelación.

Los SIG a la vez, son importantes incluso en aquellos modelos que dividen la cuenca en subcuencas. Los SIG permiten generar e identificar las subcuencas para luego realizar las modelaciones. De la misma forma se pueden identificar las áreas y proporciones de sectores permeables e impermeables de cada subcuenca.

### *Modelo Digital de Elevación (DEM en sus siglas en inglés)*

Los DEM son unos de los datos de mayor importancia en la modelación hidrológica distribuida, ya que dependiendo el modelo será necesario para determinar pendientes medias de subcuencas o la dirección de escurrimiento de celdas.

Para generar los DEM en zonas urbanas es posible utilizar curvas de nivel del sector (contemplando niveles de calle, vereda, etc) o ya puede estar desarrollado según mediciones satelitales, como puede ser los datos de la misión del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), misión con el objetivo de generar datos topográficos digitales de gran parte del mundo. El tamaño de las celdas de los datos fuente es de 1 segundo de arco, sobre Estados Unidos y en el resto del mundo, 3 segundos de arco. Estos últimos datos se pueden obtener con una resolución espacial asociada a un pixel de 30 ó 90 m, resolución que para zonas urbanas parece ser demasiado

pequeñas según distintas investigaciones en donde se utiliza un tamaño de pixel de 25 o 10 m para modelos de celdas.

Una opción nueva y con grandes potencialidades para generar los DEM para la modelación de cuencas urbanas son los datos LiDAR (Laser Imaging Detection and Ranging). Los datos Lidar son una nube de puntos del terreno obtenidas mediante un escáner láser aerotransportado. Trabaja en combinación con un sistema de GPS diferencial (DGPS) y un sistema inercial de navegación (INS). Por lo tanto, el resultado de una campaña LiDAR es una colección de puntos con coordenadas conocidas en sus tres dimensiones. La cantidad de puntos suele ser enorme y éstos se obtienen mediante un muestreo aleatorio. Los puntos estarán situados tanto sobre el terreno como sobre los objetos que se encuentren sobre él: vegetación, edificios, vehículos, etc. En general, para que estos datos sean útiles, será preciso clasificarlos o filtrarlos y construir un modelo a partir de los puntos clasificados. Como el número de puntos es muy grande es necesario disponer de herramientas para realizar una clasificación automática de los datos y a continuación revisar y editar manualmente los resultados obtenidos (Ruiz & Kornus, 2003).

Con los datos LIDAR procesados es posible obtener resoluciones más grande que con datos SRTM o ASTER, con tamaños de pixel de 1 m. De esta forma es posible identificar construcciones, calles, veredas, etc. Tanto para obtener el DEM necesario para modelos hidrológicos de celdas o para delimitar de manera correcta las subcuencas necesarias para modelar en SWMM por ejemplo.

En distintos trabajos se observa que en modelos hidrológicos de celda al utilizar resoluciones grandes, dependiendo el tamaño de cuenca a analizar, por más que los procesadores sean de avanzada los tiempos de cálculo se hacen elevados y se pueden generar algunas inestabilidades. Sumado a lo anterior, no se visualizan demasiadas diferencias entre los resultados obtenidos para distintas resoluciones principalmente porque los resultados están sujetos a los valores utilizados para la calibración y en cada resolución se utilizan valores distintos de calibración obteniendo resultados a veces similares. Es decir, desde el punto de vista de resultados con dos modelos con resoluciones diferentes pueden lograr resultados de orden similares, pero en cambio, desde el punto de vista de los valores utilizados para la calibración se presume que los utilizados para el modelo con mayor resolución se asemejan más a la realidad y a medida que se disminuye la resolución estos valores tienden a ser promedios o ponderaciones de las distintas áreas (tipos de suelo diferentes, usos de suelo diferentes, etc) que contempla una celda o pixel. He aquí que influye también en la elección de resolución del modelo la calidad y cantidad de información disponible, ya que “mejoras” en la calidad de resultados y modelación que se pueden obtener con un DEM de considerable resolución se puede perder si no se tiene detallada información de la distribución de las demás variables comprendidas en el modelo, que pueden generar errores al momento de la calibración del modelo.

En estos tipos de modelos se debe tener un especial cuidado con los DEM, en muchos casos es necesario realizar un adecuado procesamiento del mismo para evitar tener inconvenientes en los sectores de puentes, alcantarillas, edificaciones, etc.

### *Imágenes Satelitales*

Las imágenes satelitales están ampliamente difundidas para la identificación de usos de suelo en sectores urbanos principalmente para identificar las áreas permeables e impermeables, principalmente enfocados para los modelos del tipo SWMM.

En modelos hidrológicos de celdas, seleccionando una adecuada imagen satelital (imagen, banda y resolución adecuada) aplicándole un procesamiento a través de los GIS es posible obtener directamente los mapas de uso de suelo, utilizados principalmente en el modelo para la identificación de sectores con distinta rugosidad, intercepción e infiltración.

El uso de imágenes satelitales, obviamente va a estar supeditada al objetivo del estudio que se realizará con las modelaciones hidrológicas. Si el objetivo es calibrar el modelo con datos de precipitaciones y caudales líquidos de determinados eventos, estas imágenes deberán coincidir temporalmente con los eventos seleccionados. De no ser así se debe determinar que grado de variaciones en los distintos factores determinados con estas imágenes desde el momento de su obtención con respecto al momento de producirse los eventos seleccionados para la calibración, de tal manera de visualizar los errores que pueden existir y de ser posible corregirlos. Similar sucede al efectuar modelaciones hidrológicas con el fin de simular escenarios futuros o que varían en el tiempo (caso real), en los cuales las imágenes satelitales pueden que no reflejen a ciencia cierta los nuevos escenarios o los escenarios que cambiaran con el tiempo.

Aún teniendo en cuenta lo anterior, las imágenes satelitales son de gran utilidad para la modelación, ya que permite adoptar con criterios razonables distintas variables de los modelos hidrológicos y ayudan a generar a la vez escenarios futuros, según escenarios pasados y actuales.

## *Buenas Prácticas de Conservación de Cuencas*

Debido al impacto que tienen las urbanizaciones en las cuencas, es cada vez más requerida la aplicación de buenas prácticas en las mismas, entre ellas: techos verdes, pavimentos porosos, lagunas de retención, lagunas de infiltración, etc.

Entre los modelos de celdas identificados, no se encontraron aplicaciones en las cuales se apliquen estas prácticas pero no se observan inconvenientes para aplicar y analizar el impacto de techos verdes y pavimentos porosos. El caso de lagunas de retención y de infiltración, pueden existir problemas de inestabilidad numérica.

En los modelos del tipo SWMM se observa más dificultoso aplicar algunas prácticas cada vez más difundidas, como los techos verdes y pavimentos porosos. En general, para aplicar las anteriores prácticas en una modelación clásica de SWMM en cuenca urbana donde las subcuencas tienen una extensión de una manzana o más aún, la variante que producen las prácticas mencionadas (mayor infiltración, cambios en rugosidad, intercepción) se podría reflejar en el porcentaje de área permeable de la cuenca, y aunque este porcentaje aumentaría con el uso de buenas prácticas, no es posible diferenciar por ejemplo la diferencia de un área permeable destinada a jardín o pavimento poroso, etc. De la misma forma si se encuentran varios sectores de áreas permeables dentro de una subcuenca no se puede identificar correctamente cual de ellas esta directamente conectada a la “salida” (otra subcuenca o red de drenaje), cual pasa previamente por un área impermeable o viceversa (que área impermeable escurre antes de salir de la subcuenca sobre un área permeable). No se encontraron trabajos realizando estas aplicaciones. Para lagunas de retención y lagunas de infiltración, los modelos tipo SWMM tienen módulos específicos para éstos elementos pudiéndose modelar de manera bastante completa, existiendo numerosos trabajos que así lo realizan.

## CONCLUSIÓN

Existen dos tipos de modelos distribuidos aplicables en áreas urbanas, aquellos del tipo totalmente distribuido que divide la cuenca en celdas y aquellos que dividen la cuenca en subcuencas de distinto tamaño. Estos últimos son los más difundidos y desarrollados, modelando no solo los procesos hidrológicos dentro de la cuenca urbana sino aquellos procesos hidráulicos que existen en las redes de drenaje urbano (tuberías) (SWMM, MOUSE, HydroWorks).

Los modelos de celdas se encuentran en pleno desarrollo, sustentándose los mismos en la facilidad de la obtención de los datos y su procesamiento a través de herramientas como los GIS (TREX y CASC2D). Al estar

pensados inicialmente para cuencas rurales no tienen en cuenta la modelación de flujo en tuberías. Este último problema ha sido solucionado por el modelo MultiHydro al realizar una combinación de distintos complementos de modelos ya difundidos ampliamente, pero al encontrarse todavía en desarrollo no se encuentra disponible.

La elección del modelo hidrológico a utilizar en una cuenca urbana va a estar supeditado al objetivo del estudio que se realizará con la modelación.

Los modelos de celdas poseen grandes ventajas y potencialidades especialmente con los nuevos desarrollos, como ser: nuevos procesadores, imágenes satelitales, SIG y datos de modelos digital de gran precisión (LiDAR). Con estas herramientas e información que se pueden ser aplicadas muy rápidamente a los modelos, le permiten a los mismos una gran flexibilidad para realizar modelaciones de diferentes escenarios, lo que permite realizar ordenamientos territoriales, verificar sectores inundables, variantes en distintos diseños de obras, etc.

Los modelos de celdas evitan el engorroso y subjetivo proceso de división de cuencas en subcuencas como obligatoriamente debe ser realizado en los modelos del tipo de SWMM. Aun sí estas subcuencas pueden ser determinadas automáticamente por un SIG, es necesario adoptar datos precisos para cada subcuenca para la determinación de los tiempos de concentración de cada una de ellas, lo que en cuencas urbanas en muchos casos no se encuentra demasiado claro.

Los modelos tipo SWMM tienen un buen desarrollo en el aspecto hidráulico referido a redes de drenaje, lo que es un déficit en los modelos de celdas, ya que es un aspecto importante en la mayoría de las modelaciones de cuencas urbanas.

Finalmente, teniendo en cuenta los nuevos desarrollos desde el punto informático, obtención de información en campo, desarrollos en los modelos citados, etc. Se puede concluir, que actualmente, la elección del modelo en primer lugar dependerá del grado de detalle y objetivo que se busca con la modelación. Sin embargo, al resolverse el problema principal que tenían los modelos de celdas existentes para la aplicación en cuencas urbanas, que era la falta de la modelación de una red de drenajes, se observa que los modelos de celdas serán los más adecuados para analizar y estudiar con mayor detalle las cuencas urbanas ya que permiten una directa aplicación de la información de imágenes satelitales, mediciones de precisión, etc. A través de los SIG y a la vez una completa modelación de los flujos por cañerías

## REFERENCIAS:

Beven, K. J., 2001. Modelación de precipitación-escorrentia. Wiley.

- Vieux, B. E., 2004. Modelación hidrológica distribuida utilizando GIS. Water Science and Technology Library. Volume 48.
- Singh, V. P., 1995. Modelos de computadora en la hidrología de cuencas. Water Resources Publications, CO.
- EPA, 2005. SWMM – Manual del Usuario (Version 2005, en español).
- Freni, G, Maglionico, M., Federico Di V., 2003. Estado del arte en la modelación de drenaje urbano. CARE-S Report D7. 2003.
- DHI , 2000. MOUSE – Manual de Usuario y Tutorial (Version 2000), DHI, Hørsholm, Denmark.
- Ruiz A., Kornus W., 2003. Experiencias y aplicaciones del Lidar. V Semana Geomática de Barcelona. 11.2.03 al 14.2.03, Barcelona.
- Velleux, M., England, J., and Julien P. 2008. TREX: Modelo Espacialmente Distribuido para evaluar el transporte y destino de contaminantes en cuencas. Science of the Total Environment, 404(1):113-128.
- England, J., Velleux, M., and Julien, P. 2007. Simulación en dos dimensiones de caudales extremos en una gran cuenca. 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