

# ***Influencia de la resolución espacial de los datos de entrada en la simulación hidrológica y sedimentológica en cuencas urbanas de cabecera***

*Jeannette Zambrano Nájera*

*Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Colombia. Estudiante de doctorado.  
DEHMA. Universitat Politècnica de Catalunya. UPC.*

*Correo-e: [jeannette.zambrano@upc.edu](mailto:jeannette.zambrano@upc.edu)*

*Manuel Gómez Valentín*

*DEHMA. Universitat Politècnica de Catalunya. UPC.*

*Correo-e: [manuel.gomez@upc.edu](mailto:manuel.gomez@upc.edu)*

## **1 Introducción**

Las nuevas características del paisaje de las cuencas urbanas, causadas por el incremento de los asentamientos urbanos y teniendo en cuenta las condiciones hidrológicas propias de las cuencas del Litoral Mediterráneo (lluvias muy intensas y cuencas pequeñas) han conducido al aumento progresivo de los caudales de escorrentía y por tanto a una mayor producción de sedimentos (Arandes, 1992). Estos sedimentos al ser arrastrados hasta la red pueden ocasionar grandes problemas en su funcionamiento como la disminución de la capacidad hidráulica entre otros. Este hecho puede hacer que sea necesario un mantenimiento periódico de dichas instalaciones para garantizar su correcto funcionamiento o incluso hacer que sea necesaria la construcción de estructuras que eviten la entrada de sólidos en la red de drenaje.

De esta manera cada vez cobra mayor importancia determinar la producción de sedimentos en las cuencas de cabecera causados por la erosión hídrica. Para ello, se ha desarrollado una cantidad importante de modelos empíricos y modelos de base física. Los de base física se fundamentan en la modelación matemática de los procesos que intervienen en el fenómeno erosivo y por esta razón son considerados superiores a los modelos empíricos. Actualmente existe gran cantidad de modelos de base física, los que varían ampliamente en el tratamiento de los procesos seleccionados, así como en la escala temporal y espacial que utilizan y el componente de la erosión en el que se enfocan. Algunos de los modelos de base física existentes para modelar pequeñas cuencas a escala de eventos, de manera distribuida son: SHE/SHESED/SHETRAN, KINEROS2, EUROSEM, LISEM, EROSION3D, DWSM y CASC2D-SED.

Debido a la manera de realizar la espacialización en cada uno de los modelos anteriores su aplicación a un entorno específico implica realizar grandes esfuerzos en tiempo y costos para determinar los valores de los parámetros requeridos por cada modelo (problema de sobre-parametrización), o realizar simplificaciones de las características ambientales propias de dicho entorno conllevando esto un nivel de incertidumbre en los resultados obtenidos. Existen estudios que demuestran la influencia de la resolución de los datos de entrada en los resultados obtenidos, pero adicionalmente la manera en que se discretiza la cuenca en los modelos distribuidos genera respuestas hidrológicas y sedimentológicas diferentes, por lo que es importante determinar la manera correcta de realizar dicha discretización. En este estudio se revisan las diferentes maneras para discretizar las cuencas por medio de modelos distribuidos, y se estudian los impactos sobre la respuesta hidrológica y sedimentológica determinando las causas de estos resultados.

## 2 Métodos

El tipo de conceptualización utilizado para representar una cuenca determina la respuesta hidrológica y por tanto la sedimentológica, ya que ésta depende fuertemente de las características físicas de la cuenca.

La representación de la cuenca puede realizarse de manera agregada o distribuida. La primera consiste en asignar características homogéneas para toda la zona de estudio y es utilizada para la modelación a escala de ladera o de grandes áreas en los modelos empíricos y conceptuales. En los modelos de base física en cambio, se utiliza la modelación de forma distribuida, para la cual existen dos clases: espacialización agrupando zonas de características similares y espacialización por mallas. Para distinguirlas, la primera se denominará semi-distribuida y la segunda simplemente distribuida.

La espacialización semi-distribuida consiste en dividir la cuenca en unidades hidrológicas caracterizadas por subcuencas y corrientes, que van aportando en cascada a una nueva red hasta llegar al punto de salida. En este tipo de modelación a cada unidad hidrológica se le asignan propiedades homogéneas. Un ejemplo de este tipo de simulación es la realizada por los modelos KINEROS2, EUROSEM, SWAP o SWIM (Figura 1a).

Por otra parte la espacialización distribuida consiste en dividir la cuenca en forma de malla estructurada (generalmente con elementos cuadrangulares o rectangulares) o malla no estructurada (por lo general con elementos triangulares) (Figura 1b). La representación distribuida es la más utilizada actualmente para realizar la modelación de los procesos erosivos, ya que como expresan Ferro y Minacapilli (1995) los sedimentos son producidos por diferentes fuentes distribuidas en el área de la cuenca. De modo que existe una fuerte dependencia entre factores locales (como el desprendimiento del sedimento y el tiempo de viaje del mismo) y los procesos de generación de sedimentos, por lo que la modelación de estos fenómenos requiere una representación espacialmente distribuida (Ferro y Minacapilli, 1995). Esta afirmación ha sido de aceptación mundial y por tal razón hoy en día toda la modelación a escala de pequeñas cuencas por eventos se realiza de manera distribuida. Este tipo de representación (específicamente la de tipo malla estructurada) es utilizada por ejemplo en los programas SHESD, SHETRAN, EROSION3D, MEDRUSH, SEMMED, CASC2D-SED.

Los modelos espacialmente distribuidos presentan el problema de la gran cantidad de información de entrada que requieren, lo que está asociado a altos requerimientos computacionales y a la transferencia de la incertidumbre de los datos a los resultados del modelo. Por otra parte también el tamaño del elemento de cálculo presenta grandes efectos sobre los resultados obtenidos, como por ejemplo una mejor o peor representación de la red hidrográfica. Esto es debido a que la resolución de la información utilizada debe estar acorde a la escala que se pretende modelar, de modo que los parámetros requeridos pueden no ser medibles para las áreas a modelar (de cientos de km<sup>2</sup> o superiores) o puede no existir información medida para algunos de los parámetros requeridos por un modelo. Por tal razón, los modelos distribuidos deberían incluir solamente aquellos parámetros y variables para las cuales existe suficiente información teniendo en cuenta su variación espacial (Rustomji y Prosser, 2001).

Los efectos de la resolución de la modelación, han sido estudiados por sus repercusiones en los resultados obtenidos y son comunes tanto a los modelos semi-distribuidos como a los modelos distribuidos. Existen estudios en los que se demuestran los efectos de la resolución de la celda sobre la modelación hidrológica y sedimentológica, utilizando para esto diferentes modelos computacionales. En resumen, estos concluyen que la resolución de la celda afecta la representación topográfica, afectando primordialmente la definición de pendientes y la definición de la red hidrográfica. Al aumentar el tamaño de las celdas la simulación hidrológica pierde calidad en la información y resultados obtenidos, y la estimación de la producción de sedimentos al depender fuertemente de la topografía y la hidrología se realizará más pobremente (Rojas Sánchez, 2002, Merritt et al., 2003, Alatorre y Beguería, 2009).

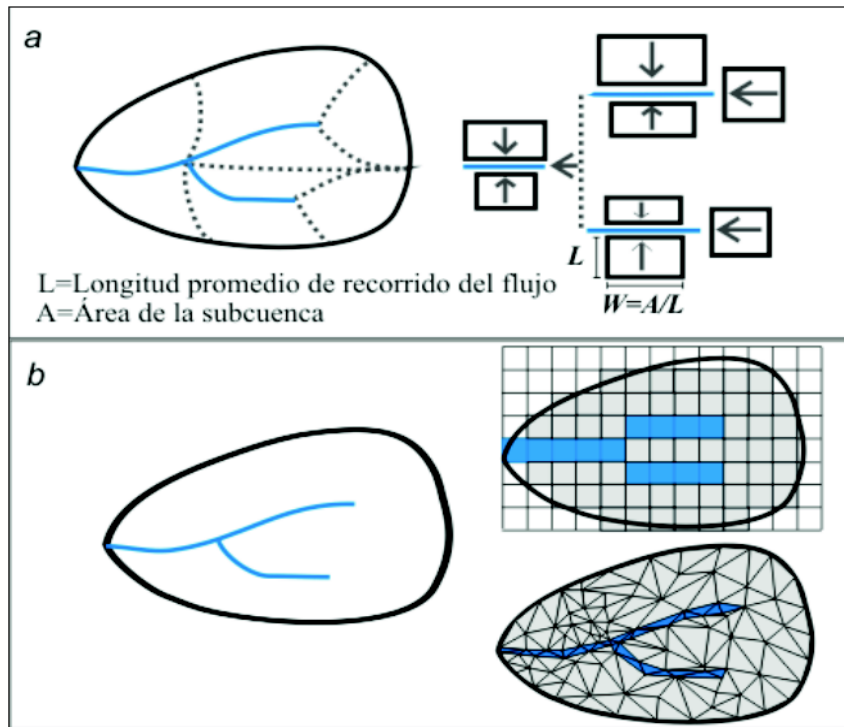


Figura 1. Representación de una cuenca a) en forma semi-distribuida (Ej. KINEROS2) b) en forma distribuida por mallas estructuradas con elementos cuadrangulares (Ej. CASC2D-SED) y no estructuradas con elementos triangulares (Ej. CHILD).

A continuación se revisan los efectos sobre la modelación hidrológica y sedimentológica producidos por las diferencias en la discretización (utilizando una misma resolución inicial para los datos de entrada) aplicando el modelo distribuido KINEROS2 con discretización por Unidades Hidrológicas sobre una cuenca de la ciudad de Barcelona.

## 2.1 Descripción de KINEROS2 (K2)

K2 es un modelo distribuido, de base física que describe los procesos de escorrentía y erosión en cuencas pequeñas de vocación agrícola o urbana (Smith et al., 1995). Conceptualiza la cuenca por medio de planos unidimensionales con flujo Superficial, organizados en cascada (ver Figura 1), que contribuyen lateralmente a los canales (Woolhiser et al., 1990, Smith et al., 1995, Semmens et al., 2008). Mayor información se encuentra en los sitios web [www.tucson.ars.ag.gov/kineros](http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros) (USDA-ARS, 2010). [www.tucson.ars.ag.gov/agwa](http://www.tucson.ars.ag.gov/agwa) (USDA-ARS, 2008) o [www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/agwa](http://www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/agwa) (USEPA, 2008).

K2 recibe datos de precipitación temporal y espacialmente variados, tiene en cuenta la interceptación, y estima la infiltración mediante el modelo de 3-parámetros de Parlange en el cual los modelos de Green-Ampt y de Smith y Parlange están incluidos como dos casos límite (Semmens et al., 2008), según el cual la capacidad máxima de infiltración se obtiene así:

$$f_c = K_s \left( 1 + \frac{\gamma}{\exp(\gamma I_*) - 1} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $f_c$  es la capacidad máxima de infiltración del suelo [L/T],  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada [L/T],  $\gamma$  es un parámetro que describe el tipo de suelo variando entre valores cercanos a 0 - 1,  $I_*$  [L] es la Infiltración acumulada en el suelo  $I$  dividida entre la capilaridad  $G$  [L] y el déficit de humedad  $\Delta\theta$ .

El modelo de 3-parámetros fue ampliado en el 2000 para incluir la variación espacial de los datos de Conductividad Hidráulica (Woolhiser et al., 1996), hallando la tasa de infiltración ensamblada  $f_e$  (Smith et al., 2002).

$$f_{e^*} = 1 + (r_{e^*} - 1) \left\{ 1 + \left[ \frac{(r_{e^*} - 1)}{\gamma} (e^{-\gamma r_{e^*}} - 1) \right]^c \right\}^{-1/c} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde el subíndice \* indica la normalización por la Conductividad Hidráulica ensamblada,  $r_{e^*}$  es la precipitación ensamblada normalizada,  $I_{e^*}$  es la Infiltración acumulada ensamblada y  $c$  es un coeficiente obtenido con el Coeficiente de Variación de la Conductividad o  $CV_K$ .

$$c \cong 1 + \frac{0.8}{(CV_K)^{1.3}} [1 - \exp(-0.85(r_* - 1))] \quad \text{Ecuación 3}$$

Utiliza el método de Onda Cinemática para la transmisión del flujo en los planos y en los canales, resuelto mediante un esquema numérico implícito de 4 puntos.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q_l(x, t) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $t$  [T] es el tiempo,  $x$  [L] el espacio,  $h$  es el calado [L],  $q_L$  [L/T] es la tasa de flujo lateral, y  $\alpha$  y  $m$  son parámetros relacionados con la pendiente, la rugosidad de la superficie y el régimen de flujo. Para flujo Hortoniano la descarga unitaria de flujo es relacionada con la profundidad por medio de la expresión  $q = \alpha h^m$ . Una vez que el flujo entra en el canal se utiliza una formulación análoga pero se trabaja con el caudal total.

La componente de sedimento del modelo está basada en la ecuación unidimensional de continuidad de flujo no permanente. La tasa de erosión/deposición es la combinación de la erosión por lluvia y la erosión por flujo.

$$\frac{\partial(A \cdot C_s)}{\partial t} + \frac{\partial(Q \cdot C_s)}{\partial x} - e(x, t) = q_{sl}(x, t) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $C$  [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>] es la concentración volumétrica de sedimento,  $A$  [L<sup>2</sup>] es el área de la sección transversal,  $Q$  [L<sup>3</sup>/T] la descarga en el canal (para flujo superficial es igual a la descarga por unidad de ancho [L<sup>2</sup>/T]),  $e$  [L<sup>2</sup>/T] es la tasa de erosión y  $q_{sl}$  [L<sup>3</sup>/T·L] es el flujo lateral de sedimento en los canales por unidad de longitud. Para las superficies de la parte alta (**upland areas**) el modelo considera dos componentes: erosión causada por el impacto de las gotas de lluvia (**splash erosion**) y erosión (o deposición) causada por el flujo de escorrentía (**hydraulic erosion**).

$$e = e_s + e_h \quad \text{Ecuación 6}$$

La erosión por impacto se determina por medio de la relación

$$e_s = \begin{cases} c_f \cdot k(h) \cdot r^2 & \text{para } q > 0 \\ 0 & \text{para } q < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde  $c_f$  [T/L] es una constante positiva,  $k(h)$  es un factor de reducción que varía entre 0 (para flujos muy profundos) y 1 (para flujos poco profundos) con un valor general de  $k(h) = \exp(-c_h \cdot h)$ , y  $r$  [L/T] es la intensidad de precipitación.

La tasa de erosión por flujo se obtiene con la siguiente relación

$$e_h = c_g \cdot (C_m - C_s) \cdot A \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde  $c_g$  es un coeficiente de transferencia de sedimentos, que dependerá de la velocidad de sedimentación del sedimento,  $C_m$  [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>] es la concentración volumétrica de sedimentos en el equilibrio de la capacidad de transporte y  $C_s$  [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>] es la concentración volumétrica de sedimentos actual. Para determinar  $C_m$ , **K2** emplea la ecuación de Capacidad de Transporte de Engelund Hansen.

## 2.2 Aplicación a una cuenca de estudio

Se aplicó el modelo a una cuenca de cabecera de colectores de la ciudad de Barcelona, situada en la Sierra de Collçerola, que fue denominada en este estudio cuenca Masdeu (coordenadas UTM X=429.762 y Y=4.588.908, área aproximada de 58 ha). El modelo Digital del Terreno (MDT) fue creado a partir de la cartografía digital 1:5.000 del Institut Cartogràfic de Catalunya ICC (Generalitat de Catalunya, 2010b), utilizando una resolución de celda de 25x25 m. Los usos de suelo fueron obtenidos de la cartografía digital del Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) (Generalitat de Catalunya, 2010a) y reclasificados según la clasificación de cobertura indicada en el SIG AGWA creado para K2. El tipo de suelo se ha obtenido a partir de la cartografía digital de tipo de suelo de España y reclasificado según la clasificación del Mapa Mundial de Suelos de la FAO, con la Base de Datos Mundial Armonizada (HWBD).

Para realizar la modelación se utilizaron diferentes niveles de discretización, comenzando con el 2.5% de área contributiva o CSA -valor recomendado en el manual de AGWA (Burns et al., 2007), generando 53 elementos y aumentando consecutivamente la resolución hasta llegar al máximo permitido por K2, logrando así 6 simulaciones con 53, 85, 262, 381, 426 y 485 elementos (Figura 2). Los parámetros utilizados en las simulaciones se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros del modelo en K2

| Parámetro   | Unidad | PLANOS      | CANALES |
|---|--------|-------------|---------|
| <b>Componente de Geometría</b>                    |        |             |         |
| Ancho coeficiente <i>a</i>                        |        |             | 0.0724  |
| Ancho coeficiente <i>b</i>                        | -      | -           | 0.3377  |
| Profundidad coeficiente <i>a</i>                  |        |             | 0.0502  |
| Profundidad coeficiente <i>b</i>                  | -      | -           | 0.1523  |
| <b>Componente Cálculo de Pérdidas</b>             |        |             |         |
| $\gamma$  |        | 0.85        | 0.85    |
| Interceptación (INT_)                             | mm     | 1.4 - 2.0   | -       |
| Cobertura del suelo (cover)                       | %      | 18.4 - 37.6 | -       |
| CV  |        | 0.4         | 0       |
| KS  | mm/hr  | 13          | 210     |
| G   | mm     | 80          | 101     |
| Por   |        | 0.463       | 0.440   |
| Rock  | %      | 0           | 0       |
| <b>Componente de Transformación Lluvia-Caudal</b> |        |             |         |
| Coef. Manning (Mann-N)                            |        | 0.15        | 0.15    |
| Pave % del área del plano                         | %      | 0.0 - 6.5   | -       |
|   |        | 4781.12     |         |
| <b>Componente Sedimentológica</b>                 |        |             |         |
| Dist  |        | 0.250       | 0.545   |
| Pct-Sand  | %      | 42          | 90      |
| Pct_silt  | %      | 37          | 5       |
| Pct_clay  | %      | 21          | 5       |
| SP  |        | 141.8       | 63      |
| COH   |        | 0.009       | 0.005   |
| Smax  |        | 0.94        | -       |

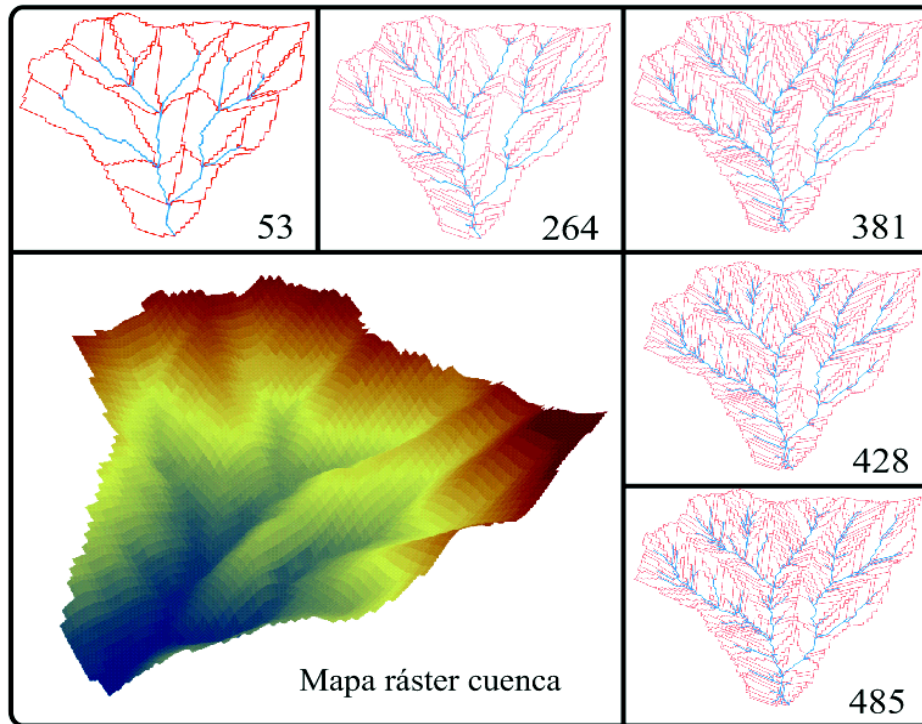


Figura 2. Discretización de la cuenca Masdeu de forma distribuida a partir de un MED, utilizando 53,264,381, 428 y 485 elementos.

### 3 Resultados y Discusión

Se encuentra que la resolución para la discretización utilizada altera la distribución de las pendientes de la cuenca e impacta en la distribución de la red de canales (Tabla 2. **Distribución de pendientes para cada simulación**). En la tabla 2 se observa que las máximas pendientes decrecen considerablemente al disminuir la resolución de la discretización, al igual que sucede con la resolución de las celdas (Rojas Sánchez, 2002, Merritt et al., 2003, Alatorre y Beguería, 2009). Adicionalmente las pendientes medias también disminuyen considerablemente en los elementos canales y se mantienen muy similares en los elementos planos, esto porque los rangos varían considerablemente en los elementos canales. Como se observa en la Figura 3, a menor resolución la tendencia es que la representación topográfica corresponda con las pendientes medias y por el contrario al aumentar la resolución se representa mucho mejor la variación de pendientes. Similares conclusiones se han obtenido en los estudios que evalúan la resolución de las celdas como establece Rojas Sánchez (2002). Por otra parte la distribución de suelos y de los usos de suelos se mantiene casi igual independientemente de la resolución utilizada.

Tabla 2. Distribución de pendientes para cada simulación.

| N°<br>elementos | Media | Planos |        | Canales |        |        |
|-----------------|-------|--------|--------|---------|--------|--------|
|                 |       | mínima | máxima | media   | mínima | máxima |
| 53              | 0.367 | 0.004  | 0.474  | 0.165   | 0.001  | 0.301  |
| 85              | 0.367 | 0.004  | 0.488  | 0.197   | 0.001  | 0.394  |
| 264             | 0.335 | 0.000  | 0.511  | 0.244   | 0.001  | 0.569  |
| 381             | 0.332 | 0.000  | 0.540  | 0.260   | 0.001  | 0.817  |
| 428             | 0.328 | 0.000  | 0.609  | 0.255   | 0.001  | 0.584  |
| 485             | 0.320 | 0.000  | 0.576  | 0.253   | 0.001  | 0.584  |

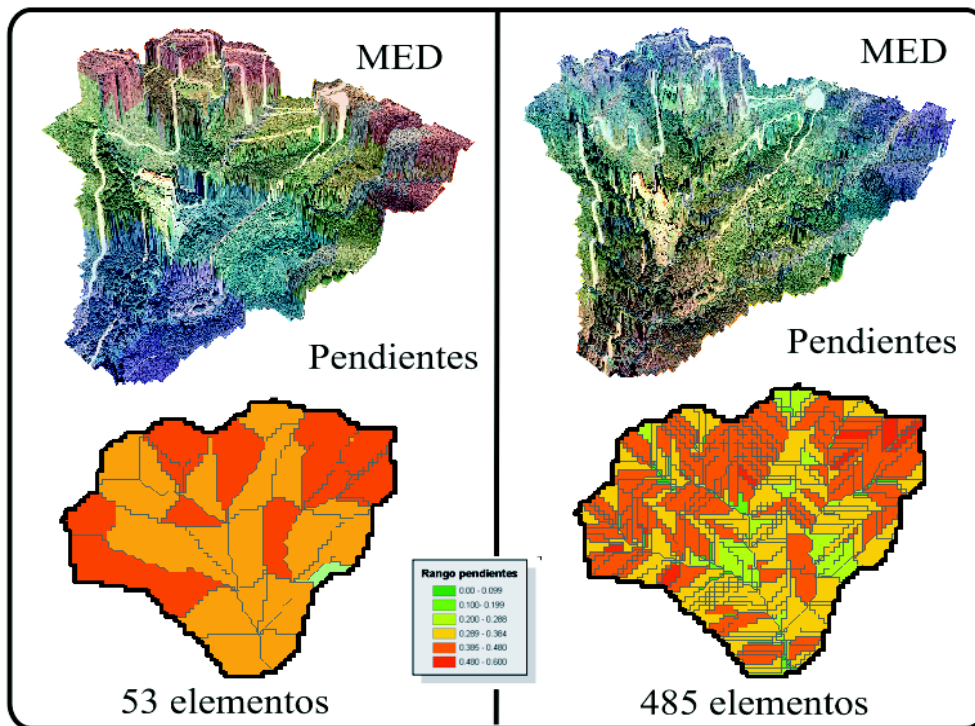


Figura 3. Representación del MED con 53 y 485 elementos y la asignación de pendientes correspondientes.

Como consecuencia del uso de bajas resoluciones de discretización en la modelación, el hidrograma se retarda debido a que se tienen pendientes más bajas de modo que la velocidad del flujo es menor. Adicionalmente, con resoluciones más pobres, los volúmenes de escorrentía disminuyen, el caudal pico es mucho menor y el tiempo para alcanzarlo mucho mayor (Figura 4). Sin embargo, al incrementar la resolución, las pendientes son representadas en forma más aproximada a la realidad incrementando las velocidades de flujo, lo que disminuye los tiempos de inicio del flujo y pico, pero aumenta considerablemente el caudal pico y estrecha el hidrograma (Figura 4).

Por otra parte, ya que la producción de sedimentos depende fuertemente del caudal y de las pendientes utilizadas, se encuentra que a mayor resolución los caudales líquidos se incrementan, y por lo tanto los caudales sólidos. Pero adicionalmente, al aumentarse las pendientes se incrementa también la erosión generada (Figura 4). De manera que las modelaciones realizadas con discretizaciones espaciales de baja resolución subestimarán los valores de desprendimiento, y por tanto los caudales sólidos, los sedigramas se presentarán, al igual que los hidrogramas, retardados, con menores caudales punta y tiempos mayores para alcanzar los caudales punta. De esta manera se puede concluir que aunque el modelo contenga un módulo robusto para la estimación de la producción de sedimentos, los fallos que se transfieren por la pobre resolución de simulación a la representación del terreno se transmite también a la simulación de la hidrología y serán magnificados en la estimación de sedimentos.

Adicionalmente es importante mencionar que la forma de conceptualizar la cuenca en los modelos distribuidos que emplean el concepto de Unidades Hidrológicas permiten calibrar el tiempo de inicio pero no permiten simular en forma más aproximada a la realidad el tiempo de viaje dentro del plano, al contrario que la modelación espacial por mallas. Un ejemplo de estas diferencias se muestra en la Figura 5. De modo que al comparar la respuesta hidrológica de una cuenca simulada mediante un programa con espacialización distribuida tipo Unidad Hidrológica con otro tipo Malla, una vez ajustados los resultados estos presentarán un mejor ajuste en la representación tipo Malla porque se puede representar mejor la topografía de la cuenca (Kalin y Hantush, 2006).



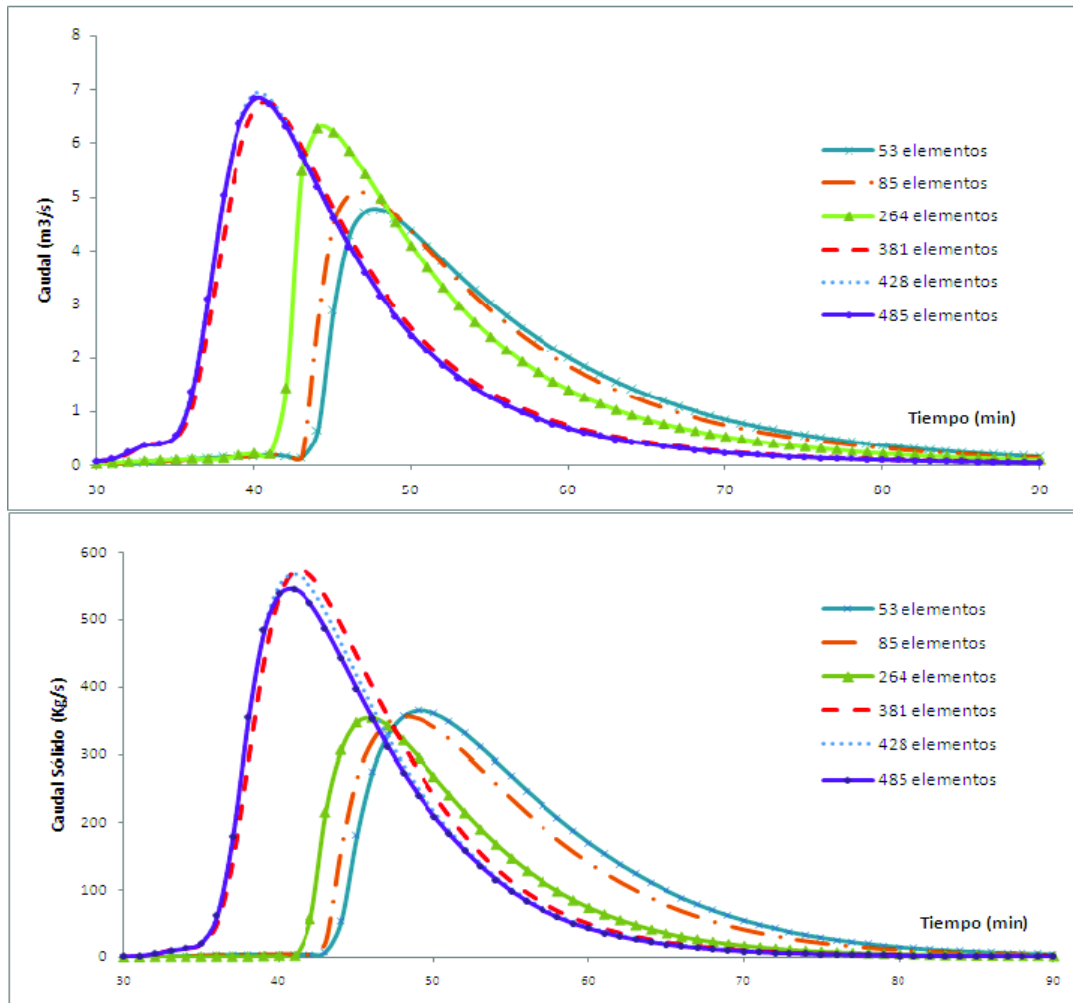


Figura 4. Hidrogramas y sedigramas resultantes en la cuenca Masdeu, para diferentes números de elementos en K2

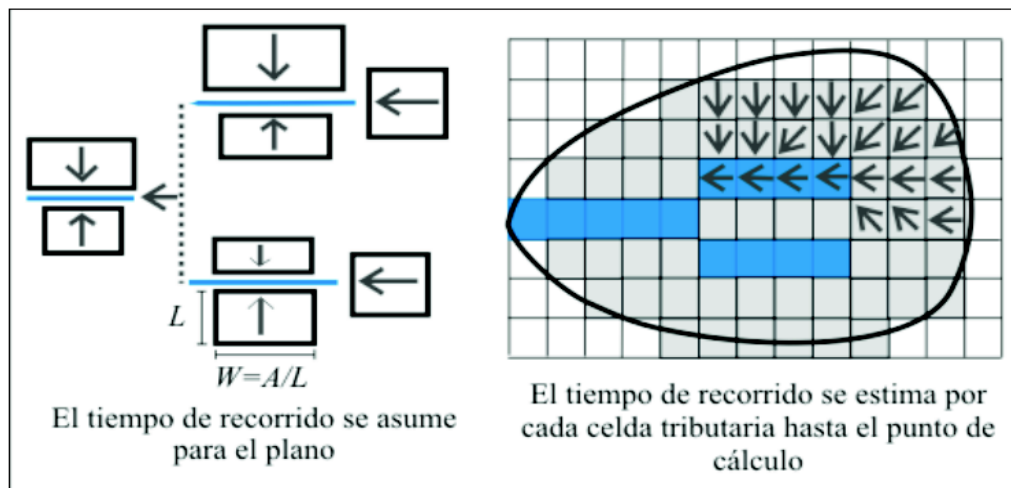


Figura 5. Esquema del tiempo de viaje que asume un modelo según el tipo de espacialización utilizada



## 4 Resumen y Conclusiones

Se aplicó el programa K2 a la cuenca de estudio Masdeu, ubicada en la ciudad de Barcelona. El modelo fue ajustado utilizando un MDT obtenido a partir de la cartografía del ICC y se realizaron simulaciones utilizando 53, 85, 262, 381, 428 y 485 elementos.

Del estudio realizado se puede concluir que simulaciones realizadas con discretización espacial de baja resolución causa impactos en la distribución de las pendientes, generando: valores menores para la pendiente media, menores desviaciones de los valores y desaparición de pendientes extremas. Esto a su vez lleva a la subestimación de los volúmenes de escorrentía, y a la obtención de hidrogramas erróneamente retardados y con caudales punta menores. Por último los problemas presentados en la simulación se magnificarán en la estimación de la producción de sedimentos debido a la fuerte dependencia de los resultados del caudal y de la estimación de pendientes.

Además, aunque se cuente con modelos robustos para estimar la erosión hídrica, para obtener resultados confiables se requiere contar con información de entrada con una resolución adecuada al tamaño de la cuenca, y a los objetivos de modelación, y además la discretización de la cuenca debe realizarse de manera tal que se obtenga la mejor descripción posible de las características físicas con la mayor eficiencia computacional.

Independientemente de la resolución utilizada, la representación de la cuenca en unidades hidrológicas tipo subcuenca utilizada para realizar la modelación de la erosión hídrica en cuencas de pequeña escala o en cuencas que presenten gran heterogeneidad en sus propiedades físicas, debe ser utilizada sólo si se cuenta con mapas de resolución apropiada al tamaño de la cuenca y los objetivos de modelación, debido a los errores que se introducen en el modelo al tratar de representar la topografía de la cuenca. Estos han sido utilizados ampliamente por los altos requerimientos computacionales que presentan los modelos distribuidos tipo malla, pero actualmente para cuencas de pequeña escala esto no puede ser considerado un limitante gracias a los desarrollos tecnológicos disponibles.

## 5 REFERENCIAS

- Alatorre, L. C. & Beguería, S. 2009. Los modelos de erosión: una revisión (A review of erosion models). *Revista C & G*, 23, 29-48.
- Arandes, R. 1992. Planteamiento urbanístico y drenaje urbano. In: DOLZ, J., GÓMEZ VALENTÍN, M. & MARTÍN VIDE, J. P. (eds.) *Inundaciones y Redes de Drenaje Urbano*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Burns, I., Scott, S., Levick, L., Semmens, D. J., Miller, S. N. & Hernández, M. 2007. Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) Documentation versión 2.0. In: USDA-ARS & UNIVERSITY OF WYOMING, R. E. A. W. M. (eds.). Tucson, Arizona: USDA.
- Ferro, V. & Minacapilli, M. 1995. Sediment delivery processes at basin scale. *Hydrological Sciences Journal*, 40, 703-717.
- Generalitat de Catalunya. 2010a. *Sitio Web Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF)* [Online]. Barcelona. Available: <http://www.creaf.uab.es/MCSC/esp/index.htm> [Accessed Abril 2010].
- Generalitat de Catalunya. 2010b. *Sitio Web Institut Cartogràfic de Catalunya ICC* [Online]. Barcelona. Available: <http://www.icc.cat/> [Accessed Marzo 2010].
- Kalin, L. & Hantush, M. H. 2006. Comparative assessment of two distributed watershed models with application to a small watershed. *Hydrological processes*, 20, 2285-2307.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A. & Jakeman, A. J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 761-799.
- Rojas Sánchez, R. 2002. *GIS-based upland erosion modeling, geovisualization and grid size effects on erosion simulations with CASC2D-SED*. Ph.D Thesis, Civil Engineering Department, Colorado State University. Fort Collins, Colorado, USA.
- Rustomji, P. & Prosser, I. 2001. Spatial patterns of sediment delivery to valley floors: sensitivity to sediment transport capacity and hillslope hydrology relations. *Hydrological processes*, 15, 1003-1018.

- Semmens, D. J., Goodrich, D. C., Unkrich, C. L., Smith, R. E., Woolhiser, D. A. & Miller, S. N. 2008. KINEROS2 and the AGWA modelling framework. *In: WHEATER, H., SOROOSHIAN, S. & SHARMA, K. D. (eds.) Hydrological modelling in arid and semi-arid areas.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Smith, R., Smetten, K., Broabrid, P. & Woolhiser, D. A. 2002. *Infiltration Theory for Hydrologic Aplications,* Washington D.C., American Geophysical Union.
- Smith, R. E., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A. & Unkrich, C. L. 1995. KINEROS-A KInematic Runoff and EROsion Model. *In: SIMTH, R. E., D.C. GOODRICH, D.A. WOOLHISER, Y C.L. UNKRICH (ed.) Computer Models of Watershed Hydrology.* Highlands Ranch: Water Resources Publications.
- USDA-ARS. 2008. *Sitio Web del programa AGWA* [Online]. Tucson. Available: <http://www.tucson.ars.ag.gov/AGWA/> [Accessed 15/Marzo 2010].
- USDA-ARS. 2010. *Sitio Web del programa KINEROS* [Online]. Southwest Watershed Research Center. Available: <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/> [Accessed 18 Febrero 2010].
- USEPA. 2008. *Sitio web AGWA* [Online]. Available: <http://www.epa.gov/nerlesd1/land-sci/agwa/> [Accessed 2010].
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E. & Giraldez, J. V. 1996. Effects of spatial variability of saturated hydraulic conductivity on Hortonian overland flow. *Water Resources Research*, 32, 671-678.
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E. & Goodrich, D. C. 1990. KINEROS, A Kinematic Runoff and Erosion Model. Documentation and User's Manual. *In: U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE (ed.).* Fort Collins, Colorado: Agricultural Research Service, ARS-77.