

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD CON MIKE SHE VARIANDO TOPOGRAFÍA Y ET

R. F. Vázquez¹, J. Feyen² y J. Berlamont¹

Resumen:

Se modeló la hidrología superficial y subterránea de una cuenca media con el código MIKE SHE. Se llevó a cabo un Análisis de Sensibilidad (AS) variando datos de topografía y evapotranspiración (ET), variables importantes para modelar el balance hídrico de una cuenca. Se generaron tres Modelos de Elevación Digital (MED) para preparar igual número de modelos hidrológicos difiriendo sólo en términos de la topografía. Se investigó, mediante la calibración independiente de los modelos hidrológicos, los efectos de los MED en las predicciones y en los parámetros de los modelos. En general, se observó una diferencia razonable entre los datos disponibles de elevación y los MED. Sin embargo, en particular, uno de los métodos de interpolación indujo la presencia significativa de depresiones y vías de desagüe artificiales. Paradójicamente, las predicciones del modelo hidrológico correspondiente resultaron ser las más aceptables. El análisis indicó una dependencia significativa de las predicciones de los modelos hidrológicos y los parámetros calibrados en los MED. Adicionalmente, se emplearon en la estructura de MIKE SHE dos conjuntos distintos de parámetros para la estimación de la ET. Se investigó en los períodos de evaluación los efectos de las dos series resultantes de ET en las predicciones hidrológicas. El análisis indicó un efecto significativo en las predicciones de los caudales superficiales.

Palabras clave: Análisis de Sensibilidad, modelaje numérico, MED, ET, MIKE SHE.

INTRODUCCIÓN

El gran potencial que los modelos distribuidos ofrecen para el manejo o gestión integral de recursos hídricos generalmente contrasta con la cantidad significativa de variables de entrada y parámetros necesarios para esquematizar y representar de manera adecuada una cuenca en particular. Como tal, es importante investigar cuál de esas variables de entrada son realmente significativas para la simulación de los procesos dinámicos que ocurren en el sistema hidrológico modelado. Esta investigación debería basarse en Análisis de Sensibilidad (AS) adecuados, llevados a cabo de acuerdo a la naturaleza distribuida de los modelos en cuestión.

Una de estas variables de interés para el modelaje del balance hídrico en una cuenca es el Modelo de Elevación Digital (MED) o Modelo Geomorfológico Digital (MGD), por su importancia en la investigación hidrológica y en la gestión de recursos hídricos. Esto debido a que la simulación del flujo del agua depende de las características geomorfológicas intrínsecas en el MED.

Sin embargo, los hidrólogos no están generalmente al tanto de los errores y de las limitaciones de los MED como fuente (distribuida) de información geomorfológica, y, con mucha frecuencia, utilizan MED sin un conocimiento previo de los errores asociados a la creación de los mismos y / o de las correcciones posteriores (Walker y Willgoose, 1999).

Dependiendo, entre otros factores, de la disponibilidad de información base y de las características del problema a modelar, la resolución de los MED utilizados en el modelaje de sistemas hídricos y del suelo puede variar ampliamente. Así por ejemplo, para modelar detalladamente sistemas hidrodinámicos complejos y cuencas experimentales pequeñas se utilizan tamaños de celda del orden de pocas decenas de metros (Saulnier et al., 1997). Sin embargo, el tamaño de celda puede incrementarse drásticamente para cuencas de tamaño medio y regional (Refsgaard, 1997; Madsen, 2003).

¹ Hydraulics Laboratory, Department of Civil Engineering, K.U.Leuven, Kasteelpark Arenberg 40, 3001 Heverlee, Belgium, raulito_vz@yahoo.com, raulfvazquez@yahoo.co.uk

² Institute for Land and Water Management, K.U.Leuven, Vital Decosterstraat 102, 3000 Leuven, Belgium, jan.feyen@agr.kuleuven.ac.be

Artículo recibido el 15 de diciembre de 2003, recibido en forma revisada el 20 de abril de 2004 y aceptado para su publicación el 28 de junio de 2004. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

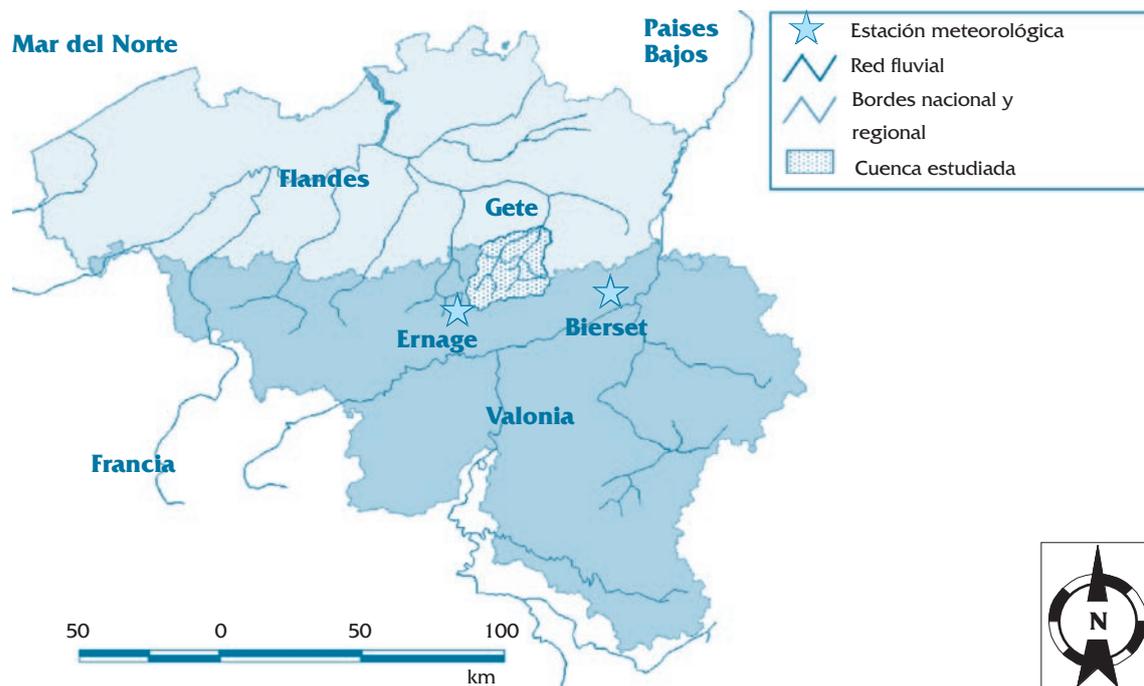


Figura 1: Localización de la cuenca de estudio (modificado en base a Vázquez, 2003).

A pesar de esto, apenas se encuentran en la literatura valoraciones de procesos que condensan información detallada y producen MED de baja resolución (i.e. de tamaño grueso de celda) así como de los efectos de estos procesos en las predicciones hidrológicas de cuencas de tamaño mayor.

Este artículo valora la conveniencia de un conjunto de MED para su incorporación en el desarrollo de un modelo hidrológico de una cuenca de tamaño medio localizada en Bélgica. Para ello se evaluaron las consecuencias del conjunto de MED en la bondad de predicción y en los valores efectivos (a la escala de la modelación) de los parámetros de los modelos.

Otra variable de interés es la evapotranspiración (ET), que junto a otros procesos como precipitación, escorrentía e infiltración, juega un papel importante en el modelaje hidrológico de cuencas. Sin embargo, se dan muy pocos reportes en la literatura especializada sobre los procesos de estimación de la evapotranspiración actual (ET_{act}) o acerca de la influencia de los valores estimados de ET_{act} sobre las predicciones hidrológicas de modelos distribuidos, aplicados a la escala de cuencas hidrográficas. Así en este estudio, se analiza brevemente los efectos de la variación de datos estimados de la ET_{act} sobre las predicciones hidrológicas.

MATERIALES

Características principales de la cuenca estudiada

La zona de estudio, la cuenca del Gete (586 km²), está localizada en Bélgica (figura 1). La elevación varía aproximadamente entre 27 m en la parte norte y 174 m en la parte meridional. El uso del suelo es principalmente agrícola con algunas manchas forestales. El clima se caracteriza por condiciones húmedas moderadas. Detalles adicionales de la cuenca se indican más adelante en la sección "Asignación de parámetros de la cuenca del Gete a la estructura de MIKE SHE".

MED disponibles para el modelaje hidrológico

Se usaron MED almacenados en una estructura de celdas que conforman una retícula rectangular. Los MED se obtuvieron a partir de datos puntuales de elevación en forma digital, de cuyo origen y precisión sólo se conoce que fueron obtenidos a partir de las curvas de nivel de un mapa topográfico a escala 1:50 000. También se conoce que estos datos fueron inicialmente interpolados linealmente, siguiendo la dirección de mayor gradiente entre dos curvas de nivel sucesivas, para conformar una retícula no-ortogonal con una resolución aproximada de 30x40 m². Esta retícula fue la que se utilizó como dato de entrada para los métodos de interpolación, aplicados en este estudio.

Un análisis breve de los datos de elevación reveló que, debido a los propósitos militares con los que fueron obtenidos, éstos fueron truncados hasta la unidad de metro, lo que implica una incertidumbre apreciable.

Los MED son el producto de tres métodos de interpolación que se escogieron entre los usados comúnmente en la práctica normal con fines hidrológicos. Por lo tanto, éstos no son necesariamente los más apropiados para las condiciones del estudio. En el método (A), se aplicó el proceso de interpolación Bilineal (Bi) que está disponible como preprocesador dentro del paquete computacional MIKE SHE (DHI, 1998). El método estima la elevación del centro de una celda en particular (de la retícula) como el promedio de los valores de las esquinas de la celda, que a su vez se determinan por medio del método Bi. Este método usa hasta cuatro puntos para estimar la elevación en cada una de las esquinas de la celda. Los puntos considerados en la interpolación se seleccionan de acuerdo a (i) su distancia a la esquina de la celda; y (ii) un radio de búsqueda, definido por el modelador. Dependiendo de la densidad de los datos de elevación y de la resolución del modelaje, sólo hasta un máximo de 16 puntos pueden contribuir a la estimación de la elevación en el centro de la celda.

Los métodos (B) y (C) usaron métodos comunes de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con los cuales se produjo en primer lugar una Red Irregular Triangular (RIT). La RIT se basa en dos

elementos básicos: puntos con coordenadas XYZ y una serie de segmentos que unen estos puntos para formar triángulos. De esta forma se representa de una manera irregular la geomorfología de la cuenca. La RIT se obtuvo sobre la base de una interpolación lineal para cada triángulo. El método de triangulación siguió el criterio de Delaunay que implica que todos los puntos se conectan con sus vecinos más cercanos para formar triángulos (Vázquez, 2003). En el método (B), la RIT se procesó aún más, mediante interpolación lineal, para producir una retícula regular que finalmente se convirtió al formato adecuado (malla) empleado por MIKE SHE. En el método (C), las curvas de nivel obtenidas de la RIT fueron los datos de entrada en el módulo de interpolación Bilineal de MIKE SHE. En comparación al método (A), los métodos (B) y (C) tienden a incluir más errores de manipulación de datos, debido a los pasos adicionales de interpolación incluidos en los mismos. En la discusión que sigue, se emplearán los términos MED(A), MED(B) y MED(C) para referirse a los productos de los métodos antes señalados.

Las características principales de los MED que se emplearon en el estudio se detallan en la tabla 1 con respecto a dos regiones de análisis: (i) la divisoria topográfica de la cuenca; y (ii) la superficie rectangular que constituye el dominio del modelo numérico y que está definida por las coordenadas mínimas y máximas (173500 m, 206500 m) a lo largo del eje X (Oeste-Este) y (141500 m, 174500 m) a lo largo del eje Y (Sur-Norte), expresadas en el Sistema Cónico de Lambert (72-Bélgica).

Tabla 1: Estadísticos descriptivos de los MED en función de los métodos de generación.

Estadístico	Datos de elevación (m)	Método de generación de MED					
		A		B		C	
		MED (m)	ER (%)	MED (m)	ER (%)	MED (m)	ER (%)
a. Dentro del área de la cuenca (divisoria topográfica)							
Valor mínimo	27.0	27.4	1.48	26.0	-3.70	30.0	11.11
Valor medio	96.1	97.4	1.30	97.5	1.43	96.7	0.61
Valor máximo	174.0	168.5	-3.16	170.6	-1.95	167.8	-3.56
Rango de variación	147.0	141.1	-4.01	144.6	-1.63	137.8	-6.26
Desviación típica	36.7	37.1	0.88	37.5	1.95	36.8	0.05
b. Dentro del área total del modelaje hidrológico (dominio del modelaje)							
Valor mínimo	25.0	26.0	4.17	26.0	4.00	29.6	18.40
Valor medio	99.6	99.6	0.08	99.7	0.12	98.9	-0.67
Valor máximo	180.0	175.7	-2.37	180.0	0.00	173.6	-3.56
Rango de variación	155.0	149.7	-3.42	154.0	-0.65	144.0	-7.08
Desviación típica	39.9	39.5	-1.16	39.9	0.06	39.3	-1.49

Leyenda: ER = Error Relativo.

La tabla 1 incluye también información relevante obtenida de los datos puntuales de elevación. La comparación de las características de elevación de los MED y de los datos puntuales originales se condensa en la tabla 1 mediante el Error Relativo (ER) expresado en porcentaje.

Se conoce que los métodos de interpolación para generar MED pueden producir errores locales en elevación conocidos como “depresiones artificiales”, que difieren de las condiciones observadas en el terreno (Quinn et al., 1995). Estas depresiones artificiales dependen no sólo del método de interpolación en sí, sino también de la calidad, distribución y densidad de los datos base de elevación, además de la resolución final del MED. Se conoce además que los algoritmos, que están comúnmente disponibles en los paquetes de SIG para la derivación de vías de desagüe y delineación de los contornos de las cuencas, se ven afectados por estas depresiones artificiales (Quinn et al., 1995). Sin embargo, los hidrólogos no están generalmente al tanto de estas limitaciones del primer producto (MED) de un proceso de interpolación cualquiera y proceden por tanto a su directa aplicación en el modelaje de una cuenca, sin un proceso previo de filtrado del MED a fin de remover estas depresiones artificiales del mismo.

En este estudio, se utilizaron los primeros productos de los métodos de interpolación, sin un proceso posterior de filtrado, reflejando de esta manera las condiciones generales de análisis en muchos casos de práctica común. Se compararon los MED entre sí para obtener distribuciones de las discrepancias de elevación entre cada uno de ellos. Además, se investigaron relaciones geomorfológicas derivadas de los MED tales como vías de desagüe y delineaciones de los contornos de las cuencas. Los resultados indicaron algunas diferencias significativas con respecto a las vías de desagüe (figura 2). La delineación del contorno de las cuencas mostró resultados similares para todos los métodos de generación. Sin embargo, fue necesario retocar levemente el contorno de las cuencas de acuerdo a la forma derivada de los mapas topográficos a escala 1:50 000. Estos resultados indican la presencia significativa de depresiones en los MED, especialmente en el MED(B). Esto fue confirmado por un análisis de identificación de depresiones artificiales (Quinn et al., 1995). Estas depresiones deberían ser removidas mediante un proceso de filtrado antes de la aplicación de un MED en cualquier aplicación de modelaje medioambiental. Sin embargo, como se indicó anteriormente, este proceso no se llevó a cabo en el presente análisis.

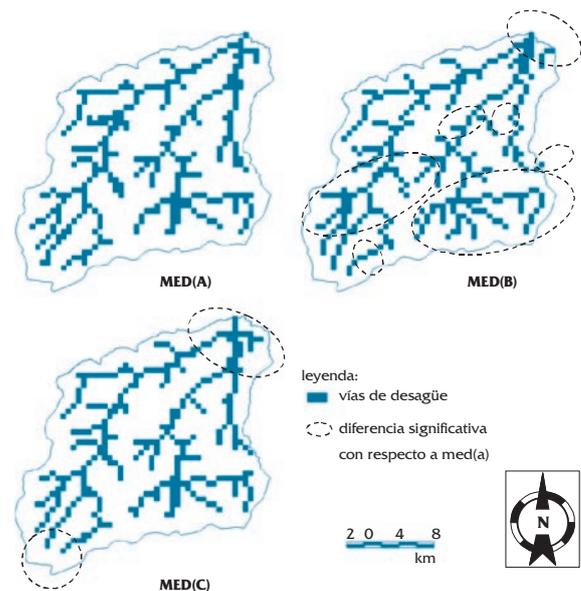


Figura 2: Resultado de la extracción automática de vías de desagüe de los MED (modificado en base a Vázquez, 2003).

MÉTODOS

El código hidrológico

Este estudio es parte de un proyecto más general dedicado al análisis de la conveniencia del uso de códigos hidrológicos distribuidos para modelar el efecto del Cambio Global del Clima en el ciclo hidrológico. Por ello se escogió el código MIKE SHE (Refsgaard y Storm, 1995) al considerar que caracteriza de forma íntegra (superficial y subterránea) el flujo en la cuenca del Gete. El código MIKE SHE se ha usado en diversas aplicaciones (Refsgaard, 1997; Jayatilaka et al., 1998; Feyen et al., 2000; Vázquez et al., 2002; Vázquez, 2003). MIKE SHE es un código hidrológico determinístico (que se basa en principios físicos) y distribuido que describe la fase terrestre del ciclo hidrológico. El módulo del movimiento del agua (WM) es el componente principal de MIKE SHE que puede modelar (figura 3): la retención en la vegetación, la evapotranspiración real (ET_{act}), el flujo superficial (bidimensional, onda difusiva), flujo en canales (unidimensional, onda difusiva), flujo en la zona saturada (ecuación bidimensional o tridimensional de Boussinesq), flujo en la zona subsaturada (ecuación unidimensional de Richards) e intercambio entre los acuíferos y ríos. Al aplicar MIKE SHE a cuencas hidrográficas se supone que las ecuaciones deducidas a escalas más pequeñas también son válidas a escalas superiores (utilizando el concepto de “parámetros efectivos”).

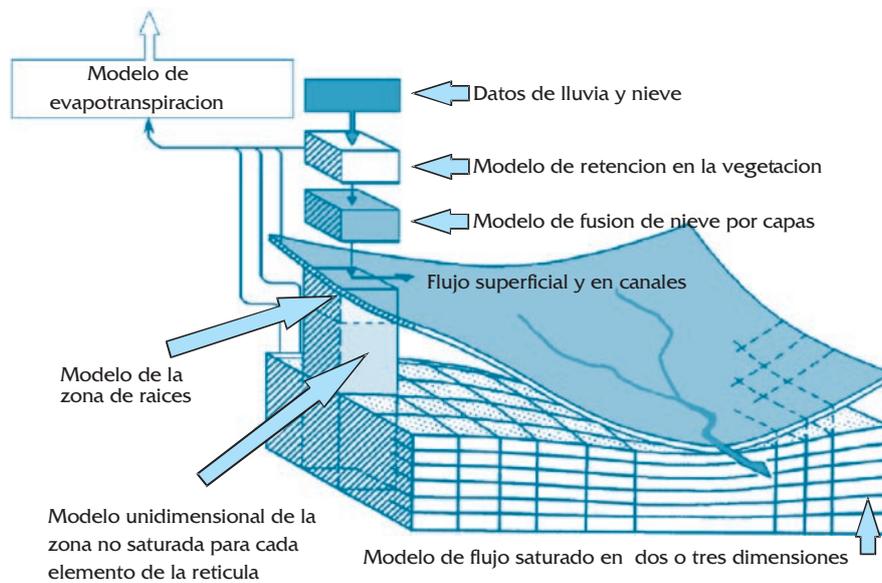


Figura 3: Bosquejo del módulo principal del código distribuido MIKE SHE (modificado en base a Vázquez, 2003).

Investigación de la sensibilidad del modelaje a los métodos de generación de MED

Inicialmente, la cuenca se subdividió en una retícula con una resolución de 600x600 m². La selección de la resolución es consecuencia de las limitaciones computacionales impuestas por el tamaño del área de estudio, antes que por las posibilidades de generación del MED (a partir de la retícula irregular con una resolución aproximada de 30x40 m²). La resolución de 600x600 m² se escogió luego de un AS que relacionó la calidad de predicciones del modelo con su resolución (Vázquez et al., 2002). Este AS consideró las resoluciones de 300x300 m², 600x600 m² y 1200x1200 m². Los resultados del análisis indicaron que los beneficios de considerar un tamaño de retícula inferior a 600x600 m² no fueron tan significativos como el incremento, tipo exponencial, que sufrió el tiempo promedio de cálculo necesario para simular con el modelo durante un período determinado. Por lo tanto, valorando con prioridad el aspecto práctico del modelaje, se decidió escoger la resolución de 600x600 m² para análisis posteriores como el presente.

Es necesario señalar que se espera que esta resolución grosera tenga cierta influencia en los resultados derivados de este estudio. El lector debe estar consciente de que si se hubiera trabajado con una resolución más acorde con la resolución original de los datos puntuales de elevación, los resultados podrían haber sido diferentes a los detallados en este estudio.

Para el presente AS, variando datos de la topografía, se llevó a cabo una prueba de Calibración Múltiple (CM) en la que se calibraron y se evaluaron los tres modelos que tan sólo difieren en el MED (figura 4). Después de la calibración, se compararon los conjuntos de valores efectivos de los parámetros para evaluar su dependencia en la información de los MED. Finalmente, en el período principal de evaluación, se determinaron los errores residuales para investigar la dependencia de la bondad de predicción en los métodos de generación de MED.

La presente investigación apuntó hacia (i) la definición del MED más conveniente para el modelaje hidrológico de la cuenca; y (ii) la evaluación de los efectos que, sobre el presente modelaje hidrológico, tienen las depresiones artificiales ocasionadas por los métodos de interpolación.

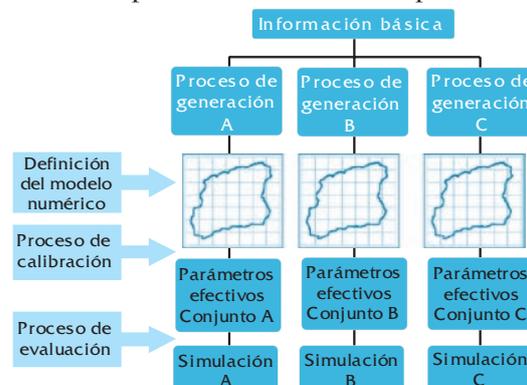


Figura 4: Organigrama de la prueba Multi-calibración (MC) con respecto a los métodos de generación de MDE (modificado en base a Vázquez 2003).

Investigación de la sensibilidad de las predicciones hidrológicas a la estimación de ET

MIKE SHE (DHI, 1998) estima la evapotranspiración real (ET_{act}) a través del método de Kristensen y Jensen (1975), considerando entre otros factores, series de tiempo de evapotranspiración potencial (ET_p). La estimación de ET_{act} depende además de los parámetros del método de Kristensen y Jensen, descritos brevemente en la tabla 2 (DHI, 1998). Por lo tanto, ya que ET_{act} es un componente importante del balance hídrico en una cuenca, se puede esperar que los parámetros (Kristensen y Jensen) y datos (ET_p) mencionados tengan una influencia significativa sobre las predicciones de MIKE SHE. Esto ilustra la importancia de incluir la evapotranspiración, además de la topografía, en el presente análisis de sensibilidad.

En este contexto, se revisan los efectos en las predicciones de los modelos hidrológicos de dos conjuntos de parámetros de Kristensen y Jensen, como se indica en la figura 5. Estos dos conjuntos de parámetros de Kristensen y Jensen se incluyeron en el módulo ET_{act} de MIKE SHE junto con una única serie de valores estimados de ET_p que se obtuvo mediante el método 24 (FAO-24), considerando valores sugeridos por la FAO para los coeficientes del mismo (Doorenbos y Pruitt, 1977; Vázquez, 2003; Vázquez y Feyen, 2004). La serie de tiempo de ET_p se obtuvo teniendo en cuenta los datos meteorológicos de las estaciones indicadas en la figura 1. Los parámetros de Kristensen y Jensen C_1 , C_2 y C_3 son empíricos (DHI, 1998). C_1 depende completamente en la vegetación, C_3 depende tanto en la vegetación como en el tipo de suelo. C_2 se define como una tasa de evaporación básica que ocurre independientemente de la densidad de la vegetación y la humedad en el suelo cuando ésta es mayor que el punto permanente de marchites. A_{rt} es la distribución de la masa de raíces que influencia la manera en la que el agua es extraída de la zona de raíces.

El primer conjunto de parámetros de Kristensen y Jensen (tabla 2) se obtuvo de la literatura (Xevi et al., 1997; DHI, 1998). Este conjunto se utilizó a lo largo de todo el análisis de Calibración Múltiple (CM), esquematizado en la figura 4. El segundo conjunto de parámetros de Kristensen y Jensen (tabla 2) se empleó sólo durante los períodos de evaluación (figura 5). Este conjunto de parámetros de Kristensen y Jensen fue derivado mediante la calibración del modelo asociado al MED(A), sobre la base de los caudales totales y niveles piezométricos observados, considerando para ello, los siguientes intervalos: [0.01, 1.00] para C_{int} ; [0.01, 1.00] para C_1 ; [0.05, 0.50] para C_2 ; [5.0, 40.0] para C_3 ; y [0.00, 5.00] para A_{rt} .

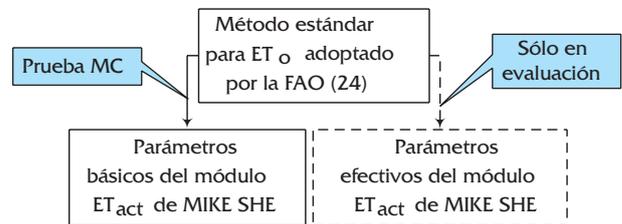


Figura 5: Características de los análisis de sensibilidad con respecto a los MED y la ET.

Asignación de parámetros de la cuenca del Gete a la estructura de MIKE SHE

El proceso de asignación de valores a los parámetros de la estructura de MIKE SHE se describe intensivamente en informes tales como Feyen et al. (2000) y Vázquez et al. (2002). Se recomienda al lector acudir a esos artículos para detalles adicionales a los expuestos en esta sección.

La definición de las características de las secciones transversales de la red fluvial se basó en la interpolación / extrapolación de perfiles medidos. En MIKE SHE se supone que los cauces corren a lo largo de los límites de las celdas de la retícula de cálculo y se definen sobre la base de un modelo fluvial que incluye, entre otros datos,

Tabla 2: Conjuntos de valores de los parámetros de Kristensen y Jensen (MIKE SHE) usados en el análisis de sensibilidad.

Parámetro	Importante para el cálculo de	Valor de la literatura	Valor efectivo
C_{int} [mm]	Capacidad de almacenamiento por interceptación / evaporación de vegetación	0.05	0.07
C_1 [--]	Transpiración de vegetación / evaporación del suelo	0.30	0.28
C_2 [--]	Transpiración de vegetación / evaporación del suelo	0.20	0.07
C_3 [mm día ⁻¹]	Transpiración de vegetación / evaporación del suelo	20	5
A_{rt} [--]	Transpiración de vegetación / evaporación del suelo	1.0	0.09

Leyenda: C_{int} = Coeficiente de Interceptación o retención; C_1 = Parámetro empírico; C_2 = Parámetro empírico; C_3 = Parámetro empírico; A_{rt} = Distribución de la Masa de Raíces.

la información sobre la geometría de la red fluvial, la geometría vertical de los lechos de los cauces y las secciones transversales de los cauces. Se especificaron cotas de desagüe para tomar en cuenta los sistemas de desagüe cuyos detalles no se incluyeron explícitamente en el modelo debido a la baja resolución del modelaje ($600 \times 600 \text{ m}^2$) y así mejorar la forma del hidrograma simulado. En este contexto, se calibraron la cota de desagüe (z_{dr}) y la constante recíproca de desagüe (T_{dr}). $T_{dr} [\text{T}^{-1}]$ puede interpretarse como un coeficiente de desagüe ya que determina la velocidad de desagüe y afecta principalmente los picos del hidrograma simulado. $z_{dr} [\text{L}]$ tiene más influencia en la recesión del hidrograma (Vázquez et al., 2002).

En la cuenca de estudio pueden distinguirse nueve unidades de suelo según la leyenda del mapa de suelos de Bélgica, es decir, suelos arcillosos (Aba, Ada y Adc), suelos areno-arcillosos (Lca, Lda y Ldc), suelos limosos (Eep y Uep) y suelos pedregosos (Gbb). El tipo de suelo dominante en la cuenca es el Aba. La variación espacial de las unidades de suelo y sus propiedades verticales se definieron considerando una extensa base de datos producida con anterioridad (Hubrechts et al., 1997). Los parámetros de las ecuaciones que describen el flujo a través del suelo fueron determinados mediante funciones de Pedotransferencia (FPT). Los parámetros de los suelos no se incluyeron dentro del proceso de calibración, a pesar de la incertidumbre intrínseca en las FPT y a pesar de que la base de datos edafológica no puede proporcionar los valores efectivos de los parámetros de los suelos a la escala de la retícula del modelaje, debido a la diferencia de escalas a las cuales, (i) se recolectó la información de la base de datos edafológica y (ii) se ejecutó el modelo hidrológico. De esta forma se evitó considerar demasiados parámetros (para 9 unidades de suelos) durante el proceso de calibración.

La complejidad del sistema geológico regional indicó que era necesario un modelo tridimensional para simular el flujo subterráneo y los niveles piezométricos. Debido a la falta de medidas, se supuso que la divisoría del sistema subterráneo coincide con la topográfica; así se asignó condiciones de frontera sin flujo a los acuíferos modelados. La geoestratigrafía de la cuenca del Gete incluye nueve unidades geológicas (Vázquez et al., 2002). Sólo dos de éstas cubren completamente el área de la cuenca. Un análisis previo de sensibilidad demostró que el modelo de la cuenca del Gete podría simplificarse agrupando las nueve unidades geológicas en seis unidades de cálculo sin influir en los resultados significativamente (Vázquez et al., 2002).

El modelo incluyó cinco unidades geológicas superiores (Vázquez et al., 2002, Vázquez, 2003): la unidad arcillosa "Quaternarian", la unidad arenosa "Brusseliaan", la unidad areno-arcillosa "Landeniaan", la unidad limo-arenosa "Heers" y la unidad calcárea "Cretaceous". La unidad rocosa "Paleozoic" también se incluyó en el modelaje como un basamento casi impermeable. Se calibraron los parámetros hidrogeológicos de las cinco unidades superiores.

Procesos de calibración y evaluación del modelo hidrológico

Los períodos de calibración y evaluación se escogieron acorde con la disponibilidad de observaciones para el modelaje. Sobre todo, la disponibilidad de datos piezométricos permitió definir el período de calibración como del 1° de enero de 1985 hasta el 31° de diciembre de 1986 y el período principal de evaluación como del 1° de enero de 1987 hasta el 31° de diciembre de 1988. Asimismo, se consideraron otros períodos adicionales de evaluación, de longitud variable, en el marco de una prueba de Períodos Múltiples (PM).

La calibración de modelos distribuidos no es una actividad trivial, debido principalmente a los requisitos de cálculo altos y al elevado número de parámetros incluidos en el modelo. En este estudio se observaron las limitantes de orden físico que se detallan en la tabla 3 y que reflejan la incertidumbre inicial asociada a los parámetros de los modelos de la cuenca. La calibración se efectuó por tanteos, procedimiento con el que se examinó paso a paso la influencia de los diversos parámetros a través de un criterio que se basa en varios estadísticos. En general, para cada método de generación de MED, el modelo hidrológico se calibró y evaluó usando una Partición Simple (PS) del período de observaciones en dos subperíodos para la calibración y evaluación, respectivamente. En los procesos de calibración y evaluación se utilizaron caudales diarios a la salida de la cuenca y niveles piezométricos en 12 pozos de observación con sus filtros en unidades geológicas distintas (figura 6).

Para juzgar cuan bien el modelo calibrado puede simular variables internas se efectuó una prueba de bondad de simulación considerando emplazamientos de control interiores, en este caso 2 estaciones fluviales y 6 pozos de observación que no se consideraron durante el proceso de calibración (figura 6), en el marco de una prueba de Emplazamientos de Control Interiores (ECI).

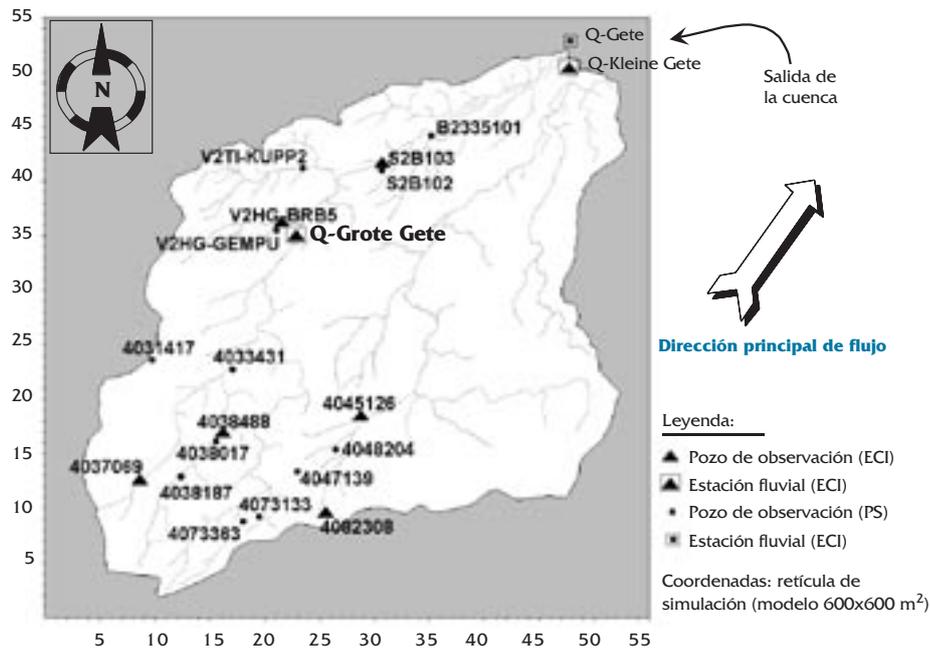


Figura 6: Estaciones de flujo y pozos usados durante los procesos de calibración y evaluación (modificado en base a Vázquez et al., 2002).

Tabla 3: Intervalos físicos considerados durante el proceso de calibración.

Parámetro del modelo	Unidad geológica	Límite del intervalo		
		Inferior	Superior	
z_{dr} [m]		-2.00	-0.10	
T_{dr} [s ⁻¹]		5.0×10^{-8}	1.0×10^{-6}	
K_{sat} [m s ⁻¹]	K_x [m s ⁻¹]	Quaternarian	1.0×10^{-7}	4.0×10^{-5}
		Brusseliaan	7.0×10^{-5}	2.0×10^{-3}
	Landeniaan	Heers	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-4}
		Heers	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-5}
		Cretaceous	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-5}
	K_z [m s ⁻¹]	Quaternarian	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-6}
		Brusseliaan	7.0×10^{-6}	7.0×10^{-5}
		Landeniaan	5.0×10^{-7}	5.0×10^{-5}
		Heers	1.0×10^{-8}	5.0×10^{-6}
		Cretaceous	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-7}
S_y [-]	Quaternarian	0.01	0.30	
	Brusseliaan	0.01	0.44	
	Landeniaan	0.01	0.46	
	Heers	0.02	0.40	
	Cretaceous	0.01	0.46	

Leyenda: K_{sat} = Conductividad Hidráulica Saturada, K_x = Componente horizontal de la Conductividad Hidráulica Saturada, K_z = Componente vertical de la Conductividad Hidráulica Saturada, S_y = Rendimiento Específico.

En general, los modelos hidrológicos distribuidos son sistemas complejos que requieren muchos parámetros (multi-parámetros) y que producen respuestas múltiples, distribuidas espacialmente.

Por ende su evaluación, en términos de la calidad (o bondad) de simulación, requiere un análisis elaborado que investigue diferentes aspectos del comportamiento de los modelos. Bajo estas consideraciones, se combinaron el cálculo de estadísticos con el análisis visual de gráficos auxiliares, tales como hidrogramas, gráficos de volúmenes acumulados y gráficos de correspondencia (“dispersión”) de las variables observadas y simuladas. El grupo de estadísticos se ilustra en la figura 7, en donde, P_i es el valor simulado i , O_i es el valor observado i , \bar{O} es el promedio de los valores observados y n es el número de observaciones. Cada uno de los estadísticos mide información distinta de las propiedades de las diferencias o residuos entre las observaciones y las predicciones del modelo. Por lo tanto, es necesario considerar un grupo de estadísticos, matemáticamente independientes entre sí, y que de forma complementaria, permitan una evaluación integral de la bondad de simulación de un modelo en particular (Vázquez, 2003). Los estadísticos MAE y BIAS miden la magnitud media de los residuos. El estadístico RRMSE mide la desviación típica de los residuos. EF_2 estima el error total entre las observaciones y las predicciones. El estadístico CD proporciona una medida rápida de la calidad de predicción de los caudales picos (Feyen et al., 2000; Vázquez et al., 2002; Vázquez, 2003). Para cada simulación se consideraron, de forma simultánea, las informaciones proporcionadas por todos los estadísticos.

Error Medio Absoluto

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n}$$

Valor óptimo = 0.0
 $0.0 \leq MAE$

Error Medio (Relativo) Cuadrado

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \cdot \frac{1}{\bar{O}}$$

Valor óptimo = 0.0
 $0.0 \leq RRMSE$

Coefficiente de Eficiencia

$$EF_2 = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Valor óptimo = 1.0
 $-\infty < EF_2 \leq 1.0$

Coefficiente de Determinación

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$$

Valor óptimo = 1.0
 $0.0 < CD < +\infty$

Desviación Media

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n}$$

Valor óptimo = 0.0
 $-\infty < BIAS < +\infty$

Figura 7: Criterio estadístico usado en la evaluación cuantitativa de la bondad de predicción (modificado en base a Vázquez y Feyen, 2004).

Con respecto al proceso de calibración, se calibraron la cota de desagüe (z_{dr}) y la constante recíproca de desagüe (T_{dr}) contra el caudal global de la cuenca. Luego, los valores de los parámetros hidrogeológicos de las cinco unidades superiores se variaron contra el caudal global de la cuenca. Cuando el caudal global de la cuenca fue simulado razonablemente bien, se variaron los parámetros hidrogeológicos de cada unidad con el objeto de lograr un acuerdo razonable entre los niveles piezométricos simulados y los observados en los pozos incluidos en la calibración. Finalmente, en base a experiencias de modelaje anteriores (Feyen et al., 2000; Vázquez et al., 2002; Vázquez, 2003), z_{dr} , T_{dr} y la conductividad hidráulica horizontal de las unidades “Quaternarian” (K_w) y “Landenian” (L_n) se volvieron a modificar para mejorar la simulación del caudal global de la cuenca. El incremento de tiempo para el período en el cual las condiciones de frontera no cambian (período de estrés) se tomó igual a un día, debido a la falta de datos observados en períodos más cortos. El intervalo máximo de tiempo para la zona no saturada (NS) y para flujo superficial y en canales (SC) se fijó igual a $T_{maxNS,SC} = 6$ h. El intervalo máximo de tiempo para la zona saturada (ZS) se tomó igual a $T_{maxZS} = 24$ h. Detalles adicionales sobre los intervalos de tiempo de simulación dentro de la estructura de MIKE SHE pueden encontrarse en DHI (1998), Feyen et al. (2000) y Vázquez (2003).

En este estudio se efectuó una prueba adicional de evaluación de las predicciones de los modelos hidrológicos, el Análisis de Valores Extremos (AVE) en el período [1984-1995]. Los valores extremos se identificaron mediante el método conocido como Series de Tiempo de Duración Parcial (STDP), tanto para el hidrograma diario observado como para los hidrogramas simulados. En el método STDP (Rosbjerg et al., 1992; Vázquez, 2003) se consideraron criterios diferentes de independencia tales como las constantes de recesión para flujo superficial, subsuperficial y flujo base a fin de definir los intervalos de independencia de los valores extremos. Las constantes de recesión se identificaron por medio de una transformación logarítmica de la variable de caudales observados.

Con respecto al caudal observado, una vez que los extremos diarios se seleccionaron, se empleó el método conocido como Valores Extremos sobre un Valor Límite (VEVAL o POT por sus siglas en Inglés) para definir la distribución de valores extremos más apropiada para la cuenca (Rosbjerg et al., 1992; Pandey et al., 2003; Vázquez, 2003). El análisis sugirió que los datos observados se ajustan a una distribución exponencial como la que se indica en la ecuación (1), en donde $x_{th} = 6.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ es el valor límite (umbral) sobre el que la distribución tiene una probabilidad máxima de representar apropiadamente los extremos observados y $\kappa_{sc} = 4.211$ es el parámetro de escala de la distribución.

En el caso de los caudales simulados, los períodos de retorno, derivados empíricamente en base a la fórmula de Weibull (Chow et al., 1988), se compararon tanto con los períodos de retorno empíricos de las observaciones como con los períodos de retorno teóricos derivados de acuerdo a la distribución exponencial (ecuación 1).

$$G(x) = 1 - \exp\left(-\frac{(x-x_0)^k}{K_x}\right) \quad (1)$$

RESULTADOS

La tabla 4 muestra los valores efectivos de los parámetros calibrados. La tabla en mención incluye sólo los valores efectivos correspondientes a las unidades “Quaternarian” (Kw) y “Landeniaan” (Ln) que tienen una influencia significativa tanto en el modelado del flujo subterráneo así como en la interacción acuíferos-ríos. Durante la calibración, los parámetros hidrogeológicos se variaron espacialmente, considerando factores tales como la extensión de las subcuencas principales, los límites de las unidades geológicas y la localización de los pozos de bombeo (Vázquez, 2003). Para una unidad particular, los valores indicados en la tabla 4 corresponden a la zona efectiva con los valores más bajos de los parámetros hidrogeológicos.

Tabla 4: Valores efectivos de los principales parámetros del modelo en relación con los métodos de generación de MED.

Parámetro del modelo	Unidad geológica	Método de generación de MED		
		A	B	C
z_{dr} [m]		-0.40	-1.00	-0.40
T_{dr} [s ⁻¹]		9.00×10^{-8}	7.25×10^{-7}	3.75×10^{-7}
K_{sat} [m s ⁻¹]	Quaternarian	2.30×10^{-7}	2.30×10^{-7}	1.50×10^{-7}
	Landeniaan	1.12×10^{-5}	1.12×10^{-5}	1.12×10^{-5}
K_z [m s ⁻¹]	Quaternarian	2.30×10^{-7}	2.30×10^{-7}	1.43×10^{-7}
	Landeniaan	1.12×10^{-6}	1.12×10^{-6}	6.72×10^{-6}
S_y [–]	Quaternarian	0.20	0.20	0.15
	Landeniaan	0.35	0.30	0.18

La Calibración Múltiple (CM) señaló una influencia significativa de los métodos de generación de MED en los valores efectivos adoptados por los parámetros que se inspeccionaron. Los efectos se notaron especialmente en z_{dr} y T_{dr} , parámetros que afectan a la simulación de procesos superficiales.

El análisis de CM indicó una diferencia significativa también entre los valores efectivos del rendimiento específico (S_y) de la unidad “Landeniaan” asociada al MED(C) en relación con los valores efectivos asociados a los otros MED (tabla 4).

La prueba de Períodos Múltiples (PM) aplicada a las predicciones del caudal global de la cuenca indicó una dependencia de los valores de los estadísticos, tales como EF_2 , en la amplitud del período de análisis. Así por ejemplo, en el período de análisis [1984-1995], usando el conjunto de parámetros efectivos de Kristensen y Jensen (1975) en el módulo de evapotranspiración real (ET_{act}) de MIKE SHE, los siguientes valores de EF_2 se observaron: 0.734 (MED(A)), 0.777 (MED(B)) y 0.731 (MED(C)). Para el período de análisis [1991-1995], los valores correspondientes son: 0.645 (MED(A)), 0.628 (MED(B)) y 0.699 (MED(C)). Para un período de análisis anual, la figura 8 ilustra los valores del estadístico EF_2 , conforme a los dos conjuntos de parámetros de Kristensen y Jensen. La parte (a) de la figura 8 corresponde al conjunto de valores básicos tomados de la literatura (Xevi et al., 1997; DHI, 1998), mientras que la parte (b) corresponde al conjunto de valores efectivos. La figura permite apreciar aún más claramente el contraste de los valores anuales del índice con respecto a los valores para períodos más largos.

La figura 8 indica además una mejora significativa de la actuación de los modelos cuando se usan los valores efectivos de los parámetros de Kristensen y Jensen, sobre todo en la última parte del período de evaluación. Los resultados de la prueba PM indicaron además que, en general, los modelos asociados al MED(B) fueron los mejores en el período [1984-1993]; sin embargo, fueron las peores en los años 1994 y 1995. En la primera evaluación, considerando valores básicos para los parámetros de Kristensen y Jensen (figura 8, parte a), las predicciones asociadas al MED(A) y al MED(C) fueron levemente dispares; ésta diferencia, en términos de predicción, se incrementó en la segunda evaluación (figura 8, parte b).

La Figura 9 muestra los resultados del AVE según los métodos de generación de MED y los dos conjuntos de valores de los parámetros de Kristensen y Jensen (MIKE SHE). Todos los modelos infravaloraron ligeramente los flujos máximos. Sin embargo, los modelos asociados al MED(B) y al MED(C) tendieron a simular los flujos máximos de una manera más apropiada que el modelo asociado al MED(A).

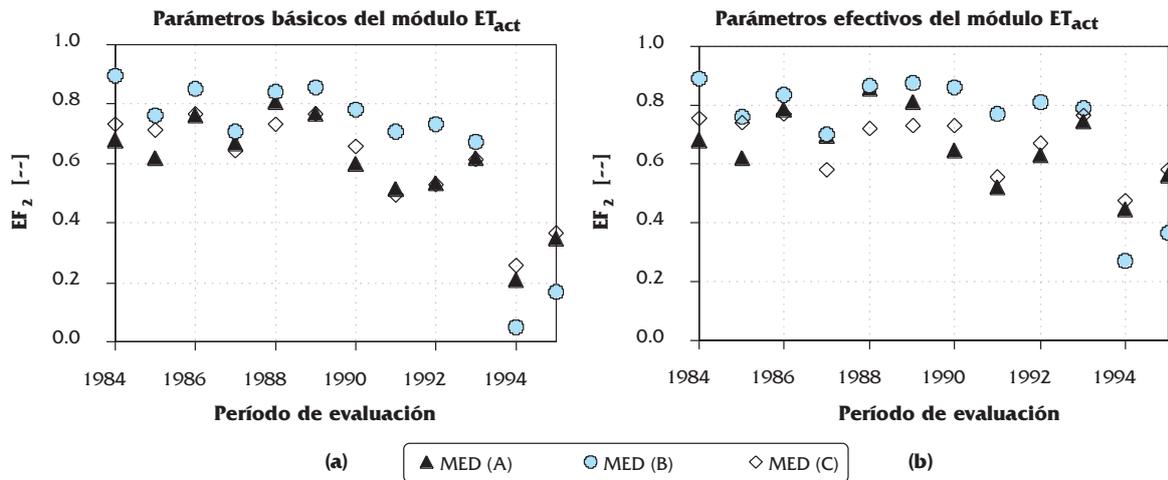


Figura 8: Índices anuales de bondad de predicción de los caudales de la estación Gete con respecto a los métodos de generación de MED y los parámetros del módulo ET_{act} de MIKE SHE (modificado en base a Vázquez, 2003).

La figura también indica que considerando los valores efectivos para los parámetros del módulo ET_{act} (figura 9, parte b) reforzó ligeramente las predicciones de caudales máximos de los modelos asociados al MED(B) y al MED(C).

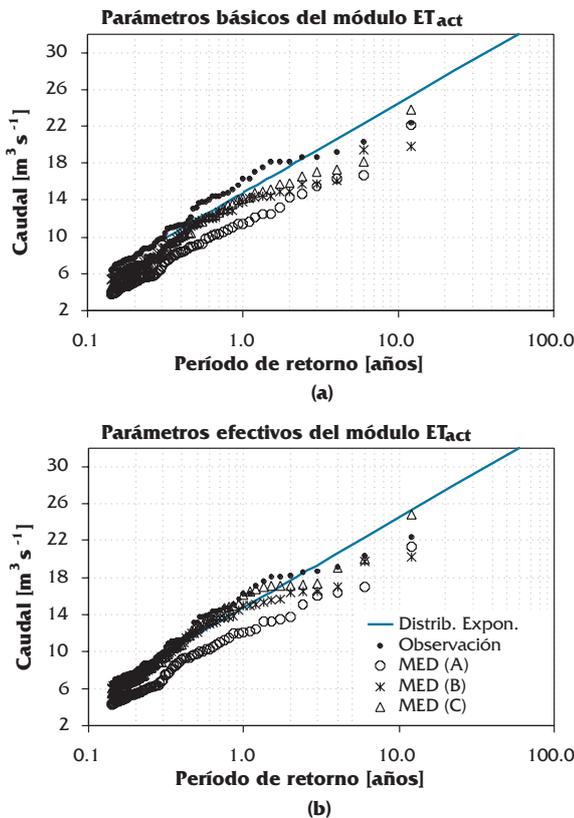


Figura 9: Análisis de Valores Extremos de los caudales de la estación Gete con respecto a los métodos de generación de MED y los parámetros del módulo ET_{act} de MIKE SHE (modificado en base a Vázquez, 2003).

Las predicciones de niveles piezométricos se ilustran en la figura 10 para (a) tres pozos de observación incluidos en la prueba de Partición Simple (PS) del período de observaciones y (b) dos pozos considerados en la prueba de evaluación en Emplazamientos de Control Interiores (ECI), que no fueron tomados en cuenta durante la calibración de los modelos (Cf. figura 6). En general, la figura muestra que la predicción de los niveles piezométricos difirió considerablemente entre los distintos pozos de observación y que se registró una variación considerable del comportamiento de los modelos en función de los MED usados en la Calibración Múltiple (CM). Además de algunas diferencias significativas de orden local con respecto a las cotas que se emplearon para monitorear los pozos y los datos base de elevación a partir de los cuales se obtuvieron los MED, aparentemente, las diferencias en predicción piezométrica indicadas en la figura 10 se deben principalmente a los distintos conjuntos de parámetros variados durante la calibración (tabla 4). En este sentido, el nivel de los drenajes artificiales (z_{dr}) afecta directamente al nivel de la tabla de agua y los parámetros hidrogeológicos de la unidad "Quaternarian" afectan la recarga hacia los acuíferos más profundos y por ende los niveles piezométricos en los mismos.

Teniendo en cuenta las predicciones piezométricas en todos los pozos incluidos en las pruebas PS y ECI, la calidad de predicción se puede clasificar en el siguiente orden: modelo asociado al MED(A) seguido de los modelos asociados al MED(C) y al MED(B).

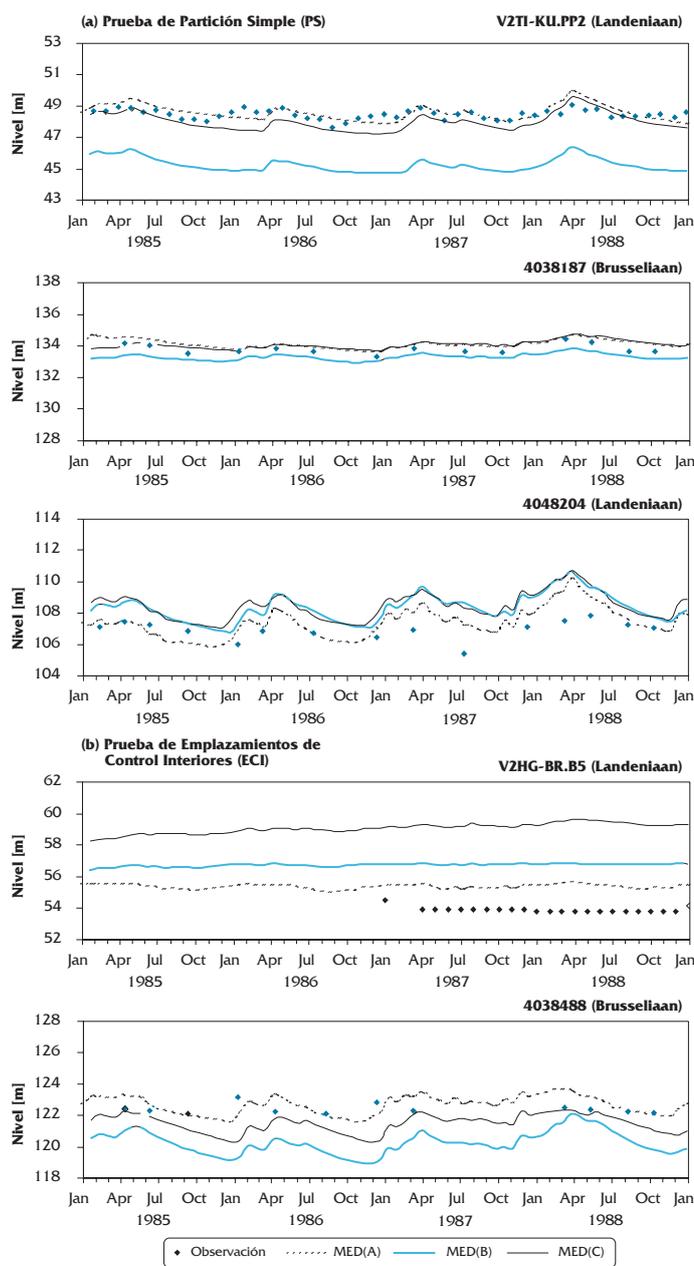


Figura 10: Efectos de los métodos de generación de MED en la simulación de los niveles piezométricos de algunos de los pozos considerados en las pruebas de (a) PS y (b) ECI.

CONCLUSIONES

En este estudio se evaluaron los efectos de tres métodos de interpolación de elevaciones sobre las predicciones y los valores efectivos de los parámetros de un modelo hidrológico distribuido en la cuenca del río Gete. El estudio comparó también la influencia de dos conjuntos de parámetros para la estimación de la evapotranspiración (ET) sobre las predicciones del modelo.

La prueba de Calibración Múltiple (CM) reveló una influencia significativa de los MED en los parámetros efectivos de los modelos distribuidos, sobre todo con respecto a los parámetros asociados a la simulación de procesos superficiales.

El hecho de que las predicciones del caudal total, asociadas al MED(B), fueron las mejores para la mayoría de los períodos de evaluación (Cf. figura 8) podría estar influido por el uso, en este estudio, de un único modelo fluvial independientemente de las propiedades de elevación de los diferentes MED incluidos. Sin embargo, al parecer, la presencia de depresiones artificiales inducidas por el método de interpolación (B) fueron necesarias para incluir, de alguna manera, accidentes geomorfológicos que tienden a desaparecer con retículas de tamaño grueso como las utilizadas en este estudio.

El análisis considerando Emplazamientos de Control Interiores (ECI) reveló que los modelos predicen variables de estado distribuidas con una calidad aún más baja con respecto a las variables calibradas. La prueba de evaluación considerando Períodos Múltiples (PM) indicó la dependencia de los valores de los estadísticos para medir la bondad de las predicciones de los modelos, con respecto a la amplitud del período de evaluación. Esto no sólo ilustra la necesidad de la evaluación de un modelo distribuido, considerado la prueba tradicional de Partición Simple (PS), sino también de evaluaciones que enfoquen la variabilidad espacial (como la prueba ECI) y temporal (como la prueba PM), acorde con la naturaleza distribuida y temporal del modelaje.

Considerando todos los resultados obtenidos en este estudio, fue difícil escoger el MED más apropiado para la actividad del modelaje. Por un lado, el análisis mostró que las predicciones de caudal total y de flujos máximos producidas por el modelo asociado al MED(B) fueron las mejores. Sin embargo, el método de interpolación empleado para obtener el MED(B) indujo depresiones artificiales en el relieve de éste. Por otro lado, la calidad de predicciones piezométricas asociadas al MED(B) aparentemente fue la más pobre. Si, sobre la consideración de la incertidumbre significativa de los datos geológicos usados en el presente modelaje (Vázquez et al., 2002), se da a la simulación de caudales y de flujos máximos una relevancia más alta que a la simulación de niveles piezométricos, entonces el método de generación más apropiado para el presente modelaje sería el B, aunque el modelo no se comporte aceptablemente en el año 1994 (Cf. figura 8).

El análisis también indicó una mejoría considerable en la calidad de las predicciones de flujos superficiales cuando parámetros efectivos de Kristensen y Jensen (1975) se usaron en el modelaje, en lugar de parámetros derivados de la literatura. Esto sugiere que las predicciones de MIKE SHE se ven afectadas significativamente por los valores estimados de evapotranspiración (ET) que se consideran en el modelaje. Por ende, debería tenerse un cuidado especial para estimar valores reales de ET a fin de definir modelos distribuidos de cuencas, basados en principios físicos.

Sobre la evidencia arrojada por este estudio se puede concluir que existe un efecto significativo de las variables estudiadas, topografía y ET, en las predicciones del modelaje así como en los parámetros efectivos derivados mediante la calibración del modelo. El presente análisis podría extenderse en el futuro para incluir por ejemplo MED sometidos a procesos de filtración posteriores a su obtención y otros métodos para estimar ET_p , distintos al método estándar FAO-24.

AGRADECIMIENTO

Este estudio fue posible gracias al financiamiento de la OSTC (oficina Federal Belga para asuntos culturales, técnicos y científicos, proyecto CG/DD/08C) y del Programa Ínter universitario (K.U.Leuven-V.U.Brussel) en Ingeniería de Recursos Hídricos (IUPWARE). La redacción de este artículo fue posible gracias al financiamiento por parte de la K.U. Leuven (post-doctoral mandate PDM/03/108). El presente trabajo es el resultado de un largo y continuado proceso de investigación. Los autores quisieran expresar su agradecimiento perenne a todos aquéllos que de una u otra forma supieron brindarles su apoyo y aportaron con nuevos aires a sus pensamientos iniciales.

REFERENCIAS

- Chow V. T., Maidment D. R. y Mays L. W. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill international Editions, Singapore, 572pp.
- DHI, (1998). MIKE-SHE v.5.30 User Guide and Technical Reference Manual, Danish Hydraulic Institute, Copenhagen, 50pp.
- Doorenbos J. y Pruitt W. O., (1977). FAO Irrigation and Drainage Paper 24: Crop water requirements, FAO, Roma, 156.
- Feyen L., Vázquez R. F., Christiaens K., Sels O. y Feyen J., (2000). Application of a distributed physically-based hydrologic model to a medium size catchment. *Hydrology and Earth System Sciences* 4, 47-63.
- Hubrechts L., Vlassak V., Van Crielingen A. y Feyen J. (1997). En publicación interna (48) Handleiding bij AARDEWERK-SISBIS: Bevragsingssysteem voor bodemprofielgegevens, bodemoppervlaktegegevens en bodemgeschiktheids-gegevens. Institute for Land and Water Management (K.U.Leuven), Lovaina, 56pp.
- Jayatilaka C.J., Storm B. y Mudgway, L.B., (1998). Simulation of water flow on irrigation bay scale with MIKE SHE. *Journal of Hydrology* 208, 108-130.
- Kristensen K.J. y Jensen S.E. (1975). A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration, *Nordic Hydrology* 6, 170-188.
- Madsen H. (2003). Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources* 26, 205-216.
- Pandey M. D., van Gelder P. H. A. J. M. y Vrijling J. K. (2003). The Use of L-Moments in the Peak Over Threshold Approach for Estimating Extreme Quantiles of Wind Velocity. Memorias de "the European Safety and Reliability Conference 2003", Maastricht, Países Bajos.
- Quinn P., Beven K.J. y Lamb R. (1995). The $\ln(a/\tan\beta)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. *Hydrological Processes* 9, 161-182.
- Refsgaard J.C. y Storm B., (1995). MIKE SHE. En: Singh, V P (ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Capítulo 23, Water Resources Publications, Highlands Ranch, 809-846.
- Refsgaard J.C. (1997). Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198, 69-97.
- Rosbjerg D., Madsen H. y Rasmussen P. F. (1992). Prediction in partial duration series with generalized Pareto-distributed exceedances. *Water Resources Research*, 28, 3001-3010.
- Saulnier G.-M., Obled Ch. y Beven, K. (1997). Analytical compensation between DTM grid resolution and effective values of saturated hydraulic conductivity within the TOPMODEL framework. *Hydrological Processes* 11, 1331-1346.
- Vázquez R.F., Feyen L., Feyen J. y Refsgaard J.C., (2002). Effect of grid-size on effective parameters and model performance of the MIKE SHE code applied to a medium sized catchment. *Hydrological Processes* 16, 355-372.
- Vázquez R.F., (2003). Assessment of the performance of physically based distributed codes simulating medium size hydrological systems. PhD thesis ISBN 90-5682-416-3, Department of Civil Engineering, K. U. Leuven, Lovaina, 335pp.

- Vázquez R.F. y Feyen J., (2004). Potential Evapotranspiration for the distributed modelling of Belgian basins. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 130, 1-8.
- Walker J.P. y Willgoose G.R., (1999). On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research* 35, 2259-2268.
- Xevi E., Christiaens K., Espino A., Sewnandan W., Mallants D., Sorensen H. y Feyen J., (1997). Calibration, Validation and Sensitivity Analysis of the MIKE-SHE Model Using the Neuenkirchen Catchment as Case Study. *Water Resources Management* 11, 219-239.