

APLICACIÓN DEL MODELO SHETRAN V3.4 PARA EL CALCULO DE CAUDALES EN LA CUENCA DEL RÍO SAR

*Díaz-Fierros Tabernero, F., (1) Díaz-Fierros Viqueira,
F. (1) y O'Connell, P. E. (2)*

*(1) Dpto. de Edafología e Química Agrícola, Fac. de Farmacia,
Univ. de Santiago de Compostela.
(2) Water Resource System Research Lab., Dept. of Civil Engineering,
Univ. of Newcastle Upon Tyne.*

SUMMARY

Application of SHETRAN V3.4 Model for calculation of water flow in River Sar basin

SHETRAN V3.4 belongs to the group of hydrological models that works with a powerful physical basis and spatially disaggregated. It was developed in the WRSRL of the University of Newcastle Upon tyne (United Kingdom) from SHE model, it had been used with success for the modelling of surface flow in a basin scale as well as the sediment and contaminants transport. In this study were shown the first results of the application of the water flow to the upper basin of the River Sar. Hourly data of discharge in the outlet of the basin to the calibration of the model with adequate results ($R^2 = 0,81$ and $EF = 0,72$). Also, the model was applicated with success for the calculation of the relations area-volume in the basin. This study was a part of a work more spacious for analyzing the diffuse contamination with an urban origin.

Key words: SHETRAN V3.4, water flow, basin.

RESUMEN

SHETRAN V3.4, pertenece al grupo de modelos hidrológicos que funcionan con una potente base física y espacialmente desagregados. Desarrollado en el *WRSRL* de la Universidad de Newcastle Upon Tyne (Reino Unido) a partir del SHE, se ha utilizado con éxito para la modelización del flujo superficial a escala de cuenca, así como del transporte de sedimentos y contaminantes. En este trabajo se presentan los primeros resultados de la aplicación de la componente del flujo (*Water Flow*) a la cuenca superior del río Sar. Se utilizaron datos horarios de caudal en el cierre de cuenca para la calibración del modelo con resultados adecuados ($R^2 = 0,81$ y $EF = 0,72$). Además, se aplicó con éxito para el cálculo de las relaciones área-caudal en la cuenca, como parte de un trabajo más amplio en el que se estudió la contaminación difusa de origen urbano.

Palabras clave: SHETRAN V3.4, caudal, cuenca.

INTRODUCCIÓN

SHETRAN V3.4 (BATHURST *et al*, 1995; PARKIN, 1995 a,b) es un potente modelo hidrológico de base física y espacialmente desagregado (en la literatura anglosajona *PBSD, Physically-Based Spatial-Distributed*) para la simulación del flujo de agua y el transporte de sedimentos y contaminantes a escala de cuenca. Integra el movimiento superficial y subsuperficial del agua a través de una cuenca, incorporando los principales elementos y procesos de la fase terrestre del ciclo hidrológico.

Su origen se encuentra en el *Système Hydrologique Européen* (SHE), promovido y financiado por la U. E. en 1976 y desarrollando conjuntamente por el *Danish Hydraulic Institute* (Dinamarca), el *Institute of Hydrology* (Reino Unido) y SOGREAH (Francia). La primera versión operacional apareció en 1982 y desde entonces ha experimentado un intenso proceso de desarrollo y mejora continua. En Inglaterra, el *Water Resource System Research Laboratory* de la Universidad de Newcastle Upon Tyne ha continuado con la labor del *Institute of Hydrology*, desarrollando las aplicaciones de transporte de sedimentos y contaminantes.

En este estudio se presentan los primeros resultados de la aplicación del modelo al cálculo de caudales de la cuenca superior del río Sar, como parte de un trabajo más amplio en el que se estudió la contaminación difusa de origen urbano en el río Sar (DÍAZ-FIERROS, 2000). La cuenca de estudio, de 82,6 Km², comprende el área de drenaje del río Sar desde su nacimiento, poco antes de la ciudad de Santiago de Compostela, hasta Lapidó (Bertamiráns). El río en ese tramo tiene una longitud de 17 Km y un caudal medio de 2,2 m³/s.

ESTRUCTURA DEL MODELO

SHETRAN V 3.4 es un modelo de base física ya que los procesos de flujo y transporte del agua se modelizan resolviendo ecuaciones de conservación de masa, momento y energía o bien mediante ecuaciones empíricas. Los parámetros del modelo tienen un significado físico y pueden medirse. La distribución o desagregación espacial de la precipitación, de los procesos y propiedades de la cuenca y de sus respuestas se consigue en el plano

horizontal por la representación de la cuenca en una malla ortogonal y en el vertical por una columna de diferentes capas horizontales en cada cuadrado de malla. El sistema de cauces o canales se representa en los bordes de malla (fig. 1).

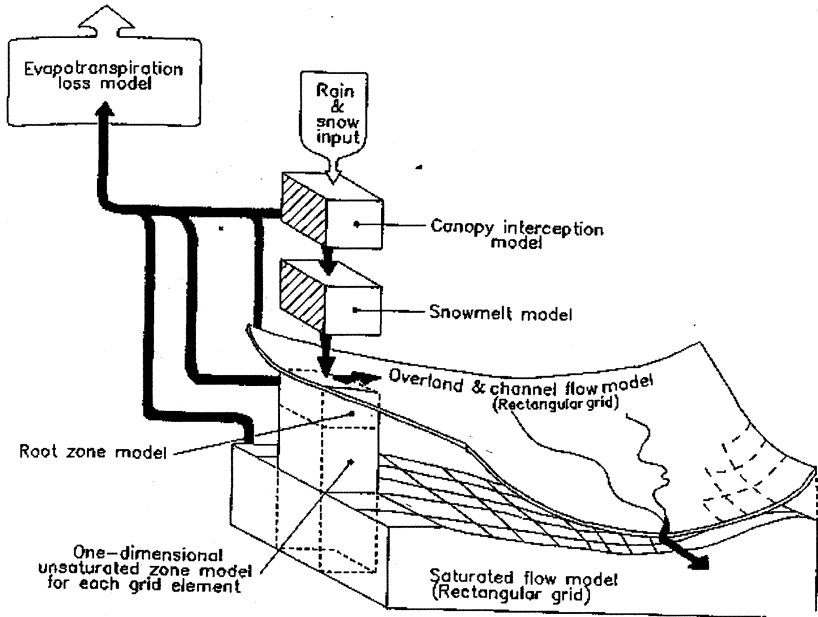


Figura 1. Representación de la cuenca en SHETRAN V3.4 mediante una malla rectangular compuesta por celdas y columnas.

SHETRAN tienen una estructura modular, con cinco componentes: WAT = *water flow*, SY = *sediment transport*, CM = *contaminant transport*, FRA = *frame* y SHE = biblioteca. Cada componente está compuesto por diversos módulos. Los componentes y módulos representan los diferentes procesos físicos del ciclo hidrológico en cada parte de la cuenca. Asume que el flujo de agua no se ve afectado por el transporte de sedimentos y éste a su vez por el de contaminantes, por lo que los tres componentes principales trabajan en base a una jerarquía natural: primero el flujo, luego el transporte de sedimentos y por último el de contaminantes (fig. 2).

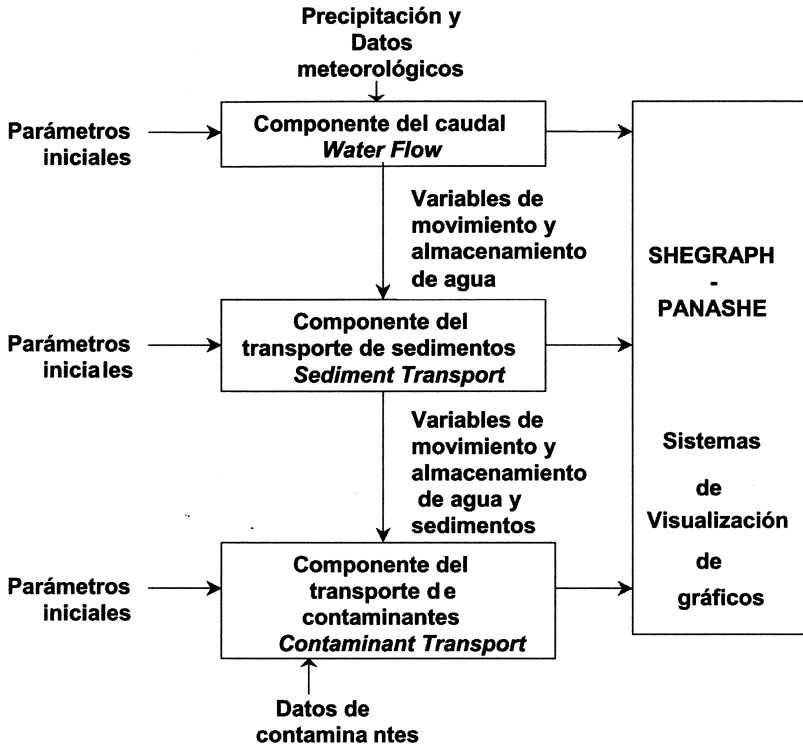


Figura 2. Componentes de cálculo en SHETRAN V3.4

El *Frame component* controla la totalidad de los parámetros y procesos de la simulación, incluyendo la forma, el tamaño y número de elementos de la cuenca, lectura e inicialización de las entradas, el intervalo de cálculo, número y tipo de salidas y duración de la simulación. Todas las componentes usan el mismo intervalo de cálculo, pero éste puede variar durante la simulación. En los momentos secos puede ser relativamente largo (lo normal suele ser 1-2 horas). En momentos de tormenta es normal usar un intervalo más corto para poder recoger adecuadamente las rápidas variaciones que se puedan producir en la infiltración o escorrentía. El intervalo de cálculo se modifica en SHETRAN V3.4 en base a criterios definidos por el usuario dependiendo de la cantidad e intensidad de lluvia.

Los resultados se obtienen en una serie de archivos gráficos sin formato que pueden ser leídos y visualizados mediante las aplicaciones SHEGRAPH o PANASHE (BIRKINSHAW, 1995). Las salidas incluyen variaciones temporales en cualquier punto de la malla, variaciones espaciales en cualquier momento de la simulación, perfiles verticales de las variables subsuperficiales y representaciones en 3-D o en gráficas, y todo esto para un gran número de variables de flujo, sedimentación y transporte. Los datos iniciales de entrada al modelo, la información de diagnóstico y los resúmenes estadísticos de la simulación están escritos en formato ASCII.

Dado que estos primeros resultados de la aplicación de SHETRAN V3.4 a la cuenca del río Sar se ha centrado única y exclusivamente en la componente del flujo, sólo se especificará aquí la estructura y funcionamiento de dicha componente.

COMPONENTE DEL WATER FLOW

Consta de seis módulos: ET = *evapotranspiration/interception*, OC = *overland/channel*, UZ = *unsaturated zone*, SZ = *saturated zone*, EX = *aquifer-channel exchange* y SN = *snowmelt*. El último de los módulos no se ha utilizado en la cuenca del Sar, por lo que tampoco se hará referencia a él. Los datos de entrada y parámetros del modelo que se necesitan para cada módulo son:

1. Parámetros generales (*FRA component*):
 - Elevaciones del terreno
 - Niveles de la roca madre
 - Distribución de estaciones meteorológicas y de lluvia
 - Distribución de tipos de suelos y vegetaciones.
2. Datos de entrada:
 - Meteorológicos (ETP) y precipitación.
3. Condiciones iniciales:
 - Nivel de la capa freática
 - Profundidad del flujo superficial y profundidad de los canales

4. Condiciones de borde de malla:

- Nivel del agua en los bordes de malla
- Descargas y extracciones artificiales en los cauces
- Flujos o potenciales subterráneos en los bordes de malla
- Datos de recarga y extracciones de agua subterránea

5. Parámetros de intercepción:

- Parámetros de drenaje
- Capacidad de almacenamiento de la cubierta vegetal
- Índice de cubierta del suelo

6. Parámetros de evapotranspiración (*ET component*):

- Resistencia estomática
- Resistencia aerodinámica
- Índice foliar.
- Relación entre la ETR (evapotranspiración real) y ETP (evapotranspiración potencial) en función de la tensión de humedad del suelo
- Distribución de las raíces en profundidad

7. Parámetros del flujo superficial (*OC component*):

- Coeficientes de resistencia de Strickler para el flujo laminar (*overland flow*) y en canales (*channel flow*)
- Curva de gastos del vertedero
- Geometría de los canales

8. Parámetros de la zona no saturada (*UZ component*):

- Relación entre contenido y tensión de humedad del suelo
- Conductividad hidráulica en zona no saturada en función del contenido en humedad

9. Parámetros de la zona saturada (*SZ component*):

- Porosidades
- Conductividad hidráulica en zona saturada

SHETRAN V3.4 modeliza la escorrentía superficial laminar y en canales y el flujo de agua a través del suelo en la zona no saturada y saturada, mediante la ejecución de una secuencia normal de procesos (fig. 3). Los principales procesos que entran en juego se presentan a continuación:

- Intercepción de la lluvia sobre la cubierta vegetal.
- Evaporación de la lluvia interceptada, el agua del suelo y de los cauces.
- Transpiración
- Infiltración
- Flujo unidimensional en la zona no saturada.
- Flujo bidimensional en la zona saturada.
- Flujo bidimensional en la superficie del suelo
- Flujo unidimensional en los cauces
- Combinaciones entre acuíferos combinados y no combinados.
- Transferencias entre el agua de la capa freática y los cauces.
- Descargas del agua subterránea.
- Extracción e introducción de agua en los cauces.

La intercepción calcula la precipitación neta que llega al suelo a través de la cubierta vegetal, la cantidad de agua retenida en la cubierta y la evaporación desde ésta, mediante integración analítica de la ecuación de Rutter. Generalmente los parámetros C (profundidad de agua en la cubierta), S (capacidad de almacenamiento de la cubierta) k y b (parámetros de drenaje) no pueden ser medidos directamente en el campo aunque pueden estimarse indirectamente de las medidas de lluvia, la lluvia neta bajo cubierta y la ETP.

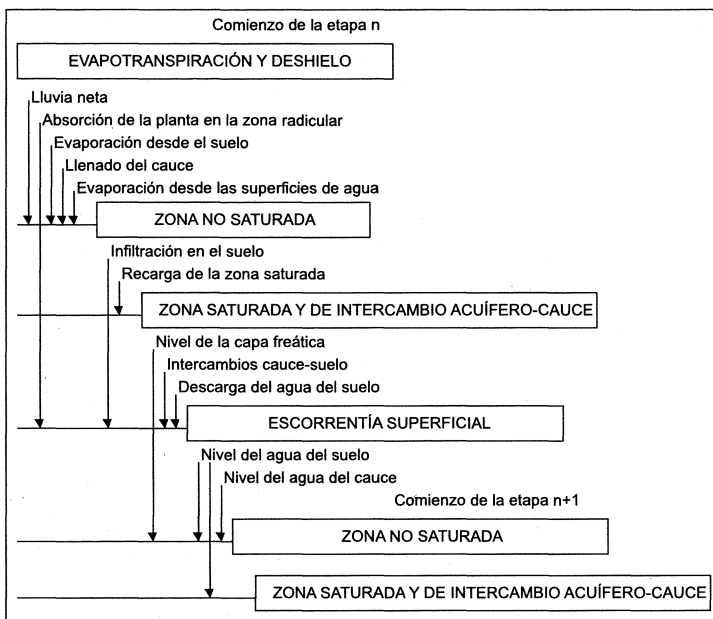


Figura 3. Secuencia de procesos ejecutados en SHETRAN V3.4 para el cálculo de caudales.

Mediante la ecuación de Penman-Monteith se calcula la evapotranspiración real (ETR), que se traduce en un término de pérdida que describe la toma de agua por las raíces y su transpiración en condiciones secas, parcialmente húmedas y húmedas. El término de pérdida es utilizado por el módulo UZ para el cálculo de la humedad del suelo. Existen tres modos de operación, dependiendo de la resistencia de la cubierta vegetal o resistencia estomática, r_c :

- a) r_c es constante para cada tipo de vegetación.
- b) r_c varía en función de la tensión de humedad del suelo y los tipos de vegetación.
- c) r_c es cero, con lo que se obtiene la evapotranspiración potencial (ETP). La evapotranspiración real se calcula entonces por la relación especificada entre el cociente ETP/ETR y la tensión de humedad del suelo. En este caso, pueden introducirse en el modelo directamente los valores medidos de ETP.

En el módulo OC, el flujo superficial laminar (*overland flow*) y en canales (*channel flow*) depende de la topografía, forma de los canales y resistencia al flujo, utilizando las ecuaciones de continuidad y momento de Saint Venant y la fórmula de Mannig/Strickler para el cálculo de la resistencia al flujo. El flujo laminar se genera por exceso de precipitación frente a infiltración o por ascenso del nivel freático de la zona no saturada y se modula en 2 dimensiones. El flujo en canales es unidimensional.

El módulo de la zona no saturada, UZ, determina el contenido y tensión de la humedad del suelo en esta zona, la infiltración y el intercambio con la zona saturada a nivel de la capa freática. Las propiedades físicas de esta zona son poco uniformes: en su parte alta, la zona de raíces, exhibe importantes variaciones en el contenido de humedad del suelo como resultado de la evapotranspiración e infiltración; en su parte baja varía en función del nivel de la capa freática. Este módulo juega un papel crucial en la modelización del flujo ya que los demás módulos dependen de él. Asumiendo que existe sólo un flujo unidimensional en la vertical, el modelo trabaja en base a la ecuación de Richards.

En la zona saturada (SZ) se determina el nivel de la capa freática, el flujo en la zona saturada como un acuífero no confinado, los intercambios acuífero/canal, la recarga del agua subterránea y las extracciones artificiales. La variación con el tiempo de la capa freática es modelada mediante la ecuación de Boussinesq, que combina la ley de Darcy y la conservación de masa, para un flujo laminar bidimensional en un acuífero anisotrópico y heterogéneo.

APLICACIÓN DEL WATER FLOW A LA CUENCA SUPERIOR DEL RÍO SAR

Para trabajar con el modelo lo primero que se hizo fue construir digitalmente la estructura básica de la cuenca del río Sar, representando en una malla ortogonal su forma y tamaño, subdividiéndola en celdas y columnas y representando en ellas topografía, canales (cauces), suelos y vegetación. Para representar las características de la cuenca se partió de mapas a escala 1:25.000 de topografía y usos del suelo por hectárea. Se construyó una base

espacial de 80 Km² y se dividió en 311 celdas de 500 x 500 m. Sobre la malla se representaron los distintos canales, formados por 132 elementos de borde de malla. Se asignaron elevaciones, tipos de suelo y clases de vegetación para cada celda y se construyeron de esta forma los distintos mapas que forman la base topográfica de la simulación (fig. 4). Además se introdujeron como entradas al modelo los datos de precipitación y ETP diaria.

Cada tipo de suelo, o lo que es lo mismo, cada columna de celda, está formado por la interacción de dos características: textura y profundidad. A su vez, cada textura está definida por una serie de propiedades físicas. La profundidad se establece por un número de nódulos verticales determinado. Se establecieron tres texturas y 6 profundidades diferentes que dieron lugar a 8 tipos de suelo.

Para cada clase de vegetación se definieron distintas propiedades específicas, además de la profundidad de raíces (que depende de la profundidad de columna) y distribución de las raíces en profundidad, es decir, porcentaje radicular en cada nódulo. Se establecieron 5 categorías principales de vegetación: bosque perenne (coníferas y eucaliptos), bosque mixto (frondosas, coníferas, eucaliptos y monte bajo), prado, suelo urbano y cultivos. Las dos primeras categorías se dividieron a su vez en otras tres categorías, dependiendo de la profundidad de las raíces, con lo que se obtuvieron finalmente 9 clases de vegetación-usos del suelo.

La calibración del modelo se realizó para el período enero/98 – marzo/99, utilizando como referencia los datos de caudal del río Sar medidos en Lapido. Para ello se dispuso de una estación hidrométrica en la que se registraron las alturas del río cada 10 minutos, transformándolas en caudales mediante la curva de gastos previamente calculada. El resultado de la simulación para el período de calibración fue bastante satisfactorio dada la complejidad del modelo (fig. 5). Los resultados estadísticos de la simulación fueron los siguientes:

Eficiencia del modelo (EF) = 0,72

Coefficiente de correlación (R^2) = 0,81

Diferencia acumulada (Accdiff) = -194,7

Raíz del error medio cuadrado (RMSE) = 2,55

Coefficiente de masa residual (CRM) = 0,224

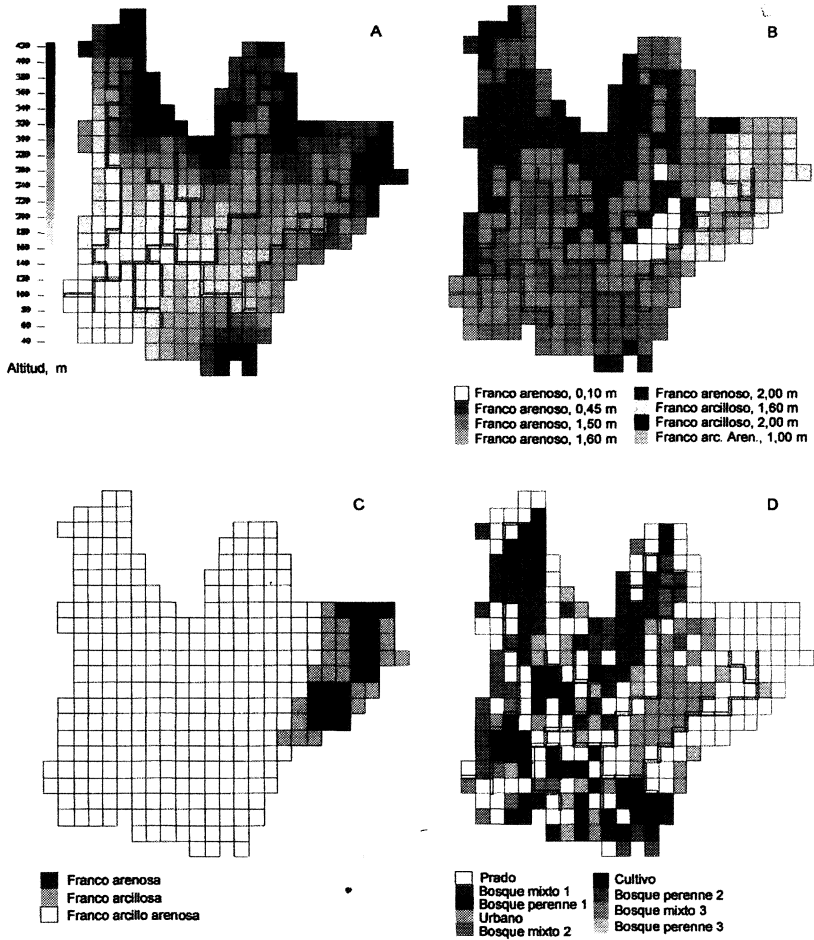


Figura 4. Representación de la cuenca del río Sar en SHETRAN V3.4

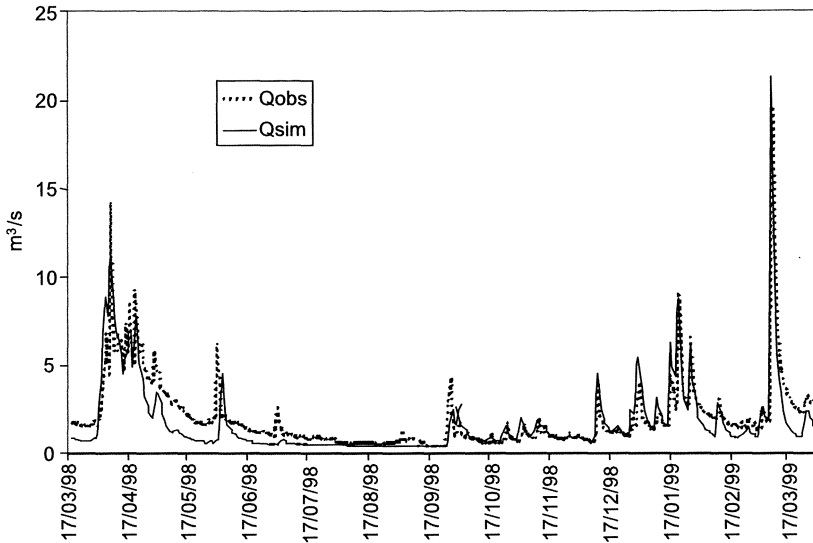


Figura 5. Resultado de la calibración del modelo entre el caudal horario observado (Oobs) y el simulado (Qsim) para el periodo 01/01/98 – 31/03/99.

Un valor positivo de CRM indica una infraestimación generalizada de la simulación (VANCLOOSTER *et al.*, 1992), lo que sucede en este caso. De igual forma, el valor obtenido de Accdiff refleja una infraestimación del modelo, fundamentalmente debido a que en los períodos secos el nivel del caudal simulado desciende en exceso y el modelo no es capaz de mantener el flujo basal del río.

Se realizó una simulación del caudal del río Sar en la cuenca para el período 01/01/96 – 31/03/99, utilizando los parámetros obtenidos en la calibración del modelo. El resultado se muestra en la figura 6, en la que se puede observar cómo SHETRAN V3.4 responde de forma rápida en los momentos de lluvia, con picos bien definidos, pero no es capaz de mantener un adecuado nivel basal en los momentos de estiaje.

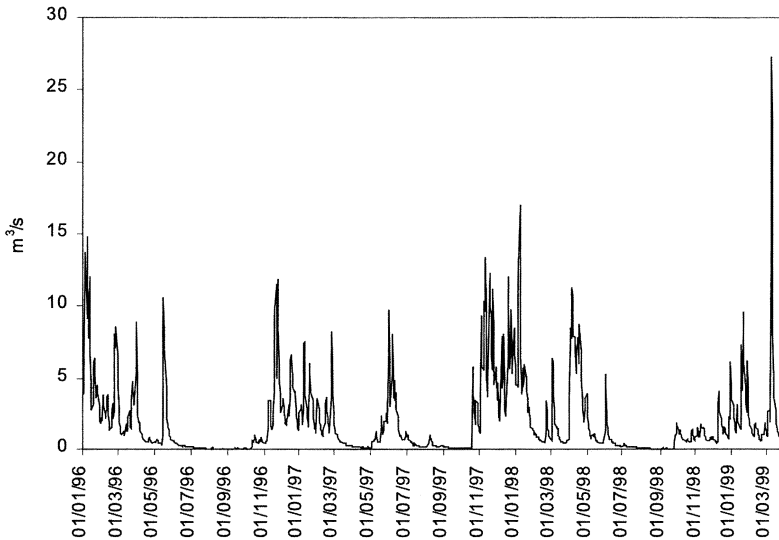


Figura 6. Simulación del caudal diario del río Sar en Lapido para el período 01/01/96 – 31/03/99.

De especial importancia en hidrología resulta el análisis de las relaciones que existen entre el caudal del río y el área de drenaje. Para ello se aplican métodos como el de Área-Caudal, con el que se puede conocer el caudal en cualquier punto del cauce a partir de una estación de aforos, toda vez que se haya establecido previamente una relación adecuada entre estos parámetros. Se realizó una campaña de aforos en distintos puntos de la cuenca para calcular esta relación área-caudal, tomando como estación de aforos la de Lapido. Aunque la relación obtenida fue satisfactoria ($R^2 = 0,94$), se aprovechó la capacidad de SHETRAN V3.4 para simular caudales en cualquier punto de la cuenca y se aplicó al método Área-Caudal. Se recogieron datos del caudal simulado por el modelo para el período 01/01/96 – 31/03/99 en distintos puntos de la red de canales. Los diez puntos con los que se trabajó y algunos ejemplos de sus caudales se indican en la figura 7.

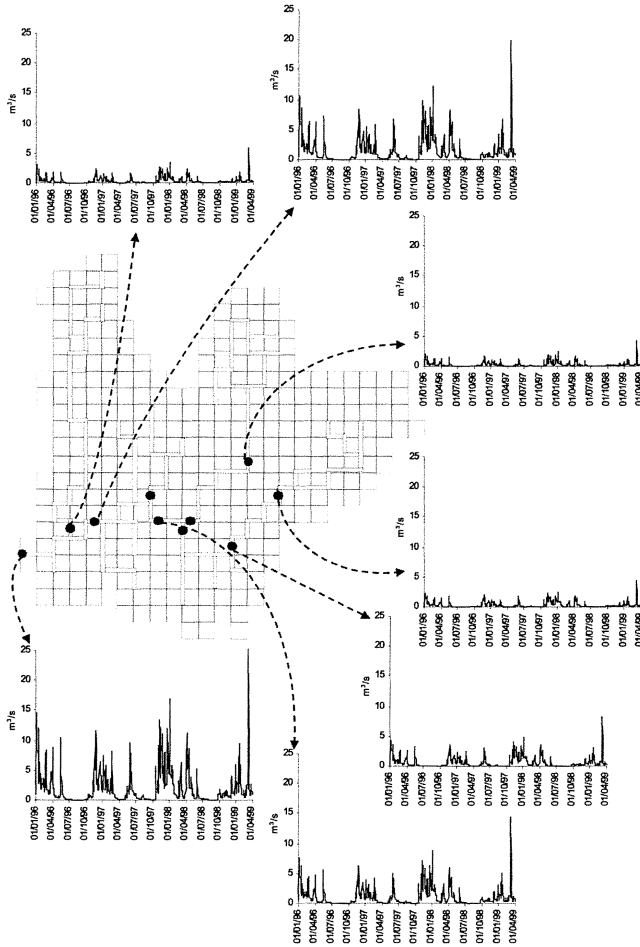


Figura 7. Puntos del cauce utilizados para el cálculo de las relaciones área-caudal de la cuenca, a partir del caudal del río Sar simulado para el periodo 01/01/96 – 31/03/99.

Teniendo en cuenta el área de drenaje de esos puntos, se aplicó el método Área-Caudal a los caudales obtenidos en la simulación. Se transformaron los datos diarios de caudal en promedios mensuales (una serie tan larga resultaría poco práctica e innecesaria).

Se calcularon las relaciones entre los caudales y las áreas de drenaje correspondientes para cada mes, mediante un ajuste a un modelo de regresión potencial. A partir de estos ajustes se obtuvieron los coeficientes que determinan la relación $a = F(Q_{Lapido})$ (fig. 8).

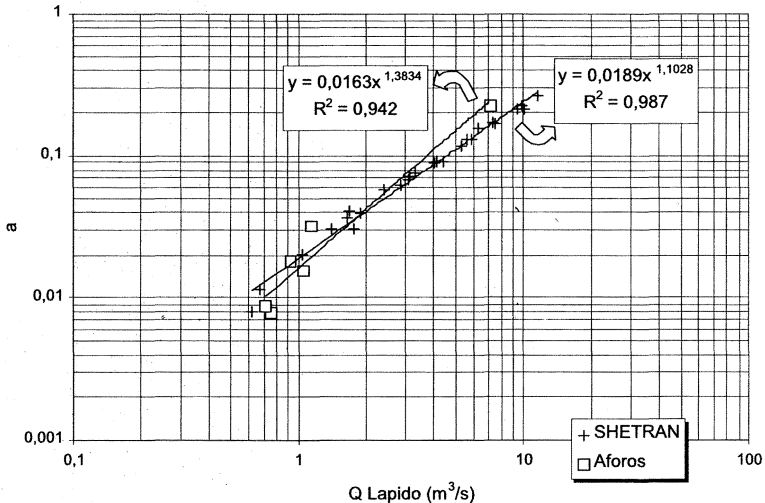


Figura 8. Relación área-caudal obtenida mediante aforos y simulación en SHETRAN V3.4.

El ajuste obtenido con los datos de la simulación en SHETRAN V3.4 es mejor que el obtenido con los aforos, debido fundamentalmente al mayor número de puntos utilizados en el ajuste. Sin embargo, lo más destacado es la buena correlación que existe entre las dos rectas, que relacionan el caudal del río Sar en Lapido (Q_{Lapido}) con el coeficiente a . Esto confirma la bondad del método Área-Caudal y la correcta relación que ya se había establecido mediante aforos. Generalmente este método es válido para caudales medios y bajos. En momentos de pico de caudal las relaciones entre el área de drenaje y el caudal de la cuenca fallan, ya que la respuesta hidrológica del río en esos episodios es mucho más acusada en cabecera (áreas pequeñas) y más suavizada en desembocadura (áreas grandes). Utilizar promedios mensuales, que suavizan el valor de los caudales, favorece la buena correlación entre las dos rectas.

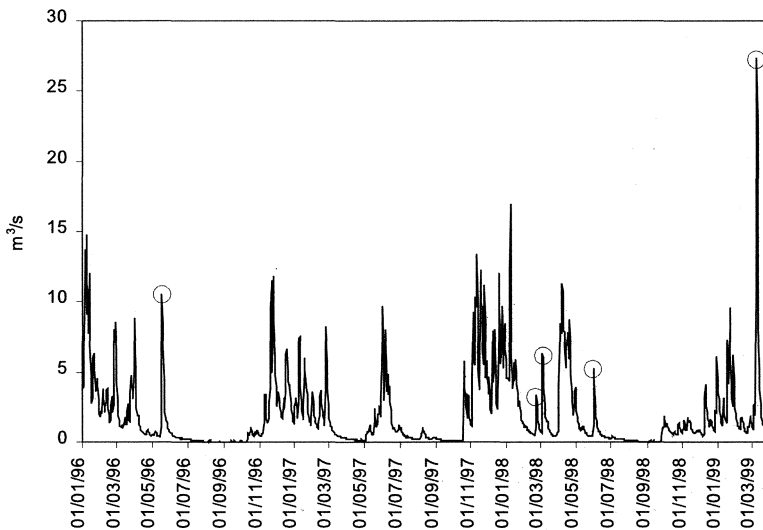


Figura 9. Picos de caudal utilizados para el cálculo de la relación área-caudal en momentos de crecida mediante el caudal simulado en SHETRAN V3.4.

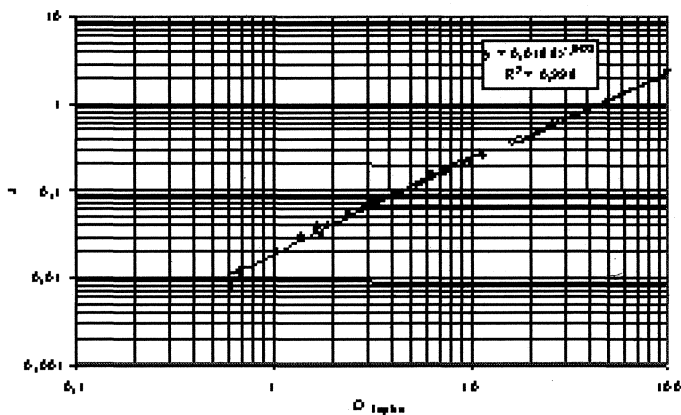


Figura 10. Relación área-caudal obtenida mediante el caudal simulado en SHETRAN V3.4 para caudales medios y picos de caudal.

Adicionalmente se comprobó si con el caudal simulado por SHETRAN V3.4 para el período 01/01/96 – 31/03/99 las relaciones área/caudal se mantenían en momentos de crecida, analizando cinco picos de caudal (fig. 9). Para determinar las correlaciones, se utilizaron las áreas de cada pico. La correlación obtenida fue muy buena, manteniéndose adecuadamente la relación ya calculada con los caudales promedio mensuales (fig. 10). La recta está desplazada hacia arriba debido a que los caudales utilizados son mucho mayores. De esta manera se comprueba que la relación establecida para aguas basales entre caudal y área de cuenca, se puede ampliar a los picos de caudal, lo que demuestra la validez y consistencia de dicha relación para todo tipo de caudales

BIBLIOGRAFÍA

BIRKINSHAW, S. 1999. PANASHE user's guide. Water Resource Systems Research Unit. Department of Civil Engineering. University of Newcastle Upon Tyne, U.K.

BATHURST, J. C., WICKS, J.M. and O'CONNELL, P.E. 1995. The SHE/SHESED basin scale water flow and sediment transport modelling system. In: Computer Models of Watershed Hydrology Edited by Singh, V. P. Water Resources Publications, U.S.A.

DÍAZ-FIERROS TABERNERO, F. 2000. *Procesos de contaminación difusa del agua en áreas urbanas y periurbanas de la cuenca del río Sar*. Tesis Doctoral. Universidade de Santiago de Compostela.

PARKIN, G. 1995a. Functional specifications for SHETRAN V3.4. WRSRU/TR/9510/58.0. Water Resource Systems Research Unit. Department of Civil Engineering. University of Newcastle Upon Tyne, U.K.

PARKIN, G. 1995b. SHETRAN water flow component: equations and algorithms. WRSRU/TR/9510/61.0. Water Resource Systems Research Unit. Department of Civil Engineering. University of Newcastle Upon Tyne, U.K.

VANCLOOSTER, M., VERECKEN, J., DIELS, J., HUYSMANS, F., VERSTRAETE, W. and FEYEN, J. 1992. Effect of mobile and immobile water in predicting nitrogen leaching from cropped soils. Modeling of Geobiosphere Processes, 1, nº 1. pp. 23-40.