

Simulación hidrológica continua en la cuenca del río Cuareim con el modelo MGB-IPH

Continuous hydrologic simulation in the Cuareim basin with the MGB-IPH model

Crisci, Magdalena ⁽¹⁾, Chreties, Christian ⁽¹⁾, Silveira, Luis ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

Contacto: mcrisci@fing.edu.uy

RECIBIDO: 14/3/2015 – APROBADO: 24/11/2015

Resumen

La creciente intensificación de la demanda de agua, por un lado, y el aumento de la demanda atmosférica y de la variabilidad climática (asociados al cambio climático), por otro, ponen de manifiesto la necesidad de contar con herramientas de modelación hidrológica para la gestión sustentable de los recursos hídricos en Uruguay. En este trabajo se presenta el análisis, la implementación y la calibración del modelo hidrológico MGB-IPH (Collischonn, et al., 2007) de paso diario en la cuenca del río Cuareim, en la cual existe una gran competencia por el uso del agua, fundamentalmente para el riego de arroz. El análisis del modelo permitió asociar sus parámetros más importantes a datos físicos conocidos en la cuenca (y en todo el país), así como reconocer aquellos parámetros más sensibles. La implementación y la calibración del modelo en la cuenca del río Cuareim permitió obtener una parametrización que representa muy adecuadamente los caudales observados en dicha cuenca ($R^2=0.88$, $NS=0.77$). El modelo puede ser implementado en otras cuencas del país, teniendo en cuenta los parámetros físicos de las mismas.

Palabras clave: Modelación hidrológica, gestión de recursos hídricos.

Abstract

Although Uruguay has an abundant water supply, the increase of water demand together with the increase of atmospheric demand and climate variability (associated with climate change), calls for the need for hydrological modeling tools for the sustainable management of water resources in Uruguay. The aim of this work is to analyze, implement and calibrate the MGB-IPH hydrological model (Collischonn, et al., 2007) in the Cuareim basin, where there is a strong competition for water demand, primarily for rice irrigation. The model analysis allowed to associate its most important parameters with known physical data of the basin (and nationwide) and recognize the most sensitive parameters. The implementation and calibration of the model in the Cuareim basin yielded a hydrological model that properly represents the observed flows. The model can be easily implemented in others national basins, taking into account their physical parameters.

Keywords: Hydrological modeling, water resources management.

Introducción

Si bien nuestro país tiene el privilegio de contar con una abundante oferta hídrica, la creciente intensificación del uso del agua, por un lado, y el aumento de la demanda atmosférica y de la variabilidad climática (asociados al cambio climático), por otro, evidencian la escasez del recurso, la cual se manifiesta principalmente en períodos de déficit hídrico. Asimismo, la acción antrópica sobre los recursos naturales vinculados a los cursos de agua se ha desarrollado prácticamente sin planificación previa, generando como consecuencia diferentes conflictos y problemáticas específicas, como por ejemplo: competencia del uso del agua en cuencas con múltiples usuarios; impactos no cuantificados en la cantidad y en la calidad del agua dados por cambios en el uso del suelo; inundaciones en zonas urbanas y rurales causantes de perjui-

cios socioeconómicos de considerable valor en zonas costeras y aledañas, y degradación de la biodiversidad y la integridad de los ecosistemas asociados a los cursos de agua. Esto pone de manifiesto la necesidad de generar herramientas para la gestión sustentable de los recursos hídricos en el país. Para ello es fundamental el desarrollo de herramientas como la modelación hidrológica, a partir de las cuales sea posible producir información cercana a la realidad en cuencas donde no se dispone de medidas y analizar la disponibilidad del recurso hídrico bajo diferentes escenarios potenciales.

Aunque a nivel nacional existen numerosos antecedentes en materia de modelos de balance hídrico de paso mensual y en modelos de eventos extremos, ampliamente extendidos para el diseño de obras hidráulicas (MVOTMA, 2011), en lo que respecta a modelos hidrológicos de simulación continua (de paso diario o inferior), es muy poca la experiencia reciente

en el país. Es posible mencionar el desarrollo del modelo HYDRO-URFING en la cuenca del río Tacuarembó en el año 1998 (Silveira, 1998), así como la implementación del modelo SHETRAN (Ewen, et al., 2000) a escala de microcuencas en Uruguay a efectos de evaluar el impacto sobre el escurrimiento por el cambio de uso de suelo de pastura natural a plantación forestal (Alonso, 2007).

Un modelo hidrológico de simulación continua que permita representar los caudales diarios de las cuencas hidrográficas de Uruguay para diferentes escenarios potenciales es una herramienta fundamental para la gestión de los recursos hídricos del país. Los modelos hidrológicos de simulación continua (paso diario o inferior) tienen en cuenta de forma explícita todos los componentes de la escorrentía (superficial, sub-superficial y subterránea) y consideran además el proceso de redistribución de la humedad del suelo entre los eventos de precipitación. El principal elemento a resolver desde el punto de vista hidrológico en este tipo de modelos es la evolución temporal del contenido de humedad del suelo.

Los modelos de simulación continua tienen un desarrollo relativamente reciente en virtud de sus dos principales motivaciones: primero, la necesidad de gestionar adecuadamente los recursos hídricos disponibles en un contexto de claro aumento del uso del recurso para diferentes fines y frente a las incertidumbres planteadas en materia de cambio climático; segundo, el avance de la capacidad computacional, que justifica el desarrollo de modelos distribuidos.

A nivel internacional se han propuesto diversos modelos hidrológicos diarios de simulación continua (concentrados y distribuidos), de los que se destacan por su mayor difusión y aplicación los siguientes: las propuestas de adaptación continua del modelo de Curva Número (Lamont, et al., 2008; Geetha, et al., 2007, 2008); el modelo SHETRAN (Ewen, et al., 2000; Birkinshaw, et al., 2010), que constituye una evolución del modelo original SHE (Système Hydrologique Européen, Abbott, et al., 1986); el modelo SWAT (Arnold, et al., 1993; Gassman, et al., 2007); el modelo de la Universidad de Washington: VIC (Liang, et al., 1994); el modelo de Sacramento (Burnash, et al., 1995); la serie de modelos IPH (Tucci, 1998), y el modelo MGB (modelo de grandes cuencas, Collischonn, et al., 2007). Todos

estos modelos representan con más o menos detalle diferentes procesos hidrológicos y, por lo tanto, el desempeño de un modelo puede ser muy variable en función de las características hidroclimáticas y de suelos existentes.

En este trabajo se analiza e implementa el modelo hidrológico MGB-IPH (Collischonn, et al., 2007) en la cuenca del río Cuareim, en la cual el uso principal del agua es el riego de arroz a través de tomas directas en los cursos de la cuenca y la construcción de represas de almacenamiento. En época de sequías, la oferta de agua es insuficiente para cubrir la demanda para todos los usos (riego, abastecimiento a poblaciones, caudal ecológico), con lo cual se hace necesario contar con herramientas de gestión que permitan el desarrollo sustentable de los recursos de la cuenca. Es por esto que una herramienta de este tipo resulta determinante a la hora de estudiar criterios de gestión del recurso en diferentes escenarios de uso del agua.

El modelo MGB-IPH fue seleccionado dado que, como se verá más adelante, representa detalladamente los procesos hidrológicos de infiltración y redistribución del agua en la zona no saturada del suelo, procesos fundamentales en las cuencas de Uruguay. Además, los parámetros más relevantes del modelo MGB-IPH pueden ser representados por parámetros físicos del suelo, ya conocidos en todo el territorio nacional.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El río Cuareim es afluente del Río Uruguay y frontera entre Uruguay y Brasil (Figura 1). El área de su cuenca es de 14.800 km², y ocupa tanto territorio uruguayo como brasilero (55% y 45%, respectivamente). En territorio uruguayo comprende un área de 8.100 km² y se localiza en el departamento de Artigas.

La longitud del cauce principal del río Cuareim es de 351 km y la diferencia de cotas entre su nacimiento y su desembocadura es de 326 m, con una pendiente media de 0,93 m/km. Las pendientes más pronunciadas se presentan en el primer cuarto

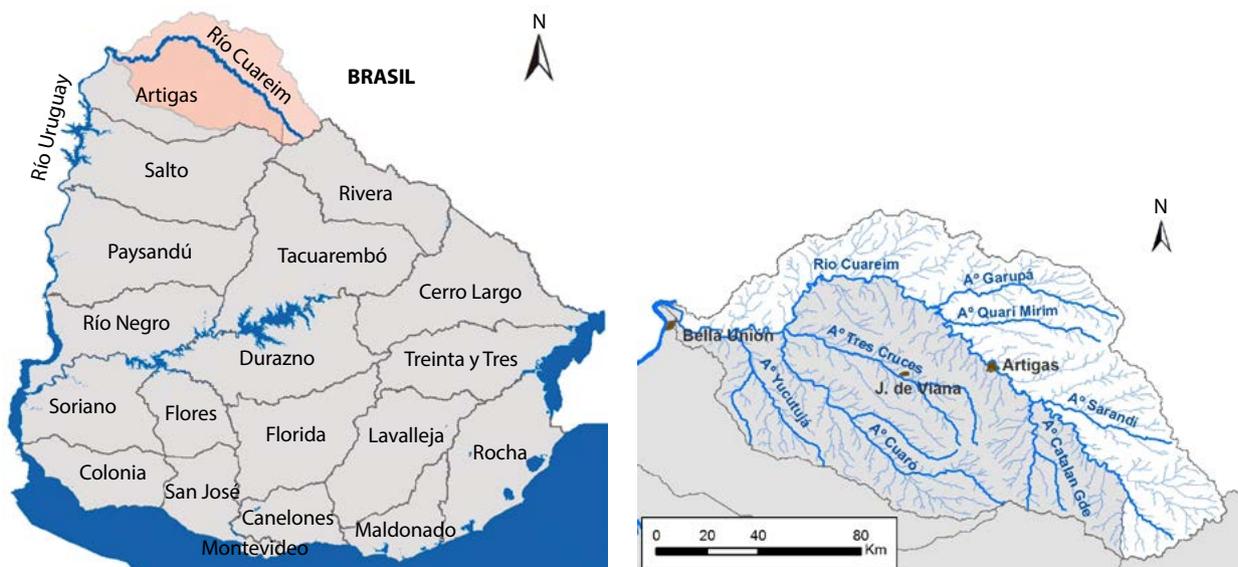


Figura 1. Cuenca del río Cuareim.

de su recorrido, con una pendiente media para este tramo de 1,96 m/km (Genta, et al., 2005). El tiempo de concentración hasta la ciudad de Artigas, con una cuenca de aporte de 4.501 km², es de aproximadamente 28 hs.

La mayoría de los suelos presentes en la cuenca se desarrollan sobre roca basáltica (Formación Arapey) y pueden clasificarse en base a su profundidad en suelos muy superficiales (de menos de 40 cm de espesor) y en suelos de mayor profundidad (entre 40 y 120 cm de espesor). Los suelos de poca profundidad se encuentran principalmente en la zona alta de la cuenca y presentan serias limitaciones de arraigamiento de las pasturas, por lo cual poseen grandes dificultades para su explotación agrícola y ganadera. Los suelos de mayor profundidad presentan mejores condiciones para el desarrollo de pasturas y siembra de cultivos, entre los que se encuentra el arroz.

Debido a que los suelos presentan una baja capacidad de almacenamiento, en los cursos afluentes al río Cuareim las descargas importantes se manifiestan después de las lluvias y luego se da una rápida disminución en la escorrentía. Esto determina picos de crecida y descenso rápidos y un retorno en pocos días a sus caudales base, que en términos generales son reducidos.

Descripción del modelo MGB-IPH

El modelo MGB (Collischonn, et al., 2007) es un modelo hidrológico distribuido de paso diario desarrollado por el Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) de Brasil. Divide la cuenca de drenaje en minicuecas (también denominadas celdas) interconectadas por canales, cada una de las cuales está compuesta, según su ubicación, por diferentes Unidades de Respuesta Hidrológica (URH), las cuales son el resultado de la combinación de los distintos tipos de suelo y de cobertura que existen dentro de la cuenca.

Dentro de cada minicuenca el balance de agua en el suelo se computa para cada URH, cuya suma resulta en la escorrentía total generada por la minicuenca, la cual es propagada dentro de la misma hasta el cauce y posteriormente transitada por la red de drenaje hasta la salida de la cuenca.

El balance de agua en el suelo se calcula para cada URH a partir de la siguiente expresión:

$$W_{i,j}^k = W_{i,j}^{k-1} + (P_{i,j} - ET_{i,j} - D_{sup_{i,j}} - D_{int_{i,j}} - D_{bas_{i,j}}) \cdot \Delta t$$

Siendo: Δt el paso de tiempo (generalmente 1 día); $W_{i,j}^k$ (mm) la cantidad de agua almacenada en el suelo al final del intervalo de tiempo k en la URH j de la minicuenca i; $W_{i,j}^{k-1}$ (mm) la cantidad de agua almacenada en el suelo al final del intervalo de tiempo k-1 (o sea, al inicio del intervalo de tiempo

k) en la URH j de la minicuenca i; $P_{i,j}$ (mm/ Δt) la precipitación que llega al suelo (es decir, que no es interceptada) en la URH j de la minicuenca i; $ET_{i,j}$ (mm/ Δt) la evapotranspiración a partir del suelo en la URH j de la minicuenca i; $D_{sup_{i,j}}$ (mm/ Δt) el escurrimiento superficial (rápido) que deja el suelo en la URH j de la minicuenca i; $D_{int_{i,j}}$ (mm/ Δt) el escurrimiento sub-superficial en la URH j de la minicuenca i, y $D_{bas_{i,j}}$ (mm/ Δt) la percolación o recarga del acuífero en la URH j de la minicuenca i.

P_i se calcula extrayendo de la precipitación total incidente la lámina de agua interceptada por la vegetación en cada intervalo de tiempo. $ET_{i,j}$ se calcula a partir de la ecuación de Penman-Monteith, teniendo en cuenta la demanda atmosférica ya satisfecha en la evaporación de la lámina interceptada. Para el cálculo de $ET_{i,j}$ se requieren datos diarios de variables climáticas (temperatura, velocidad de viento, insolación, humedad relativa y presión atmosférica) además de la definición de tres parámetros fijos, diferentes para cada URH y mes del año, correspondientes al albedo, la altura media de la vegetación y la resistencia superficial.

Para el cálculo del escurrimiento superficial ($D_{sup_{i,j}}$), la capa superficial del suelo se representa por un gran número de reservorios de diferentes capacidades de almacenamiento, representados por una función de distribución. A partir de dicha representación del suelo se considera que toda precipitación que cae sobre una porción de suelo saturada genera escurrimiento (Todini, 1996).

El flujo sub-superficial ($D_{int_{i,j}}$) se obtiene utilizando una función similar a la ecuación de Brooks y Corey (Rawls, et al., 1993), y el flujo de agua subterránea ($D_{bas_{i,j}}$) se calcula considerando una relación lineal entre la cantidad de agua almacenada en el suelo y la capacidad máxima de almacenamiento.

Una vez obtenidos los escurrimientos superficial ($D_{sup_{i,j}}$), sub-superficial ($D_{int_{i,j}}$) y subterráneo ($D_{bas_{i,j}}$) para cada URH dentro de cada minicuenca (además de ser utilizados para calcular el contenido de agua en el suelo al final de cada paso de tiempo), estos se transitan a través de la minicuenca considerando tres reservorios lineales e independientes (uno para cada tipo de escurrimiento) que colectan el flujo generado en todos los URH existentes dentro de la minicuenca.

Finalmente, el caudal de salida de cada minicuenca (Q_i) se calcula como la suma de Q_{sup} , Q_{int} y Q_{bas} , y es posteriormente transitado por la red de drenaje a través del método de Muskingum-Cunge.

El modelo consta de cuatro parámetros fijos y nueve parámetros calibrables. Los parámetros fijos (IAF, albedo, altura de la vegetación y resistencia superficial) dependen de la época del año y de la vegetación asociada a cada URH y sus valores pueden obtenerse de la bibliografía. En las Tablas 1 a 4 se presentan los valores utilizados.

| Cobertura | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Pastura | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| Arroz | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| Bosque | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| Agua | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 | 0,08 |

Tabla 1. Valores adoptados para albedo según cobertura.

| Cobertura | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pastura | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Arroz | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 |
| Bosque | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Agua | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabla 2. Valores adoptados para el índice de área foliar según cobertura.

| Cobertura | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pastura | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Arroz | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 1 | 1 | 1 |
| Bosque | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Agua | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Tabla 3. Valores adoptados para la altura media de vegetación (m) según cobertura.

| Cobertura | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Set | Oct | Nov | Dic |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pastura | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Arroz | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 | 70 |
| Bosque | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Agua | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabla 4. Valores adoptados para la resistencia superficial (s/m) según cobertura

| Parámetro | Descripción | Rango sugerido |
|------------------|---|----------------|
| W_m (mm) | Capacidad máxima de almacenamiento de la capa superficial del suelo. Depende del tipo de suelo. Un valor para cada URH. | 50 - 1000 |
| b | Variabilidad del volumen máximo de los reservorios que representan la capa superficial del suelo. Depende del tipo de suelo y de su profundidad. Afecta el escurrimiento superficial. Un valor para cada URH. | 0,12 - 1,6 |
| K_{int} (mm/d) | Tasa de flujo de agua sub-superficial cuando el suelo se encuentra saturado. Depende del tipo de suelo. Afecta al escurrimiento sub-superficial. Un valor para cada URH. | 4 - 40 |
| XL | Índice de porosidad del suelo. Depende del tipo de suelo. Afecta al escurrimiento sub-superficial. Un valor para cada URH. | ~0,67 |
| K_{bas} (mm/d) | Tasa de flujo de agua subterránea cuando el suelo se encuentra saturado. Depende del tipo de suelo. Afecta al escurrimiento subterráneo. Un valor para cada URH. | 0,05 - 5 |
| Wc | Parámetro sin significado físico que evita valores negativos e inestabilidades del modelo. Un valor para cada URH. En general, no se recomienda utilizar valores distintos a 0,1. | 0,1 |
| Cs | Multiplica al tiempo de concentración para definir el tiempo de respuesta superficial de las minicuencas. Afecta el caudal de salida superficial. Un valor único para todas las URH. | 1 - 20 |
| Ci | Multiplica al tiempo de concentración para definir el tiempo de respuesta sub-superficial de las minicuencas. Afecta el caudal de salida sub-superficial. Un valor único para todas las URH. | 50 - 200 |
| TKB (h) | Tiempo de respuesta del flujo subterráneo de las minicuencas. Afecta el caudal de salida subterráneo. Un valor único para todas las URH. | 1200 - 8000 |

Tabla 5. Parámetros calibrables del modelo MGB-IPH.

Los parámetros calibrables se describen en la Tabla 5, en donde también se presentan los rangos de variación sugeridos por el modelo.

Implementación del modelo MGB-IPH en la cuenca del río Cuareim

Para implementar el modelo MGB-IPH en la cuenca del río Cuareim, esta fue discretizada en 402 minicuecas con un área media de aproximadamente 35 km² (Figura 2). Cada minicuenca corresponde a una celda de cálculo del modelo.

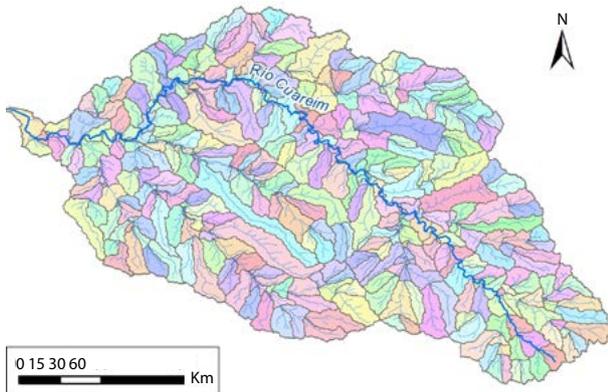


Figura 2. Minicuecas definidas para la implementación del modelo MGB-IPH.

Para representar la topografía, las direcciones del flujo y la red de drenaje de la cuenca fue utilizada como información de base el modelo digital del terreno de SRTM (90m) corregido por el Consorcio para Información Espacial del CGIAR (Jarvis, et al., 2008).

Para definir las URH presentes en la cuenca, se realizó la combinación analítica de dos capas: la capa de tipo de suelo (desde el punto de vista hidrológico) y la capa de usos o cobertura del suelo.

La caracterización de los suelos presentes en la cuenca fue obtenida del trabajo «Balances hídricos superficiales en la cuenca del Río Cuareim con fines de gestión del recurso agua y el impacto en las crecientes», realizado por el IMFIA (Genta, et al., 2005), a partir del cual se agruparon los suelos en tres clases: superficiales, profundos y de planicie. Esta agrupación fue realizada en función de la textura/estructura del suelo y de la capacidad de almacenamiento del suelo. La representación del uso o cobertura del suelo fue realizada en base a una imagen satelital del año 2010, a partir de la cual se identificaron tres coberturas principales: pasturas, arroz y bosque.

En función de la caracterización realizada se definieron para la cuenca del río Cuareim nueve URH, resultantes de la combinación de tres tipos de suelo (profundos, superficiales y de planicie) y de tres usos o cobertura del suelo, más una décima URH correspondiente a las superficies cubiertas con agua. En la Figura 3 se presenta la distribución resultante de las URH definidas.

Se observa que en casi toda la cuenca alta predomina la URH correspondiente a pasturas sobre suelo superficial, mientras que en la zona más baja de la cuenca aparecen los suelos más profundos en donde se encuentran, junto con la zona localizada al norte de la cuenca (perteneciente a Brasil), la mayoría de las chacras de arroz.

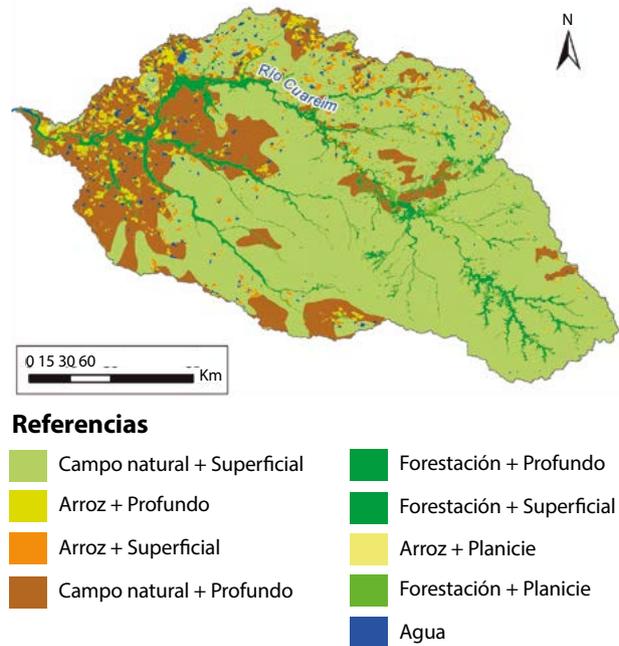
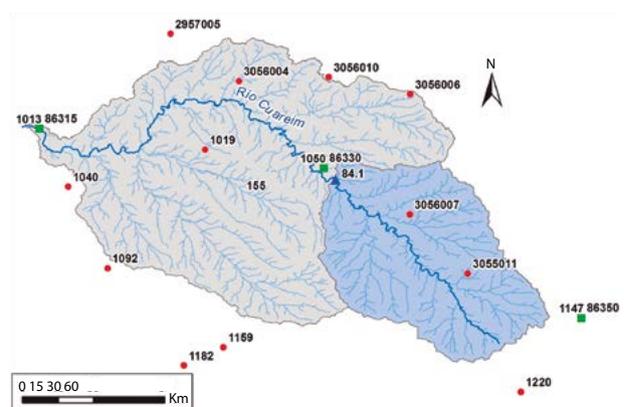


Figura 3. Unidades de Respuesta Hidrológica definidas para la implementación del MGB.

En cuanto a los datos hidrometeorológicos utilizados para implementar el modelo, se contó con datos de precipitación diaria registrados en 15 estaciones pluviométricas pertenecientes a Uruguay y a Brasil en el período 1981-2013 y con datos climáticos diarios (temperatura media, humedad relativa, velocidad del viento e insolación) registrados en tres estaciones meteorológicas pertenecientes a Uruguay en el período 2001-2013. Respecto a los datos de caudal, se utilizaron los datos diarios registrados en la estación 84.1 (localizada en la ciudad de Artigas) durante el período 1/11/1997-31/3/2008. Estos datos fueron utilizados para calibrar el modelo, una vez realizado un análisis de la calidad de los mismos, a partir del cual fueron descartados algunos períodos con datos inconsistentes. En



Referencias

- Estaciones pluviométricas
- Estaciones hidrométricas
- Estaciones meteorológicas

Figura 4. Estaciones pluviométricas, hidrométricas y meteorológicas.

la Figura 4 se presenta la localización de todas las estaciones incorporadas al modelo.

Análisis de los parámetros del modelo

Una vez implementado el modelo y previo a la etapa de calibración, se realizó un análisis de los diferentes parámetros del modelo con el objetivo de entender mejor su comportamiento, su representación física y su sensibilidad sobre los hidrogramas de salida del modelo.

Calibración del modelo

Realizado el análisis de los parámetros del modelo, se procedió a calibrarlo en la cuenca del río Cuareim con cierre en la ciudad de Artigas (con 4.640 km² de superficie), en donde se dispone de datos observados de caudal. Para ello se definió como periodo de calibración 1/1/2001 - 31/12/2004.

La calibración se realizó en dos etapas. En primer lugar, un análisis por parámetro, el cual consistió en definir para cada parámetro el rango de valores que mejor ajuste la serie de caudales modelada a la observada, en aquellos aspectos en los que el parámetro en cuestión tiene incidencia. En esta etapa el ajuste fue puramente observacional. Definidos los rangos de variación de cada parámetro se procedió a realizar una calibración manual con el objetivo de encontrar el paquete de parámetros que mejor ajuste la serie modelada a la observada, en su globalidad. En esta etapa el ajuste se basó en maximizar el coeficiente de correlación (R^2) y el número de Nash-Sutcliffe (NS) y en minimizar la diferencia porcentual entre los volúmenes de escurrimiento totales modelados y observados (ΔV). Cabe mencionar que dichos indicadores fueron obtenidos a partir de la serie de datos de caudal observado una vez eliminados los periodos determinados como inconsistentes durante el análisis de calidad de datos realizado.

Luego, una vez obtenidos los parámetros calibrados, se procedió a realizar la validación del modelo en los periodos 1/5/2005 - 30/11/2005 y 1/7/2007 - 31/12/2007, en los que los datos observados de caudal fueron considerados confiables.

Resultados y Discusión

Análisis de los parámetros del modelo

El parámetro Wm , que representa la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, se consideró el parámetro más importante del modelo, tanto por su representación física como por su sensibilidad. A medida que aumenta su valor, menor es el caudal máximo obtenido en los eventos de lluvia, producto de una mayor capacidad de almacenamiento en el suelo. Sin embargo, cuando el suelo se encuentra saturado puede generar mayor escurrimiento sub-superficial y subterráneo, dada la mayor cantidad de agua almacenada en la capa superior del suelo. Se entiende que este parámetro puede ser representado físicamente por la porosidad eficaz del suelo, la cual corresponde al total de vacíos del suelo, descontando el agua higroscópica (que no puede ser removida). La porosidad eficaz fue estimada para cada unidad de suelo como:

$$P_{eficaz} = (N - A_H \times D_a) \times H/10, \quad \text{con} \quad N = \frac{\gamma_s - D_a}{\gamma_s} \times 100$$

Siendo P_{eficaz} (mm) la porosidad eficaz del horizonte; N (%) el índice de vacíos del horizonte; A_H (%) el contenido de agua higroscópica del horizonte; γ_s la densidad del horizonte; D_a (g/cm³) la densidad aparente del horizonte, y H (mm) el espesor del horizonte.

El contenido de agua higroscópica (A_H (%)) se estima para cada horizonte como el punto de marchitez permanente. Este último parámetro y la densidad aparente se calculan para cada horizonte en función de los contenidos porcentuales de arena, limo, arcilla y materia orgánica correspondientes a cada unidad de suelo (Fernández, 1979; Silva, et al., 1988). Una vez obtenida la porosidad eficaz (mm) de cada horizonte, se obtiene la porosidad eficaz asociada a cada unidad de suelo sumando las porosidades eficaces de sus horizontes A y B, la cual es posteriormente corregida por un factor de corrección correspondiente a la rocosidad y pedregosidad de la unidad (Molfino y Califra, 2001). Finalmente, se estima la porosidad eficaz correspondiente a cada clase de suelo (superficial, profundo y de planicie) ponderando por área las porosidades eficaces de las unidades de suelos que componen cada clase. En la Tabla 6 se presentan los valores de porosidad eficaz obtenidos para las tres clases de suelo identificadas.

| Clase | Porosidad eficaz (mm) |
|-------------|-----------------------|
| Superficial | 47,9 |
| Profundo | 225,3 |
| De planicie | 71,4 |

Tabla 6. Porosidad eficaz de las clases de suelo definidas en la cuenca.

Por otro lado, el parámetro b resultó ser relevante para lluvias pequeñas, aumentando el caudal de salida a medida que aumenta su valor, no teniendo incidencia en eventos más importantes. Esto es así debido a que a mayor valor de b , más amplia es la distribución del tamaño de los reservorios que representan el suelo superficial. Es decir, existen reservorios más pequeños que se saturan con lluvias pequeñas, aportando al escurrimiento superficial, mientras que para eventos grandes que saturan toda la capacidad de almacenamiento del suelo (Wm –que no varía al variar b –), el escurrimiento superficial no depende de la distribución del volumen de los reservorios.

Respecto al parámetro $Kint$, se observó que a medida que aumenta su valor mayor es el caudal de salida en el tramo final de los hidrogramas de crecida (flujo sub-superficial), disminuyendo levemente su caudal máximo, sobre todo durante periodos con varios eventos seguidos. Este comportamiento es esperable, ya que a mayores valores del parámetro, mayor es la tasa de aporte sub-superficial, el cual se manifiesta mayormente en el tramo final del hidrograma de salida de la cuenca. Este parámetro parece estar relacionado con el campo de flujo de Darcy (q), función de la conductividad hidráulica del suelo saturado y la pendiente de la línea de energía (Chow, et al., 1994). Un cálculo aproximado para la cuenca del río Cuareim con cierre en Artigas arroja valores de q del orden de 4 mm/día.

Asimismo, el parámetro K_{bas} tiene influencia sobre el caudal base (flujo subterráneo), aumentado este a medida que aumenta su valor, dado que a mayores valores del parámetro mayor es la tasa de aporte subterráneo, el cual se manifiesta a la salida de la cuenca durante los períodos sin lluvias.

En cuanto al parámetro C_s , se observó que a medida que aumenta, aumenta también el tiempo base de los hidrogramas y disminuye su pico, resultando en hidrogramas más achatados. Este comportamiento es esperable, debido a que al aumentar este parámetro se incrementa el tiempo de tránsito de escurrimiento superficial dentro de cada minicuenca, por lo que amortigua más los hidrogramas de salida de la minicuenca. Afecta tanto caudales grandes como pequeños, no teniendo incidencia en el caudal base.

Los restantes parámetros del modelo resultaron tener relativamente poca sensibilidad sobre los hidrogramas de salida del modelo.

Calibración del modelo

En la Tabla 7 se presentan los valores de los parámetros calibrados para la cuenca del río Cuareim. Cabe recordar que los valores de W_m corresponden a la porosidad eficaz (espacio total de vacíos del suelo descontando el agua higroscópica), cuyo valor fue obtenido a partir de las características correspondientes a cada clase de suelo.

En la Tabla 8 se presentan los valores de los indicadores obtenidos en la calibración y la validación del modelo. En las Figuras 5 y 6 se expresa la evolución de los caudales modelados y observados para un tramo del período de calibración y de validación, respectivamente.

Los valores de la Tabla 8 y los Gráficos 1 y 2 indican un buen ajuste de los caudales modelados respecto a los caudales observados, tanto en el período de calibración como en el período de validación.

| URH | W_m | b | K_{bas} | K_{int} | XL | W_c |
|-----------------------|-------|-----|-----------|-----------|------|-------|
| Pastura + Superficial | 47,9 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Pastura + Profundo | 225,3 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Pastura + Planicie | 71,4 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Arroz + Superficial | 47,9 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Arroz + Profundo | 225,3 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Arroz + Planicie | 71,4 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Bosque + Superficial | 47,9 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Bosque + Profundo | 225,3 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Bosque + Planicie | 71,4 | 1 | 0,01 | 4 | 0,67 | 0,1 |
| Agua | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | |
|-------|----|-------|-----|-------|-----|
| C_s | 15 | C_i | 100 | TKB | 876 |
|-------|----|-------|-----|-------|-----|

Tabla 7. Parámetros calibrados del modelo en Artigas.

| Indicador | Calibración (2001-2004) | Validación | | Período total (2001-2007) |
|------------|----------------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|
| | | 1/5/2005-30/11/2005 | 1/7/2007-31/12/2007 | |
| R^2 | 0,89 | 0,89 | 0,91 | 0,88 |
| NS | 0,80 | 0,76 | 0,81 | 0,77 |
| ΔV | 4,10 | -3,70 | -9,32 | 4,42 |

Tabla 8. Resultados obtenidos de la calibración y la validación del modelo.

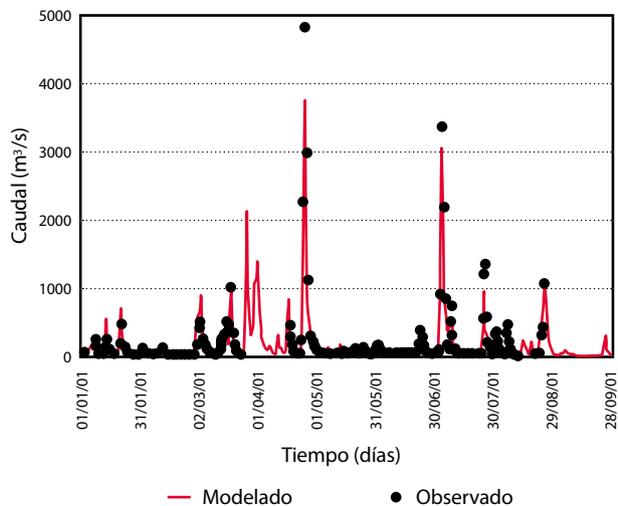


Gráfico 1. Caudales modelados y observados en un tramo del período de calibración.

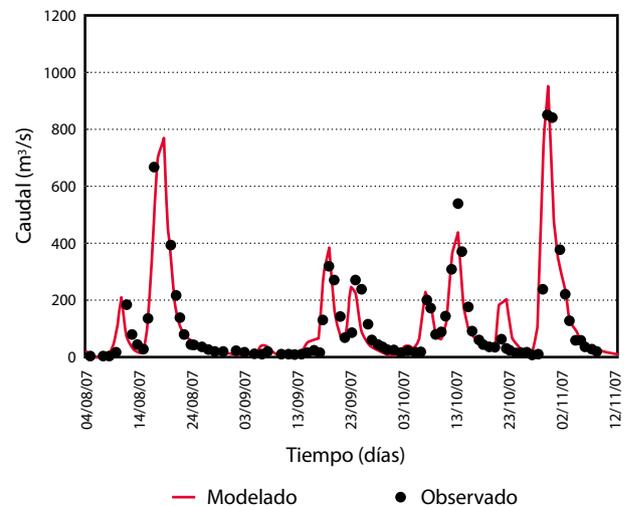


Gráfico 2. Caudales modelados y observados en un tramo del período de validación.

Conclusiones

El modelo MGB-IPH fue implementado y calibrado en la cuenca del río Cuareim y se realizó, además, un análisis de sus parámetros para comprender su comportamiento y sensibilidad sobre los hidrogramas de salida.

El análisis de los parámetros permitió asociarlos a características físicas conocidas en la cuenca y reconocer los parámetros más sensibles del modelo. En particular, el parámetro Wm fue considerado como el de mayor importancia, tanto por su representación física (capacidad de almacenamiento del suelo) como por su gran incidencia sobre los hidrogramas de salida. Los valores de dicho parámetro utilizados en la calibración del modelo fueron estimados a partir de la porosidad eficaz de los suelos presentes en la cuenca. Esto es de gran interés a la hora de evaluar la aplicabilidad del modelo en otras cuencas no aforadas del país debido a que, por un lado, este parámetro tiene un gran significado físico dentro del modelo y, por otro, su valor es un dato disponible para todos los suelos del país. Asimismo, se asoció al parámetro $Kint$ con el campo de flujo de Darcy (Chow, et al., 1994). Si bien su influencia en los resultados del modelo es muy pequeña, su valor puede ser estimado para cada cuenca en función de las características del suelo y de la pendiente media de la cuenca.

Al respecto de la calibración realizada, se obtuvieron resultados muy auspiciosos en cuanto al desempeño del modelo para representar los caudales observados, lo que motiva su implementación en otras cuencas del país, teniendo en cuenta también la asociación realizada entre los parámetros del modelo y las características físicas de la cuenca, conocidas para todas las cuencas de Uruguay.

Referencias

- Abbott, M, Bathurst, J., Cunge, J., O'Connell, P. y Rasmussen, J., 1986. An Introduction to the European System: Systeme Hydrologique Europeen (SHE). En: *Journal of Hydrology*, 87, pp.61-77.
- Alonso, J., 2007. *Simulation of land-use change in two experimental micro basins in Uruguay: SHETRAN*

validation. Newcastle: University of Newcastle.

(Training activity at the School of Civil Engineering and Geosciences, Final Report)

- Arnold, J.G., Allen, P.M. y Bernhardt, G., 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. En: *Journal of Hydrology*, 142(1-4), pp.47-69.
- Birkinshaw, S.J., James, P. y Ewen, J., 2010. Graphical user interface for rapid set-up of SHETRAN physically-based river catchment model. En: *Environmental Modelling & Software*, 25, pp.609-610.
- Burnash, R. J. C., 1995. The NWS river forecast system catchment modeling. En: Singh, V.P. (ed.). *Computer models of watershed hydrology*. Colorado: Water Resources Publication. Chapter 10.
- Collischonn, W., Allasia, D., Da Silva, B. C., y Tucci, C. E., 2007. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. En: *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), pp.878-895.
- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W., 1994. *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Ewen J., Parkin G., O'Connell P.E., 2000. SHETRAN: distributed river basin flow and transport modeling system. En: *Journal of Hydrologic Engineering*, 5, pp.250-258.
- Fernández, J.C., 1979. *Estimaciones de densidad aparente, retención de agua a tensiones de $-1/3$ y -25 bar y agua disponible en el suelo a partir de la composición granulométrica y porcentaje de materia orgánica*. 2da Reunión Técnica. Montevideo: Facultad de Agronomía, Universidad de la República.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H. y Arnold, J.G., 2007. The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. En: *T ASABE*, 50(4), pp.1211-50.
- Geetha, K., Mishra, S. K., Eldho, T. I., Rastogi, A. K., y Pandey, R. P., 2008. SCS-CN-based continuous simulation model for hydrologic forecasting. En: *Water resources management*, 22(2), pp.165-190.
- Geetha, K., Mishra, S. K., Eldho, T. I., Rastogi, A. K., y Pandey, R. P., 2007. Modifications to SCS-CN method for long-term hydrologic simulation. En: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(5), pp.475-486.

- Genta, J.L., Chreties, Ch., Sordo, A., Gussoni, J. y Molfino, J.H., 2005. *Balances hídricos superficiales en la cuenca del Río Cuareim con fines de gestión del recurso agua y el impacto en las crecientes*. Montevideo: IMFIA-DNH-CRC.
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E., 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org>.
- Lamont, S., Eli, R. y Fletcher, J., 2008. Continuous hydrologic models and curve numbers: a path forward. En: *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), pp.621-635.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F. y Burges, S.J., 1994. A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs. En: *Journal of Geophys. Res.*, 99(D7)(14), pp.415-428.
- Molfino, J.H. y Califra, A., 2001. *Agua disponible de las tierras del Uruguay*. Montevideo: División de Suelos y Aguas, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.
- Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), 2011. *Manual de diseño y construcción de pequeñas presas*. Montevideo: MVOTMA.
- Rawls, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L. y Shirmohammadi, A., 1993. Infiltration and soil water movement. En: Maidment, B.D. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill. Chapter, 5.1-5.
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F. y Durán, A., 1988. *Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua en los suelos del Uruguay*. Montevideo: Facultad de Agronomía. (Boletín de Investigación, 10).
- Silveira, L., 1998. *Modelación hidrológica de pasturas naturales con pendientes suaves en la zona templada*. Stockholm: KTH. (Tesis PhD).
- Todini, E., 1996. The ARNO rainfall-runoff model. En: *Journal of Hydrology*, 175(1), pp.339-382.
- Tucci, C.E.M., 1998. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: ABRH.