

Simulación agregada-distribuida y evaluación del transporte de sedimentos en cauces efímeros

M^a Dolores Marín Martín

Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de I+D+i Hidr@m

mdolores.marin@upct.es

Luis G. Castillo Elsitdié

Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de I+D+i Hidr@m

luis.castillo@upct.es

1 Resumen

Los flujos torrenciales hiperconcentrados que se presentan en las ramblas de la geografía peninsular, provocan grandes inundaciones que tienen unos efectos muy destructivos sobre el medio y las personas. Estos flujos no pueden captarse con los sistemas habituales presa-embalse, ya que la elevada concentración de sedimentos los inutilizaría en poco tiempo. Por ello es preciso la construcción de sistemas específicos de control y captación de este tipo de flujos.

Para definir los parámetros de diseño de estos sistemas es imprescindible caracterizar hidrológica e hidráulicamente las cuencas, y cuantificar el transporte de sedimentos que presentan los cauces efímeros donde se situarán las estructuras. Dentro de los objetivos de trabajo que realiza el grupo Hidr@m podemos citar la caracterización hidrológica de las zonas semiáridas mediante el empleo de programas de simulación agregada y distribuida, la validación de la metodología elaborada por Castillo et al. (2000, 2009, 2011) y Castillo (2007) y su generalización y aplicación en estas zonas. Atendiendo a la problemática citada, en este artículo se presenta el análisis de los principales resultados obtenidos en el cálculo hidrológico, hidráulico y de transporte de sedimentos en varias cuencas de la Rambla del Albuñón (Campo de Cartagena, Murcia).

2 Introducción

Los flujos torrenciales hiperconcentrados que se presentan en las ramblas de la geografía peninsular, provocan grandes inundaciones con efectos muy destructivos sobre el medio y las personas. Este hecho se está viendo incrementado por el cambio climático, con un efecto directo sobre la frecuencia e intensidad de la precipitación, de manera que actualmente en estas zonas se producen lluvias más intensas y menos frecuentes. Estas características se traducen en la concentración de los recursos en un número escaso de avenidas con elevados caudales y velocidades, y una gran proporción de transporte de materiales sólidos.

Dichos flujos no pueden captarse con los sistemas habituales presa-embalse, ya que la elevada concentración de sedimentos los inutilizaría en poco tiempo. Por ello es preciso la construcción de sistemas específicos de control y captación de este tipo de flujos.

Para llegar al análisis de los parámetros de diseño de los posibles sistemas de captación, previamente se han de conocer las características hidrológicas e hidráulicas de los cauces donde se situarán dichas obras. Dentro de la caracterización de los cauces efímeros, propios de zonas semiáridas, la cuantificación de la capacidad de transporte de sedimentos es imprescindible.

Atendiendo a la problemática y basándonos en experiencias similares y los principales resultados que de estos estudios se ha publicado Castillo et al. (2000, 2009, 2011), se presentan en este artículo los principales resultados de la caracterización hidrológica e hidráulica en tres subcuencas de la Rambla del Albuñón. (Campo de Cartagena, Región de Murcia).

Para la caracterización hidrológica se han realizado varios modelos con dos tipos de programas diferentes: (1) el programa HEC-HMS v 3.5 (2010), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers de los Estados Unidos (USACE), que permite la modelización agregada y semidistribuida, y (2) el programa MIKE SHE (DHI, 2008),

desarrollado por el by DHI Water & Environment, que permite la modelización físicamente basada y distribuida del ciclo integral del agua. Los primeros resultados obtenidos en una de las cuencas estudiadas, nos indican la similitud de los resultados y la coherencia existente entre ambos modelos.

Respecto a la evaluación de transporte de sedimentos, y la caracterización hidráulica, en ambos casos se comprueba la validez y bondad de la metodología citada en los cauces efímeros estudiados

3 Descripción de las cuencas Mediterráneas estudiadas

La Rambla del Albujión, situada en la Región de Murcia (España), forma parte de la Cuenca Hidrográfica del río Segura, y constituye la principal red de drenaje de la comarca del Campo de Cartagena. Nace en las sierras circundantes, Sierra de Carrascoy, Sierra del Algarrobo, Sierra de las Victorias y Sierra de Los Gómez y desemboca en el Mar Menor. La superficie vertiente de la cuenca es de algo más de 694 km².

Geomorfológicamente la cuenca del Albujión se caracteriza por presentar elevaciones moderadas. Las pendientes del terreno oscilan entre el 0.4 % próximo a la desembocadura, y el 5.8% en las zonas de cabecera. Siguiendo la morfología propia del Campo de Cartagena, predominan las grandes llanuras de cultivos agrícolas, eminentemente de regadío en la zona baja de la misma (frutales y herbáceos en la parte media-alta). También existen zonas dispersas de arbolado en las sierras, destacan las formaciones de coníferas, matorral y monte bajo.

En la litología de la cuenca del Albujión encontramos en la zona media-baja un predominio casi exclusivo de glaci de limos negros y rojos, cantos encostrados, y en menor proporción arcillas rojas. En la parte alta predominan las formaciones superficiales cálcicas no consolidadas, encontrando en los puntos más altos de los cerros mayor variedad de suelos (rocas carbonatas y areniscas, filitas y margas en el noroeste y cuarcitas al sur). Estas formaciones confieren al suelo un carácter poco permeable y un drenaje imperfecto.

La cuenca del Albujión está compuesta por 17 subcuencas de entre 28 y 55 km², de las cuales se han seleccionado tres para el estudio: La Rambla del Mergajón dada la semejanza que presenta con el Barranco de las Angustias (cuenca para la que fue definida la metodología a aplicar), tanto en sus características geomorfológicas (área y pendiente), como las hidrológicas e hidráulicas; y las subcuencas de Hoya de España y Albujión Intermedia por sus diferencias con las anteriores y como representantes de cuencas aluviales o de cauce medio. (Figura 1)

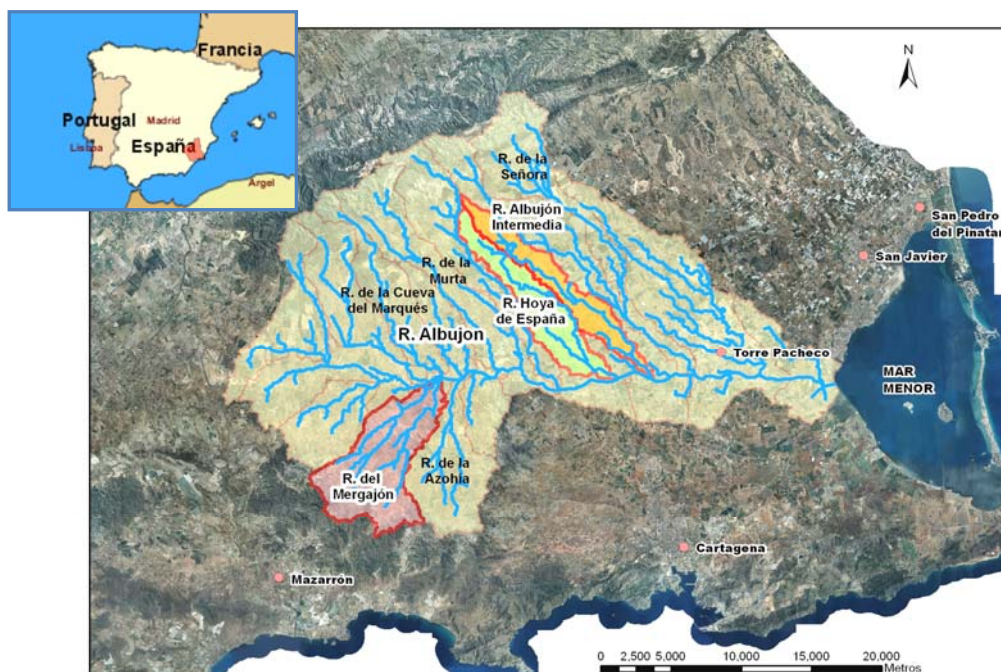


Figura 1 Situación de la Ramblas del Albujión, del Mergajón, Hoya de España y Albujión Intermedia.

4 Caracterización hidrológica de las cuencas

Las regiones áridas o semiáridas se caracterizan por presentar mayores valores de extremos relativos en los componentes del ciclo hidrológico, que en los climas húmedos. Se caracterizan por poseer una alta evaporación potencial y una baja precipitación anual, pero con tormentas de alta intensidad que presentan considerable variabilidad espacial. Además, estas regiones son especialmente propensas a la erosión. Es por ello que los modelos hidrológicos han de ser elegidos adecuadamente, de manera que puedan explicar de forma satisfactoria estos factores. Según Salas (2000) en general, para cuencas áridas o semiáridas los modelos distribuidos, ya sean continuos o de eventos, son más flexibles y más útiles que los modelos agregados.

En base a ello en la caracterización hidrológica se han empleado dos tipos de programas diferentes: (1) el programa HEC-HMS v 3.5 (2010), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers de los Estados Unidos (USACE), que permite la modelización agregada y semidistribuida, y (2) el programa MIKE SHE (DHI, 2008), desarrollado por DHI Water & Environment, que permite la modelización físicamente basada y distribuida del ciclo integral del agua, incluyendo los procesos de evapotranspiración, flujo superficial, flujo en zona no saturada, flujo subterráneo y flujo en lámina libre, así como las interrelaciones entre ellos.

En la implementación de los modelos realizados para los dos programas se han utilizado entradas comunes, como la topografía y la precipitación, y otros valores de parámetros equivalentes.

Para la topografía, se ha usado un Modelo Digital del Terreno (MDT) de 4x4 m elaborado en el año 2009 como parte del proyecto Natmur-08 (Consejería de Desarrollo Sostenible y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia) (Figura 3a). En el caso del modelo HEC-HMS la agregación de las subcuencas que la componen, y sus características se han obtenido con la aplicación Hec-GeoHMS v. 4.2 (2009), para el programa ArcGIS 9.2 (2006) del Environmental Systems Research Institute. Inc. ESRI. (Tabla 1).

Respecto a la precipitación, la variabilidad espacio-temporal se simula mediante los patrones de precipitaciones o tormentas de diseño para varios periodos de retorno. Así, para calcular la precipitación máxima diaria en cada punto para un periodo de retorno determinado, se ha realizado un estudio pluviométrico que incluye: análisis estadístico de las precipitaciones máximas diarias y en 24 horas, la definición del tiempo de tormenta y su distribución (tormenta de diseño).

Para el análisis estadístico de las precipitaciones se ha partido de los datos registrados durante los años 1933 a 2009 en 17 estaciones pluviométricas, situadas en el interior o en las proximidades de la cuenca del Albuñón. Se ha aplicado el método de las dobles masas, y a los valores resultantes se les afectó del coeficiente corrector que según el número de observaciones en 24 h recomienda la Organización Meteorológica Mundial (a). Con estos datos se procede a estimar la lluvia de los diferentes periodos de retorno, en cada estación, ajustando la ley de distribución de frecuencias a las funciones estadísticas más habituales (TCEV, GEV, LP3, GUMBEL y SQRT-ETmax). Seguidamente se obtuvieron los valores de las precipitaciones medias para cada subcuenca, a los que se les aplicaron otras dos correcciones: la propuesta por Témez (1991) para considerar el efecto de no simultaneidad de la precipitación en toda la superficie (b), y la propuesta por la Organización Meteorológica Mundial en función del área de la cuenca y de la duración de tormenta de proyecto (c). Resultados en Tabla 1.

Para la distribución temporal de la lluvia se ha considerado un patrón de lluvias acorde con la forma en que se presentan estos eventos en la zona de estudio. Partiendo de un tiempo de tormenta de 24 h, mediante el método de bloques alternos, se ha elaborado un patrón en el que el 80 % de la lluvia se concentra en las 8 horas centrales, repartiéndose el 20% restante de manera simétrica en las 2 colas de 9 horas cada una.

Tabla 1 Características generales de las cuencas de estudio, factores de corrección y máxima lluvia diaria.

Factores de Corrección para todas las subcuencas: (a) = 1.13; (b) = 0.89; (c) = 0.99						Máxima lluvia diaria (mm)					
Cuenca	Área cuenca completa (km ²)	L (km)	i_{media} (m/m)	T_c (min)	T_{lag} (min)	$P_{1.4}$	P_5	P_{10}	P_{50}	P_{500}	P_{1000}
Intermedia	32	25.230	0.0082	512	179	30	78	99	145	210	229
H. España	28	27.241	0.0082	532	186	32	74	92	131	187	204
Mergajón	52	12.874	0.0274	290	102	36	92	118	176	257	281
Angustias	49	12.982	0.0392	180	63	101	166	195	257	344	370

4.1 Simulación agregada y semidistribuida

Con el programa HEC-HMS se han implementado varios modelos. Para cada cuenca se ha considerado un modelo agregado, tomando la cuenca completa, y dos modelos semidistribuidos, desagregando en varias subcuencas con áreas no mayores de 11 km², y empleando diferentes métodos de tránsito de caudales (Figura 2).

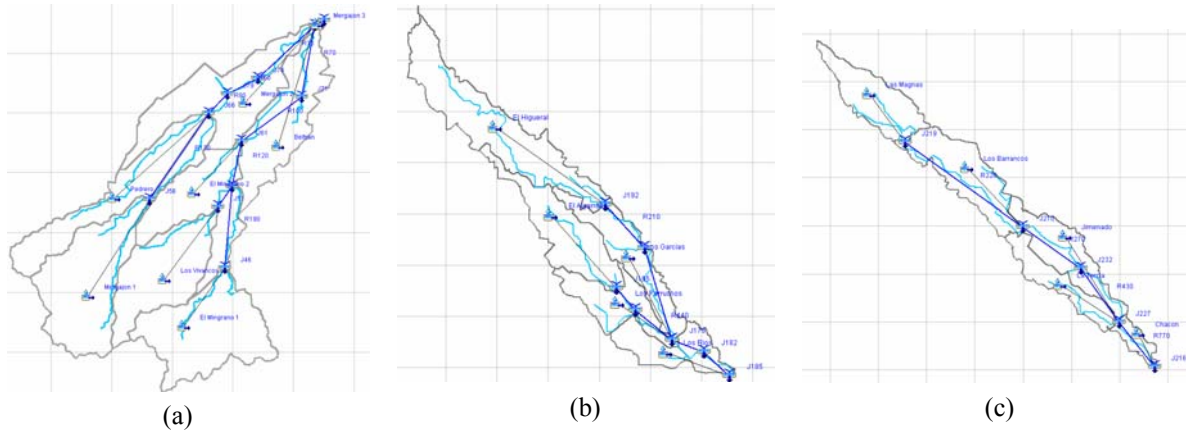


Figura 2 Modelos semidistribuidos HEC-HMS, (a) Mergajón, (b) Albuñón Intermedia y (c) Hoya de España.

Para el cálculo de pérdidas por infiltración, en todas las simulaciones, se ha empleado el modelo empírico del Soil Conservation Service (SCS) por ser el más extendido, experimentado, y contar con estudios propios en España. Para ello el mapa de los números de curva de la cuenca (Figura 3b), se ha obtenido empleando la metodología expuesta en Ferrer et al. (1995).

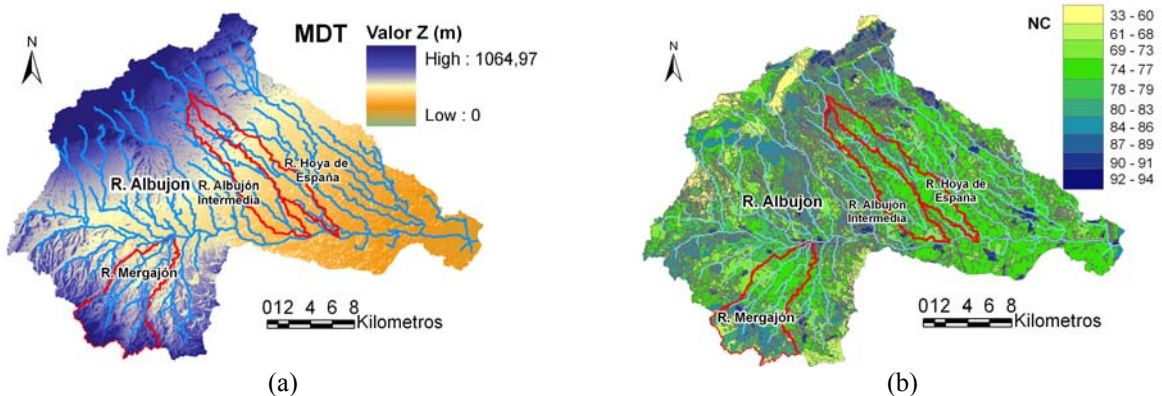


Figura 3 (a) MDT de las cuencas y subcuencas (b) mapa de números de curva.

Respecto al modelo de transformación lluvia-escorrentía, para todas las simulaciones, se ha optado por utilizar el hidrograma unitario del SCS, dada la escasa información existente sobre eventos reales en la cuenca, con el cálculo del tiempo de retardo (T_{lag}) en función del tiempo de concentración (T_c) $T_{lag} \approx 0.35T_c$ según la expresión de Témez (1987). Los valores obtenidos para cada cuenca completa se encuentran en la Tabla 2. Se hace notar que la diferencia de forma que presentan las cuencas completas, se refleja en los valores de T_c y T_{lag} , las cuencas más alargadas como la Hoya de España y Albuñón Intermedia presentan valores significativamente mayores.

Para el tránsito de los caudales en los modelos semidistribuidos, se han empleado los métodos de Muskingum-Cunge y la Onda Cinemática.

Los resultados de todas las simulaciones se muestran en la Tabla 2. En todos los casos, la simulación de la cuenca completa da valores inferiores a los obtenidos en las simulaciones semi-distribuidas, diferencias que van aumentando a medida que crece el periodo de retorno. Respecto a los caudales calculados en cuencas completas,

comparativamente los resultados del Mergajón y Las Angustias son muy similares tanto en precipitaciones como en caudales para periodos de retorno mayores de 50 años.

En términos generales los resultados obtenidos en las simulaciones semidistribuidas con los dos métodos de propagación, Muskingum-Cunge y Onda Cinemática, son similares para cada rambla. El método de la Onda Cinemática se considera más apropiado que el de Muskingum-Cunge en las ramblas del Albuñón Intermedia y Hoya de España, básicamente en atención a la forma de las cuencas y a las pendientes medias de las mismas (menor del 1%). En el caso del Mergajón, los resultados de la cuenca completa y disgregada, difieren significativamente. La causa está en la singular forma de la cuenca, que al tener dos ríos paralelos que se unen al final de la cuenca, hace que los picos de los hidrogramas sean prácticamente coincidentes.

Tabla 2 Valores de caudal máximo resultantes del modelo HMS.

Cuenca	Simulación	Área (Km ²)	Modelo/ Características	Caudal máximo (m ³ /s)					
				Q _{1,4}	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀
Albuñón Intermedia	Agregada	32	T _c =512 min T _{lag} =179 min	3	48	76	144	246	277
	Semi-distribuida	5 subcuencas	Muskingum-Cunge	3	57	95	187	329	384
	Semi-distribuida	De 4 a 11	Onda Cinemática	3	54	90	184	329	386
Hoya de España	Agregada	28	T _c =532 min T _{lag} =186 min	3	37	58	109	186	210
	Semi-distribuida	5 subcuencas	Muskingum-Cunge	3	44	70	139	244	279
	Semi-distribuida	De 1.5 a 8	Onda Cinemática	3	40	65	129	232	267
Mergajón	Agregada	52	T _c =290 min T _{lag} =102 min	15	147	227	421	701	785
	Semi-distribuida	8 subcuencas	Muskingum-Cunge	19	163	315	587	987	1103
	Semi-distribuida	De 1 a 9	Onda Cinemática	18	170	327	601	1000	1119
Las Angustias	Agregada	49	T _c =180 min T _{lag} =63 min	121	277	350	519	762	836

4.2 Simulación distribuida

El programa MIKE SHE ha sido empleado para la modelización distribuida de la cuenca del Mergajón. Como primera aproximación, para la simulación de un evento de 24 horas de precipitación, sólo se incluyó el proceso de flujo superficial. Para implementar el modelo de MIKE SHE se han utilizado valores de entrada equivalentes a los utilizados en el modelo de HMS. Entre ellos la precipitación, la topografía, y el valor de almacenamiento (detention storage, DS), que se asimila al valor de P₀. Los resultados para las simulaciones de tres periodos de retorno diferentes se muestran en la Tabla 3 y Figura 4.

Comparando los valores obtenidos de caudal máximo y el tiempo para alcanzarlo tanto en el modelo HEC-HMS como en MIKE SHE (Tabla 3), podemos ver que los caudales obtenidos por MIKE SHE son más altos que los de HMS para un período de retorno bajo (T 1.4 años). Sin embargo, dichos valores son similares en ambos modelos para T 50 años. Para T 500 años los caudales del modelo MIKE SHE son más bajos que el modelo de HMS. Respecto al tiempo al pico, estos son muy similares entre ellos excepto para el caso de T 1.4 años.

Tabla 3 Valores de caudal máximo obtenidos en HEC-HMS y MIKE SHE. Tiempo para alcanzarlo.

DS = P ₀ (mm)=14	CN=78	Pd T _{1,4}	Pd T ₅₀	Pd T ₅₀₀
HEC HMS Q _{max} (m ³ /s)		14	422	701
Tiempo al pico (h)		14:15	13:45	13:45
MIKE SHE Q _{max} (m ³ /s)		24.2	420.8	558.9
Tiempo al pico (h)		19:09	13:36	13:10

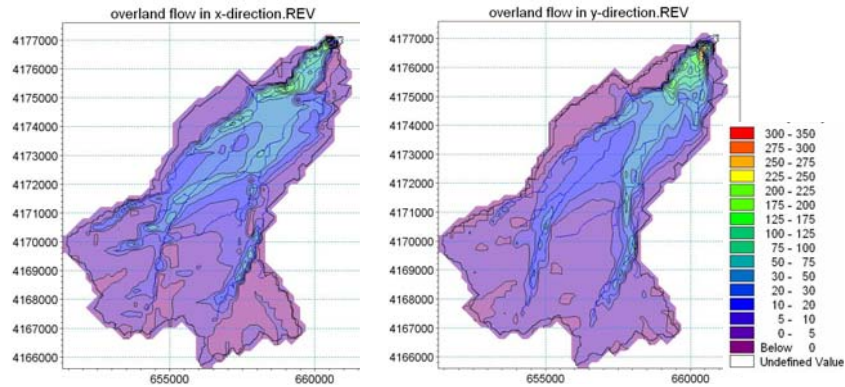


Figura 4 Caudales máximos en x e y para T500 años.

5 Caracterización hidráulica. Estudio del transporte de sedimentos

Para el cálculo del transporte de sedimentos, la información básica necesaria es de dos tipos, una de de tipo hidráulico a través de las características de flujo (Tabla 5), y otra de tipo granulométrico del material del lecho del cauce (Tabla 4).

Es de notar la gran diferencia que existe entre la granulometría de Las Angustias y las restantes.

Tabla 4 Curvas granulométricas de las diferentes cuencas.

Cuenca / Diámetro	$D_{16}(mm)$	$D_{50}(mm)$	$D_{84}(mm)$
Las Angustias	1.3	28	870
Mergajón	0.6	3.5	14.7
Intermedia	1.3	4.9	22.5
Hoya de España	2.5	10.5	19.7

5.1 Estimación del coeficiente de resistencia de Manning

El cálculo de las características de flujo depende fundamentalmente, a parte de la sección transversal y la pendiente longitudinal, del coeficiente de resistencia. Siguiendo la metodología de Castillo et al. (2009) se consideran cuatro aspectos para determinar las características del flujo: (1) macrorugosidad, (2) resistencia por formas de fondo, (3) tipo de flujo, hiperconcentrado o mud flow y (4) acorazamiento.

En todos los casos estudiados nos enfrentamos a un problema de macrorugosidad en períodos de retorno bajos puesto que $y/D_{84} < 50$, donde y es la profundidad. Por otra parte no es necesario contemplar un aumento de resistencia por forma de fondo, ya que en todos los casos $R_h/D_{50} < 2000$ -donde R_h es el radio hidráulico-, ni tampoco un aumento por la densidad y viscosidad del flujo puesto que la concentración en peso de los sedimentos es inferior al 10%. Sin embargo, el fenómeno del acorazamiento se presenta en el Mergajón y Albuñón Intermedia, donde ($\sigma_g > 3$), pero no en la Hoya de España. (Tabla 5).

Tabla 5 Principales características hidráulicas de las cuencas.

Cuenca	$Q_T(m^3/s)$	y/D_{84}	$Q_{1000}(m^3/s)$	R_h/D_{50}	$Q_T(m^3/s)$	Conc. Peso (%)	$\sigma_g=D_{84}/D_{16}$
Intermedia	$Q_{50}=144$	46	277	152	$Q_5=48$	0.31	4.15
H. España	$Q_{50}=109$	49	210	76	$Q_{1000}=210$	0.31	2.79
Mergajón	$Q_{1.4}=15$	23	786	442	$Q_5=147.5$	1.28	5.03

Para la estimación del coeficiente de rugosidad en flujos macrorugosos se han empleado las 8 expresiones recogidas en la metodología de Castillo et al. (2000, 2009). El cálculo se realiza acoplando iterativamente las características hidráulicas con el transporte de sedimentos, obteniendo así la media de la rugosidad del grano. En aquellas formulaciones en las que no se indica expresamente en valor del coeficiente de Manning n , se ha empleado la relación de Strikler $n = R_h^{1/6} / C$, donde C es el coeficiente de Chezy. La Tabla 6 muestra las fórmulas que mejor se ajustaron al valor medio.

Tabla 6 Principales formulaciones del coeficiente de resistencia para flujos macrorugosos.

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Fuentes y Aguirre (1991)	$C^* = 5.657 \log[d / D_{50}] + 1.333 + 0.737[1 / (d / D_{50})]$ $0.3 \leq d / D_{50} \leq 77$	$0.001\% \leq S_0 \leq 6.55\%$ C^* =coeficiente adimensional de Chezy $C^* = C / \sqrt{g}$
Bathurst (1985)	$C^* = 5.62 \log[d / D_{84}] + 4;$ $0.3 \leq R / D_{84} \leq 50$	$0.4\% \leq S_0 \leq 4\%$ d = calado del flujo
García Flores (1996)	Régimen Supercrítico: $C^* = 5.756 \log[d / D_{84}] + 3.698;$ $0.30 \leq d / D_{84} \leq 100$ $C^* = 5.756 \log[R_b / D_{50}] + 1.559;$ $0.6 \leq R_b / D_{50} \leq 200$	$n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d / D_{84}) + 1.2849}$ R_b = Radio hidráulico del fondo
Van Rijn (1987)	$C^* = 5.75 \log(12R_f / 3D_{90})$	R_f = radio hidráulico de fondo

Los resultados obtenidos de las diferentes expresiones analizadas muestran cierta dispersión, pero en general los valores tienden a disminuir a medida que aumenta el flujo. Los valores calculados se incrementaron en 0.01 para considerar la forma de la sección, y la vegetación existente en la zona del Albuñón. Finalmente los coeficientes de Manning adoptados para el cálculo del transporte de sedimentos fueron: Las Angustias (0.104 - 0.062), Mergajón (0.033 - 0.032), Albuñón Intermedia (0.036 - 0.034) y en la Hoya de España (0.038 - 0.034).

5.2 Estimación del transporte de sedimentos

En Castillo et al. (2000, 2009) se contemplan 12 expresiones para el cálculo de la capacidad de transporte de sedimentos. Estas han sido aplicadas en las ramblas estudiadas para caudales con periodos de retorno comprendidos entre 1.4 y 1000 años. La Tabla 7 muestra las formulaciones que más se han ajustado al valor promedio.

La Figura 5 presenta los resultados medios finales obtenidos de cada cuenca. Se aprecia que todas las subcuencas del Albuñón arrojan valores inferiores al de las Angustias, solo los obtenidos en el Mergajón son comparables al de Las Angustias. En general la diferencia entre ellos disminuye a medida que el caudal líquido aumenta.

También se ha representado la proporción que representa del transporte medio total, el transporte de fondo y de fondo en suspensión (Tabla 8 y Figura 5), cuyos porcentajes fueron obtenidos mediante la expresión de Einstein-Barbarossa. Para el caso del Barranco de las Angustias se observa que en caudales más bajos, el transporte de fondo es mucho mayor que el de suspensión (84% frente al 16% para $Q_{1.4}=121 \text{ m}^3/\text{s}$), proporción que va variando hasta llegar al 61% de frente al 39% para $Q_{1000}=836 \text{ m}^3/\text{s}$. En el Mergajón para bajos periodos de retorno ($Q_{1.4} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$) el transporte de fondo tiene un valor superior al de transporte de fondo en suspensión (71% vs. 29%), sin embargo para caudales mayores ($Q_{1000}=786 \text{ m}^3/\text{s}$) el transporte de fondo es inferior al de fondo en suspensión, tendencia invertida a la de Las Angustias.

Aguirre et al. [12] señala que para ríos pendientes entre 0,01 y 0,20, el transporte de fondo puede llegar a alcanzar un 50% del transporte total de fondo. En contraste con esto, en ríos con pendientes bajas el transporte de fondo se situaría alrededor de 5 a 20% del transporte total de fondo. La rambla del Mergajón, si bien se puede considerar como un río de montaña en función de su pendiente (0,027), tiene una curva granulométrica propia de un río de aluvial, muy distinta a la que presenta Las Angustias. Este hecho explicaría la tendencia invertida comentada.

Tabla 7 Formulaciones de transporte de sedimentos que mejor se ajustan.

FÓRMULA	OBSERVACIONES
<p>Einstein y Barbarossa (1952):</p> $i_B g_{Bi} = \Phi_* i_b \gamma_s (g \Delta D_i^3)^{1/2}; g_{BT} = g_B + g_{BS}$ $i_S g_{Bsi} = i_B g_{Bi} \{P_E I_1 + I_2\};$ $i_{BT} g_{BTi} = i_B g_{Bi} \cdot \{1 + P_E I_1 + I_2\}$ $g_{BT} = \sum_{i=1}^n i_{BTi} g_{BTi}; \Psi_* = \xi Y (\beta / \beta_x)^2 \Psi';$ $\xi = f(D_i / X); Y = f(D_{65} / \delta'); K_s = D_{65};$ $\beta_x = \log(10.6 X / \Delta); \Psi' = \Delta [D_i / (R'S)]; \Delta' = \frac{K_s}{\chi}$	$P_E = 2.303 \log\left(\frac{30.2d}{\Delta'}\right)$ $I_1 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \int_0^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^Z dy$ $I_2 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \int_0^1 \left(\frac{1-y}{y}\right)^Z \ln(y) dy$ $E = a / d; a = 2D_i; z = w / (K\beta U_*');$ $\chi = f(K_s / \delta'); U_*' = \sqrt{gR'S}$ <p>d = calado (m); S = pendiente</p>
<p>Meyer- Peter and Müller (1948):</p> $\gamma (K_s / K_r)^{3/2} R_s I =$ $= 0.047 \gamma_s' D_m + 0.25 \gamma_s'^{2/3} \rho^{1/3} (g_{BT} / \gamma_s)^{2/3}$ $K_r = \frac{26}{D_{90}^{1/6}}; K_m = \frac{1}{n}; K_w = \frac{1}{n_w}$	<p>g_{BT} = transporte unitario de fondo en peso (T/ms); b = ancho (m); d = calado (m); n_w = coeficiente de resistencia de las paredes</p> $K_s = \frac{B^{2/3} K_m K_w}{\{K_w^{3/2} (B + 2d) - K_m^{3/2} 2d\}^{2/3}}$
<p>Bathurst et al. (1987):</p> $\phi = (2.5S^{3/2} / [(\Delta + 1)D_{50}(g\Delta D_{50})^{1/2}]) [q - q_c]$ $D_{50}: q_c^* = \frac{q_c}{g^{1/2} D_{50}^{3/2}} = 0.15S^{-1.12};$ $D_{16}: q_c^* = \frac{q_c}{g^{1/2} D_{16}^{3/2}} = 0.21S^{-1.12}$	<p>S = pendiente; q = caudal líquido unitario; q_c = caudal crítico; Δ = peso específico aparente adimensional.</p>
<p>Yang S. (2005):</p> $C = \frac{g_t}{Vh} = k \frac{\gamma_s \tau_o u_*'^2 - u_{*c}^2}{\gamma_s - \gamma Vh w}; k = 6- 12.5$ <p>u_{*c}^2 = velocidad crítica de de Shields, $u_*'^2$ = velocidad de corte debido al grano; γ = peso específico agua.</p>	<p>C = concentración de sedimento total de fondo; g_t = transporte total de fondo en peso por ancho; h = radio hidráulico o calado; V = velocidad media; d = diámetro del sedimento; γ_s = peso específico sedimento; w = velocidad de caída de la partícula; τ_o = tensión de corte en el fondo.</p>

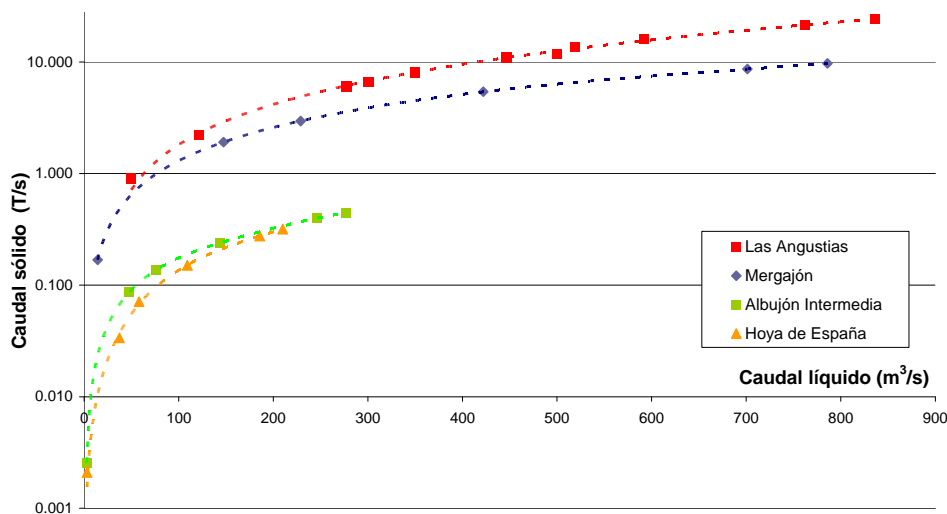


Figura 5 Caudal sólido (T/s) en función del caudal líquido (m³/s) para todas las cuencas.

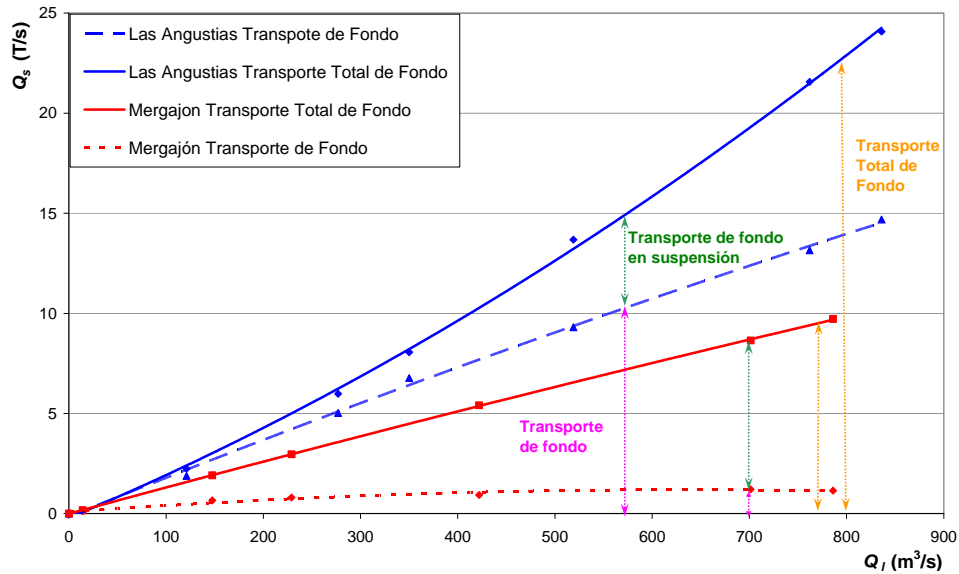


Figura 6 Comparativa del transporte de fondo entre el Barranco de las Angustias y la Rambla del Mergajón.

Las ramblas del Albuñón Intermedia y la Hoya de España, aunque se pueden considerar propiamente como ríos de llanura, de acuerdo a los valores indicados en la Tabla 8, las tasas de transporte de fondo son más altas que las de fondo en suspensión, para todos los caudales. Este comportamiento podría ser debido a que los flujos en estas cuencas son más bajos que en Mergajón, y no son capaces de movilizar todo el transporte de fondo.

Tabla 8 Proporciones del transporte total de fondo para las distintas subcuencas.

Cuenca	$Q_{T1.4}$ (m ³ /s)	Transp. Fondo	Transp. Susp	Q_{T1000} (m ³ /s)	Transp. Fondo	Transp. Susp.
Angustias	121	84 %	16 %	836	61 %	39 %
Mergajón	14	71 %	29 %	786	12 %	88 %
Intermedia	3	93 %	7 %	277	55 %	45 %
H. España	3	95 %	5 %	210	71 %	29 %

6 Resumen y conclusiones

En este artículo se ha realizado la caracterización hidrológica e hidráulica de tres cuencas mediterráneas, sitas en el Campo de Cartagena (Región de Murcia), empleando la metodología elaborada por Castillo et al. (2000 y 2009) en regiones semiáridas. Se han estudiado la Rambla del Mergajón, cuenca de montaña con características hidrológicas similares a la cuenca para la que fue realizada la metodología (Barranco de las Angustias), y las ramblas del Albuñón Intermedio y la Hoya de España con características propias de ríos de llanura o aluviales.

Para la caracterización hidrológica se han empleado dos tipos de programas, agregados y semidistribuidos (HEC-HMS), y distribuidos (MIKE-SHE). Los primeros resultados ofrecen valores coherentes para ciertos periodos de retorno.

Como conclusión en este aspecto, la recomendación del uso de modelos distribuidos (tipo MIKE-SHE) para mejorar el conocimiento de los procesos físicos ocurridos en cuencas semiáridas, y hacer notar la importancia de la determinación de T_{lag} , T_c y del patrón de lluvia que representará la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

Con respecto a la caracterización y el cálculo de la capacidad de transporte de sedimentos, el estudio muestra que la metodología propuesta es adecuada para los ríos efímeros. Los resultados presentados apuntan a la importancia del muestreo en el cálculo del transporte de sedimentos, así, los diámetros característicos que reflejan una curva granulométrica, sobrevalorarán o subvalorarán las estimaciones de su capacidad de transporte.

Finalmente es importante señalar que para analizar y contrastar las distintas fórmulas de transporte de sedimentos y de rugosidad, se precisan cuencas piloto con instrumentos suficientes y adecuados.

Agradecimientos

La investigación forma parte del proyecto PEPLAN: "Modelación Hidrológica en Zonas Semiáridas. Subproyecto 3: Modelación de Captaciones en Cauces Efímeros" (Decreto 420/2008). Los autores agradecen por el financiamiento recibido a la Consejería de Universidades, Empresa e Investigación de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

Referencias bibliográficas

- Aguirre-Pe J., Olivero M.L. y Moncada A.T. (2000). Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. *Ingeniería del Agua*, 7(4), pp. 353-365.
- ArcGIS v.9.2 (2006). Using ArcGIS Desktop. Environmental Systems Research Institute. Inc. ESRI. USA.
- Bathurst, J.C. (1985). Flow resistance estimation in mountain rivers. *J. Hydraulic Engineering, ASCE*, 111(4), pp. 625-643.
- Bathurst J.C., Graf, H. y Cao, H.H. (1987). Bed load discharge equations for steep mountains rivers (Chapter 15). *Sediment transport in gravel bed rivers*, ed. John Wiley and Sons, N.Y, USA, pp. 453-491.
- Castillo, L., Santos, F., Ojeda, J., Calderón, P. y Medina, J.M. (2000). Importancia del muestro y limitaciones de las formulaciones existentes en el cálculo del transporte de sedimentos. XIX IAHR, Córdoba, Argentina.
- Castillo, L. (2004). Estimation of sediment transport and dominant flow in hyperconcentrated flows. Proc. of the ICHE, Brisbane, Australia.
- Castillo, L. (2007). Discussion about prediction of bed material discharge. *J. Hydraulic Research*, 45 (2), pp. 425-428.
- Castillo, L., Martín Vide, J.P. y Marín, M.D. (2009). Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas. Proc. of the I Jornadas de Ingeniería del Agua, JIA, CEDEX. Madrid.
- Castillo, L., y Marín, M.D. (2010). Caracterización hidrológica e hidráulica en regiones semiáridas. XXIV IAHR, Punta del Este, Uruguay.
- Castillo, L. y Marín, M.D. (2011). Characterization of Ephemeral Rivers. 34th IAHR World Congress. Brisbane. Australia.
- Danish Hydraulic Institute (DHI). (2008). MIKE SHE. An integrated hydrological modeling framework-User Guide and Technical Ref. Manual.
- Einstein, H.A. y Barbarrosa, N. L. (1952). River Channels Roughness, ASCE Vol.117, pp. 1121-1132.
- Fuentes, R. y Aguirre-Pe, J., (1991). Resistance to flow in steep rough streams. *J. Hydraulic Engineering*, 116(11), pp. 1374-1387.
- García Flores, M. (1996). Resistencia al flujo en ríos de montaña. Proc. of the XVII IAHR Guayaquil, Ecuador.
- Hec-GeoHMS v. 1.1. (2009). User's Manual. US Army Corps of Engineers.
- Hec-HMS v.3.5. (2010). User's Manual y Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948). Formulations of the Bed-load Transport. Proc. of the II IAHR, Stockholm, pp. 39-64.
- Salas, J.D., (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. *Ingeniería del Agua*, 7(4), pp.409-429.
- Témez, J.R. (1991). Generalización y mejora del método racional, Versión de la Dirección general de Carreteras de España. *Ingeniería Civil, CEDEX-MOPT*, 82, pp. 51-56.
- Van Rijn, L.C. (1987). Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. Delft Hydraulics Communication No. 382.
- Yang, S.Q. (2005). Sediment Transport Capacity, *J. Hydraulic Research, IAHR* 43(1), pp. 12-22.