

# EFFECTO DEL FLUJO LATERAL EN EL MAPEO DE INUNDACIONES EN ZONAS SEMIÁRIDAS, MODELACIÓN BIDIMENSIONAL DEL FENÓMENO

A. I. Pacheco-Guerrero<sup>1</sup>, J. González-Trinidad<sup>1</sup>, H. Júnez-Ferreira y C. Bautista-Capetillo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Recursos Hidráulicos; Universidad Autónoma de Zacatecas, México.  
E-mail: anuard.pacheco@uaz.edu.mx

## Introducción

Mientras que los modelos de simulación de flujo unidimensionales son usados comúnmente para el performance de estudios de inundación y siendo capaces de reproducir algunas características del fenómeno real de inundación (la onda de propagación y difusión por ejemplo) son incapaces de representar la complejidad espacial de los patrones de flujo y la topografía pertinente de la compleja geometría del lecho del cauce así como de los hombros y taludes de este. Los modelos bidimensionales ofrecen una solución a dichas limitantes, dado que son capaces de diferenciar entre las diferentes condiciones hidráulicas en el canal y en las llanuras de inundación además puede incorporar en su mallado la variabilidad espacial de la topografía y el termino de fricción (Horrit, 2002). En la práctica, los modelos bidimensionales representan el enfoque más apto y sofisticado para predecir las llanuras de inundación dadas las condiciones de flujo y la topografía (Horrit et al., 2007).

Estudios en la calibración y validación de modelos bidimensionales de simulación numérica de flujo han demostrado que los enfoques elemento finito y volumen finito, a través de los cuales se resuelven ecuaciones bidimensionales de Saint-Venant (SWC, Shallow Water Equations, por sus siglas en inglés) reproducen la extensión de la inundación observada así como su respuesta hidrodinámica (Horrit y Bates, 2006). Autores como Alho y Altonen (2008) recomiendan los modelos bidimensionales sobre los modelos unidimensionales dado que, a pesar de consumir más capacidad computacional, los modelos 2D ofrecen una mejor exactitud horizontal del área de flujo. No obstante como lo mencionan los autores Chatterjee et al. (2008) los modelos unidimensionales pueden ser de utilidad para estudiar el nivel del agua en cauces, pero si es de particular interés conocer la hidrodinámica del fenómeno, los modelos bidimensionales son los adecuados.

El objetivo de la presente investigación es determinar las diferencias entre dos mapas de inundación, uno considerando la incorporación de flujo lateral durante la simulación bidimensional y otro sin considerar la intervención lateral, ambos con una condición de frontera aguas arriba con el mismo hidrograma.

## Zona de estudio

La investigación se desarrolló en la cuenca experimental Walnut Wulch (WGEW por sus siglas en inglés) con una extensión de 149 Km<sup>2</sup> se encuentra situada en el sudeste del estado de Arizona, Estados Unidos de America y rodea al conocido pueblo Tombstone. Las elevaciones de la cuenca varían de los 1250 a los 1585 msnm (metros sobre el nivel del mar). La tierra de pastoreo y la minería son los principales usos del suelo en la cuenca, seguido por urbanización y áreas de recreación. El cauce principal de la cuenca es un cauce efímero, tributario del Rio San Pedro (Goodrich et al, 2004). El tramo simulado se encuentra entre los vertedores de medición 1 y 2. Históricamente el centro de investigación USDA-ARS Southwest Watershed ha operado la instrumentación y experimentación de la cuenca desde los 1950's (SWRC, 2003).

## Métodos y materiales

La modelación hidrológica se realizó mediante un modelo hidrológico distribuido en ArcGIS ®. La herramienta que se utilizó lleva por nombre Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA por sus siglas en inglés) a través de la cual se dan los elementos de entrada a modelos hidrológicos como Soil and Water Tool (SWAT2000 por sus siglas en inglés) y Kinematic Runoff and Erosion Model (KINEROS2 por sus siglas en inglés). Estos modelos operan a diferentes escalas temporales y espaciales y pueden ser aplicados en un rango de diferentes condiciones para evaluar los impactos del cambio de la cobertura en las respuesta hidrológica y de erosión (Miller et al., 2007). El modelo implementado en AGWA que se usó fue KINEROS2 y es un modelo basado en eventos que estima el escurrimiento superficial (flujo hortoniano), erosión y transporte de sedimentos en flujo de plano, canales o cauces. Las entradas de precipitación al modelo son comúnmente en forma de mediciones puntuales (rain gauge observations) en cualquier tiempo o pares acumulados de lluvia o pares de intensidad, o estimaciones de intensidad de lluvia-radar proporcionadas en escalas de tiempo de decenas de minutos o menos. Los pasos de tiempo computacionales internos se ajustan automáticamente para satisfacer la condición de Courant (Roberts, 2003), y los pasos de tiempo de salida son definidos por el usuario (Goodrich et al., 2012). La Hidrología en KINEROS2 es descrita mediante la ecuación de onda cinemática (Woolhiser et al., 1990). El flujo hortoniano comienza cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración del suelo y cuando supera los efectos de la tensión superficial y llena pequeñas depresiones. Visto a microescala el flujo hortoniano es un proceso tridimensional extremadamente complejo, sin embargo a gran escala puede ser visto como un proceso unidimensional de flujo en el cual el flujo es proporcional a cierta potencia del almacenamiento por unidad de área.

Se utilizó un modelo matemático para solucionar las SWE mediante el enfoque de solución de volumen finito. El modelo utilizado fue Hec-RAS 5.0 (con la capacidad de simular rutinas hidrodinámicas de flujo bidimensional), el modelo fue desarrollado por el cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos (HEC, 2015). Las principales características de la componente bidimensional son:

- Enfoque de solución mediante el volumen finito (solución numérica a las SWE).
- Esquema numérico basado en los esquemas de Gudonov y los solucionadores de Riemann (Shock capturing scheme)
- Uso de una malla no estructurada.

El movimiento de un fluido es gobernado por los principios de conservación de la masa (ecuación de continuidad) y momentum (ecuación de Navier-Stokes). En un plano cartesiano de referencia (x, y, z) dado un volumen de control arbitrario (V) de un fluido y  $\Omega$  como su límite se supone que está presente una superficie libre y el fluido es incompresible con densidad constante  $\rho$  las ecuaciones de continuidad y momentos son:

$$\int_{\Omega} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u} \, d\Omega = 0, \quad \int_V \frac{\partial}{\partial t} (\mathbf{u}) \, dV = \int_V g \, dV - \frac{1}{\rho} \int_{\Omega} p \, n \, d\Omega + \frac{\mu}{\rho} \int_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{n}} \, d\Omega \quad [1]$$

donde  $\mathbf{n}$  es el vector unitario fuera de la condición de frontera  $\Omega$ ;  $\mathbf{u} = [u, v, w]$  es el vector de las componentes de velocidad en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  respectivamente,  $\mathbf{g} = [g_x, g_y, g_z]$  representa el vector de las componentes de las fuerzas externas por unidad de masa,  $p$  es la presión y  $\mu$  es la viscosidad dinámica.

Estas ecuaciones son aplicables para describir el movimiento del agua a superficie libre, es decir bajo los efectos de la gravedad, el vector de fuerza por gravedad  $\mathbf{g}$  es asumido como  $[0, 0, -g]$ , donde  $g$  es la aceleración debido a la gravedad considerada como una constante e igual a  $9.806 \text{ m/s}^2$ . Los ejes  $x$  –  $y$  determinan el plano horizontal, mientras que el eje  $z$  define la dirección vertical, a la cual la elevación de la superficie libre del agua es asociada.

## Resultados y discusión

Las siguientes figuras (1, 2 y 3) muestran la comparación entre los hidrogramas observados y simulados en los vertedores 10, 2 y 1 en WGEW.

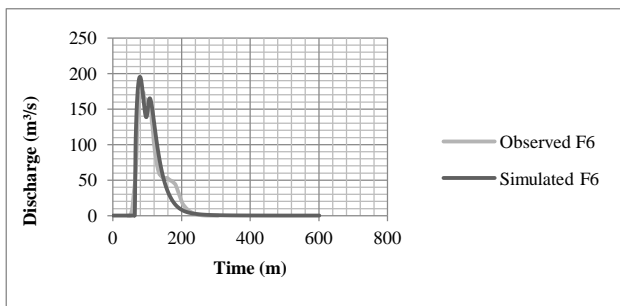


Figura 1.- Hidrogramas en el vertedor de medición 10.

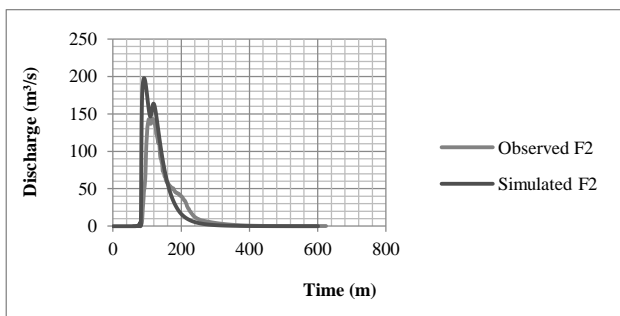


Figura 2.- Hidrogramas en el vertedor de medición 2.

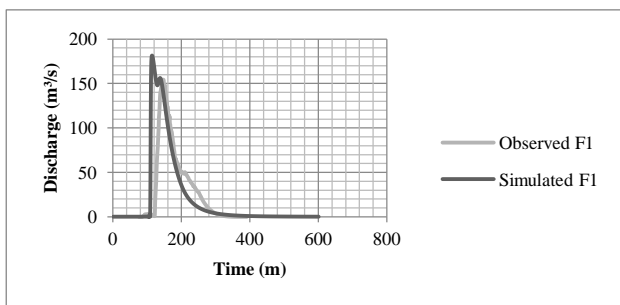


Figura 3.- Hidrogramas en el vertedor de medición 1.

La figura 4 muestra los dos mapas de inundación, el segundo sin considerar la entrada por flujo lateral a la inundación y el primero considerando las entradas laterales.

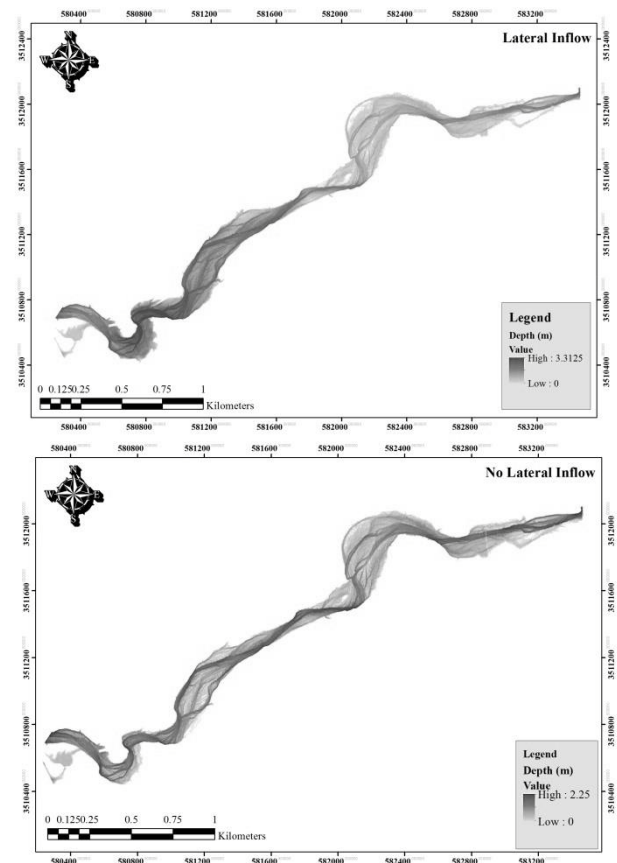


Figura 4.- Mapas de inundación con flujo lateral y sin flujo lateral.

## Conclusiones

Dos modelaciones hidráulicas se realizaron una con entradas de flujo laterales y otro sin entrada de flujo, y ambas con una condición de frontera aguas arriba ambos con una condición de frontera aguas arriba con el mismo hidrograma. Incorporar el flujo lateral impacta de dos formas distintas: atenuando la inundación en un tramo del cauce estudiado e incrementando el nivel de agua en otras partes, creciendo potencialmente el tamaño de la inundación.

## Referencias bibliográficas

- Alho P. and Aaltonen J. (2008). "Comparing a 1D hydraulic model with a 2D hydraulic model for the simulation of extreme glacial outburst floods." *Hydrological Process* 22: 1537-1547.
- Goodrich D.C., Burns I.S., Unkrich C.L., Semmens D.J., Guertin D.P., Hernandez M., Yatheendradas S., Kennedy J.R. and Levick L.R. (2012). "KINEROS2/AGWA: Model Use, Calibration, and Validation." *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 55(4):1561-1574
- Goodrich D.C., Williams D.G., Unkrich C.L., Hogan J.F. and Scott R.L. (2004). "Comparison of Methods to Estimate Ephemeral Channel Recharge, Walnut Gulch, San Pedro River Basin, Arizona." *Water Science and Application*. 9:77-99.
- Horrit M.S. and Bates P.D., (2002). "Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation." *Journal of Hydrology*. 268:87-99
- Horrit M.S., Bates P.D. and Mattinson M.J. (2006). "Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow." *Journal of Hydrology*. 329:306-314.
- Horrit M.S., Di Baldassarre G., Bates P.D. and Brath A. (2007). "Comparing the performance of a 2-D finite element and a 2-D finite volume model of floodplain inundation using airborne SAR imagery." *Hydrological Processes* 21: 2745-2759.