

**SIMULACION DE INUNDACIONES EN LLANURAS
APLICACIÓN A LA CUENCA DEL ARROYO SANTA CATALINA - AZUL**

**Marcelo Vénere[§], Alejandro Clausse[§], Diego Dalponte[§], Pablo Rinaldi[§],
Georgina Cazenave^a, Marcelo Varni^a, Luis Vives^a, Eduardo Usunoff^a**

[§] *CNEA-CONICET-CIC-Universidad Nacional del Centro, 7000 Tandil.*

^a *Instituto de Hidrología de Llanuras, CIC-UNICEN*

venerem@exa.unicen.edu.ar

Palabras clave: Inundaciones, Hidrología, Escurrimiento superficial.

Resumen: *Se desarrolló el simulador AQUA II de escurrimientos en llanuras. El trabajo muestra el progreso del proyecto AQUA, basado en la aplicación de autómatas celulares a modelos digitales de elevación. El simulador fue aplicado a la cuenca del arroyo Santa Catalina, afluente del arroyo Azul en la provincia de Buenos Aires. Se construyó un modelo de elevación de la zona utilizando interferometría radar con un tamaño de celda de 80 metros, resultando en una discretización de 70,000 celdas. El modelo fue calibrado sobre tres eventos reales de ondas de precipitaciones seguidas de escurrimientos desde las zonas serranas hasta las llanuras adyacentes. El ajuste pudo realizarse asignando un valor uniforme y constante tanto para el coeficiente de infiltración como para el de escurrimiento del terreno y una variación cúbica con la altura de agua para el caso de las celdas del arroyo. El modelo así obtenido reproduce con buena precisión el comportamiento de la cuenca ante eventos de diferentes intensidades, y los anegamientos numéricos resultantes son muy similares a los observados en base a imágenes satelitales.*

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos hidrológicos en grandes llanuras se diferencian considerablemente de aquellos que caracterizan áreas serranas o de montaña (terrenos inclinados en general). La estructura del ciclo hidrológico y las ecuaciones de balance hídrico para una cuenca dada no se ven afectadas por las condiciones morfológicas, geológicas y del suelo, pero la ponderación de los diversos componentes difiere: los flujos de agua vertical prevalecen sobre los horizontales. La característica más común de las llanuras es que sus superficies no tienen pendiente o ésta es mínima. El terreno se encuentra cubierto de depresiones locales en vez de contener un sistema de drenaje natural adecuadamente desarrollado. La energía del sistema se encuentra determinada por la diferencia de altura entre los puntos más altos de la cuenca y la sección de desagüe, la cual es muy baja.

Las precipitaciones que llegan a la superficie se almacenan en las depresiones, formando encharcamientos poco profundos y pantanos. En terrenos con pendientes pronunciadas este almacenamiento es ínfimo, pero el volumen de agua acumulado en las depresiones de las llanuras sobrepasa a los otros integrantes de la ecuación de balance hídrico. Una parte considerable de este volumen de agua se evapora o se infiltra [Varni et al., 1999]. El escurrimiento superficial proveniente de áreas serranas aumenta la cantidad de agua sobre la llanura. Los cursos de agua provenientes de tierras altas desaparecen, y el agua que acarrear fluye sobre la superficie (varios ríos de la Provincia de Buenos Aires son ejemplo de ello). El agua que excede la capacidad de almacenamiento de las depresiones se mueve como una lámina, muy lentamente sobre la superficie. La infiltración es generalmente alta debido a la gran duración del estancamiento de estas aguas. Dada la mínima pendiente del terreno, una consecuencia importante se deriva de este hecho: las actividades humanas modifican el equilibrio de energía de las llanuras; por lo tanto, cualquier modelo debe poder incorporar estas acciones (caminos, canales, principalmente).

El principal requerimiento para un mejor entendimiento de la hidrología de las llanuras es un análisis detallado del proceso de almacenamiento en las depresiones, en el suelo y en las zonas subterráneas. Entonces, un modelo que simule el proceso dominante del agua superficial en llanuras debe, 1. Estar distribuido espacialmente (los flujos lineales no están bien definidos) y, 2. Incorporar una buena descripción espacial de las depresiones, esto es, un modelo digital de elevación preciso con un tamaño de grilla muy pequeño.

Se debe hacer una segunda elección: un modelo de simulación continua o un modelo de simulación de eventos discretos. Porque el primero requiere la introducción de componentes para tratar la evapotranspiración y las zonas saturadas e insaturadas, y porque la información detallada sobre la dinámica subsuperficial del agua en grandes llanuras rara vez está disponible, se eligió un modelo de simulación de eventos discretos.

En la próxima sección se describe con cierto detalle este modelo, al cual se le ha dado el nombre de AQUA. El estudio del comportamiento del mismo con casos simples de solución conocida puede verse en [Venere, Clause, 2000]; en este trabajo se presenta su aplicación y ajuste a un caso real correspondiente a una sub-cuenca del arroyo Azul en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. En la sección resultados se incluye una comparación de las simulaciones con hidrogramas y anegamientos medidos en terreno.

2 EL MODELO AQUA II

Freeze y Harlan (1969) propusieron el concepto básico de modelos de base física en hidrología: La cuenca debe ser discretizada y las ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento espacial y temporal del proceso hidrológico se resuelven por métodos numéricos. El SHE [Abbot et al, 1986] es un modelo muy conocido producido de acuerdo a estas premisas. Generalmente la aplicación de esta clase de modelos está restringida a pequeñas cuencas. Al incrementar la escala, es apropiado incrementar las abstracciones. El costo de una descripción detallada puede poner límites debidos a la capacidad de memoria y tiempo de CPU requeridos para su procesamiento. En zonas de planicie o llanura, es de alta prioridad contar con una muy buena descripción del terreno, entonces es conveniente mantener una discretización detallada con una formulación matemática más simple basada en la teoría de Autómatas Celulares (AC) en lugar de las ecuaciones diferenciales correspondientes.

2.1 El Autómata AQUA II

Describamos el terreno físico en términos de un modelo digital de elevación (MDE), que consiste en un campo escalar, $h(x,y)$, asociado a una grilla de dos dimensiones. El campo $h(x,y)$ representa la coordenada vertical promedio de cada celda espacial. Siguiendo el paradigma de AC, el estado de la superficie de cada celda se determina por un escalar $w(x,y)$, representando en nuestro caso el nivel de agua en la celda (x,y) .

Ahora imaginemos a las celdas conectadas por esclusas que se abren y se cierran alternativamente, permitiendo que el agua fluya dirigida por las diferencias de elevación entre celdas. Además, se pueden asociar a cada celda fuentes y sumideros de agua para tener en cuenta la infiltración, la precipitación, y los flujos de ingreso y egreso debidos a la filtración y la evapotranspiración.

El flujo superficial se simula aplicando una regla básica de distribución a porciones aisladas del dominio espacial. La partición básica es un conjunto de 3x3 celdas (Fig. 1).

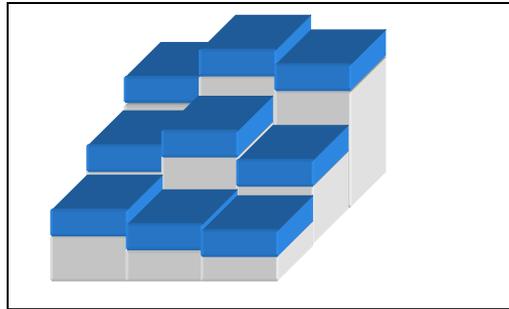


Figura 1-Partición básica.

De acuerdo a la regla, el agua se distribuye dentro de cada partición básica de acuerdo con el siguiente procedimiento:

1. Ordenar los índices de las celdas de acuerdo a la altura de terreno (ver Figura 2), esto es:

$$h_1 \leq h_2 \leq \dots \leq h_9 \quad (1)$$

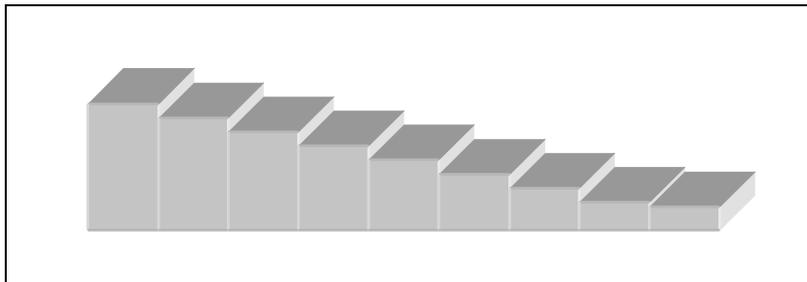


Figura 2-Celdas ordenadas por altura.

2. Sea w_i^{old} el nivel de agua actual de la celda i .
3. Calcular la altura de la superficie de equilibrio, H , como la altura que el agua alcanzaría si el total de agua contenida en la partición drenara hacia las ubicaciones más bajas (Fig. 3), esto es:

$$H = \frac{W + \sum_{i=1}^k h_i}{k} \quad (2)$$

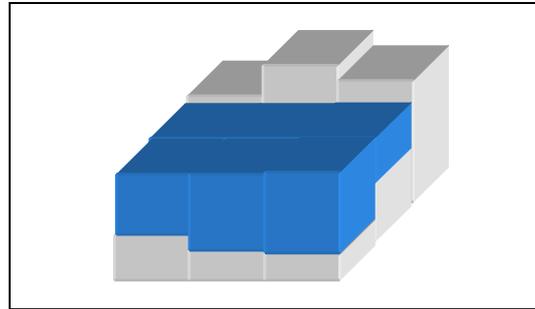


Figura3-Superficie de agua en equilibrio.

donde W es el volumen de agua contenido en la partición dividida por el área de la celda, que se puede calcular como:

$$W = \sum_{i=1}^9 (w_i^{old} - h_i) \quad (3)$$

y k es el número de celdas que permanecen mojadas luego de que el agua drene hacia abajo, el cual es el máximo índice de celda que satisface:

$$W \geq \sum_{i=1}^k (h_k - h_i) \quad (4)$$

4. Calcular el nivel de agua escurrida, w_i^{drain} , que tendrían las celdas si el volumen de agua contenida en la partición drenara hacia las ubicaciones más bajas (Fig. 3), esto es:

$$\begin{aligned} w_i^{drain} &= W \quad \text{if } i \leq k \\ w_i^{drain} &= 0 \quad \text{if } i > k \end{aligned} \quad (5)$$

5. Calcular el nuevo nivel de agua de las celdas como la combinación lineal de w_i^{old} , y w_i^{drain} :

$$w_i^{new} = \alpha w_i^{old} + (1 - \alpha) w_i^{drain} \quad (6)$$

donde α es un parámetro de relajación ($0 < \alpha < 1$) que representa la resistencia al flujo, y se modela como un atributo de la celda. En la (Eq. 6), el valor de α corresponde a la celda central de la partición. En principio, puede asignarse a cada celda un valor de α diferente. Además, el campo α puede tratarse como función del nivel de agua con el propósito de modelar situaciones especiales. Esto último es una poderosa herramienta para simular cursos de agua.

2.2 Regla de flujo superficial

El flujo superficial se simula aplicando secuencialmente la regla de distribución de agua a 9 particiones del dominio espacial, de manera que cada celda ocupe todas las ubicaciones posibles en la partición básica de 3x3. La figura 4 muestra la secuencia de particiones.

El paso del tiempo actúa una vez que la regla de distribución se aplica a la secuencia completa de las nueve particiones. El conjunto de distribuciones inmediatas no se considera “observable”, y no debería ser visto como tiempos intermedios, sino sólo como cálculos auxiliares (similar a los pasos intermedios en el método de Runge-Kutta).

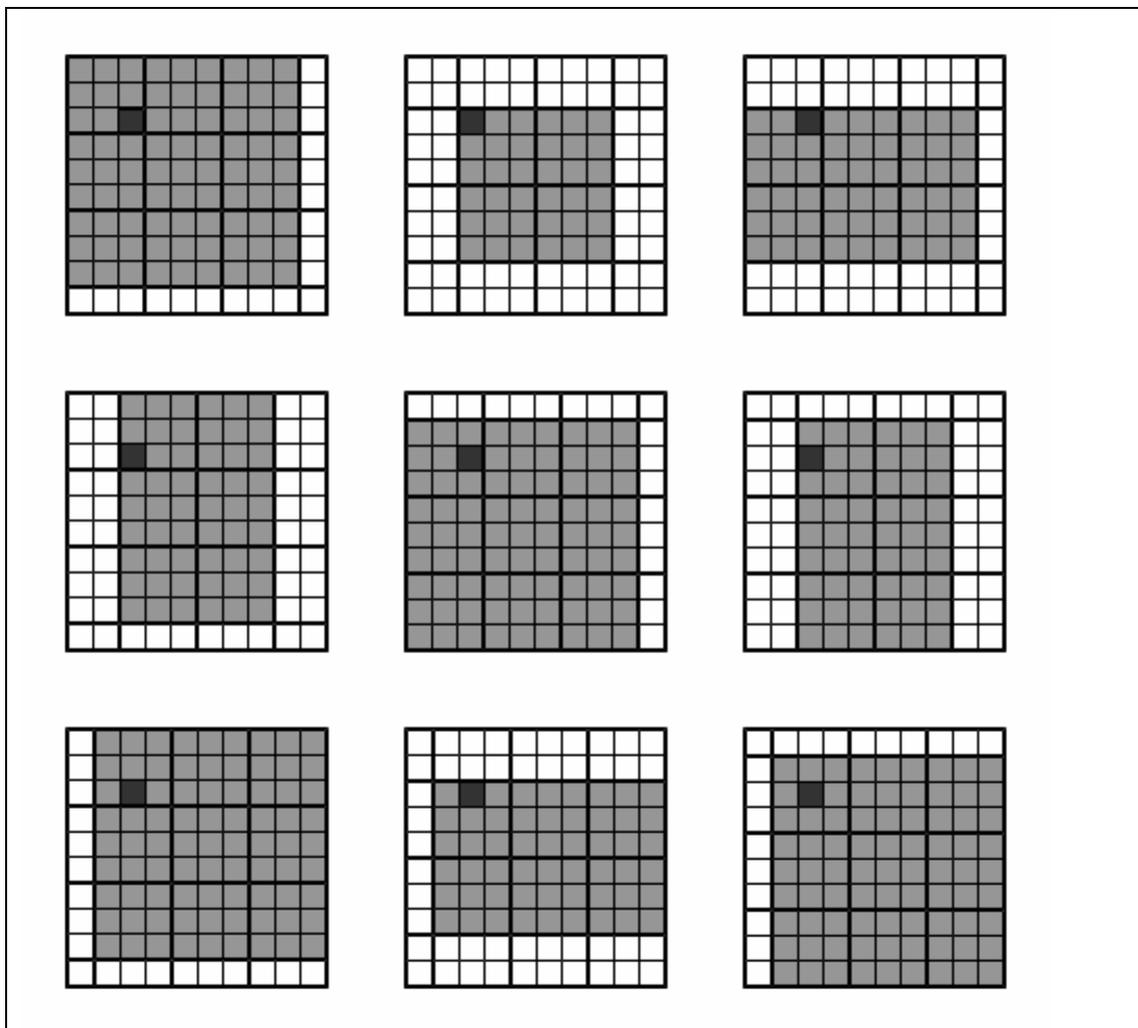


Figura 4-Secuencia de particiones del dominio espacial en conjuntos de 3x3 celdas.

2.3 Fuentes de agua

Los incrementos o reducciones del nivel de agua de las celdas, debidos a los procesos de precipitación e infiltración, se modelan como fuentes. Las precipitaciones simplemente se suman a cada celda de acuerdo a un esquema temporal determinado, que puede representar mediciones actuales o escenarios hipotéticos.

El proceso de infiltración es más complicado que la precipitación, porque su tasa depende del grado de saturación del suelo, el cual a su vez cambia cuando el agua se infiltra. Para simular este efecto, es necesario llevar el registro $I(x,y)$, del agua infiltrada en cada celda. El volumen de infiltración en un paso del tiempo n se calcula como:

$$I_n(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } w(x, y) = 0 \\ w(x, y) & \text{if } 0 < w(x, y) < b(x, y)I_{n-1}(x, y) + I_o(x, y) \\ b(x, y)I_{n-1}(x, y) + I_o(x, y) & \text{if } w(x, y) \geq b(x, y)I_{n-1}(x, y) + I_o(x, y) \end{cases}$$

donde $I_o(x,y)$ es la infiltración base, y $b(x,y)$ es un coeficiente que representa las características de saturación del suelo ($0 < b < 1$). Las regiones con valores de b inferiores se saturan más rápidamente.

2.4 Simulación de cursos y ríos

Los cursos y ríos se pueden simular en el entorno AQUA reduciendo la resistencia al flujo a lo largo de los canales de agua correspondientes. Por consiguiente, el valor actual de α en cada celda ubicada a lo largo del cauce de un río se calcula como una función del nivel de agua local, que se considera como la influencia que tiene la forma del lecho del río sobre el caudal de flujo.

Como existen numerosos factores que afectan esta relación (perfil del lecho, características del suelo, vegetación acuática, curvatura, etc.) un modelo completo requeriría la definición de una función para cada celda. Sin embargo, esto es prácticamente imposible cuando se modelan grandes extensiones de terreno. Como alternativa, se pueden definir familias regionales de funciones- α , cuyos parámetros pueden determinarse comparando cálculos numéricos con datos experimentales.

Una familia de funciones que muestra buena concordancia con las mediciones de caudal en cursos del sur de las Pampas Argentinas es la siguiente:

$$a_{river} = a_o \left(\frac{w - w_o}{w_o} \right)^n \quad (7)$$

donde α_o es el parámetro de resistencia al escurrimiento sobre el río, y w_o y n son parámetros constantes.

2.5 Condiciones de Contorno

Se aplican condiciones de contorno abiertas al límite externo de la región simulada. Esto se implementa añadiendo un borde auxiliar que consiste en dos líneas de celdas, con elevación substancialmente inferior al terreno adyacente (Fig. 5). El volumen de agua contenida en el borde añadido se elimina luego de cada paso del cálculo, para evitar acumulaciones a largo plazo.

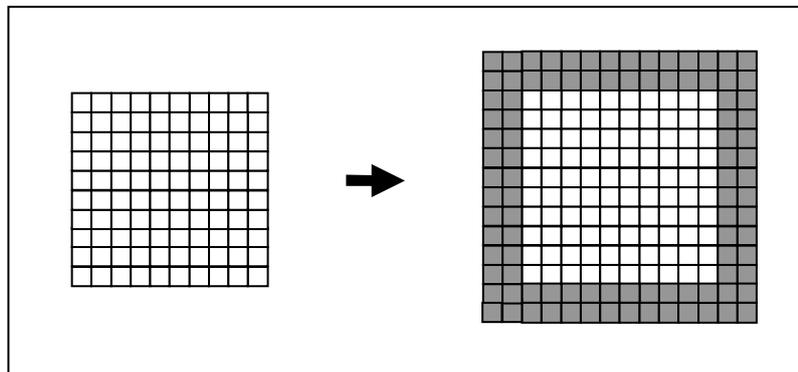


Figura 5- Condiciones de contorno, bordes auxiliares.

3 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA ESTUDIADA

El área de estudio está ubicada en el centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, entre las latitudes Sur $36^{\circ} 8'$ y $37^{\circ} 22'$, y entre las longitudes Oeste $58^{\circ} 49'$ y $60^{\circ} 10'$. Su extensión es de aproximadamente 150 Km. de largo en la dirección Sudoeste – Noreste, y 40 Km. de ancho. Consiste de una extensa planicie y una zona de pequeñas sierras en el límite sur, donde nace el arroyo Azul. Las pendientes típicas son del 5% en la zona sur y menos del 0,2% en la parte más llana (Sala et al., 1987).

La cuenca de Azul, al igual que toda la región Pampeana, está escasamente poblada. La mayoría de los habitantes viven en zonas urbanas. Los establecimientos agropecuarios entre las ciudades ocupan de 100 a 500 hectáreas. La tierra se utiliza principalmente para la ganadería y la agricultura. El nivel de producción es muy alto. Las inundaciones son causadas principalmente por lluvias intensas y, en menor grado, por grandes volúmenes de descargas provenientes de zonas altas. La precipitación promedio es de 900 mm/año. Sin embargo, en los últimos treinta años las lluvias aumentaron hasta 1200 mm/año. Los picos diarios de mayor intensidad ocurren en otoño y en la primavera alcanzando valores del orden de los 100

a 150 mm/día. En los períodos secos, la mayor parte del exceso de agua en el área desaparece debido a la intensa evapotranspiración.

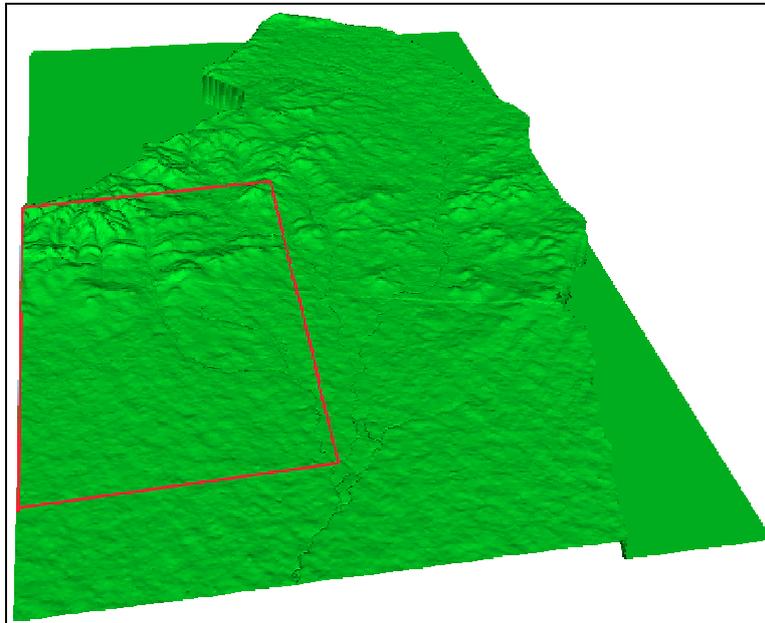


Figura 6a-Modelo digital de elevación de la zona alta del río Azul.

Durante las precipitaciones intensas, la lluvia no se infiltra en el suelo porque éste se encuentra saturado. El exceso de agua provoca entonces anegamientos comenzando en las pequeñas depresiones. Cuando se producen anegamientos en las zonas altas, se cavan pequeños canales hacia zonas más bajas para transferir el agua río abajo. Esta práctica tradicional genera disputas con los propietarios de tierras vecinas. No hay colectores naturales para drenar tales excesos. El agua se mantiene sobre el área durante un tiempo prolongado debido a las pendientes bajas y a que los procesos hidráulicos predominantes son verticales en vez de horizontales.

El río Azul tiene dos tributarios: los arroyos Videla y Santa Catalina. En la figura 6a puede verse el MDE construido para esta región utilizando interferometría radar. El modelo AQUA se calibró primero con los datos del arroyo Santa Catalina, y estos son los resultados que se incluyen en este trabajo. El MDE correspondiente se muestra en la figura 6b y comprende un área de aproximadamente 28 Km. por 16 Km.

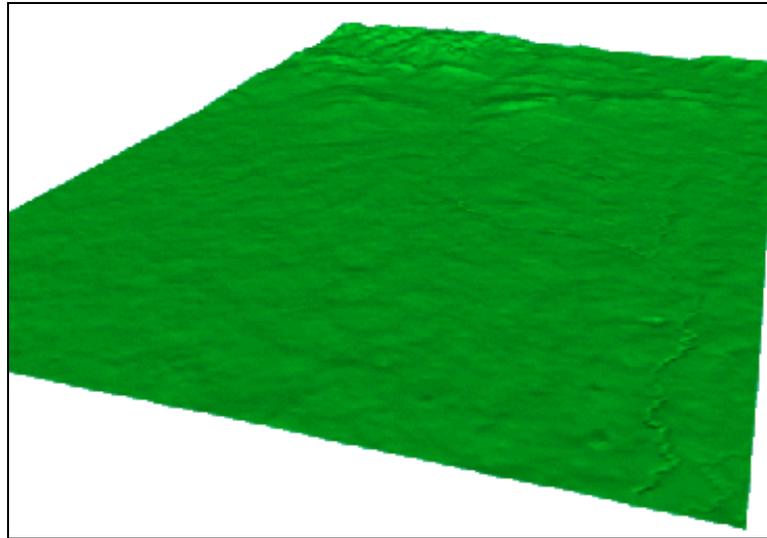


Figura 6b-Modelo digital de elevación del arroyo Santa Catalina.

4 AJUSTES Y RESULTADOS

Para este ajuste se utilizaron tres eventos de crecida correspondientes a tormentas de fechas Mayo-2002, Agosto-2002 y Octubre-2002. Las mismas son de distintas características, difiriendo en duración, intensidad y estado del suelo al inicio del evento. Los datos disponibles para estos casos consisten en:

- Totales de precipitaciones divididos por zonas provenientes de la red de pluviómetros distribuidos en la cuenca.
- Distribución temporal de la lluvia proveniente de los pluviógrafos ubicados en los extremos de la cuenca alta de Azul.
- Hidrogramas de salida del arroyo Santa Catalina provenientes de los datos de altura registrados en la sección de control y extrapolados en base a la curva de relación H/Q obtenida con los aforos.
- Estado de humedad del suelo antecedente a cada evento: Valores de nivel freático.

El ajuste se realizó modificando los parámetros del modelo (coeficientes de infiltración y escurrimiento del terreno y coeficiente de escurrimiento del arroyo) de forma de reproducir el comportamiento del arroyo en las diferentes crecidas. Los resultados de las simulaciones realizadas se muestran como hidrogramas de salida y se comparan con las mediciones observadas. Se detallan a continuación los resultados obtenidos para cada evento

Octubre-2002

Se trató de un evento relativamente intenso y de corta duración, característico de esta época del año (primavera). La figura 7 muestra los puntos del hidrograma medido con sus

correspondientes barras de error y en línea continua el hidrograma simulado. También se incluyen en el gráfico las precipitaciones medidas en cada hora con el pluviógrafo.

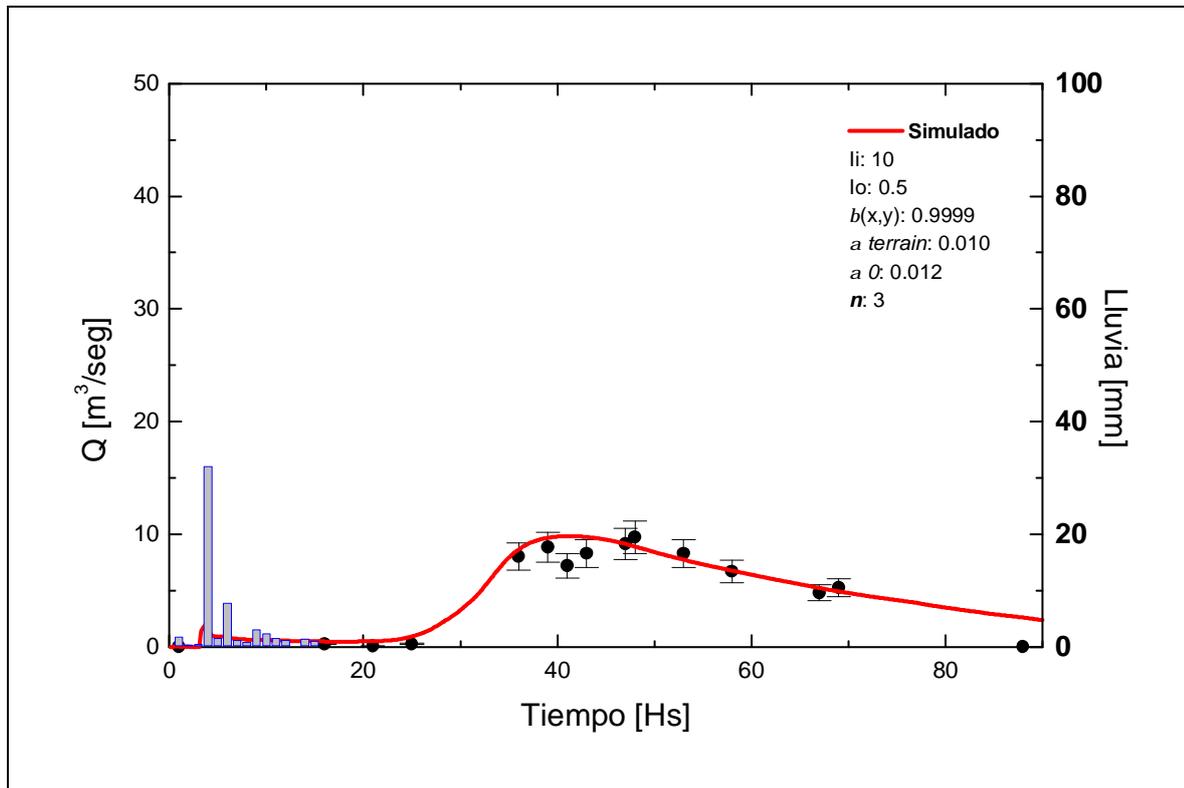


Figura 7-Hidrograma del evento de Octubre de 2002. Los puntos indican el caudal observado a lo largo del tiempo y la línea continua es el hidrograma simulado por AQUA. Las barras indican los milímetros de agua precipitados en cada hora (hietograma).

El ajuste se realizó utilizando un valor de $\alpha_{terrain}$, el parámetro de resistencia al flujo, de 0.010 correspondiente, para el ejemplo, a una cobertura alta del suelo, y un valor de 0.012 para el río. Los coeficientes de infiltración utilizados son $I_i=10$, $I_o=0.5$, y $b(x,y)=0.9999$.

Agosto-2002

Se trata de un evento típico de la época invernal, con precipitaciones continuas durante un cierto período de tiempo y un suelo relativamente saturado de humedad.

El ajuste se logró utilizando un valor de $\alpha_{terrain}$ de 0.013, correspondiente a una baja presencia de vegetación y el mismo valor que el evento previo para α_0 de 0.012. Los coeficientes de infiltración utilizados son $I_i=6$, $I_o=0.5$, y $b(x,y)=0.9999$.

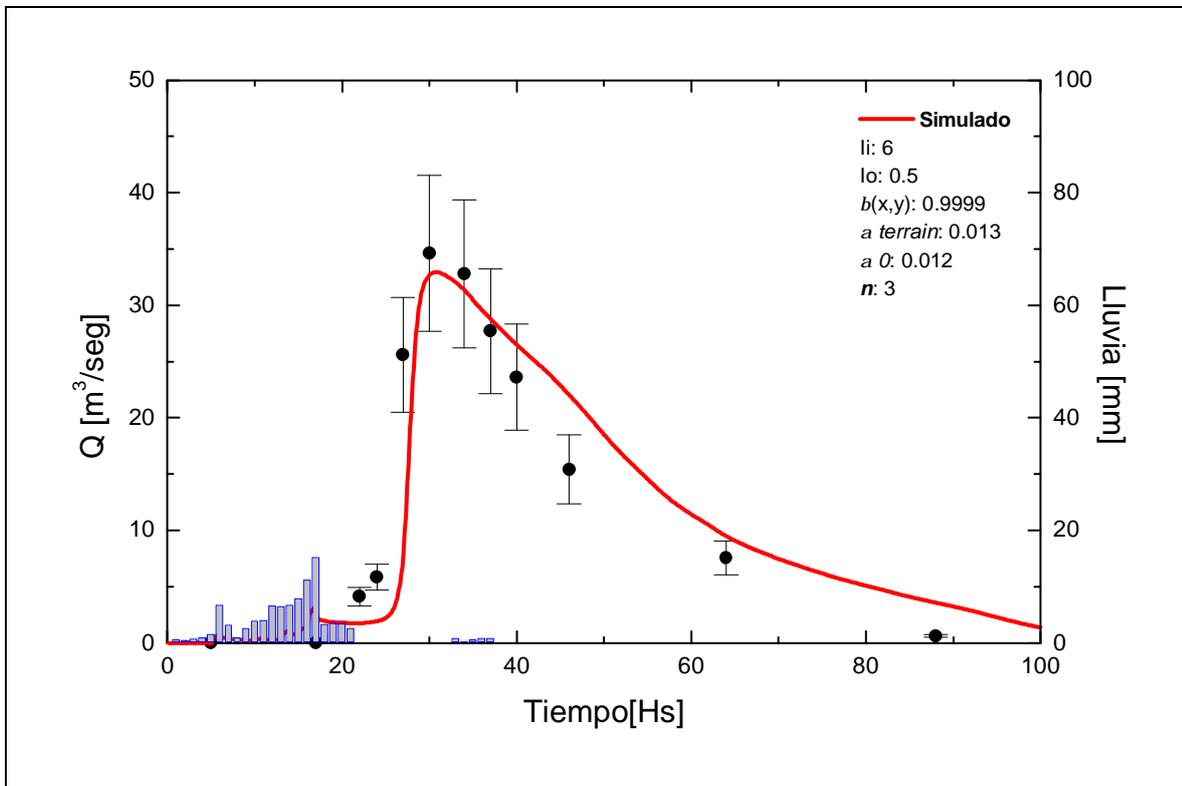


Figura 8 -Hidrograma del evento de Agosto de 2002. Los puntos indican el caudal observado a lo largo del tiempo y la línea continua es el hidrograma simulado por AQUA. Las barras indican los milímetros de agua precipitados en cada hora (hietograma).

Mayo-2002

Este evento resulta muy interesante porque se compone de dos sub-eventos consecutivos separados por 80 horas y donde la primera lluvia satura gran parte de la capacidad de absorción del suelo cambiando las condiciones de humedad para el segundo sub-evento. El modelo de infiltración que incorpora AQUA permite tratarlo como uno solo y reproducir las dos crecidas con precisión. En los modelos que utilizan hietogramas netos calculados en base a números de curva como el HEC-HMS resulta muy difícil simular estas situaciones, ya que en general se logra reproducir correctamente uno de los picos de crecida, pero no el segundo.

El ajuste se obtuvo usando un sólo valor para los dos $\alpha_{terrain}$ y α_0 de 0.012 y coeficientes de Infiltración $I_i=11$, $I_o=0.5$, y $b(x,y)=0.9999$.

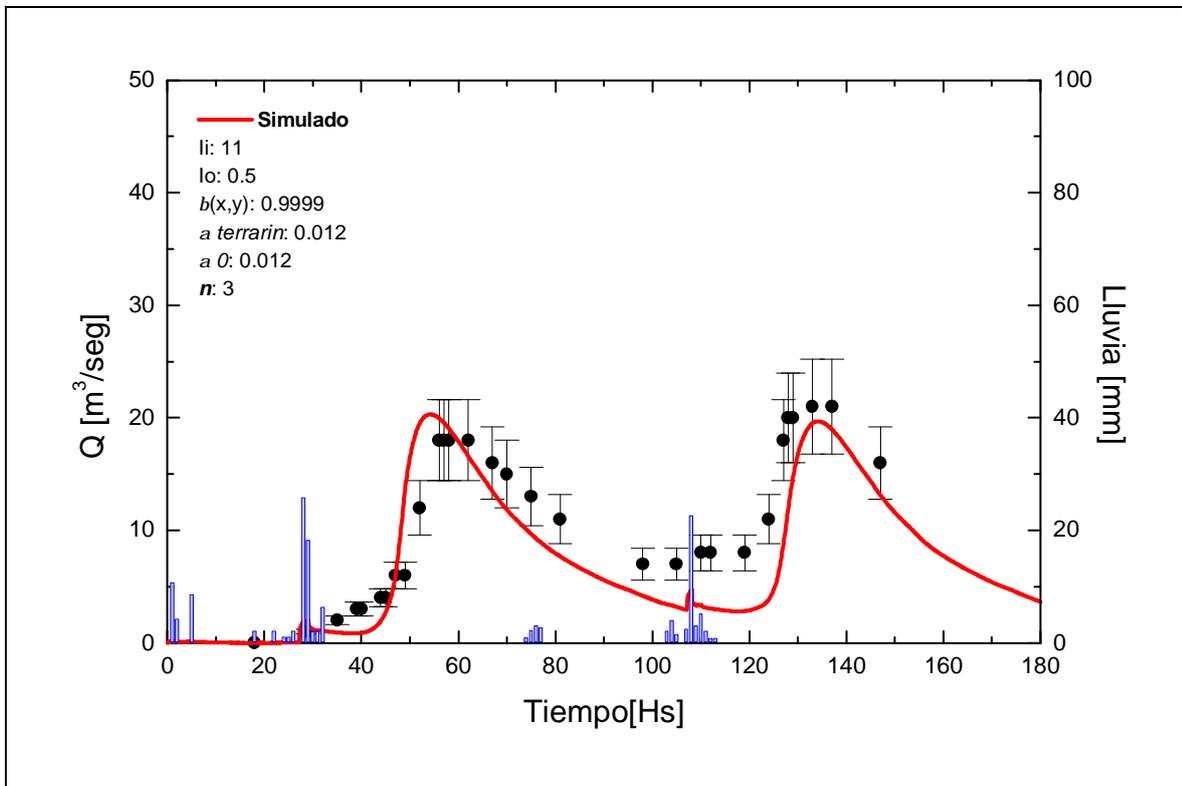


Figura 9-Hidrograma del evento de Mayo de 2002. Los puntos indican el caudal observado a lo largo del tiempo y la línea continua es el hidrograma simulado por AQUA. Las barras indican los milímetros de agua precipitados en cada hora (hietograma).

Como puede observarse, en los tres eventos la simulación reproduce satisfactoriamente las mediciones con un buen grado de precisión. Esto se logró sin necesidad de variar los parámetros a lo largo del terreno, sino simplemente sus valores globales en función de consideraciones estacionales. El factor más importante es la modificación del valor del coeficiente de escurrimiento en función de la presencia o no de vegetación, la cual varía sensiblemente en la región a lo largo del año.

Es interesante hacer notar que a pesar que el modelo AQUA no considera un coeficiente de almacenamiento por celda, tal como lo requieren otros modelos, los resultados se logran ajustar muy bien a las mediciones. Esto se consigue gracias a una descripción de la topografía muy precisa, con un tamaño de celda pequeño, lo cual permite capturar los bajos que son los responsables directos del almacenamiento superficial del agua. Incluso si se comparan los anegamientos obtenidos (figura 10a), con los mapas de riesgo hídricos construidos en base a promedio de anegamientos observados (figura 10b), se pueden encontrar similitudes más que significativas.

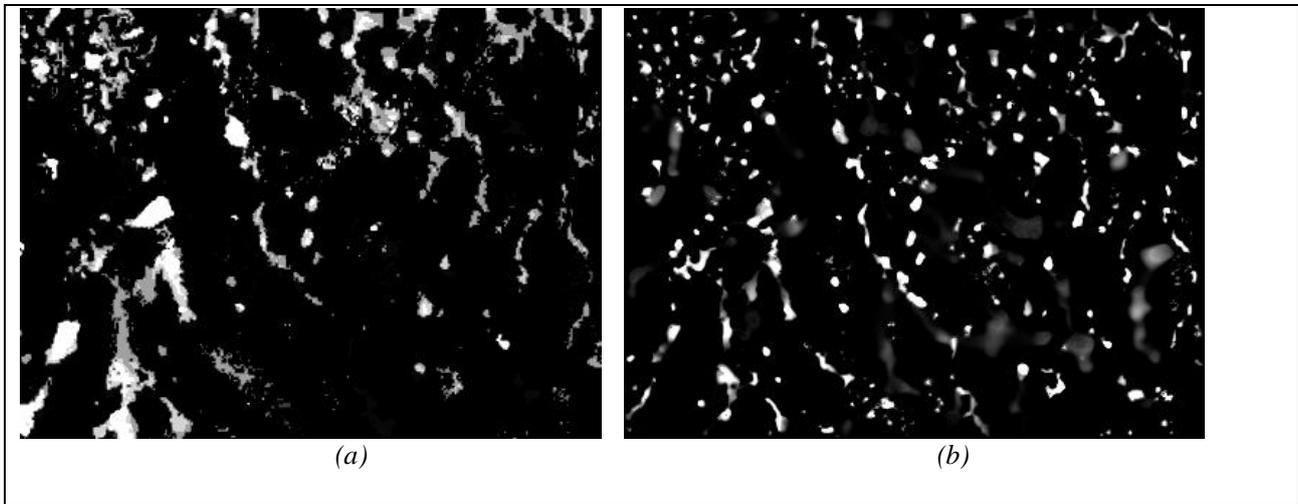


Figura 10 - Anegamientos observados (a) y simulados (b)

5 CONCLUSIONES

Se ha aplicado el modelo AQUA II en casos reales de escurrimiento en una llanura serrana con resultados que reproducen con muy buena precisión las mediciones.

Los parámetros efectivos del modelo fueron calibrados con facilidad tomando coeficientes dependientes sólo de condiciones estacionales, lo cual es un resultado importante y alentador, ya que facilita la aplicación del mismo a otras cuencas similares.

Por último, gracias a la precisión del modelo de elevación utilizado se logró reproducir anegamientos notablemente parecidos a los observados en la realidad. Es evidente que este resultado sólo se puede obtener con esta metodología, ya que considerar modelos con coeficientes de almacenamiento obliga a definir un coeficiente de almacenamiento distinto para cada celda, lo cual resulta inaplicable en casos reales.

Referencias:

Abbott, MB, Bathurst, JC, Cunge, JA, O'Connell, PE and Rasmussen, J. 1986. An introduction to the European hydrological system – Systeme Hydrologique Européen "SHE": 2. Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87 (1/2): 61-77

Euillades P, Vénere M. 2003. Corrección de modelos de elevación en base a un conjunto de puntos seguros. *Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería*. Vol. 19, pp. 33-43.

Freeze, RA and Harlan, RL. 1969. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. *Journal of Hydrology*, 9: 237-258

Sala, JM, Kruse, E, and Aguglino, R. 1987. Investigación hidrológica de la Cuenca del Arroyo Azul, Provincia de Buenos Aires. CIC, Informe 37.

Varni, M, Usunoff, E, Weinzettel, P and Rivas, R. 1999. Groundwater recharge in the Azul aquifer, Central Buenos Aires Province, Argentina. *Physics and Chemistry of the Earth*, 24(4): 349-352.

Vénere M, Clausse A. 2002. A computational environment for water flow along floodplains. *International Journal on Computational Fluid Dynamics*, Vol. 16, pp. 327-330.