

Modelación del impacto de inundaciones en una cuenca subtropical en el sur de Florida

Modeling the flood response for a sub-tropical urban basin in South Florida

Juan M. Stella¹

Emmanouil N. Anagnostou²

¹Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México, juan.stella@yahoo.com

²Department of Civil and Environmental Engineering, University of Connecticut, Storrs, USA

Autor para correspondencia: Juan M. Stella, juan.stella@yahoo.com

Resumen

Un área importante de investigación en modelación hidrológica es la predicción de la respuesta a las inundaciones en cuencas urbanas complejas, con estructuras hidráulicas tales como estaciones de bombeo, canales, alcantarillas y desagües. Es necesaria la predicción de la respuesta a las fuertes lluvias en la cuenca para evaluar los impactos potenciales en las decisiones de gestión de cuencas hidrográficas, en especial durante los periodos de altos caudales. En este estudio se adoptó el modelo *HEC-HMS* para predecir las descargas acumuladas en una cuenca urbana ubicada en West Palm Beach, Florida, USA. El modelo fue calibrado basado en siete eventos de inundación y validado utilizando siete eventos independientes que abarcan un periodo de cinco años. Los resultados muestran que los caudales acumulados de agua expulsada de la cuenca fueron simulados con gran precisión y que el modelo puede ser utilizado para evaluar diferentes

escenarios de gestión de condiciones de altos caudales de la cuenca urbana en el sur de Florida.

Palabras clave: Florida, balance hídrico, *HEC-HMS*, simulación, inundaciones.

Abstract

A key area of research in hydrologic modeling is the prediction of flood response in complex urban basins with hydraulic structures such as pump stations, canals, culverts, and spillways. The prediction of the basin's response to heavy rainfall is needed in order to assess the impacts of potential watershed management decisions, especially during high flow periods. In this study, the *HEC-HMS* model was adopted to predict the accumulated discharges in a small urban basin located in West Palm Beach, Florida, USA. The model was calibrated based on seven flood events and validated using seven independent events spanning a 5-year period. The results show that the accumulated flow of water released from the basin was simulated with high accuracy, and that the model can be used for various management scenarios involving high flow conditions in the south Florida urban basin.

Keywords: Florida, water balance, *HEC-HMS*, simulation, flood.

Recibido: 14/07/2016

Aceptado: 22/11/2017

Introducción

A medida que la urbanización aumenta rápidamente junto con la densidad de población, los problemas de planificación espacial se vuelven muy importantes para una gestión sostenible de los recursos hídricos. La calidad del entorno de vida debería ser alta, al mismo tiempo que se necesitaría

garantizar la seguridad del área. Uno de los principales problemas que enfrenta la hidrología urbana es el cálculo de un equilibrio hídrico urbano preciso. Para lograr ese objetivo, la aplicación de un modelo de simulación hidrológica de confianza puede ayudar a predecir el balance hídrico después de una tormenta de lluvia (Dey & Kamioka, 2007). Para Dey y Kamioka, (2007), la predicción correcta de las inundaciones en las cuencas urbanas se ha convertido en un desafío, ya que los modelos tradicionales de drenaje urbano consideran sólo la red de alcantarillado que es capaz de simular el sistema de drenaje correctamente hasta que no haya desbordamiento de la entrada de red o pozo de registro; por lo tanto, cuando dichos desbordamientos existen debido a la capacidad de drenaje insuficiente de las tuberías o canales posteriores resulta difícil reproducir las extensiones reales utilizando estas técnicas de simulación monofásicas tradicionales, por lo que la situación de inundación correcta rara vez se aborda desde las disponibles en modelos tradicionales. Desde una perspectiva de modelado, esto se puede lograr utilizando un equilibrio hídrico urbano como marco conceptual, donde los insumos son la lluvia, evapotranspiración y suministro de agua por tubería; los productos son el drenaje de la cuenca, el cambio en el almacenamiento en los acuíferos naturales (acuíferos de suelos y aguas subterráneas) y componentes construidos del sistema urbano como estaciones de bombeo y estructuras hidráulicas (Mitchell, Deletic, Fletcher, Hatt, & McCarthy, 2007). Uno de los principales problemas del balance hídrico en la hidrología urbana es la cuantificación de la recarga; las fuentes y vías para la recarga de aguas subterráneas en las áreas urbanas son más numerosas y complejas que en los entornos rurales (Grimmond & Oke, 2002). Grimmond y Oke (2002) encontraron que la recarga en las áreas urbanas ahora es ampliamente reconocida como generalmente alta o más alta que en áreas rurales equivalentes. Su investigación mostró que los enfoques holísticos se recomiendan para su uso siempre que sea posible, por ejemplo, investigando el balance general del agua o calibrando un modelo de flujo de agua subterránea. Durante la mañana del 10 de junio de 2000, el este de España se vio afectado por una tormenta que por lo común presenta breves intervalos de recurrencia en las costas mediterráneas y produjo un aumento significativo del flujo en la subcuenca de la región catalana (Amengual, Romero, Gómez, Martín, & Alonso, 2007). Amengual *et al.* (2007) aplicaron y calibraron el modelo hidrológico *HEC-HMS* en la cuenca del río Llobregat, con un área de drenaje de 5 040 km² para estudiar la respuesta hidrológica de la cuenca a este evento de inundación utilizando datos pluviométricos de lluvia. Los resultados mostraron una reproducción razonable de la descarga observada en la salida de la cuenca y que *HEC-HMS* parecía ser una herramienta adecuada para la predicción hidrometeorológica de crecidas repentinas en la cuenca del Llobregat (Amengual *et al.*, 2007). En la cuenca principalmente urbana de Kifissos de 370 km², ubicada en Grecia, se aplicó un sistema para pronosticar el riesgo

de inundación utilizando un sistema hidrometeorológico integrado; los resultados son alentadores para esta etapa operativa inicial, sin embargo, los autores indicaron que la hidroelectricidad integrada en los modelos meteorológicos son herramientas que aún no se han madurado (Koussis *et al.*, 2003). El objetivo de esta investigación es aplicar el modelo de escorrentía del Sistema de Modelación Hidrológica del Centro de Ingeniería Hidrológica (*HEC-HMS*) a la cuenca urbana C-11 de la Florida durante siete eventos, calibrar el modelo utilizando las descargas acumuladas observadas como referencia y validar el modelo con otros siete eventos con los parámetros obtenidos durante la calibración.

Datos y aplicación de *HEC-HMS*

El Distrito de Administración del Agua del Sur de la Florida (SFWMD) es uno de los muchos institutos que se enfoca en la administración y protección de los recursos hídricos en el estado de Florida, en EUA. Su misión es encontrar un buen equilibrio en la disponibilidad de sus recursos hídricos limitados que afectan a más de 7.5 millones de personas que viven en el sur de dicho estado (Skinner, Bloetscher, & Pathak, 2009). SFWMD opera y mantiene el sistema de gestión del agua de la cuenca C-11 en la ciudad de West Palm Beach, con una superficie administrativa de unos 251.22 km² (Tillis & Swain, 1998). La cuenca C-11 se divide administrativamente en dos subcuencas: C-11-este con 68 km², que representa el 27% del área total de la cuenca hidrográfica, y C-11-oeste, con 184 km², que representa cerca del 73% del total de la cuenca hidrográfica. En el lado oeste, la cuenca C-11 está bordeada por el Área de Conservación de Agua 3A (WCA-3A), los pantanos de los Everglades y al este por las áreas metropolitanas de Fort Lauderdale a lo largo de la costa del océano Atlántico (Tillis & Swain, 1998). Desde 1985, la cuenca C-11 ha experimentado un crecimiento poblacional; por lo tanto, se han creado varias estructuras hidráulicas nuevas para el manejo de cuencas, como se muestra en la Figura 1 (Pathak, 2008).

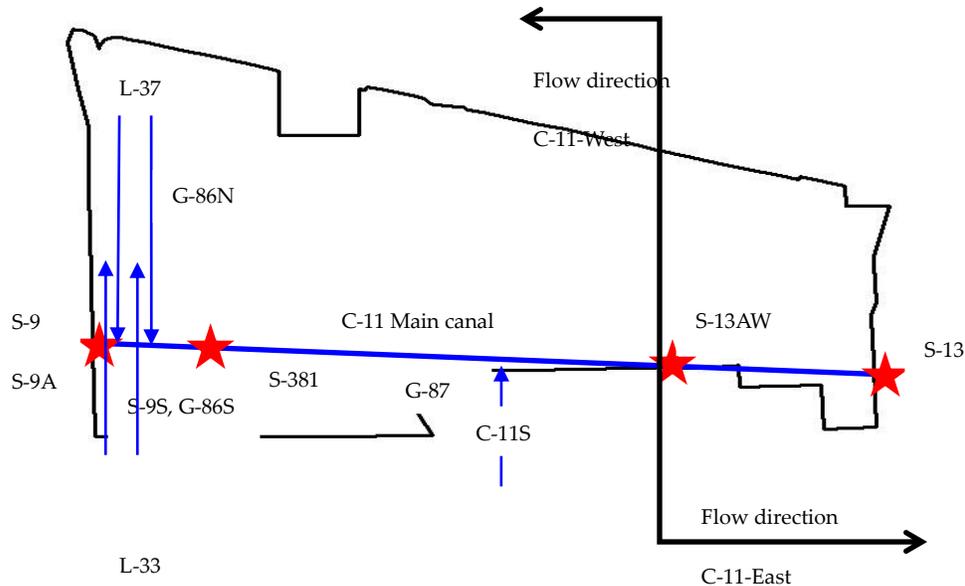


Figura 1. Estructuras de la cuenca C-11: C-11S, G-86N, G-86S, L-33, L-37, S-9N, S-9S canales. S-9, S-9A y S-13 estaciones de bombeo; S-381 y S-13 aliviadero; S-13AW alcantarilla y dirección del flujo.

El sur de la Florida tiene un clima relativamente húmedo, con una acumulación de lluvia promedio anual de 1 321 mm (Skinner *et al.*, 2009). Para Skinner *et al.* (2009), la lluvia puede variar de modo significativo en la región debido a condiciones climáticas extremas, que van desde sequías intensas hasta huracanes. Estos eventos impactan de manera importante en las acciones requeridas para el suministro de agua y la protección contra inundaciones. Las acciones para tener control sobre tales eventos han llevado al desarrollo de una serie de estructuras hidráulicas en la cuenca C-11, que incluyen los canales de drenaje C-11, C-11S, L-33 y L-37; los aliviaderos S-381 y S-13; las alcantarillas S-13A (hasta el 29 de abril de 2008), S-13AW (desde el 29 de abril de 2008), S-9XS, G-86N, G-86S y G-87, y las estaciones de bombeo S-13, S-9 y S-9A (Pathak, 2011). En específico, la subcuenca hidrográfica C-11-este se drena a través de la estructura de alcantarilla S-13AW; S-13 estructura con una estación de bombeo, y aliviadero con puerta levadiza vertical. La cuenca hidrográfica C-11-oeste se drena mediante bombas en S-9; y un sistema de bombeo en la estructura S-9A, que consta de dos bombas eléctricas y dos bombas diésel (Pathak, 2011). La cuenca C-11, los canales y las estructuras de control tienen tres propósitos: proporcionar protección contra inundaciones y drenaje para la cuenca, suministrar agua durante periodos de flujo natural

bajo, y controlar e interceptar filtraciones de WCA-3A (Pathak, 2011). Para lograr estos objetivos se aplican las siguientes reglas para la gestión de las estructuras C-11: en la subcuenca C-11-oeste, el exceso de agua se bombea utilizando la estación de bombeo S-9 a la cuenca WCA-3A de los Everglades, ubicada al oeste de la C-11-oeste. Cuando las estaciones de bombeo S-9 y S-9A, ubicadas en la subcuenca C-11-oeste, alcanzan su capacidad de bombeo, el exceso de agua puede descargarse desde C-11-oeste a C-11-este mediante el S-estación de alcantarillado 13A (S-13AW) (Pathak, 2011). El exceso de agua en la subcuenca hidrográfica C-11-este se descarga al Tenedor Sur del Río Nuevo, ubicado al este de la C-11-este, utilizando la estación de bombeo S-13 y el aliviadero. En el canal L-33, la tasa de filtración de los Everglades al canal C-11 está regulada por la etapa sostenida por la alcantarilla de tubería S-9XS. La dirección del flujo en L-33 puede cambiarse, ya sea al norte en la cuenca C-11 o al sur a la cuenca C-9 al sur de la cuenca C-11, dependiendo de la operación del S-9XS (Pathak, 2011). La estructura del vertedero S-13 se operará para mantener una elevación óptima de la cabecera de 0.5 m, cuando haya suficiente agua disponible para mantener este nivel (Manriquez, Wilsnack, & Li, 2009). Los controles automáticos en el aliviadero funcionarán de la siguiente manera: cuando la elevación del cabezal se eleve a una elevación de 0.6 m, la puerta se abrirá; cuando la elevación de la cabecera cae o se eleva a una altura de 0.51 m, la puerta se mantendrá tal como está; cuando la elevación de la cabecera cae a 0.49 m, las puertas se cerrarán. Además de mantener un control de agua dulce aguas arriba óptimo como ya se describió, los controles de compuerta automáticos en esta estructura tienen un control primordial que cierra las compuertas, con independencia del nivel de agua corriente arriba en el raro caso de una marea elevada, siempre que el diferencial entre la cabeza y las elevaciones de la piscina de agua de cola alcanzan 0.07 m (Pathak, 2011). Durante esta operación, cuando el sensor de flotación aguas arriba indica que la compuerta debe abrirse, la compuerta abre un mínimo de 0.8 m. Si esta apertura da como resultado una etapa de cabecera por debajo del nivel de cierre de la puerta, como suele suceder, la puerta comenzará a cerrarse y la operación automática normal tomará el control. La estación de bombeo S-13 debe operar siempre que el nivel del agua en el canal C-11 al oeste de la estructura exceda la elevación óptima de 0.76 m sobre el nivel del mar y el nivel del agua hacia el este esté a menos de 2.43 m sobre el nivel del mar. Además, las bombas se usan cuando se pronostican lluvias excesivas y / o mareas altas que podrían comprometer la operación de la gravedad. Los registros de detención del G-86S normalmente se establecen con una cresta de 1.67 m (Pathak, 2011). Durante los periodos de fuertes lluvias, cuando la etapa en la zanja de drenaje US 27 —ubicada en el desarrollo de West Hollywood Lakes, cerca de la divisoria de drenaje a la cuenca C-9— se eleva por encima de 1.67 m, se eliminan los registros de parada para ser reemplazados cuando el escenario

West Hollywood Lakes desciende por debajo de 1.67 m. Los registros de parada S-9XS se establecen en una cresta de 1.83 m. Cuando las condiciones de inundación en la cuenca C-11 no están presentes, los registros de parada se pueden eliminar cuando el límite de 2.12 m se excede en S-9XS (Pathak, 2011).

HEC-HMS fue diseñado para simular los procesos de precipitación y escorrentía de los sistemas de cuencas dendríticas (USACE, 2009) con un entorno de trabajo integrado que incluye una base de datos, utilidades de entrada de datos, motor de computación y herramientas de informe de resultados (Scharffenberg, 2001). El programa auxiliar *HEC-GeoHMS* permite la integración de SIG con cuenca modelo *HEC-HMS* que utiliza el análisis espacial para el desarrollo de parámetros hidrológicos, y permite el uso de lluvia radar y otras técnicas avanzadas para modelar una cuenca a nivel de la red (USACE, 2009). *HEC-HMS* está diseñado para ser aplicable a una amplia gama de áreas geográficas para resolver una gran variedad de problemas, como: suministro de agua de cuencas grandes, hidrología de inundaciones, y escorrentías pequeñas de cuencas urbanas o naturales (USACE, 2009). *HEC-HMS* se puede aplicar a una variedad de cuencas hidrográficas con diferentes formas, tamaños y características; la interfaz gráfica de usuario hace que el programa sea fácil de usar y está disponible en el dominio público. *HEC-HMS* puede ser una herramienta muy útil para estimar las inundaciones urbanas, frecuencias de inundación, reducción de las inundaciones, sistemas de advertencia de inundaciones, diseño de yacimientos y otros estudios ambientales (Shamsi, 1997). La Figura 2 muestra los límites administrativos (negro), natural (rojo) y los principales (azul) de la cuenca C-11 aplicando la metodología habitual para la delineación de cuencas usando *HEC-GeoHMS*.

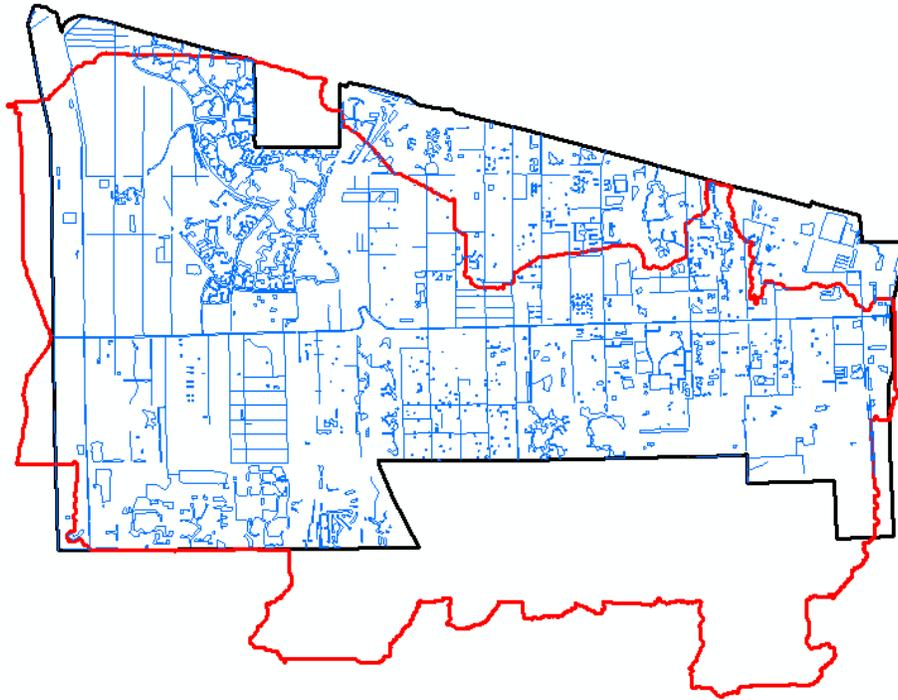


Figura 2. Borde administrativo de la cuenca C-11 (negro), natural (rojo) y cauces principales (azul).

Para la esquematización final de *HEC-HMS* en la cuenca hidrográfica Florida C-11, se calcularon los parámetros para el modelo. Para el cálculo del número de curva (*CN*) primero se realizó una reclasificación de la cobertura del suelo en cuatro tipos: agua, medio residencial, forestal y agrícola. Luego se colocó la tabla de suelo del mapa de suelos y se rellenó la tabla con los códigos de suelo A-B-C-D para cada tipo de suelo; luego se calculó el porcentaje de cada tipo de suelo sobre el área de la cuenca (Merwade, 2007). El número de curva (*CN*), la abstracción inicial (*Ia*) y el tiempo de concentración (*Tc*) se obtienen de SCS TR55 (Cronshey, Roberts, & Miller, 1986). El porcentaje de área impermeable (*PctA*) se determinó como el 70% del área urbana en cada subcuenca. El coeficiente de almacenamiento del embalse (*SC*), que representa el efecto de almacenamiento del canal de la corriente, se calcula a partir de un hidrograma de inundación observado de la cuenca. *SC* se calcula de modo gráfico como la relación entre el volumen bajo el hidrograma después del segundo punto de inflexión, bajo la curva de recesión, y el valor del flujo en el punto de inflexión (*POI*) (USACE, 2009). El flujo base de la recesión está diseñado para aproximarse al comportamiento típico observado en las cuencas hidrográficas cuando los flujos del canal retroceden de forma exponencial después de un evento. *HEC-HMS* requiere curvas de elevación de almacenamiento para las estructuras hidráulicas

definidas en el modelo; estas curvas se calcularon usando la información de sección transversal de las estructuras y las longitudes de los canales ascendentes, que se usaron para calcular el volumen en función de la altura. El SFWMD proporcionó series cronológicas de eventos de precipitación, aguas subterráneas y datos de flujo para la calibración y validación del modelo para siete eventos para calibración y siete eventos para validación. Las descargas acumuladas simuladas y observadas para los siete eventos se compararon usando el cuadrado de regresión lineal R y el modelo de eficiencia Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) dados por la ecuación (1):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

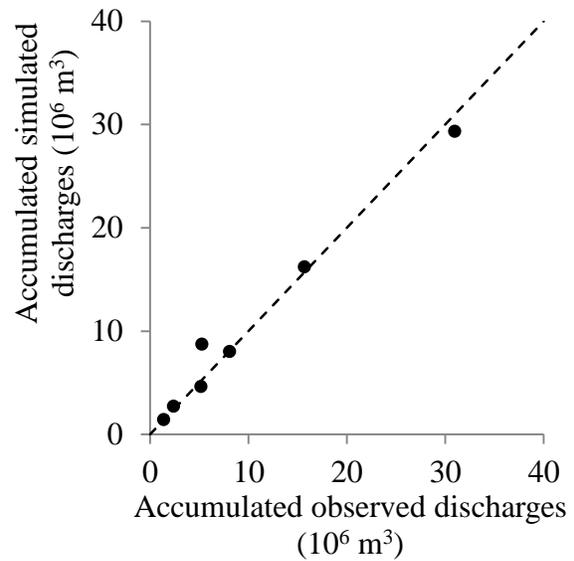
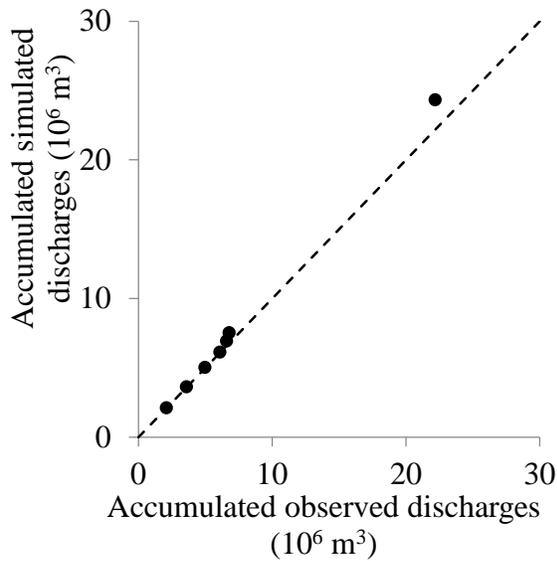
Donde:

- O_i Caudales observados.
- \bar{O} Caudales medios observados.
- S_i Caudales simulados.
- N Número de pasos.

Resultados y discusión

La calibración se realizó para lograr un coeficiente cuadrado de regresión lineal más cercano a 1 entre el total acumulado de descargas observadas y simuladas para cada evento en la cuenca C-11 (considerando las subcuencas C-11-este y C-11-oeste). Los dos parámetros *HEC-HMS* seleccionados para la calibración son el flujo de base y el coeficiente de almacenamiento. El flujo base se utiliza para producir una contribución de agua para lograr el

equilibrio hídrico cuando la cuenca hidrográfica se encuentra en condiciones normales. El coeficiente de almacenamiento se seleccionó para calibración, pues 1) es el único parámetro que no se determina con base en los principios físicos y los datos disponibles, y 2) las estadísticas de error de balance de agua modelo muestran una fuerte sensibilidad a las variaciones de este parámetro. La calibración y validación se trazaron con una línea de 45° para cada periodo (dos) de los siete eventos, entre las descargas acumuladas observadas y simuladas en las subcuencas C-11-oeste, C-11-este y en la cuenca total C-11 (Figura 3, Figura 4).



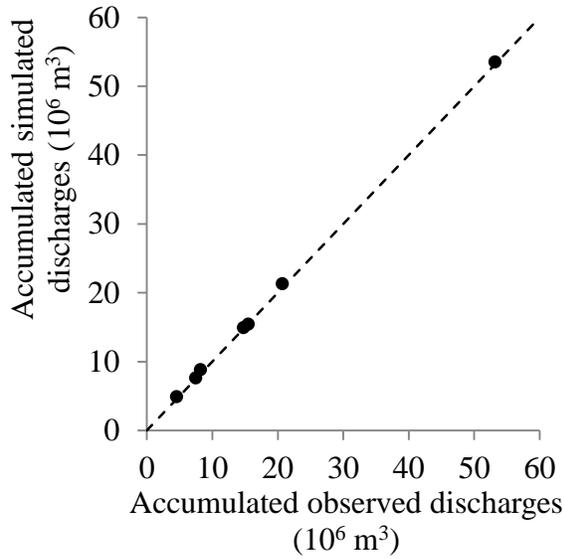
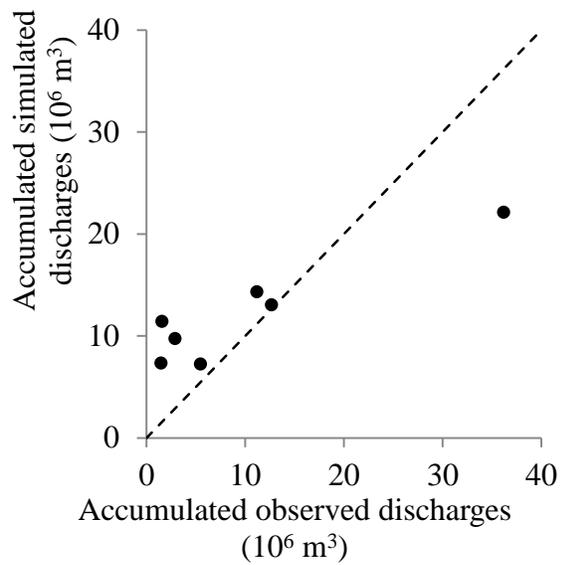
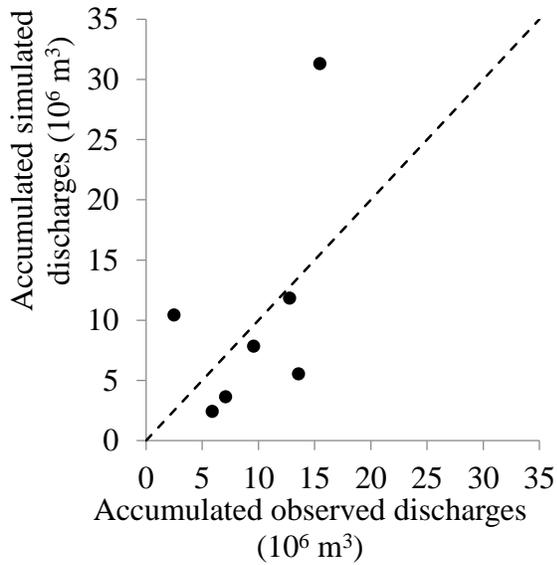


Figura 3. Caudales observados y simulados acumuladas con una línea de 45° para la calibración en los siete eventos: arriba izquierda, subcuena C-11-Oeste. Arriba a la derecha, subcuena C-11-Este y Abajo a la izquierda, la cuena hidrográfica Total C-11.



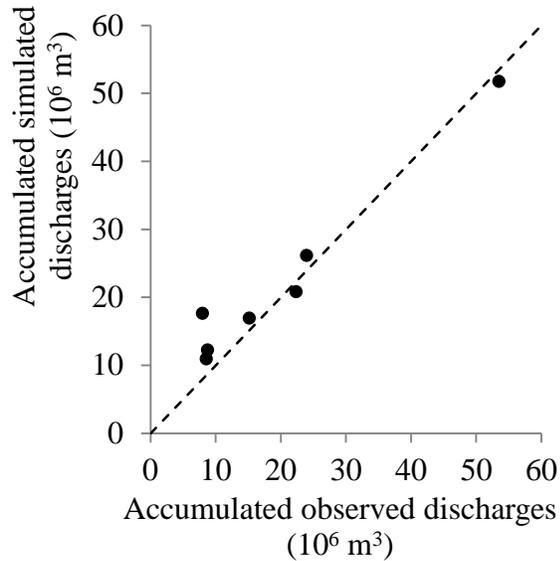


Figura 4. Caudales observados y simulados acumulados con línea de 45o para la validación en los siete eventos: arriba izquierda, subcuenca C-11-Oeste. Arriba a la derecha, subcuenca C-11-Este y Abajo a la izquierda, cuenca total C-11.

Cuadrado de regresión lineal R y Nash-Sutcliffe se calcularon para la calibración y validación del modelo entre las descargas acumuladas observadas y simuladas para los siete eventos (dos periodos) en las subcuencas C11-oeste, C-11-este y en la cuenca hidrográfica total C-11. Los resultados se resumen en la Tabla 1a y Tabla 1b.

Tabla 1a. Regresión lineal y 1b: Nash-Sutcliffe, para calibración y validación en C11-oeste, C-11-este y total C-11.

Tabla 1a

Regresión lineal	Calibración	Validación
C-11-oeste	0.99	0.57
C-11- este	0.98	0.86

Tabla 1b

Nash-Sutcliffe	Calibración	Validación
C-11-oeste	0.98	-2.1
C-11-	0.97	0.57

C-11	0.99	0.95
------	------	------

este		
C-11	0.99	0.92

Conclusiones

El modelo *HEC-HMS* fue calibrado y sus simulaciones de descargas acumuladas validadas con base en dos eventos de tiempo de siete muestras en la cuenca C-11 en el sur de la Florida. El modelo reprodujo el balance hídrico de la cuenca hidrográfica, pero no el momento exacto de los flujos en las estructuras S-9/S9A o S-13. El origen de este desajuste es 1) el funcionamiento de las estructuras no siempre sigue los criterios establecidos para la operación de la bomba, lo que podría causar una gran discrepancia entre los flujos observados y simulados, así como entre las etapas, y (2) la falta de datos precisos sobre la geometría de las secciones transversales del canal C-11. El bombeo en las estructuras S-9/S9A y S-13 está controlado por las relaciones elevación-volumen y la velocidad de flujo en el canal; por lo tanto, datos imprecisos en la sección transversal del canal afectarían el disparo de las bombas. Además, la operación subjetiva de las bombas no puede relacionarse con procesos físicos que resulten en flujos de bombeo que en algunos de los eventos excedieron la precipitación acumulada en la cuenca. La calibración de *HEC-HMS* durante los siete eventos mostró una fuerte consistencia para el parámetro de coeficiente de almacenamiento en cada una de las condiciones de trabajo iniciales *HEC-HMS*, seco, húmedo y normal para C-11-oeste con pequeñas variaciones para C-11-este a través de los siete eventos. La fracción de flujo de base mostró una consistencia moderada con las condiciones de la cuenca a lo largo de los siete eventos en las subcuencas C-11-oeste C-11-este. El cuadrado de regresión lineal R para la calibración entre las descargas acumuladas observadas y simuladas para los siete eventos es 0.99 en la subcuenca C-11-oeste; 0.98 en la subcuenca C-11-este, y 0.99 en la cuenca C-11 total. El modelo de eficiencia Nash-Sutcliffe para la calibración entre las descargas acumuladas observadas y simuladas para los siete eventos es 0.98 en la subcuenca C-11-oeste; 0.97 en la subcuenca C-11-este, y 0.99 en la C-11 total de la cuenca. Por lo tanto, el análisis del modelo calibrado mostró una gran concordancia entre las descargas acumuladas observadas y simuladas; así, a partir del rendimiento de calibración del modelo, concluimos que es posible utilizar los

dos parámetros seleccionados de *HEC-HMS*, a saber, coeficiente de almacenamiento y fracción de flujo base, para representar la respuesta de la cuenca a la lluvia y las condiciones iniciales.

El cuadrado R de regresión lineal para la validación entre las descargas acumuladas observadas y simuladas para los siete eventos es 0.57 en la subcuenca C-11-oeste; 0.86 en la subcuenca C-11-este, y 0.95 en la cuenca total C-11. El modelo de eficacia Nash-Sutcliffe para la validación entre las descargas acumuladas observadas y simuladas para los siete eventos es -2.1 en la subcuenca C-11-oeste; 0.57 en la subcuenca C-11-este, y 0.92 en la C- total de la cuenca hidrográfica. Para la validación, la aplicación de *HEC-HMS* muestra un alto grado de precisión para la simulación del balance hídrico total en la cuenca de Florida C-11, pero no tan bueno para las cuencas hidrográficas C-11-este y C-11-oeste por separado. El origen de este desajuste podría deberse a la falta de información precisa sobre el nivel freático, las contribuciones de infiltración en la parte occidental de la cuenca, los efectos de las mareas en los límites orientales y la falta de información precisa sobre las geometrías del canal para obtener una elevación más precisa relaciones de volumen en las estructuras y un cronograma preciso de las operaciones de la bomba al comienzo de cada evento simulado. La evaluación correcta de las variables enumeradas anteriormente puede mejorar la capacidad del *HEC-HMS* como modelo de confianza para obtener un equilibrio de agua de alta precisión en hidrología urbana. También con el modelo se puede lograr una nueva bomba programada que permita el ahorro en energía debido al hecho de que en cada una de las simulaciones siempre se han tenido bombas en reserva. Además de los resultados obtenidos simulando las descargas acumuladas, se probó la delineación Florida C-11. *HEC-HMS* se diseñó para simular los procesos de precipitación-escorrentía de dendríticos, con una única salida y una sola dirección de flujo. Los cambios se realizaron en el modelo original, que divide la cuenca hidrográfica en dos subcuencas con dos salidas opuestas, y mostraron que es posible utilizar *HEC-HMS* para un escenario hidrológico más amplio inicialmente asumido para el modelo. De aquí en adelante, la delineación de la cuenca del C-11 de Florida mostró diferencias significativas entre las fronteras administrativas y naturales de la cuenca. Debido a las demandas de una gobernanza adecuada de todos los sistemas hídricos que afectan a la población que vive en áreas urbanas vinculadas con cuestiones socioeconómicas y medioambientales, el uso de un modelo de simulación hidrológica puede convertirse en una importante herramienta ambiental que puede gestionar de manera eficiente y efectiva el sistema urbano de agua en todos sus aspectos, como saneamiento, suministro de agua y protección contra inundaciones.

Agradecimientos

Reconocemos la asistencia y agradecemos a las doctoras Chandra Pathak y Sarah Noorjahan (Distrito de Administración del Agua del Sur de la Florida) por los datos utilizados para este estudio.

Referencias

- Amengual, A., Romero, R., Gómez, M., Martín, A., & Alonso, S. (2007). A hydrometeorological modeling study of a flash-flood event over Catalonia, Spain. *Journal of Hydrometeorology*, 8, 282-303.
- Cronshey, R. G., Roberts, R. T., & Miller, N. (1985). Urban hydrology for small watersheds (TR-55 Rev.); hydraulics and hydrology in the small computer age. *Proceedings of the Specialty Conference*, Lake Buena Vista, Florida, August 12-17, W.R. Waldrop (ed.). Hydrology Division-American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.
- Dey, A. K., & Kamioka, S. (Feb, 2007). An integrated modeling approach to predict flooding on urban basin. *Water Science and Technology*, 55(4), 19-29. DOI: 10.2166/wst.2007.091
- Grimmond, C. S., & Oke, T. R. (2002). Turbulent heat fluxes in urban areas: Observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41, 792-810.
- Koussis, A. D., Lagouvardos, K., Mazi, K., Kotroni, V., Sitzmann, D., Lang, J., Zaiss, H., Buzzi, A., & Malguzzi, P. (2003). Flood forecasts for urban basins with integrated hydro-meteorological model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(1), 1-11.
- Merwade, V. (2007). *Tutorial on using HEC-GeoRAS with ArcGIS 9.3*. West Lafayette, USA: Purdue University.
- Manriquez, C., Wilsnack, M., & Li, H. (2009). Rating analysis for pump station S-13 (Technical publication EMA # 451).
- Mitchell, V. G., Deletic, A., Fletcher, T. D., Hatt, B. E., & McCarthy, D. T. (Feb, 2007). Achieving multiple benefits from stormwater harvesting. *Water Science and Technology*, 55(4), 135144. DOI: 10.2166/wst.2007.103
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through

- conceptual models: Part 1 – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Pathak, C. S. (2008). *Volume I, Appendix 2-1: Hydrologic Monitoring Network of the South Florida Water Management District. South Florida Environmental Report*. West Palm Beach, USA: South Florida Water Management District.
- Pathak, C. S. (2011). *Personal Interview*.
- Scharffenberg, W. A. (2001). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS*. Davis, USA: Hydrologic Engineer Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- Shamsi, S. (1997). *Introduction to HEC-HMS. CEEGR 6977: Hydrology*. Ohio, USA: Youngstown University.
- Skinner, C., Bloetscher, F., & Pathak, C. S. (2009). Comparison of NEXRAD and Rain Gauge Precipitation Measurements in South Florida. *Journal of Hydrologic Engineering ASCE*, 14(3), 248-260.
- Tillis, M. G., & Swain, E. D. (1998). *Determining discharge-coefficient ratings for selected coastal control structures in Broward and Palm Beach Counties, Florida* (Report 98-4007). Tallahassee, USA: U.S. Geological Survey: Water-Resources Investigations.
- U.S. Army Corps of Engineers, USACE. (2009). *HEC-HMS 3.4 User's manual*. Davis, USA: Hydrologic Engineering Center.