

MODELO BIDIMENSIONAL DE INUNDACIÓN URBANA DE LA CIUDAD DE AZUL (ARGENTINA) CON HERRAMIENTAS DE USO LIBRE, 2ª PARTE

Ignacio Villanueva¹, Guillermo Collazos², Ninoska Briceño² y Martín Blanco²

¹Consultor independiente Recursos Hídricos, España.

²Instituto de Hidrología de Llanuras – C.I.C., Argentina.

E-mail: ivillamadrid@gmail.com, gcollazos.ihlla@gmail.com

Introducción

En la actualidad la simulación de inundaciones con modelos matemáticos para las ecuaciones de Saint Venant, o de aguas poco profundas, tanto en una como en dos dimensiones, cuenta con un gran número de códigos para su ejecución, tanto en el ámbito académico como en el de consultoría profesional, pero no son tantos los códigos robustos y de libre distribución disponibles.

Si en el primer trabajo homónimo se ha empleado el software libre IBER (2018, versión 2.4.3) para modelar el efecto y la extensión de las inundaciones del arroyo del Azul en la planta urbana de la ciudad homónima, ubicada en el centro de la pampa bonaerense (Fig. 1 izq.) en éste se emplea el software libre HEC-RAS (2018, versión última 5.0.4, bidimensional y transitorio) y una versión beta de RiverFlow2D (2018, versión CPU 6.2.10) ejecutada dentro del propio entorno de QGIS (2018, versiones 2.18.6 y 3.0.3).

El arroyo atraviesa la ciudad con dirección general Sur-Norte, y se modeló una banda a ambos lados del arroyo marcada con línea gris gruesa, coincidente con la zona afectada por los desbordes (Fig. 1 der.).



Figura 1.- Izq.: ubicación de la ciudad de Azul; Der.: trama urbana, arroyo y cuadrángulo del área modelada.

Modelo del terreno y rugosidad

Se modela un tramo de aproximadamente 8000 m de curso del arroyo, con una pendiente media de 0,0014; desde el sector periurbano sur al sector periurbano norte.

La elevación del terreno (en los cruces de calles y en otros puntos de interés) y las 20 batimetrías utilizadas se obtuvieron mediante relevamiento con GPS diferencial, datos que fueron adecuadamente procesados y corregidos.

También se relevaron los principales puentes, que se incorporan al modelo de forma simplificada.

Se desarrollaron subrutinas específicas para interpolar las cotas de la parte urbana del dominio, para representar por interpolación la elevación de las calles y veredas de forma realista. Las áreas internas a la línea de edificación se retiraron del modelo para minimizar el número de elementos de cálculo de la malla. Separadamente se reconstruyó parte del cauce mediante el propio interpolador de secciones de HEC-RAS a

intervalos regulares de 20 metros en el propio eje del cauce y fue acoplado con la llanura de inundación mediante la herramienta preprocesadora de terrenos digitales de RAS- Mapper.

La revisión de los puntos GPS de la llanura de inundación y casco urbano, y de las imágenes de soporte remoto (SRTM y Google-Maps), fué realizada con el Sistema de Información Geográfica libre QGIS (2018), interpolando la ausencia de datos mediante herramientas de triangulación y consultas a las cartas topográficas a escala 1:50000 del Instituto Geográfico Nacional (IGN) argentino.

En el trabajo de modelización numérica se presta especial atención a la sensibilidad de los modelos respecto a la batimetría regenerada del cauce, el mallado de la red (Gil et al. 2011) incluyendo la superficie de inundación en suelo urbano, y las posibles topologías de mallado para incluir los diversos puentes y otras estructuras hidráulicas o áreas de flujo dinámico o de almacenamiento en la zona de interés.

El área modelada se zonificó por su rugosidad, aplicando valores típicos a las zonas con arboleda, vegetación corta (césped o pasto cortado), vegetación natural y asfalto/cemento.

Ecuaciones modelizadas

En la formulación conservativa en dos dimensiones, las ecuaciones en derivadas parciales acopladas, no lineales, en aproximación de aguas poco profundas son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = Q_l \quad [1]$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad [2]$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + \frac{\partial huv}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad [3]$$

Siendo h el calado o tirante, (u, v) las componentes de la velocidad en el plano (X, Y) , S_0 la pendiente del lecho, S_f la fricción siguiendo la ley de Manning, y Q_l el aporte puntual de caudal en los puntos fuente o detracción en los sumideros. La ecuación [1] representa la conservación de masa de fluido en cada celda de la malla y la [2] y [3] son las de momento lineal.

La resolución numérica de las anteriores ecuaciones exige métodos numéricos sofisticados capaces de capturar frentes o discontinuidades viajeras (saltos hidráulicos y ondas de avenida o ruptura de presa) sobre cauces inicialmente secos o de topografía muy irregular; Iber (2018, ya usado en la primera parte de este estudio) y RiverFlow2D (2018) usan resolvers aproximados explícitos para el problema de discontinuidad de Riemann (Toro, 2001) en mallados estructurados y no estructurados de volúmenes finitos triangulares, mientras que HEC-RAS (2018) usa un método implícito en mallas estructuradas cuadrangulares o cartesianas que incluye celdas irregulares de hasta ocho lados en los límites del dominio o break-lines, o en las proximidades de polígonos con mallado más fino. Esta última versión de HEC también permite un paso

de tiempo variable o adaptado al criterio explícito de CFL <1 , lo que permitiría su comparación directa con Iber y RiverFlow2D, en el dominio temporal, aunque en el dominio espacial no es posible crear un mallado único o común para los tres. No obstante, Iber puede importar un mallado regular de HEC y triangularizarlo (RTIN), y también importar un mallado no estructurado (flexible o TIN) con varias densidades de triangulación, generado por Gmsh, mallador de Delaunay disponible en el plugin QGIS de RiverFlow2D.

Validación de los modelos

Los modelos construidos se validaron comparando la superficie alcanzada por el agua en la inundación de 2012, que fue observada en el terreno.

En este estudio no se ha incluido el aporte de caudal por los desagües superficiales y subterráneos de la precipitación caída sobre la ciudad, sino sólo el tránsito del agua que trae el arroyo en su ingreso a la ciudad.

Se estimó que un mallado base de 5 metros es óptimo como punto de partida para reproducir con precisión los efectos de la inundación de una punta de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ en un tiempo razonable de menos de 3 horas en un ordenador sobremesa de cuatro procesadores AMD A10-7800 Radeon R7, de 64 bits, a 3.5 GHz, y 16 Gb de RAM. Considerando como referencia la simulación en malla Cartesiana de HEC con celda base de superficie 25 m^2 , las simulaciones de diferentes mallados triangulares con lado mínimo 5m: RTIN de Iber (primera parte del estudio), TIN RiverFlow2D y TIN de Iber (segunda parte del estudio), se encuentran en un rango inferior al 13% de exceso de tiempo computacional respecto a la de HEC. Respecto a la superficie de extensión las diferencias son menores (inferiores al 10%), ver por ejemplo la figura siguiente del contraste entre Iber y RiverFlow2D con el mismo mallado TIN.



Figura 2.- Diferencia de la superficie máxima de inundación (contorno negro en los bordes) entre Iber y RiverFlow2D en un mallado no estructurado TIN de lado promedio 5 metros.

Conclusiones

En esta segunda parte del estudio de inundación de la ciudad de Azul, por medio de herramientas de software libre, se incluyen la última versión del software HEC-RAS 5.0.4, y el plugin para QGIS de RiverFlow2D 6.2.10. Con los tres (Iber 2.4.3 incluido en la primera) es posible realizar un análisis más apropiado en el dominio de coste computacional porque todos ellos están sujetos al criterio de límite de paso temporal CFL, aunque HEC-RAS puede relajarlo en base a su formulación implícita.

La nueva optimización de la paralelización del cálculo interno de HEC-RAS 5.0.4 mejora levemente (13%) las disponibles en Iber y RiverFlow2D, ambos CPU, aunque la posibilidad de usar los procesadores de una tarjeta gráfica o GPU con RiverFlow2D (no usada en este trabajo) lo habilita como la opción potencialmente más veloz. Las posibles diferencias de

superficie de inundación en el caso analizado son más relativas a la diferencia de geometría de la celda base que al propio modelo numérico de resolución. Por tanto, a partir de este caso es difícil extrapolar o aconsejar sobre la decisión de usar mallados regulares cartesianos (HEC-RAS) frente a irregulares estructurados (RTIN de Iber) o no-estructurados (TIN de Iber y RiverFlow2D), en otros escenarios de resoluciones inferiores a 10 metros y con la posibilidad de emplear múltiples densidades de mallado en el mismo dominio, porque además las herramientas analizadas de preprocesado con QGIS (Gmsh en RiverFlow2D) y HEC-RAS (Ras-Mapper), y de importación de mallado en Iber son muy flexibles, suficientemente maduras, robustas, y asequibles como para no ignorar de partida ninguna posibilidad.

Sin duda, en el futuro se irá ampliando el catálogo de escenarios de estudio con las herramientas de partida descritas, por los mismos autores del trabajo y la comunidad especialista.

Referencias bibliográficas

Gil, C., Villanueva, I. and Godiksen, P. (2011) "Efectos de la cartografía sobre la modelización hidráulica bidimensional de crecidas" II Jornadas Ingeniería del Agua, Barcelona, Octubre, 2011.

Eleuterio F. Toro, (2001). "Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows". Wiley; 1st edition (2001-03-23).

Gmsh software: <http://gmsh.info/doc/texinfo/gmsh.html> (Accedida Mayo 2018).

HEC-RAS software: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> (Accedida Mayo 2018).

Iber software: <http://www.iberaula.es> (Accedida Mayo 2018).

QGIS software: <https://qgis.org> (Accedida Mayo 2018).

RiverFlow2D software: <http://www.hydronia.com/> & <http://ghc.unizar.es/> (Accedidas Mayo 2018).