



Universidad
Politécnica
de Cartagena



SUFICIENCIA INVESTIGADORA

**PROGRAMA DE DOCTORADO:
MINERÍA, MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO
SOSTENIBLE**

2008-2010

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Departamento: Ingeniería Civil

Grupo de Investigación: Grupo de Investigación en
Ingeniería Hidráulica Marítima y Medioambiental,
Hidr@m

Doctoranda: M^a Dolores Marín Martín

Tutor: Dr. Luis G. Castillo Elsitdié

ÍNDICE

1. DATOS DE LA DOCTORANDA	1
2. DATOS DEL PROGRAMA DE DOCTORADO	1
3. PERIODO DE DOCENCIA (2008-2009): ASIGNATURAS CURSADAS	2
3.1. Análisis Avanzado de Proyectos de Obras Hidráulicas. Estudios de caso	2
3.2. Economía del agua.....	3
3.3. Hidroecología	4
3.4. Valoración económica de los recursos naturales	5
4. PERIODO DE INVESTIGACIÓN (2009-2010)	6
4.1. Introducción y Antecedentes	6
4.2. Objetivos.....	8
4.3. Actividades realizadas. Estado del Arte	8
4.3.1. Hidrología en regiones semiáridas	8
4.3.2. Transporte de sedimentos, coeficiente de resistencia y caudal dominante. 11	
4.4. Actividades realizadas. Metodología a aplicar	21
4.4.1. Caracterización hidrológica de la cuenca	21
4.4.2. Caracterización hidráulica del cauce	23
4.5. Aplicación a subcuencas. Resultados	30
4.5.1. Caracterización hidrológica.....	31
4.5.2. Caracterización hidráulica	35
4.6. Conclusiones.....	39
4.7. Bibliografía.....	40
5. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA	44
5.1. Contribuciones a congresos	44
5.2. Publicaciones	45
6. OTRAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS.....	47
7. PLANTEAMIENTO DE LA TESIS DOCTORAL	49
<i>ANEXO: PARTICIPACIONES EN CONGRESOS Y PUBLICACIONES</i>	

1. DATOS DE LA DOCTORANDA

Nombre	M ^a Dolores Marín Martín
Lugar de nacimiento	Madrid, 28 Agosto 1975
DNI	34863194-R
Titulación	Ingeniero de Caminos Canales y Puertos (1993-2001). Universidad Politécnica de Madrid

2. DATOS DEL PROGRAMA DE DOCTORADO

Programa	Minería, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (2008-2010)
Departamentos	Ciencia y Tecnología Agraria Ingeniería Minera, Geología y Cartografía Ingeniería Química (Universidad del Norte -Chile)
Coordinador	Angel Faz Cano
Tutor	Luis Gerardo Castillo Elsitdié. Grupo de Investigación en Ingeniería Hidráulica Marítima y Medioambiental, Hidr@m. <i>Dpto. de Ingeniería Civil.</i> <i>Universidad Politécnica de Cartagena.</i>

3. PERIODO DE DOCENCIA (2008-2009): ASIGNATURAS CURSADAS

3.1. Análisis Avanzado de Proyectos de Obras Hidráulicas. Estudios de caso

Código: 31951017

Tipo Asignatura: Fundamental

Número de créditos: 5

Calificación: Notable

Profesor: Dr. Luis G. Castillo Elsitdié

Programa:

Presentación de proyectos de carácter singular y que han dado lugar a diferentes publicaciones en congresos y revistas nacionales e internacionales: aliviaderos laterales, disipadores de energía, obras de captación en cauces con gran cantidad de transporte de sedimentos, problemas de clasificación de presas en función del riesgo potencial, planes de emergencia por hipotética rotura de presas convencionales y no convencionales (presas de residuos mineros), problemas de flujos hiperconcentrados-macrorrugosos, flujo plástico de Bingham, etc.

Aplicación de los conocimientos adquiridos:

Conocimiento de las diversas soluciones que se pueden adoptar en diferentes estudios y proyectos de obras hidráulicas singulares, especialmente en zonas semiáridas como las del sureste español, y en ramblas que presentan problemas de macrorrugosidad.

Estudio específico de un sistema de captación de agua en lugares de escasez y su aplicación en otras zonas similares: del Sistema Hidráulico de La Viña.

3.2. Economía del agua**Código:** 31951018**Tipo Asignatura:** Fundamental**Número de créditos:** 5**Calificación:** Notable**Profesor:** Dr. Juan Patricio Castro Valdivia**Programa:**

- Relación del recurso agua y el capital natural
- Valorización de los bienes de un ecosistema
- Problemática económica y social del uso del agua en climas áridos y semiáridos
- Legislación sobre vertidos a cauces y alcantarillado
 - carga contaminante
 - sanciones.

Aplicación de los conocimientos adquiridos:

Se han desarrollado habilidades para otorgar valor de mercado al recurso del agua en el contexto de su utilización sostenible con especial incidencia en climas áridos y semiáridos.

Se han adquirido herramientas para la búsqueda bibliográfica de la legislación más sobresaliente relativa a recursos hídricos, contaminación de acuíferos, cauces y ecosistemas en general, además de elementos críticos para el análisis y valoración de dicha legislación.

3.3. Hidroecología

Código: 31951016

Tipo Asignatura: Fundamental

Número de créditos: 5

Calificación: Sobresaliente

Profesor: Dr. Javier Gilavert Cervera

Programa:

- Fundamentos de la ecología
- Ecosistemas terrestres
- Ecosistemas acuáticos
- Interacciones física-biología en sistemas acuáticos
- Ecosistemas de aguas superficiales:
 - o Ecohidrología en ríos
 - o Ecohidrología en lagos
 - o Ecohidrología de ambientes áridos y semiáridos
- Ecohidrología en zonas costeras
 - o Dependencia hidrodinámica de los procesos biológicos marinos.
 - o Lagunas costeras
 - o Gestión integrada del litoral
- Procesos e interacciones hidroecológicas en las interfases tierra-agua:
 - o Gestión hidroecológica del paisaje
 - o Hidroecología en las directivas europeas

Aplicación de los conocimientos adquiridos:

Adquisición de herramientas para la caracterización de la interacción del recurso agua, con el suelo, la vegetación y la fauna.

Aplicación de conceptos teóricos y análisis a casos específicos como el de transporte de sedimentos en ecosistemas sensibles. Se elaboró un estudio sobre las afecciones que las presas y el trasvase del Ebro pueden tener en el Delta del Ebro desde el punto de vista del transporte de sedimentos.

3.4. Valoración económica de los recursos naturales**Código:** 31951019**Tipo de Asignatura:** Fundamental**Número de Créditos:** 5**Calificación:** Notable**Profesor:** Dr. Juan Patricio Castro Valdivia**Programa:**

- Relación de los recursos y el capital natural
- Valorización de los recursos naturales
 - o Técnicas directa
 - o Técnicas indirectas
- Problemática económica y social del uso de los recursos naturales
- Legislación sobre minería extractiva
- Legislación sobre conservación de recursos naturales.

Aplicación de los conocimientos adquiridos:

Aplicación de los conceptos teóricos y las metodologías de análisis en la valoración económica/ambiental del agua como recurso natural.

4. PERIODO DE INVESTIGACIÓN (2009-2010)

Asignatura: Modelización y simulación en ingeniería hidráulica

Código: 31955034

Tipo Asignatura: Trabajo de investigación

Número de créditos: 12

Profesor: Dr. Luis G. Castillo Elsitdié

Asignatura: Flujos hiperconcentrados

Código: 31955036

Tipo Asignatura: Trabajo de investigación

Número de créditos: 12

Profesor: Dr. Luis G. Castillo Elsitdié

4.1. Introducción y Antecedentes

Desde hace más de una década se vienen analizando, entre otros elementos, los datos relacionados con el incremento significativo de la temperatura media anual y el cambio señalado en ciertas variables hidrológicas, tales como la precipitación y su intensidad, apuntándose hacia la posibilidad de cambios importantes en el clima.

Lo que antes se atisbaba como la posibilidad de un cambio climático es hoy una realidad. El cuarto y último documento del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático de 2007, reafirma la existencia del cambio climático, evalúa los efectos del cambio ya acaecidos sobre los sistemas naturales y la sociedad humana, y realiza diversos análisis sobre los impactos a corto y largo plazo de acuerdo a diferentes escenarios. En concreto, respecto al agua expone que se espera que el cambio climático intensifique el estrés actualmente padecido por los recursos hídricos, debido al crecimiento de la población, cambio económico y de los usos de la tierra y en particular de la urbanización.

Este hecho se ve especialmente agravado en las zonas semiáridas (por ejemplo la cuenca mediterránea del sureste de España, el oeste de Estados Unidos, el sur de África o el nordeste de Brasil) que son más susceptibles y vulnerables a los cambios climáticos. En estas áreas, donde típicamente existe un déficit del recurso de agua, padecerán una disminución de sus recursos hídricos.

El efecto directo sobre la frecuencia e intensidad de la precipitación en estas zonas produce que se den 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. Además cada vez con más frecuencia se presentan en las ramblas flujos torrenciales hiperconcentrados que provocan grandes inundaciones con efectos muy destructivos sobre el medio y las personas.

De esta manera, varios son los principales motivos que han derivado en el tema escogido para el trabajo de investigación: (1) El interés por conocer los posibles efectos de una mayor variabilidad de las precipitaciones en zonas semiáridas que provocan lluvias torrenciales, mayor riesgo de crecidas y aumento de la erosión, (2) estudiar posibles soluciones para satisfacer la demanda del recurso agua, y (3) diseñar sistemas o estructuras para minimizar los efectos destructivos que presentan los flujos torrenciales.

Estas soluciones pasarían por captar parte de los flujos hiperconcentrados que se producen en los cauces efímeros típicos de estas regiones. Esto no es posible con los sistemas habituales de presa-embalse ya que la erosión y el alto contenido de sedimentos que arrastran los dejarían inutilizables en poco tiempo, por lo que sería necesario diseñar captaciones específicas para tal fin.

Existen algunas experiencias en el estudio y diseño de estas estructuras. En España existen los Tomaderos (obras bastantes ineficientes), como por ejemplo el de Dos Aguas en el Barranco de las Angustias (Isla de la Palma, Canarias). En países como Suiza, algunos de la ex Unión Soviética y en diversas regiones andinas, la captación de caudales de ríos de montaña se realizan mediante obras llamadas Tomas Tirolesas o Caucasianas.

La solución propuesta por Castillo et al. (2000, 2009a), y Castillo y Lima (2010) indica que el diseño base del sistema de captación debería constar de los siguientes elementos principales:

- Vertedero o azud de pequeña altura con sistemas de rejilla de fondo y cámara de recolección
- Canal lateral de recolección, canal de alta velocidad que une la cámara con el decantador
- Decantador de doble cámara vertical. Donde se realiza: el proceso de decantación e interconexión con la infraestructura de conducción del agua hacia la balsa de almacenamiento, y el de autolimpieza y reintegro al cauce del caudal sobrante
- Balsa de almacenamiento junto con los diferentes elementos de control y seguridad
- Encauzamiento del cauce hasta su reincorporación con el cauce original.

Para definir cada uno de los elementos de sistema es fundamental conocer cuáles son las principales variables hidráulicas (velocidad, esfuerzo cortante, y calado), cual es la concentración volumétrica de sedimentos y tipo de flujo; pero a la vez la determinación de estas variables depende de la estimación del coeficiente de resistencia.

4.2. Objetivos

Teniendo en cuenta la problemática, y basándonos en los principales resultados que de estos estudios se ha publicado (Castillo et al., 2000 y 2009b y Castillo, 2004 y 2007), se pretende presentar una metodología que permita generalizar la obtención de los parámetros de diseño para estos sistemas de captación en zonas semiáridas.

Para ello es imprescindible, en primer lugar caracterizar los procesos hidrológicos en estas zonas a diferente escala temporal y espacial.

En segundo lugar evaluar las diferentes formulaciones de transporte de sedimentos, seleccionando las más adecuadas para los cauces efímeros, así como evaluar las diferentes formulaciones para la caracterización de los coeficientes de rugosidad y macrorrugosidad en flujos hiperconcentrados propios de estos cauces, seleccionando las más adecuadas, y considerando su acoplamiento con las formulaciones de transporte de sedimentos.

Posteriormente aplicar las expresiones anteriores para obtener las curvas de caudales líquidos-sólidos, las velocidades de diseño, las tensiones de corte que se presenten en el fondo, los calados, etc.

Por último obtener el caudal dominante, que geomorfológicamente es el caudal que determinaría la geometría del cauce de aguas altas.

En el trabajo de investigación se han realizado varias labores interrelacionadas:

- Estudio del estado del arte en la hidrología de zonas semiáridas, y transporte de sedimentos (que incluye coeficientes de resistencia y caudal dominante).
- Basándonos en los métodos presentados por Castillo et al. (2000), y teniendo en cuenta experiencias y recomendaciones de diversos autores, se ha propuesto una nueva metodología ampliada, incluyendo una serie de formulaciones que puedan emplearse en el tipo de cuencas que encontramos en zonas semiáridas, y que presentan flujos macrorrugosos e hiperconcentrados.
- Aplicación de las conclusiones obtenidas y metodologías elaboradas en el estudio anterior a algunas subcuencas de la Rambla del Albuñón para comprobar su bondad.

4.3. Actividades realizadas. Estado del Arte

4.3.1. Hidrología en regiones semiáridas

Se ha realizado una extensa revisión bibliográfica de la literatura técnica disponible para lograr un mayor conocimiento de los procesos hidrológicos en las zonas semiáridas del sureste de la península a diferente escala temporal y espacial, lo que implica un estudio en el comportamiento de las crecidas mediante la aplicación de modelos matemáticos. Para la estimación de las crecidas la herramienta más utilizada es la modelación matemática,

básicamente debido a la imposibilidad de representar de forma real los diferentes procesos involucrados.

Los modelos matemáticos se pueden clasificar bajo diversos criterios. Si atendemos a la dependencia de las variables de entrada y salida, en función del espacio, del tiempo o de su aleatoriedad. Chow et al. (1994) clasifican los modelos hidrológicos matemáticos en tres estamentos cada uno de los cuales responde a una decisión (ver Figura 1). Los autores consideran que para que un modelo sea práctico usualmente se considera una o dos fuentes de variación, ya que la consideración simultánea de las cinco fuentes de variación (aleatoriedad, tres dimensiones espaciales y tiempo) hace que el modelo sea extremadamente complejo.

Los métodos o modelos estadísticos emplean únicamente series temporales de caudales, por ello también se les denominan modelos matemáticos estocásticos o de caudales. Generalmente en las zonas semiáridas, donde se sitúan los cauces efímeros, existe una pobre instrumentación y escasa información hidrometeorológica (pocos pluviógrafos y aforos, y los que hay tienen series históricas muy cortas) lo que dificulta e incluso impide el uso de estos métodos. Además este tipo de zonas se caracterizan por presentar mayores valores de extremos relativos en los componentes del ciclo hidrológico que en los climas húmedos, incluyendo: 1) una baja precipitación anual pero con tormentas de alta intensidad que presentan considerable variabilidad espacial, 2) alta evaporación potencial, 3) baja escorrentía anual pero presentando a corto plazo un alto volumen de escorrentía y 4) pérdidas de escorrentía en los cauces efímeros (Branson et al. 1981). 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 correctamente estos factores.

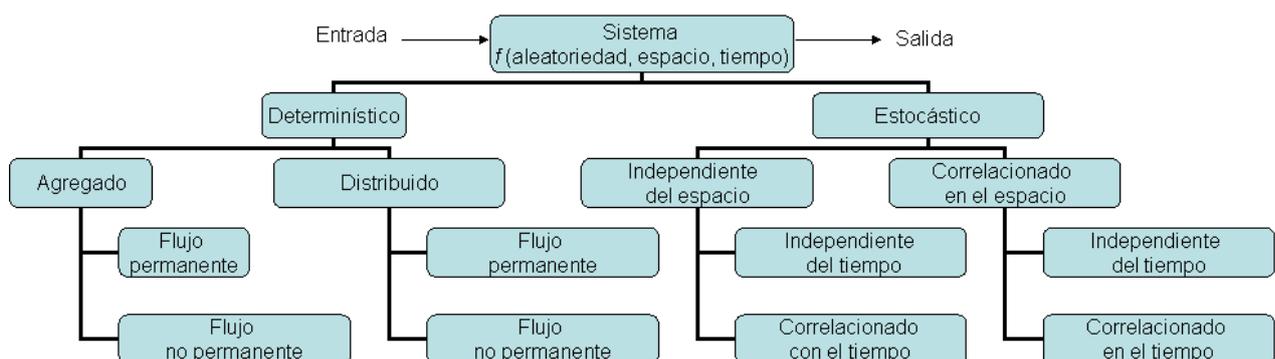


Figura 1. Clasificación de los modelos hidrológicos. Tomado de Chow et al. (1994)

En estos casos se han de emplear otro tipo de modelos denominados determinísticos que se emplean para modelizar el comportamiento de la cuenca. Se pueden clasificar según sus mecanismos internos como:

- **Modelos entrada-salida o tipo caja negra:** Son aquellos que no describen los mecanismos internos, solo presentan una relación entre la lluvia (entrada) y caudal

(salida), como los que tienen su origen en el hidrograma unitario de Sherman de 1932. Caso de algunos modelos que recoge el HEC-HMS.

- **Modelos conceptuales:** Modelos de naturaleza casi física que emplean una representación simplificada del proceso lluvia-escorrentía. Generalmente tienen en cuenta la cantidad de agua y, por lo tanto, mantienen el balance entre las entradas, las salidas y los almacenamientos internos. Caso de algunos modelos que recoge el HEC-HMS.
- **Modelos distribuidos físicamente basados:** Emplean las ecuaciones de masa, energía y cantidad de movimiento para describir el movimiento del agua. Trata de resolver numéricamente un sistema de ecuaciones diferenciales parciales mediante la representación tridimensional de la cuenca mediante una malla. Un ejemplo de ello sería el Systeme Hydrologique European Mike-SHE (Abbott et al., 1986).

Desde el punto de vista de la escala temporal, los modelos se pueden clasificar en dos grandes categorías (Chow et al. 1994):

- **Modelos continuos:** incluyen procedimientos para tener en cuenta el contenido de humedad del suelo, con el fin de simular la escorrentía de lluvias con intervalos de días u horas a lo largo de largos periodos.
- **Modelos de eventos:** modelan los procesos hidrológicos solo para un determinado evento de precipitación-escorrentía dadas las condiciones iniciales de la humedad del suelo. Dentro de estos modelos está el conocido HEC-HMS, de la U.S. Army Corps of Engineers en sus versiones iniciales, si bien en versiones más recientes tiene capacidad de evaluar procesos continuos.

Por último si atendemos a la distribución espacial, los modelos podríamos clasificarlos como:

- **Modelos agregados, globales (lumped):** son los que consideran la totalidad de la cuenca. Los procesos hidrológicos (lluvia, evaporación, pérdidas, etc.) y valores de estado son considerados como valores medios de la cuenca y se obtiene una respuesta hidrológica única para toda la cuenca. Los más conocidos son los que se basan en el hidrograma unitario desarrollado por Nash en 1987.
- **Modelos distribuidos:** En estos modelos se permite subdividir la cuenca en subcuencas, áreas contribuyentes o elementos. Estos modelos pueden procesar la información, los parámetros y las variables de estado de forma distribuida en el espacio obteniendo así una respuesta en cada uno de los elementos en cada intervalo temporal. Estos modelos distribuidos se han desarrollado gracias a la aparición y desarrollo de los SIG y de las herramientas informáticas.

Podremos combinar criterios encontrando modelos agregados continuos, modelos distribuidos continuos, y modelos de evento agregados y distribuidos, modelos distribuidos conceptuales o físicamente basados, etc.

Algunos autores como Salas (2000), indican que en general, para cuencas áridas o semiáridas los modelos distribuidos, ya sean continuos o de eventos, son más flexibles y más útiles. Michaud y Sorooshian (1994), también afirman que sólo un modelo espacialmente distribuido de alta resolución puede representar apropiadamente la variabilidad espaciotemporal de la lluvia y los subsiguientes procesos de infiltración y escorrentía en el medio semiárido.

En cambio otros autores como Beven (1989) citan que los modelos conceptuales son mejores que los modelos físicamente basados, puesto que son más simples, involucran un número de parámetros menor, requieren menos información y son más económicos, todo esto siempre y cuando se empleen a la escala adecuada.

Con todo ello, para el estudio de las cuencas en zonas mediterráneas se ha considerado conveniente el empleo de los dos tipos de modelos: agregados o semi-distribuidos conceptuales, y distribuidos y físicamente basados, mediante el uso de dos programas. Y así comparando los resultados lograr un mayor conocimiento en este tipo de zonas de los procesos hidrológicos involucrados. Por ello:

1. Se han estudiado y analizado los diferentes modelos que existen para simular los procesos de transformación lluvia-escorrentía y de propagación de caudales que ofrece el programa agregado y semi-distribuido HEC-HMS v.3.5. (2009), desarrollado por el US Army Corps of Engineers, así como los parámetros que se han introducido para la aplicación de los mismos. De ellas, se ha determinado justificadamente cuales han sido consideradas los más adecuados de acuerdo a las características que se presentan en las zonas semiáridas, y al análisis de los resultados obtenidos en varias cuencas de la Región de Murcia (ver Apartado de resultados 4.5).
2. Igualmente se ha realizado un estudio y análisis de los métodos a emplear para la simulación hidrológica mediante el programa distribuido físicamente basado MIKE-SHE (DHI, 2008), y posteriormente se ha aplicado a varias cuencas de Murcia.

4.3.2. Transporte de sedimentos, coeficiente de resistencia y caudal dominante

Tal y como dice Reid et al. (1993), si comparativamente poco se sabe sobre la hidrología de las zonas semidesérticas y desérticas a pesar de su gran extensión en el mundo, mucho menos se conoce acerca del comportamiento del transporte de sedimentos en estas zonas.

La comprensión y formulación de modelos del movimiento y transporte de partículas sólidas granulares inmersas en flujos líquidos es complejo, pues se interrelacionan fuerzas de arrastre hidrodinámicas, aspectos de flujos bifásicos, características de los sedimentos, etc.

En términos generales, el transporte de sedimentos de una cuenca se puede abordar desde tres formas diferentes, todas ellas relacionadas entre sí.

1. Una posibilidad es la de evaluar la capacidad de transporte del río mediante el empleo de formulaciones matemáticas, la mayoría de naturaleza empírica. Estas a su vez precisan de

la caracterización de los sedimentos obtenida de la toma de muestras y las curvas granulométricas.

2. Otra forma, la más inmediata, es obtener el transporte efectivo o real de sedimento que transporta un río mediante el uso in situ de captadores e instrumentos de medida.
3. Por último se presenta la posibilidad de evaluar la capacidad de transporte mediante un modelo matemático (en que se incluirían las formulaciones de cálculo) de la cuenca y del río, y cuya calibración y validación sea llevada a cabo mediante los datos del transporte real en la cuenca en ciertos eventos. En el trabajo de investigación, se han estudiado las citadas posibilidades.

En el estudio realizado se comenzó por examinar los diferentes tipos de flujo y mecanismos de transporte de sedimentos. Posteriormente partiendo de la base presentada por Castillo et al. (2000, 2009) y Castillo (2004), se revisaron aquellas formulaciones sobre transporte de sedimentos y coeficientes de resistencia, que se consideran más adecuadas para nuestra problemática (flujos hiperconcentrados y macrorrugosos), presentando sus límites de aplicación, analizando la interrelación entre ellas y la influencia que tiene fenómenos como el acorazamiento. Por último se han revisado las diferentes teorías sobre caudal dominante.

A continuación se recoge una síntesis de los puntos más relevantes estudiados, antes de explicar la metodología resultante que se adoptará en el estudio de las cuencas.

Clasificación del flujo

En hidráulica fluvial el flujo está compuesto por dos fases: una fase líquida (agua) y una fase sólida (sedimentos). En función de la cantidad, tamaño y distribución de partículas sólidas que el río transporte, el comportamiento del flujo será diferente. De acuerdo a varios autores (Martín Vide, 2001; Martínez Marín 2001; Wan y Wang, 1997) podemos clasificar los flujos en función de concentración de sedimentos en los siguientes:

1. Flujo “ordinario” o concentrado: cuando la concentración de sedimentos es muy pequeña. Se considera monofásico (con una única fase, el agua) y newtoniano. El efecto de los sedimentos en el calado o las velocidades es despreciable. En este caso se utilizan las ecuaciones de Saint Venant para el cálculo hidráulico.
2. Flujo hiperconcentrado: se presenta cuando la concentración es elevada, pero el flujo puede seguir considerándose monofásico o cuasi-Newtoniano. Se puede producir cuando los sedimentos son muy finos y cohesivos, o en cauces con pendientes medias o fuertes, después de tormentas intensas y con aporte de sólidos alto.
3. Debris flow o flujos de derrubios. Se produce cuando la concentración de sedimento y la pendiente son muy elevadas. Las características mecánicas de este tipo de fluido dependen en gran medida de la concentración y la composición del sedimento. Dentro de este tipo se puede clasificar a su vez atendiendo a las características de flujo en: viscoso, subviscoso y no-viscoso. Si atendemos a la composición de los materiales sólidos que transporta

distinguimos entre: (1) mudflow (o flujo de barros), se presenta cuando el contenido de arcillas es mayor del 15 %, (2) mud-rock flow, se presenta con un contenido de arcillas de entre 3-5%, y (3) water-rock flow que se presenta en lechos con rocas graníticas de dolomías.

Los límites entre uno u otro tipo de flujos difieren según los diferentes autores según se muestra en la Tabla 1.

La pendiente elevada, la existencia de material granular en el lecho del río (o también proveniente de la cuenca) y la presencia de una fuerte escorrentía, garantizan la existencia de flujo hiperconcentrado con transporte de una importante carga de fondo (aunque sin llegar al extremo de los flujos de derrubios). Este tipo de flujo torrencial hiperconcentrado es el que presentan ocasionalmente numerosos ríos de la geografía peninsular, y en especial las ramblas, que son ríos efímeros con cauces anchos (a veces difusos), muy permeables, de fuerte pendiente y con crecidas súbitas (Helmbrecht y Martín Vide, 2005).

Tabla 1.- Límites entre diferentes tipos de flujo según diferentes autores.

Tipo de flujo	“ordinario” o concentrado	Hiperconcentrado	Debris flow
Martín Vide (2002)	$Q_s/Q (C_v) < 5 \%$	$5\% < C_v < 40 \%$	$C_s > 40 \%$ y $S > 20\%$
Martínez Marín (2001)	$Q_s/Q (C_v) < 1 \%$	$1\% < C_v < 8-10 \%$	$C_v > 10 \%$
Wan&Wang (1997)	$Q_s/Q (C_p) < 200 \text{ Kg/m}^3$ $Q_s/Q (C_v) < 8 \%$	Depende de C_v y pendiente. Figura 2	$E_d = \gamma_s C_v S > 0.01$

Donde Q_s = caudal sólido; Q =caudal líquido; C_v =concentración volumétrica; C_s =concentración másica; E_d =energía proporcionada por la fase sólida; γ_s = densidad el sólido; S =pendiente.

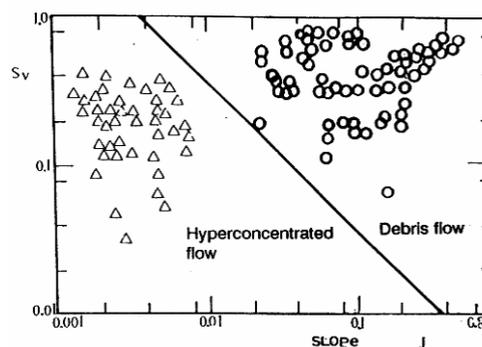


Figura 2. Diferencia entre debris flow y flujo hiperconcentrado según Wan y Wang (1997).

Mecánica y clasificación del transporte de sedimentos

El transporte del sedimento fluvial se produce por diferentes mecanismos dependiendo de la energía del flujo, y del peso o del tamaño de los sedimentos. Si las condiciones de flujo en un canal aluvial superan la condición umbral de arrastre entonces el fluido es capaz de inducir el

transporte generalizado del sedimento del lecho. Este puede clasificarse atendiendo a dos criterios: según el modo de transporte, y según el origen del material.

Si atendemos al modo de transporte del sedimento, la clasificación más detallada que proponen Martínez Marín (2001) o Maza y García (1996) es la que sigue (Figura 3). Donde el transporte unitario de sedimentos, se expresa en peso y se designa con la letra g_x ó en volumen y se designa con la letra q_x , siendo: $g_x = \gamma_s q_x$.

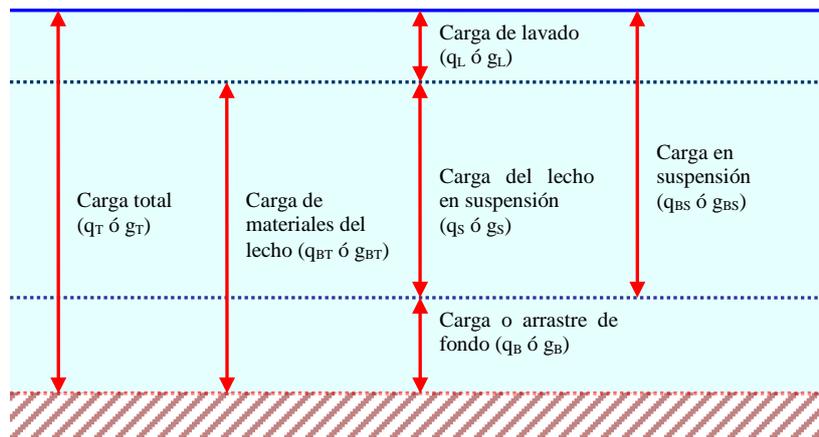


Figura 3.- Clasificación de los tipo de transportes según su modo.

- *Carga o transporte de fondo o arrastre de fondo (q_B ó g_B) “bed load”*: es la parte de la carga de materiales del lecho que es transportada por el fondo, ya sea por rodadura, deslizamiento o saltación, pero no en suspensión. Está asociado a las partículas más grandes, de entre 2 y 2000 mm (Bathurst, 2000). Conformar una capa adyacente al fondo cuyo espesor es igual a 2 veces el diámetro de la partícula.
- *Carga o transporte de materiales del lecho (q_{BT} ó g_{BT})*: Partículas que son transportadas por la corriente hidráulica y que en algún momento entran en contacto con el lecho. Pueden ser transportadas en suspensión o bien por el fondo; ($q_{BT} = q_B + q_{BS}$). Este transporte es el único cuantificable en función de las características hidráulicas de la corriente y se convierte por tanto en la capacidad de transporte de la corriente.
- *Carga o transporte del lecho en suspensión (q_{BS} ó g_{BS})*: parte de carga del lecho que en algún momento entra en suspensión y posteriormente puede volver a situarse en el fondo. Se asocia a las partículas de tamaño medio entre 0.062 y 2 mm (Bathurst, 2000). Según Van Rijn (1986) una partícula se puede considerar en suspensión si permanece en la columna de agua a distancias superiores a 100 veces su tamaño.
- *Carga o transporte de lavado o no sedimentable (q_L ó g_L) “wash load”*: corresponde a las partículas que son transportadas siempre en suspensión y nunca tiene contacto con el lecho. Está asociado a las partículas más finas, de entre 0.00024 y 0.062 mm (Bathurst, 2000).

- *Carga o transporte en suspensión* (q_S ó g_S) “*suspended load*”: Lo forman todas aquellas partículas que la corriente transporta en suspensión, ya procedan del fondo o del lavado; ($q_S = q_{BS} + q_L$). Este valor de transporte sólo se puede obtener por medio de medidas directas de muestreadores.
- *Carga o transporte total* (q_T ó g_T) “*bed material*”: que corresponde a la totalidad de material transportada por el cauce.

Según el origen del material, Martín Vide (2002) distingue entre:

- Origen de material de cauce o lecho, que se puede transportar por fondo o en suspensión.
- Origen de material de la cuenca: material muy fino de lavado de la cuenca que siempre se transporta en suspensión. Las partículas que lo componen no suelen tener tamaños superiores a los de las arcillas y limos ($D=0.0625$ mm).

Gráficamente la relación entre ambas clasificaciones se encuentra en la Figura 4.

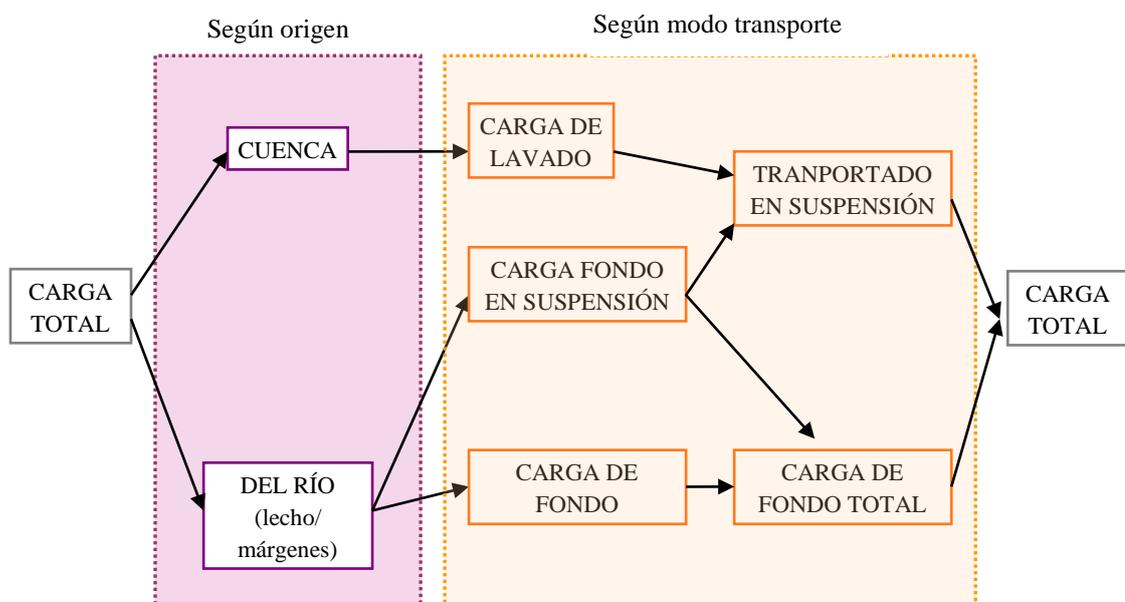


Figura 4. Relación entre cargas de sedimento clasificadas por su origen y por su modo de transporte.

La ley que gobierna en el transporte por fondo es el esfuerzo cortante (τ), mientras que la ley que lo hace en el transporte en suspensión es la turbulencia presente en el flujo.

La finalidad última del estudio es la de caracterizar las cuencas semiáridas en cuanto a la hidrología, hidráulica y la producción de sedimentos para posteriormente dar los parámetros de diseño de sistemas de captación en estos cauces, por lo que en principio solo sería necesario conocer el valor de q_{BT} de las cuencas de estudio.

Sin embargo, también es conveniente determinar en que medida existe transporte en suspensión (q_{BS}), puesto que la presencia de sólidos en suspensión en grandes cantidades afecta notablemente al transporte de fondo. Algunos autores como Rickenmann (1991)

comprobaron mediante ensayos que el transporte de fondo aumenta con el incremento de la concentración de sedimentos finos en suspensión, pudiendo llegar a ser más de 3 veces superior al transporte de fondo sin sedimentos en suspensión (o condición de agua clara), en condiciones similares.

El valor de q_{BT} será posible predecirlo mediante el empleo de formulaciones matemáticas, sin embargo la parte q_L , que incluye q_{BS} , tendrá que ser obtenido mediante la curva de descarga de sedimentos, curva que relaciona en valor de la concentración de sedimentos (C) con el caudal líquido (Q), y que se obtiene únicamente mediante datos de medición in situ.

Fórmulas para el transporte de fondo y transporte total de fondo

Las investigaciones en la evaluación del transporte de sedimentos se vienen realizando durante décadas sin obtener todavía una única ecuación realmente satisfactoria que interrelacione adecuadamente las propiedades del fluido y del sedimento. Esto se debe principalmente a la complejidad del problema, incluyendo el efecto de las distintas formas del lecho sobre el modo y magnitud del transporte de fondo, la naturaleza estocástica del problema y la dificultad de verificar las investigaciones de laboratorio en prototipo (Castillo, 2000). En su lugar se han propuesto una variedad de ecuaciones empíricas, semiempíricas o basadas en distintas teorías. Estas ecuaciones son aproximadas, no exactas, y sólo válidas dentro del rango de valores para el que fueron obtenidas.

Sin embargo se vienen realizando sustanciales avances. La mayoría de las aproximaciones utilizadas se pueden reducir a una correlación entre el parámetro ϕ tasa de transporte de sedimentos adimensional y un parámetro de flujo adimensional Ψ :

$$\phi = \frac{q_s}{D^{3/2} \sqrt{gA}} \quad (1)$$

$$F_{rd}^2 = \frac{1}{\Psi} = \frac{U^{*2}}{\Delta g D} \quad (2)$$

Donde q_s es el transporte total de fondo por unidad de ancho (m^3/sm); U^* es la velocidad de corte (m/s) $U^* = \sqrt{\tau_0/\rho} = \sqrt{gRS_0}$; τ_0 esfuerzo cortante medio producido por el flujo en las paredes y fondo del canal ($\tau_0 = \gamma RS_0$); R radio hidráulico de la sección transversal del canal; γ peso específico del agua; S_0 pendiente longitudinal del fondo; g aceleración de la gravedad y F_{rd} es el Número de Froude densimétrico.

Dentro del transporte de materiales del lecho, según Aguirre et al. (2000) en los ríos de montaña, el transporte de material suelto por el fondo constituye una parte importante del transporte total. Mientras que en los ríos de alta pendiente el arrastre de material por el fondo puede comprender cerca del 50% del arrastre total, en los ríos de baja pendiente, en llanura, el transporte de material por el fondo está en el orden del 5 al 20% del transporte total.

En los flujos de alta pendiente macrorrugosos, según García (2000) la proporción mayor de material que es transportado por el fondo, respecto a la que es transportado en suspensión, va decreciendo a medida que aumenta el valor del caudal líquido.

Para determinar el transporte de fondo en un río existen gran cantidad de fórmulas. Podemos citar algunas recopilaciones de las formulaciones clásicas más empleadas, como las presentadas por Simons y Sentürk (1992), o por Martínez Marín (2001). Estos autores las clasifican en tres tipos de fórmulas:

- Tipo Duboys: ecuaciones empíricas que expresan el transporte en función del esfuerzo cortante τ_c . Dentro de este tipo tenemos los métodos de Meyer-Peter y Müller (1948), Shields (1936).
- Tipo Schoklitsch: También ecuaciones de tipo empírico que calculan el transporte en función del caudal crítico, q_c . Estas fórmulas se aplican para materiales gruesos cuando la velocidad de corte es pequeña.
- Tipo Einstein: Las que se basan en conceptos probabilísticos del movimiento de partículas. Relaciona el transporte de suspensión directamente con el transporte de fondo. Presenta la ventaja, frente a otras fórmulas anteriores, de estudiar el arrastre de fondo separándolo en distintas fracciones e independizándolo del transporte en suspensión.

Para el caso de ríos de montaña y de gran pendiente se seleccionan una serie de expresiones que tienen buen comportamiento como son las de Bathurst et al. (1987), Mizuyama y Shimohigashi (1985) y Aguirre-Pe et al. (2000, 2002), todas ellas tipo Schoklitsch.

Entendiendo por transporte total de fondo o de los materiales del lecho como la suma del transporte de fondo, más el transporte en suspensión de materiales del fondo, éste se puede calcular de dos maneras:

- De forma indirecta calculando de forma independiente ambos sumandos. Entre estos métodos encontramos las fórmulas de Einstein, Yang, Toffaletti y Van Rijn.
- De forma directa con una formulación única para todo el transporte del material del lecho. Entre ellos encontramos las expresiones de Lané, Kalinske o Colby.

De todas las formulaciones estudiadas las que han sido seleccionadas para la metodología a aplicar son las que se presentan en la Tabla 4 (apartado 4.4).

Coefficiente de resistencia

Las características de flujo se interrelacionan con las características granulométricas del material del fondo del lecho del cauce a través de los coeficientes de resistencia y, cuyo acoplamiento con las formulaciones clásicas de transporte de sedimentos, aún no está resuelto para el caso de flujos macrorrugosos.

La resistencia que un cauce erosionable presenta al movimiento del fluido es función de los parámetros hidráulicos asociados al fenómeno: caudal, calado, rugosidad, densidad del agua, etc. Pero la existencia o no de movimiento en el lecho separa claramente las fórmulas que podríamos llamar clásicas de lecho fijo, como son las de Darcy-Weibach, Chézy, o Manning, de las que se desarrollaron desde 1950 (la de Einstein fue la primera) denominadas fórmulas para lecho móvil.

Generalmente, sobre un fondo granular se emplea la fórmula semiempírica de Strickler:

$$n = D_{90}^{1/6} / 26 \quad (3)$$

Pero estas pierden su validez si los granos son muy grandes en relación a la corriente. Esta circunstancia se denomina macrorrugosidad, y se caracteriza por la presencia de grandes partículas de sedimento que generan despegues y estelas en el flujo en torno a ellas. Se presenta generalmente en ríos de gran pendiente y material grueso existentes en zonas semiáridas. Este efecto implica la existencia de una resistencia de forma (debido a la fuerza de arrastre que se genera sobre los elementos de rugosidad del lecho), que se agrega a la resistencia friccional clásica de un lecho hidrodinámicamente rugoso. En estas condiciones se ha determinado experimentalmente que la resistencia hidráulica del lecho aumenta considerablemente.

La resistencia está descrita mediante la sumergencia relativa o también denominada inmersión relativa, que es la relación entre la profundidad de flujo (ó radio hidráulico) y el diámetro del sedimento, puede ser (D_{85} ó D_{50}).

El valor a partir del cual se puede hablar de un problema de macrorrugosidad varía según los autores, Martín Vide (2002) apunta que se presenta flujo macrorrugoso cuando $d/D_{84} < 50$ siendo d el calado. Según Niño (2005) el flujo macrorrugoso se presenta cuando $R_h/D_s < 10$ donde D_s puede adoptar el valor de D_{90} ó D_{84} .

Existen diversas formulaciones para estimar el coeficiente de rugosidad en el caso de flujos macrorrugosos, todas se basan en los fundamentos de integración de Keulegan (1938), a partir de la ley distribución media de velocidades del flujo turbulento, permanente y uniforme de Prandtl-Von Kármán, en canales rectos de fronteras rígidas y rugosas. Estas ecuaciones se expresan de forma general como:

$$C^* = \frac{V}{V^*} = \left[\frac{8}{f} \right]^{1/2} = \frac{2.3026}{\kappa} \log \left[a \frac{R}{K_s} \right] \quad (4)$$

Donde: C^* es el coeficiente adimensional de Chézy ($C^* = C/\sqrt{g}$); g aceleración de la gravedad; V velocidad media del flujo; V^* velocidad asociada al esfuerzo cortante ($V^* = \sqrt{\tau_0/\rho}$); ρ y γ densidad y peso específico del agua; τ_0 esfuerzo cortante medio producido por el flujo en las paredes y fondo del canal ($\tau_0 = \gamma R S_0$); R radio hidráulico de la sección transversal del canal; S_0 pendiente del lecho (en flujo uniforme es igual al gradiente hidráulico

S_w y a la línea de energía S_f); f factor de fricción de Darcy-Weisbach; k constante de Von Kármán en agua limpia ($\cong 0.407$); a coeficiente de forma (depende de la geometría de la sección transversal del canal); K_s rugosidad equivalente de los granos de arena de Nikuradse.

En canales de fondo móvil, además de la acción de la gravedad y de la resistencia de la superficie, influye en la resistencia al flujo, el transporte de sedimentos y la resistencia de forma (ondulaciones o configuraciones de la superficie del lecho). Las ondulaciones sedimentarias (dunas, rizos o antidunas) se producen en ríos donde el sedimento es fino, particularmente del rango de las arenas (cuando $200 < R_h/D_s < 10000$). Este produce una resistencia friccional asociada a la aspereza dada por los granos del lecho, resultando en una resistencia hidráulica mayor que la que se tendría en el caso de un lecho plano con el mismo sedimento. Sin embargo, en ríos rectos y constituidos por material grueso, el transporte de sedimentos no produce ondulaciones apreciables en el cauce, por lo que podemos utilizar la ecuación de Keulegan.

La rugosidad equivalente se suele expresar en términos de un diámetro característico de la granulometría del cauce, D_n ; así $K_s = \alpha_n D_n$, en la que α_n es el factor adimensional de textura o rugosidad relativa equivalente y depende de las condiciones del flujo y de la disposición y tamaño representativo de las asperezas del cauce. Si en la ecuación de Keulegan se reemplazan los principales valores, se obtiene la siguiente formulación:

$$C^* = \frac{V}{V^*} = \left[\frac{8}{f} \right]^{1/2} = 5.657 \log \left[\frac{R}{D_n} \right] + A_n \quad (5)$$

$$A_n = 5.657 \log \left[\frac{a}{\alpha_n} \right] \quad (6)$$

Para evaluar la resistencia al flujo en las cuencas objeto de la tesis, aplicaremos las formulaciones incluidas en la metodología presentada en el apartado 4.4, Tabla 3. Se basa en la presentada por Castillo et al. (2000) y Castillo (2004), y también se han tomado en consideración la recomendación de García (2000) sobre el uso de expresiones como las de Bathurst (1985) y (2002) y Grant (1997) para el cálculo de la resistencia en ríos de alta pendiente. Además de estas expresiones se incluyen otras pensadas para flujos macro rugosos y pendientes medias.

Caudal dominante

El caudal dominante o formativo, desde un punto de vista geomorfológico es aquel que determina la geometría del cauce de aguas altas. Desde el punto de vista de la teoría del régimen, se busca sustituir la variabilidad del régimen anual de caudales por un caudal equivalente. Al volumen de sedimentos transportado en un año contribuyen los caudales de aguas altas por sus altos caudales sólidos (a pesar de su corta duración), pero también aportan los caudales medios por su larga duración (a pesar del bajo caudal sólido transportado). Dado

que es el transporte de sedimentos de fondo quien modela el cauce, se define como caudal dominante a aquel que fluyendo como caudal constante todo el año transportaría el mismo volumen de sedimentos de fondo total (Castillo et al., 2009).

En general, el caudal dominante corresponde con la máxima avenida ordinaria, es decir, a una avenida con un período de retorno entre 1 y 2 años (Richards, 1982). Según autores como Henderson (1966) es un caudal que se da dos veces al año como promedio, o bien un caudal con un periodo de retorno de 1.4 años.

Otros autores como Petos y Amoros (1996), ó Leopold et al. (1992), citados por Niño (2005), indican que el promedio se sitúa entre 2 y 5 veces al año, o con periodos de retorno que van entre 1 a 3 años, con un valor promedio de 1.5 años.

Sin embargo, en el caso de ríos torrenciales e inestables desde el punto de vista hidrológico (como ocurre en cauces de zonas semiáridas), el caudal dominante podría incluso llegar a corresponder a un período de retorno de 7 años, tal como ocurre en algunos ríos mediterráneos (Martín Vide, 2002).

Sistemas de medición directos e indirectos

Como se ha comentado, se precisa determinar en campo dos aspectos del estudio:

- Medición directa del transporte en suspensión
- Caracterización de sedimentos del fondo del cauce para la aplicación de las formulaciones de transporte de fondo.

Sistemas de medición directos

Las muestras de sedimentos recogidas en una corriente, en una fecha determinada, es la manera más rápida y efectiva de determinar la carga de sedimentos transportada en ese momento, siempre que se realice correctamente. Las mediciones pueden efectuarse para determinar directamente el valor del transporte de sedimentos, para establecer o verificar relaciones analíticas o empíricas para el cálculo de la carga (ecuaciones de transporte de sedimento o curvas de descarga) y para calibrar y validar modelos de transporte físicos y numéricos (Bathurst, 2000).

Según sea el tipo de transporte y de río o elemento, las técnicas e instrumentos necesarios para las mediciones varían. En particular, se pueden distinguir tres tipos de muestreadores dependiendo de su ubicación respecto al cauce: muestreadores para la carga en suspensión (suspended-sediment samplers), muestreadores para la carga de fondo (bed-load samplers) y muestreadores de la carga total (bed-material samplers).

Como deseamos conocer la carga en suspensión, nos centramos en este tipo de muestreadores. Atendiendo al tipo de cauces con el que nos encontramos, y condiciones de medición, nos decantamos por el tipo ISCO 6712 ó ISCO3700, que ya ha sido empleado en el estudio de

transporte de sedimentos en suspensión con buenos resultados en cuencas de montaña mediterránea (Sala, 2002; Soler et al. 2003).

Sistemas de medición indirectos

La curva granulométrica o de distribución del material del fondo del lecho es esencial para estimar la capacidad total de transporte de sedimentos de un río mediante el empleo de ecuaciones. Los sistemas de medición indirectos se emplean para la extracción del material del lecho, que permite el estudio de su granulometría.

En cauces con pendientes medias y pronunciadas (mayor del 1 %) y en zonas semiáridas, estudios realizados por Castillo (2000), y Castillo y Marín (2010 y 2011) ponen de manifiesto la importancia que tiene el muestreo en el cálculo del transporte de sedimentos. Así, los diámetros característicos que reflejan una curva granulométrica de un cierto tramo de un determinado cauce, sobrevalorarán o subvalorarán las estimaciones de su capacidad de transporte, de acuerdo con la verdadera representatividad de la muestra; puesto que dicha capacidad de transporte es inversamente proporcional al diámetro característico de la muestra, elevado a tres medios.

En cauces efímeros, donde la mayor parte del tiempo no discurre agua, el muestreo se podrá llevar a cabo gracias a cucharas o dragas. En método a emplear en general será el del muestreo volumétrico (Martín Vide, 2002; García y Martín Vide, 2002), y en el caso de que exista acorazamiento, el muestreo superficial para la capa de coraza (Martín Vide, 2002).

Modelos matemáticos de transporte de sedimentos

Existen programas y aplicaciones informáticas para la evaluación del transporte de sedimentos. Se han seleccionado algunos de ellos como IBER, HEC-RAS o Mike11 para la comprobación de los datos obtenidos mediante formulaciones.

4.4. Actividades realizadas. Metodología a aplicar

Dentro del trabajo de investigación se ha definido una metodología a emplear una vez seleccionada la cuenca de estudio donde se desee disponer un sistema de captación.

Para ello nos hemos basado en las peculiaridades de los procesos hidrológicos que ocurren en las cuencas semiáridas, y en los métodos presentados por Castillo et al. (2000). Además se han tenido en cuenta experiencias y recomendaciones de diversos autores, incluyen una serie de formulaciones apropiadas al tipo cauces efímeros de estas zonas, que suelen presentar flujos hiperconcentrados, macrorrugosidad y lecho acorazado.

4.4.1. Caracterización hidrológica de la cuenca

Se emplearán 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.

La topografía y la precipitación, serán valores de entrada comunes a ambos modelos.

De acuerdo a la escala topográfica con la que contemos se podrán emplear unos modelos de propagación de caudales u otros.

Respecto a la precipitación, en general, en cualquier zona climática, varía en el espacio y en el tiempo de acuerdo con un patrón general de circulación atmosférica y factores locales. En zonas semiáridas es esencialmente de carácter errático y muy variable tanto en el tiempo como en el espacio (Salas, 2000). Nuestro interés se centra sobre todo en los eventos. Para estimarlos, se propone el empleo de series temporales de pluviómetros con más de 30 años a los que se les aplicará funciones estadísticas, y de un patrón de tormenta para representar la variabilidad temporal y espacial.

Implementación del modelo HEC-HMS

Se puede emplear la aplicación Hec-GeoHMS v. 4.2 (2009), para el programa ArcGIS 9.2 (2006), a la hora de realizar la agregación de las subcuencas que la componen, y obtener sus características. Se recomienda que las cuencas tengan un área de entre 5 y 50 km².

Para el cálculo de pérdidas por infiltración emplear el modelo empírico del Soil Conservation Service (SCS) por ser el más extendido, experimentado, y contar con estudios propios en España. Para la determinación del mapa de los números de curva (*NC*) de la cuenca emplear la metodología expuesta en Ferrer et al. (1995).

Respecto al modelo de transformación lluvia-escorrentía, si existe escasa información sobre eventos reales en la cuenca, se recomienda utilizar el hidrograma unitario del SCS. 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).

Para el tránsito de los caudales, se recomienda emplear el método de Muskingum-Cunge para cuencas cuyo cauce tenga pendientes >3%, y la Onda Cinemática en caso contrario. También se puede emplear las recomendaciones dadas por Nanía (2008) de la siguiente Tabla.

Tabla 2.- Criterios para la elección del modelo de propagación Nanía (2008).

Caso	Método de propagación a usar
Sin datos para calibrar	Onda cinemática, Muskingum-Cunge
Efectos importantes de remanso	Puls modificado (con condiciones invariantes)
El cauce inunda las llanuras	Puls modificado, Muskingum-Cunge de 8 puntos
$S_0 > 0.002$ y $TS_0 u_0 / d_0 \geq 171$	Cualquiera
$0.0004 < S_0 < 0.002$ y $TS_0 u_0 / d_0 \geq 171$	Muskingum-Cunge, Puls modificado, Muskingum
$S_0 < 0.0004$ y $TS_0 (g/d_0)^{1/2} \geq 30$	Muskingum-Cunge
$S_0 < 0.0004$ y $TS_0 (g/d_0)^{1/2} < 30$	Ninguna simplificación

Implementación del modelo MIKE SHE

Se incluirá el proceso de flujo superficial (Overland Flow) y la conexión con la aplicación MIKE-11 de modelización hidráulica (Rivers and Lakes). En un primer tanteo el valor de almacenamiento (detention storage, DS), se asimilará al valor de P_0 con la relación $NC = 5080 / (50.8 + P_0)$ y los datos de sección del cauce pueden ser extraídos mediante la aplicación Hec-GeoRAS v. 4.2.92 (2009), para el programa ArcGIS 9.2 (2006).

Posteriormente se calibrarán los parámetros de acuerdo a datos reales de caudales o datos bibliográficos.

Se realizará una comparativa y análisis de ambos modelos, para finalmente determinar cuales son los valores de cálculo que se emplearán en la caracterización hidráulica de la cuenca y de los parámetros necesarios para el diseño de los sistemas.

4.4.2. Caracterización hidráulica del cauce

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

Se determinará la curva granulométrica mediante muestreo volumétrico de los cauces a estudiar.

El cálculo de las características de flujo depende fundamentalmente, a parte de la sección transversal y la pendiente longitudinal, del coeficiente de resistencia.

Coefficiente de resistencia

Se considerarán cuatro aspectos para determinar las características del flujo:

(1) Macrorrugosidad: Este hecho se presenta generalmente cuando además de existir una gran cantidad de transporte de sedimentos, los tamaños característicos transportados son grandes. Se produce cuando la relación $y/D_{84} < 50$ donde y es el calado de flujo.

(2) Resistencia por formas de fondo. Sería necesario considerarlas si la relación $R_h / D_{50} > 2000$, donde R_h es el radio hidráulico.

(3) Acorazamiento. Aparece este fenómeno si la desviación típica granulométrica es extendida o bien graduada $\sigma_g = (D_{84} / D_{16})^{0.5} > 3$. Los efectos derivados del acorazamiento son varios y significativos: influyen en la rugosidad del cauce, y con ello en la velocidad de la corriente y el inicio de movimiento de las partículas del lecho.

(4) Tipo de flujo, hiperconcentrado o mud flow. Determinarán el tipo de flujo según los límites expuestos de Wan y Wang (1994). Si este no es mudflow, entonces no será necesario contemplar un incremento de la resistencia por la variación de la densidad y viscosidad del fluido.

Se aplicarán las formulaciones expuestas en la Tabla 3 para los diferentes periodos de retorno deseados. En la tabla se indica el intervalo de validez de pendiente, inmersión relativa y otros valores. Para el cálculo del coeficiente de Manning se ha utilizado la relación de Strickler $n = R^{1/6} / C$ en aquellas formulaciones que no cuentan con expresiones explícitas para ello.

Se compararán los resultados obtenidos con datos de campo en caso de existir, en caso contrario adoptar el valor de la media de aquellas expresiones que mejor se ajusten al caso.

Transporte de sedimentos

Mediante un proceso iterativo se llevará a cabo el acoplamiento de las características hidráulicas con las formulaciones de transporte de sedimentos seleccionadas (Tabla 4). Para ello se ha elaborado una hoja de cálculo en la que se han implementado todas las expresiones presentadas en la Tabla 3 y Tabla 4.

Se compararán los resultados obtenidos con datos de campo en caso de existir, en caso contrario adoptar el valor de la media de aquellas expresiones que mejor se ajusten al caso.

Se calculará mediante la expresión de Einstein-Barbarossa (1952) qué proporción de transporte de fondo y de fondo en suspensión existe, y se analizarán los resultados.

Tabla 3.- Fórmulas seleccionadas para el coeficiente de resistencia en la metodología elaborada.

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Limerinos (1970)	$C^* = 5.657 \log \left[\frac{R}{D_{84}} \right] + 3.281; \quad 0.90 \leq R / D_{84} \leq 68.55$ $C^* = 5.657 \log \left[\frac{R}{D_{50}} \right] + 0.990; \quad 1.90 \leq R / D_{50} \leq 177$	$n = \frac{0.1129R^{1/6}}{2 \log(R/D_{84}) + 1.160}$ R= Radio hidráulico total
Bathurst (1985)	$C^* = 5.62 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 4; \quad 0.3 \leq d / D_{84} \leq 50$	$0.4\% \leq S_0 \leq 4\%$ d= calado del flujo
Fuentes y Aguirre (1991)	$C^* = 5.657 \log \left[\frac{d}{D_{50}} \right] + 1.333 + 0.737 \left[\frac{1}{(d/D_{50})} \right]$ $0.3 \leq d / D_{50} \leq 77$	$0.001\% \leq S_0 \leq 6.55\%$
García Flores (1996)	Régimen Supercrítico: $C^* = 5.756 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 3.698; \quad 0.30 \leq d / D_{84} \leq 100$ $C^* = 5.756 \log \left[\frac{R_b}{D_{50}} \right] + 1.559; \quad 0.6 \leq R_b / D_{50} \leq 200$ Régimen Subcrítico: $C^* = 5.756 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 2.2794; \quad 0.30 \leq d / D_{84} \leq 100$ $C^* = 5.756 \log \left[\frac{R_b}{D_{50}} \right] + 0.2425; \quad 0.6 \leq R_b / D_{50} \leq 200$	$n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 1.2849}$ R_b = Radio hidráulico del fondo $n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 0.7919}$
Van Rijn (1987)	$C^* = 5.75 \log(12R_f / 3D_{90})$	R_f = radio hidráulico de fondo
Jarret (1984)	$n = 0.395^{0.38} / (3.28R)^{0.16}; \quad 0.2\% < S < 0.4\%; \quad 0.15m < R < 2.1m$	S= pendiente de fricción; R= radio hidráulico

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Strickler (1923)	$n = D_{90}^{1/6} / 26$	D_{50} Diámetro característico en m
Grant (1997)	$C^* = 2.18 \left[\ln(1.65 \frac{\tau_{cr}^*}{S}) + 1.35 \right]; \tau_{cr}^* = d \cdot S / (\gamma_s / \gamma_a - 1) \cdot D$	$D = D_{85}$ $S =$ pendiente tramo $d =$ calado del flujo
Bathurst (2002)	$C^* = 3.84(d / D_{84})^{0.547}; S < 0.8\%$ $C^* = 3.10(d / D_{84})^{0.93}; S > 0.8\%$	$S =$ pendiente tramo $d =$ calado del flujo $0.2\% \leq S \leq 4\%$ $d/D_{84} < 11$

Cálculo de caudal dominante

Para determinar el caudal dominante, primero se ha de caracterizar el número de eventos equivalentes, de forma que se pueda estimar en valores medios cuántas veces se presenta cada uno de ellos en un año característico y poder ajustar así el transporte sólido correspondiente.

Se aplicará la metodología desarrollada por Castillo (2000) para el Barranco de las Angustias (Figura 25), se contabilizará el número de veces en los que se presenta el suceso a partir de los datos hidrológicos conocidos, se halla el número de días que dura, y se obtiene su equivalente en eventos de hidrogramas con una base de 2 veces el tiempo de concentración de la cuenca. Se tabulan y se grafican, las funciones $Q_s=f(Q)$, $Q=g(n^\circ \text{ eventos} \times Q_s)$ en el segundo cuadrante, y $Q=h(n^\circ \text{ de eventos})$ en el primer cuadrante. El caudal dominante corresponde al valor máximo de la función g , y el caudal más frecuente al valor máximo de la función h .

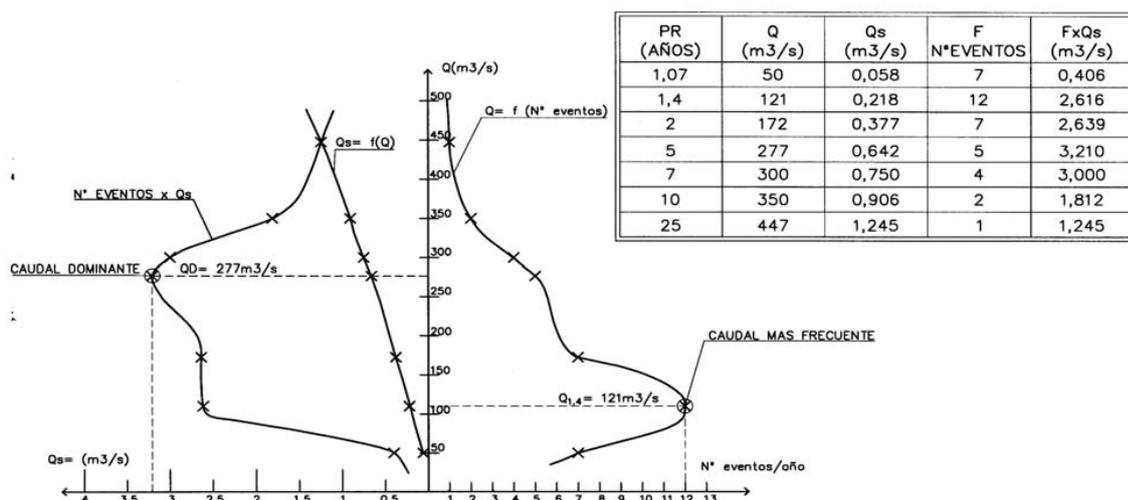


Figura 5. Caudales líquidos-Nº de eventos y Caudales líquidos-Caudales sólidos. Barranco de las Angustias.

Tabla 4.- Fórmulas seleccionadas para el transporte de sedimentos en la metodología elaborada.

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Colby (1964)	$g_{BT \max} = 1.13U^{3.326}; g_{BT \min} = 0.46U^{3.326} \quad 0.1mm \leq D_{50} \leq 1mm$	U =velocidad media del flujo g_{BT} =Transporte unitario total de fondo en peso (kg/ms)
Meyer- Peter y Müller (1948)	$\gamma(K_s / K_r)^{3/2} R_s I = 0.047\gamma'_s D_m + 0.25\gamma'_s \rho^{1/3} (g_{BT} / \gamma_s)^{2/3}; K_r = 26 / D_{90}^{1/6};$ $K_s = \frac{B^{2/3} K_m K_w}{\{Bd^{2/3} + 2d(K_w^{3/2} - K_m^{3/2})\}^{2/3}}; K_m = 1/n; K_w = 1/n_{pared}$	g_{BT} =Transporte unitario total de fondo en peso (T/ms) b =ancho (m); K_m =coeficiente de resistencia global en toda la sección. K_w =coeficiente de resistencia de las paredes; K_s =coeficiente de resistencia global del fondo; K_r =coeficiente de resistencia del grano del material del fondo; d = calado (m) $0.04\% < S < 2\%$
Ackers-White (1990)	$g_{BT} = \gamma_s K D_{35} U \left(\frac{U}{U_*}\right)^n \left(\frac{F_*}{F_{*c}} - 1\right)^m$ Si: $1 \leq D_* \leq 60: K = \exp\{2.79 \ln(D_*) - 0.426(\ln D_*)^2 - 7.967\}$ $n = 1 - 0.56 \log D_*; F_{*c} = (0.23 / \sqrt{D_*}) + 0.14; m = (6.83 / D_*) + 1.67$ $F_* = (U_*^n / \sqrt{g\Delta D}) \{U / \sqrt{32 \log(10d/D)}\}^{1-n}; D_* = D_{35} (g\Delta / \nu^2)^{1/3}$	El método se aplica si: $D_* \geq 1$ y $F_* \leq 8$ Si $D_* > 60; n = 0; m = 1.78; F_{*c} = 0.17; K = 0.025;$ $\sigma_g = \left(\frac{D_{84}}{D_{16}}\right)^{0,5}$ siendo $\begin{cases} D = D_{35} & \text{si } \sigma_g > 3 \\ D = D_{50} & \text{si } \sigma_g \leq 3 \end{cases}$
Engelund y Hansen (1967)	$g_{BT} = 0.05\gamma_s U^2 \tau_*^{3/2} \left(\frac{D_{50}}{g\Delta}\right)^{1/2}$	Siempre que: $Re_* = \frac{U_* D_{50}}{\nu} \geq 12; D_{50} \geq 0.15mm; \sigma_g \leq 2$

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Bathurst et al. (1987)	$\phi = (2.5S^{3/2} / [(\Delta + 1)D_{50}(g\Delta D_{50})^{1/2}]) [q - q_c]$ <p>Con 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>	<p>Siendo S= pendiente; q= caudal unitario de agua q_c= caudal crítico Δ = peso específico aparente adimensional</p>
Van Rijn (1987)	$\phi = \frac{0.053}{D^{*0.3}} \left[\frac{F_{rd}^2}{C^{*2} \tau_c^*} - 1 \right]^{2.1}; C^* = 5.75 \log \left[\frac{12R_f}{3D_{90}} \right]; D^* = D \left(\frac{g\Delta}{v^2} \right)^{1/3}$	<p>F_{rd}= número de Froude Densimétrico de partículas; τ_c^*= esfuerzo cortante crítico adimensional; C^* = coeficiente de Chézy; R_f= radio hidráulico del fondo</p>
Yang (1976)	<p>Transporte de arenas:</p> $g_{BT} = 0.001 \cdot U \cdot d \cdot \exp\{11.8929 - 0.153 \cdot \ln(w \cdot D_m / v) - 0.297 \cdot \ln(U_* / w) + [1.78 - 0.1563 \cdot \ln(w \cdot D_m / v) - 0.208 \cdot \ln(U_* / w)] \cdot \ln(U \cdot S / w)\}$ <p>Transporte de gravas:</p> $g_{BT} = 0.001 \cdot U \cdot d \cdot \exp\{15.3836 - 0.633 \cdot \ln(w \cdot D_m / v) - 4.816 \cdot \ln(U_* / w) + [2.784 - 0.1327 \cdot \ln(w \cdot D_m / v) - 0.1228 \cdot \ln(U_* / w)] \cdot \ln(U \cdot S / w - U_c \cdot S / w)\}$	<p>Si $1.2 < \frac{U_* D}{v} < 70$</p> $\frac{U_c}{w} = \frac{2.5}{\log(U_* D / v - 0.06)} + 0.66$ <p>Si $70 \leq \frac{U_* D}{v}$; $\frac{U_c}{w} = 2.05$</p>
Mizuyama y Shimohigashi (1985)	$\phi = 20 \frac{S^2}{\Delta^2} \frac{q}{\sqrt{g\Delta D_{50}^3}}$	<p>S= pendiente; q= caudal unitario de agua; Δ = peso específico aparente adimensional</p>
Aguirre-Pe et al. (2000)	$\phi = \frac{1.5S^{1/2} F_{rd}^6}{C^{*4}}; F_{rd}^2 = U / \sqrt{\Delta g D_m \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)}; C^* = \sqrt{\frac{8}{f_b}}$	<p>F_{rd}=Froude Densimétrico de partículas; S=pendiente; C^*=coeficiente adimensional de Chézy; U=velocidad media de flujo; D_m= diámetro promedio; θ= ángulo inclinación longitudinal de lecho; ϕ=ángulo fricción interna partículas; f_b= factor fricción Darcy-Weisbach para radio hidráulico de fondo.</p>

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Einstein y Barbarossa (1952)	<p>Transporte total</p> $g_{BT} = g_B + g_{BS} \text{ donde } g_{BT} = \sum_{i=1}^n i_{BTi} g_{BTi}; i_{BT} g_{BTi} = i_B g_{Bi} \cdot \{1 + P_E I_1 + I_2\}$ <p>Transporte de fondo:</p> $g_B = \sum_{i=1}^n i_B g_{Bi};$ $i_B g_{Bi} = \Phi_* i_b \gamma_s \left(g \Delta D_i^3 \right)^{1/2}; \Phi_* = f(\Psi_*); \Psi_* = \xi Y (\beta / \beta_x)^2 \Psi'; \beta_x = \log(10.6 X / \Delta')$ $\beta = \log 10.6 = 1.025; \Psi' = \Delta \frac{D_i}{R'I}; \xi = f(D/X); Y = f(D_{65} / \delta'); \delta' = \frac{11.6\nu}{U'_*}$ $X = 0.77 \Delta' \text{ si } \Delta' / \delta' > 1.8; X = 1.39 \delta' \text{ si } \Delta' / \delta' < 1.8; \Delta' = \frac{K_s}{\chi}; K_s = D_{65};$ $\chi = f(K_s / \delta');$ <p>El transporte en suspensión:</p> $g_{BS} = \sum_{i=1}^n i_S g_{BSi}; i_S g_{BSi} = i_B g_{Bi} \cdot \{P_E I_1 + I_2\};$ <p>Nota: Integrales se calculan por medio de ábacos. Para una descripción completa ver Simons and Sentürk (1992) y Graf (1984).</p>	$P_E = 2.303 \log \left(\frac{30.2d}{\Delta'} \right)$ $I_1 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^Z dy$ $I_2 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^Z \ln(y) dy$ $E = a/d; a = 2D_i; z = w/(K\beta U'_*); U'_* = \sqrt{gR'I};$
Einstein- Brown (1950)	$\phi = f(1/\Psi); \Psi = \frac{(\gamma_s - \gamma)}{\tau} D_s; \phi = \frac{q_b}{\gamma_s K \sqrt{g(\gamma_s / \gamma) D_s^3}}$ $\text{Si } 1/\Psi > 0.9; \phi = 40 \left(\frac{1}{\Psi} \right)^3; K = \sqrt{\frac{2}{3} + \frac{36\nu^2}{gD_s^3((\gamma_s / \gamma) - 1)}} - \sqrt{\frac{36\nu^2}{gD_s^3((\gamma_s / \gamma) - 1)}}$	$q_b = \text{transporte unitario total de fondo en volumen (m}^3/\text{ms);}$ $\nu = \text{viscosidad cinemática del agua (m}^2/\text{s)}$ $\text{Se aplica sí } 0.19 \leq \tau_* \leq 1.0 \text{ siendo } \tau_* = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma) D_s}.$

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Yang S. (2005)	$C = \frac{g_t}{Vh} = k \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{\tau_o}{Vh} \frac{u_*'^2 - u_{*c}^2}{w}$; $k = \text{constante universal}=12.5$ $u_*'^2 = \text{velocidad de corte debido a grano}; u_{*c}^2 = \text{velocidad crítica de de Shields}$ $\frac{V}{u_*} = 2.5 \ln \left(\frac{11R}{2d_{50}} \right)$	$C = \text{concentración sedimento total de fondo}; g_t = \text{transporte total de fondo en peso}; h = \text{radio hidráulico o calado}; V = \text{velocidad media}; \tau_o = \text{tensión de corte en fondo}, d = \text{diámetro sedimento}; w = \text{velocidad sedimentación partícula}; \gamma_s = \text{peso específico sedimento}; \gamma = \text{peso específico agua}$
Smart y Jaeggi (1983)	$\phi = 4 \left[\frac{D_{90}}{D_{30}} \right]^{0.2} S^{0.6} C^* \tau^*{}^{0.5} [\tau^* - \tau_{cj}^*]; \quad \tau_{cj}^* = \tau_c^* \cos(\arctan S) [1 - S / \tan \phi]$ $3\% < S < 25\% \text{ y } 2\text{mm} < D_m < 10.5 \text{ mm}$	$\tau_c^* = \text{esfuerzo cortante crítico adimensional}; \tau^* = \text{esfuerzo cortante adimensional}; C^* = \text{coeficiente adimensional de Chézy}; S = \text{pendiente}; \phi = \text{ángulo de fricción interna de las partículas}$
Parker et al. (1982)	$g_{BT} = 1400 \frac{W^* \sqrt{g(dS)^3}}{2.65} \text{ donde}$ $\begin{cases} W^* = 0.0025 \exp \{ 4.2(\phi_{50} - 1) - 9.28(\phi_{50} - 1)^2 \} & \text{si } 0.95 < \phi_{50} < 1.65 \\ W^* = 11.2 \left(1 - \frac{0.822}{\phi_{50}} \right)^{4.5} & \text{si } \phi_{50} > 1.65 \end{cases}$	$g_{BT} = \text{Transporte unitario total de fondo en peso (kg/ms)}$ $d = \text{calado}; S = \text{pendiente}$ $\phi_{50} = \frac{\tau_{50}^*}{0.0875} \quad \text{con} \quad \tau_{50}^* = \frac{0.606RS}{D_{50sub}}$ $R = \text{radio hidráulico}; D_{50sub} = \text{tamaño medio del sedimento subsuperficial}$ $\text{Aplicable si } \phi_{50} > 0.95, \text{ y } D_{50sub} > 2 \text{ mm.}$

4.5. Aplicación a subcuencas. Resultados

Se ha aplicado parte de la metodología en tres subcuencas de la Rambla del Albuñón, situada en la Región de Murcia (España). La Rambla del Albuñón 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 (Figura 6).

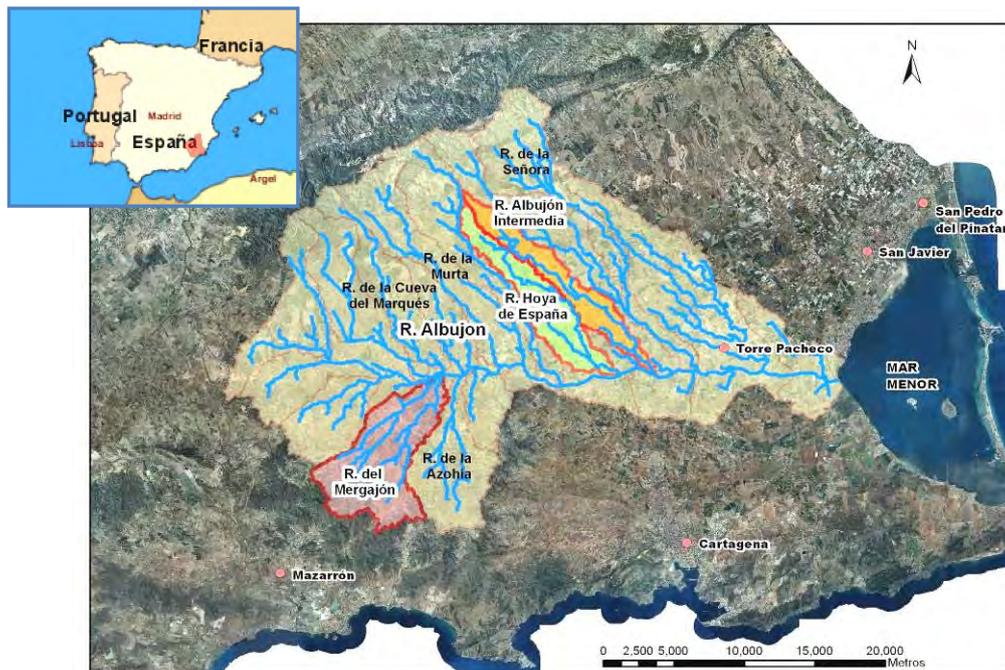


Figura 6. Situación de la Ramblas del Albuñón, del Mergajón, Hoya de España y Albuñón Intermedia.

Geomorfológicamente la cuenca del Albuñón 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 Albuñón encontramos en la zona media-baja un predominio casi exclusivo de glaciares 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 Albuñón está compuesta por 17 subcuencas de entre 28 y 55 km², de las cuales se han seleccionado tres para este primer estudio: La Rambla del Mergajón dada la semejanza que presenta con el Barranco de las Angustias (cuenca para la que fue definida originalmente parte de 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 Albuñón Intermedia por sus diferencias con las anteriores y como representantes de cuencas aluviales o de cauce medio (Figura 6).

4.5.1. Caracterización hidrológica

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 7).

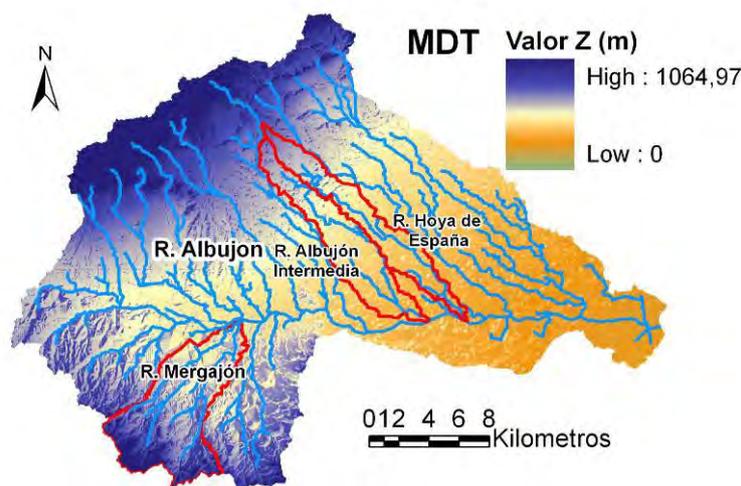


Figura 7. MDT de las subcuencas, del Mergajón, Hoya de España y Albuñón Intermedia.

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 y 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 períodos 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 5.

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 5. Características 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

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 8).

Para el cálculo de pérdidas por infiltración, en todas las simulaciones, se ha empleado el modelo empírico del Soil Conservation Service (SCS), el mapa de los números de curva de la cuenca se presenta en la (Figura 9).

Respecto al modelo de transformación lluvia-escorrentía, para todas las simulaciones, se ha utilizado el hidrograma unitario del SCS. Los valores obtenidos para cada cuenca completa se encuentran en la Tabla 6. 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.

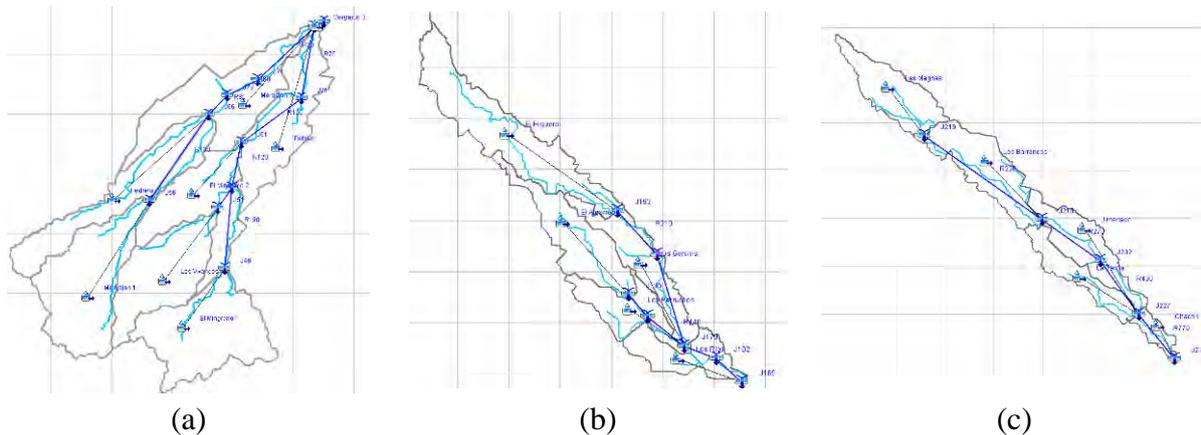


Figura 8. Modelos semidistribuidos HEC-HMS (a) Mergajón, (b) Albujión Intermedia y (c) Hoya de España.

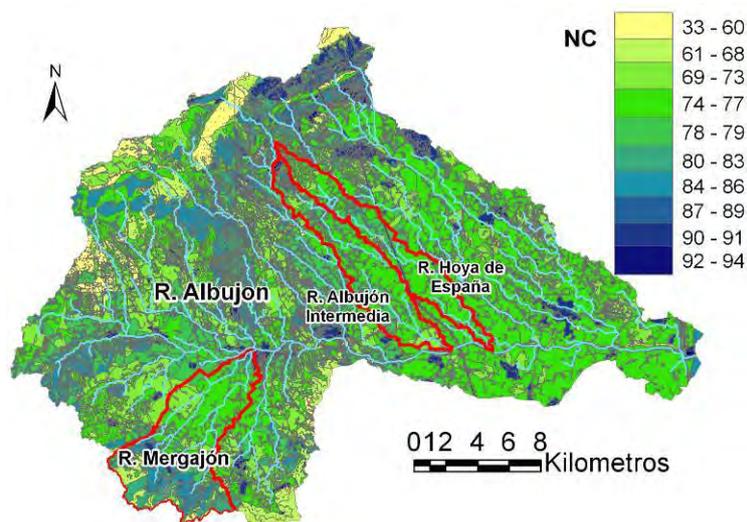


Figura 9. Mapa de números de curva.

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 6. 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 períodos 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 Albujión 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.

Este hecho nos indica la necesidad de aplicar programas distribuidos.

Tabla 6 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}
Albuji3n 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 Espa3a	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
Mergaji3n	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

Simulaci3n distribuida

El programa MIKE SHE ha sido empleado para la modelizaci3n distribuida de la cuenca del Mergaji3n. Como primera aproximaci3n, para la simulaci3n de un evento de 24 horas de precipitaci3n, s3lo se incluy3 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 precipitaci3n, la topograf3a, y el valor de almacenamiento (detention storage, DS), que se asimila al valor de P_0 . Los resultados para las simulaciones para tres periodos de retorno diferentes se muestran en la Tabla 7 y Figura 10.

Comparando los valores obtenidos de caudal m3ximo y el tiempo para alcanzarlo tanto en el modelo HEC-HMS como en MIKE SHE (Tabla 7), podemos ver que los caudales obtenidos por MIKE SHE son m3s altos que los de HMS para un per3odo de retorno bajo (T 1.4 a3os). Sin embargo, dichos valores son similares en ambos modelos para T 50 a3os. Para T 500 a3os

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 7 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

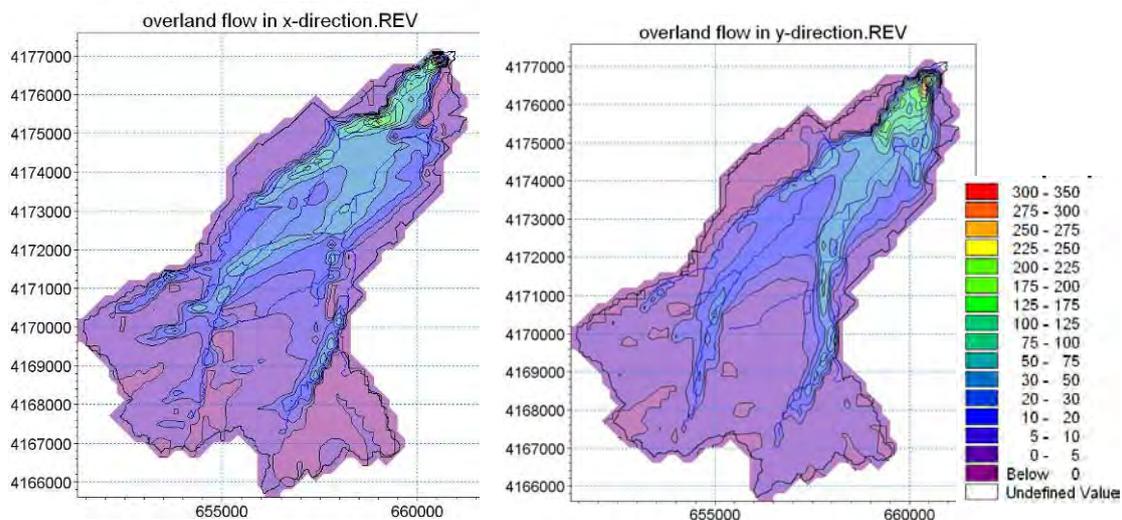


Figura 10. Caudales máximos en dirección x e y para T500 años.

4.5.2. Caracterización hidráulica

Granulometría

Se representan las curvas granulométricas de las tres ramblas que han sido estudiadas, y de la cuenca de las Angustias por su peculiaridad (Figura 11). Como se puede apreciar existe una gran diferencia en la distribución de los diámetros característicos en dichas curvas.

En el caso de las del Albuñón las curvas granulométricas no han sido tomadas de dato de campo si no de bibliografía y proyectos de la zona.

Coefficiente de resistencia

Las principales características del flujo obtenidas de las diferentes cuencas han sido:

Tabla 8 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

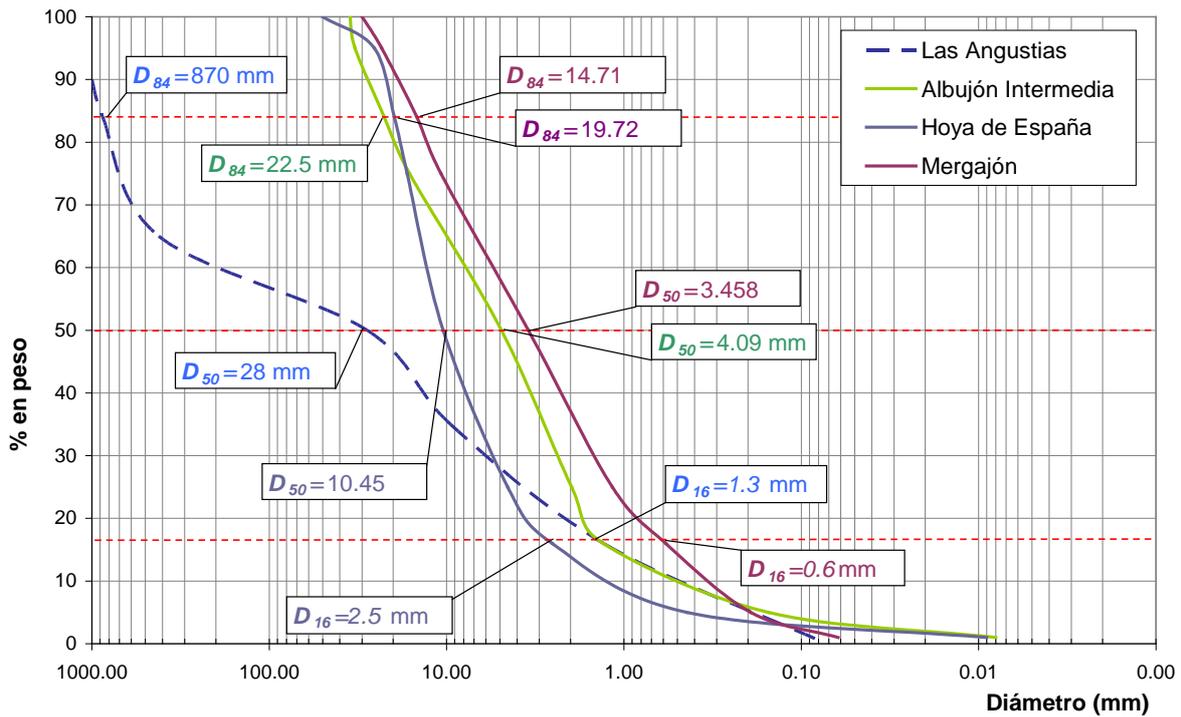


Figura 11. Curvas granulométricas de las cuencas estudiadas.

Se han aplicado las formulaciones recogidas en la Tabla 3 para cada una de las cuencas. A modo de ejemplo se representa en la Figura 12 el resultado obtenido en el Mergajón y su comparativa con Las Angustias.

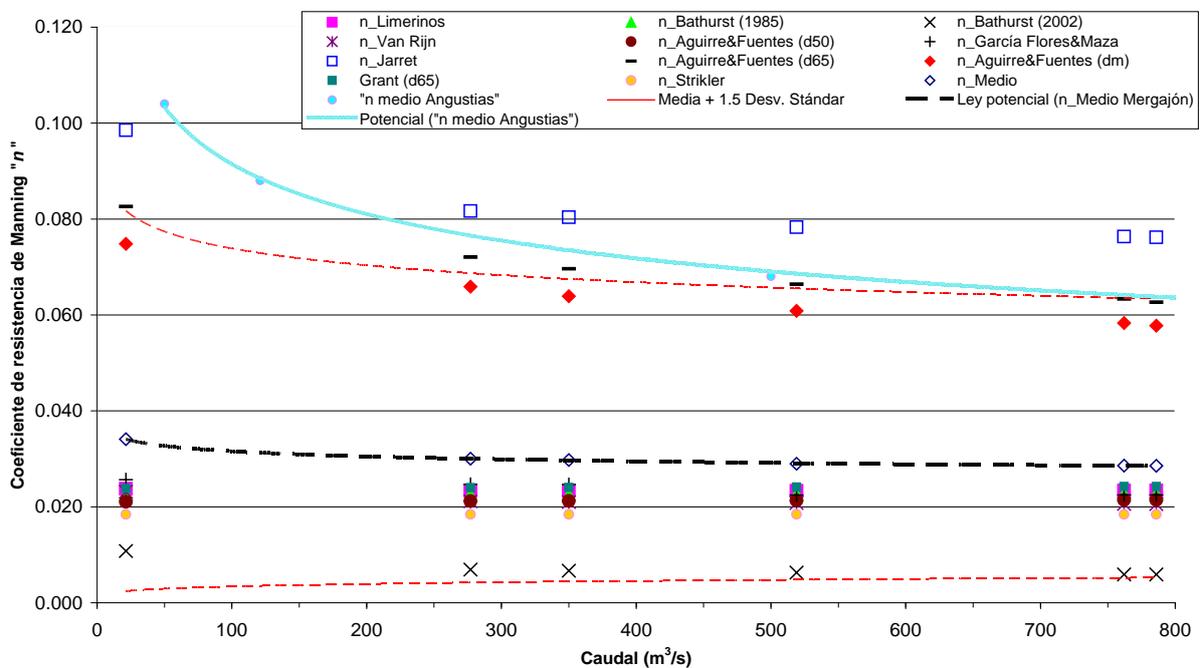


Figura 12. Coeficientes de resistencia de Manning n en función del caudal de flujo. Rambla del Mergajón y Barranco de las Angustias.

Se observa cierta tendencia en los valores a disminuir a medida que aumenta el caudal, si bien esta propensión es mucho menos pronunciada que la que presentaba el Barranco de las Angustias (n_{medio} representado por una línea azul), ya que en el caso del Mergajón nos encontramos ante un flujo no hiperconcentrado. Los valores medios de n decrecen de forma exponencial variando desde $n=0.034$ (para $Q_{1.4}=21\text{ m}^3/\text{s}$) a $n=0.029$ (para $Q_{1000}=786\text{ m}^3/\text{s}$).

Transporte de sedimentos

Como en el caso del coeficiente de resistencia, siguiendo la metodología, se han evaluado los caudales líquidos y sus correspondientes caudales sólidos para diversos períodos de retorno comprendidos entre 1.4 y 1000 años. Como ejemplo, los resultados obtenidos de la Rambla del Mergajón se presentan en la siguiente Figura.

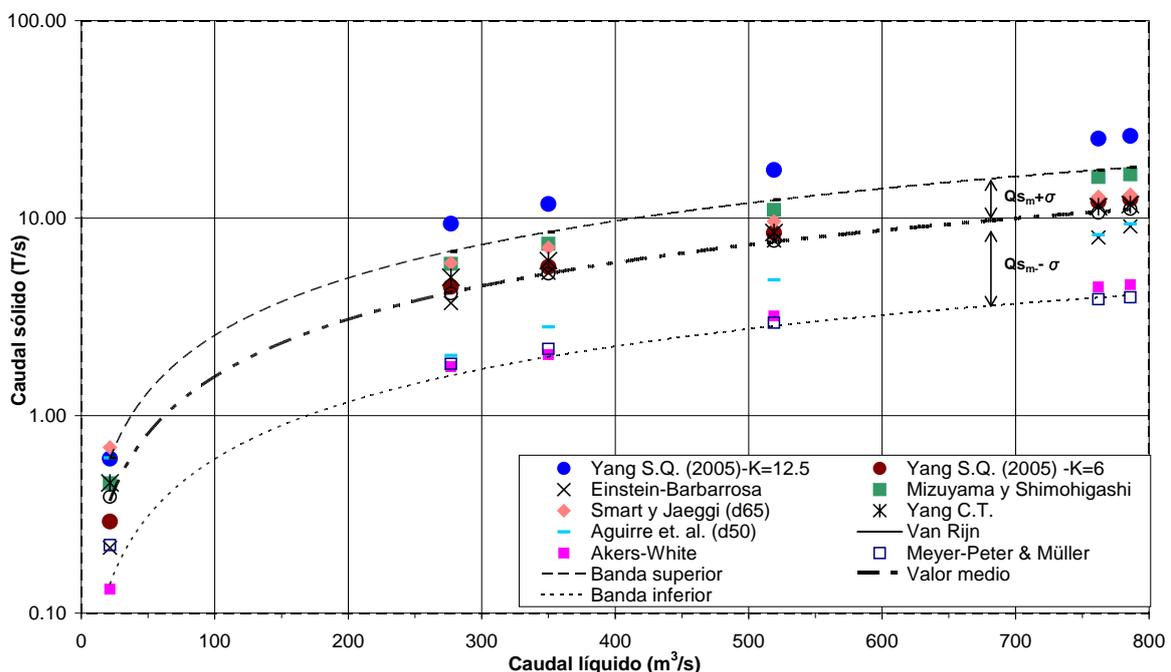


Figura 13.- Caudal sólido en función del caudal líquido (Rambla del Mergajón).

Al igual que en el caso del coeficiente de Manning, los resultados de caudal sólido muestran cierta dispersión, pero siguen una tendencia creciente exponencial.

La comparativa entre todas las cuencas se representa en la Figura 14. 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 graficado la proporción que representa del transporte medio total, el transporte de fondo y de fondo en suspensión (Figura 15 y Tabla 9), 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% 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 al de Las Angustias debido fundamentalmente a la diferente granulometría que presentan ambas cuencas.

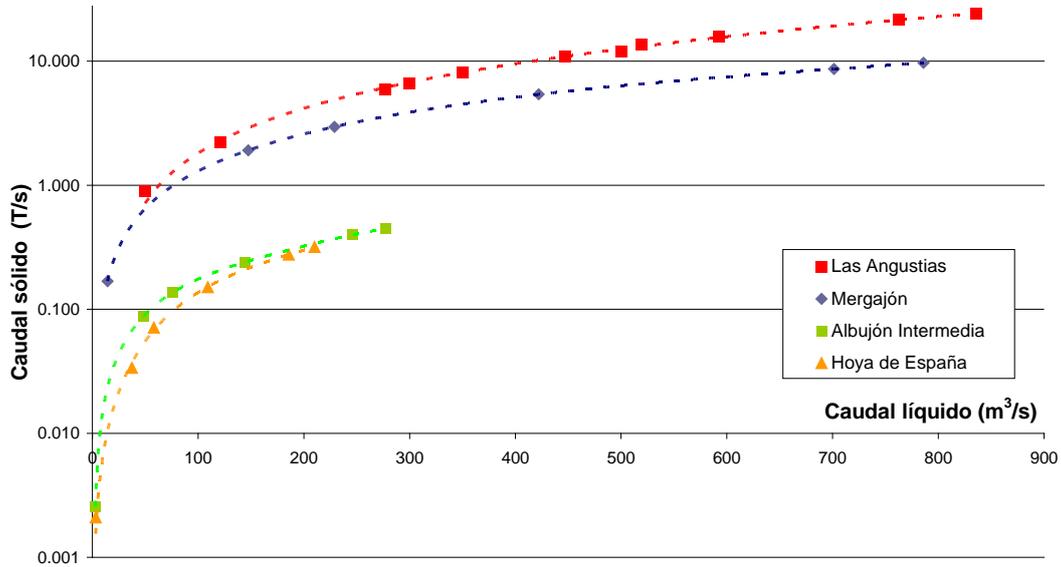


Figura 14. Caudal sólido (T/s) en función del caudal líquido (m^3/s) para todas las cuencas estudiadas.

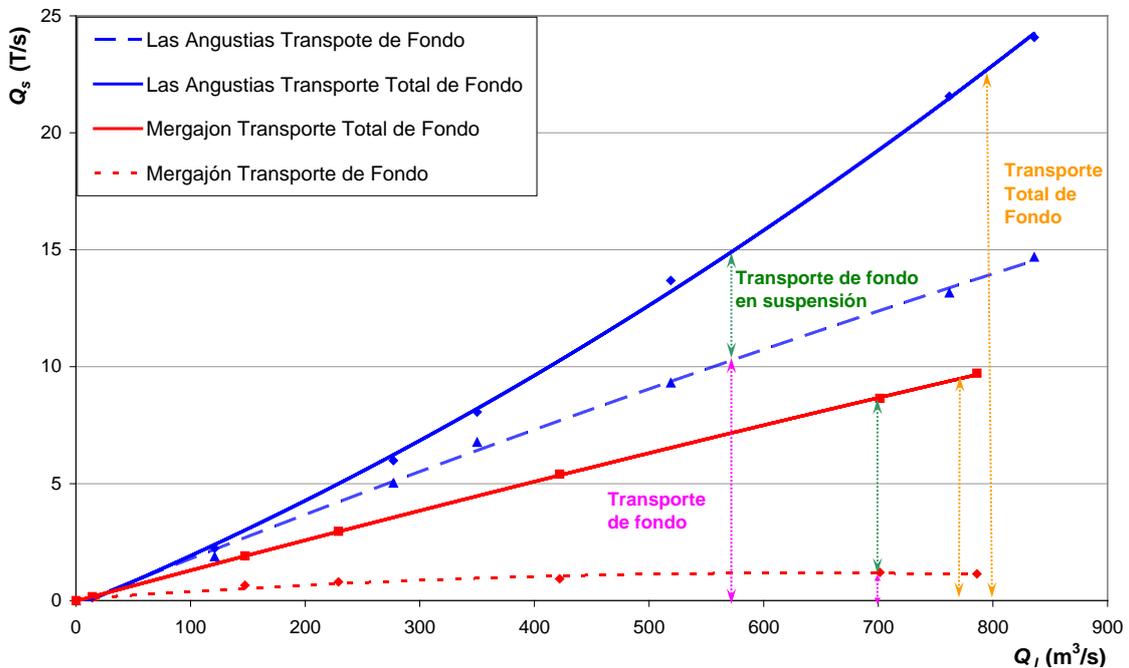


Figura 15. Comparativa del transporte de fondo entre el Barranco de las Angustias y la Rambla del Mergajón.

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 9 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 %

4.6. Conclusiones

En un primer estudio se ha seguido la metodología propuesta en tres cuencas mediterráneas, sitas en el Campo de Cartagena (Región de Murcia). 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. Sin embargo será necesario profundizar en el estudio incluyendo otros módulos de cálculo para el MIKE-SHE y calibrar con datos reales de caudales de eventos, como los recogidos en García (2009) o de bibliografía.

Respecto a ello se considera acertada 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. Es por ello que se precisan datos reales de granulometría que se obtendrán mediante la toma de muestras de fondo.

Finalmente es importante señalar que para analizar y contrastar las distintas fórmulas de transporte de sedimentos y de rugosidad, se precisarían cuencas piloto con instrumentos suficientes y adecuados. Existen actualmente varias cuencas de la región de Murcia que, con otros fines han sido instrumentalizadas, la cuenca de la Torrecilla y del Cárcavo. Se recabará

información bibliográfica sobre estas y otras cuencas mediterráneas con los que calibrar y validar las metodologías y modelos.

4.7. Bibliografía

Abbott, M. B. Bathurst, J. C. Cunge, J. A. O'Connell, P. E. y Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87, pp. 49-59.

Abbott, M. B. Bathurst, J. C. Cunge, J. A. O'Connell, P. E. y Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System-Système Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology* 87, pp. 61-77.

Ackers, P. y White, W.R. (1973). *Sediment Transport: New Approach and Analysis*. J. Hydraulics Division.

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.

Bathurst, J.C. (2000). Medición del transporte de sedimentos y curvas de descarga de sedimentos. EPIC FORCE Project. Evidence-based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and snowmelt.

Bathurst, J.C. (2002). At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. *Journal of Hydrology* 269, pp. 11-26.

Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. *Journal of Hydrology* 105. pp. 157-172.

Branson, F.A. Gifford, G.F. Renard, K.G. and Hadley. (1981). *Rangeland Hydrology*. Society for Range Management, Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa.

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., Marín, M.D. y Lima, P.R. (2009a). Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas. I Jornadas de Ingeniería del Agua, JIA, CEDEX. Madrid.
- Castillo, L., Martín Vide, J.P. y Marín, M.D. (2009b). Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas. 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.
- Chow, V. T. Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). Hidrología aplicada. Mc Graw Hill Interamericana, Bogotá.
- Colby, B.R. (1964). Practical Computations of Bedmaterial Discharge. J. Hydraul. Div. ASCE 90(HY2).
- Danish Hydraulic Institute (DHI). (2008). MIKE SHE. An integrated hydrological modeling framework-User Guide and Technical Ref. Manual.
- Einstein, H.A. y Barbarossa, N. L. (1952). River Channels Roughness, ASCE Vol.117, pp. 1121-1132.
- Einstein- Brown, C. B. 1950. Sediment transportation.' Engineering hydraulics. H. Rouse, ed., Wiley, New York, 769-857.
- Engelund, F. y Hansen, E. (1972). A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- Ferrer, M., Rodríguez, y J., Estrela, T. (1995). Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. Ingeniería del Agua. Vol. 2, No. 4, España, pp. 43-58.
- Fuentes, R. y Aguirre-Pe, J., (1991). Resistance to flow in steep rough streams. J. Hydraulic Engineering, 116(11), pp. 1374-1387.
- García, M.H. (2000). Notas de Curso: Mecánica del Transporte de Sedimentos con Aplicación a la Ingeniería Fluvial. E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, 26 al 30 de Junio de 2000.
- García, J.A. (2009). Mejora de la información hidrológica para la gestión de la cuenca semiárida de la rambla del Albuñón: datos empíricos y desarrollo de herramientas. Universidad Politécnica de Cartagena, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos. Tesis Doctoral.
- García y Martín Vide, J.P. (2002). Caracterización granulométrica del lecho móvil de un río de gravas efímero: Aplicación a un tramo de la riera de Les Arenas. Acta Geologicahispanica, Vol. 36(1-2), p. 137-147.
- García Flores, M. (1996). Resistencia al flujo en ríos de montaña. Proc. of the XVII IAHR Guayaquil, Ecuador.
- Grant, G.E. (1997). Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: A new hypothesis. Water Resources Research, Vol. 33, No. 2, pp. 349-358.

- Hec-GeoHMS v. 1.1. (2009). User's Manual. US Army Corps of Engineers.
- Hec-GeoRAS v. 4.1. (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.
- Keulegan, G. H. (1938). Laws of turbulente flow in open channels. Journal Res. at the Nat. Bureau of Standards, 21, Research Paper RP 1151, 707-741.
- Martín Vide, J.P. (2002). Ingeniería de ríos. Ediciones UPC. Barcelona.
- Martínez Marín, E. (2001). Hidráulica fluvial. Editorial Bellisco. Madrid.
- Maza Álvarez, J. A. y García Flores, M. (1996). Transporte de sedimentos. Capítulo 10 Manual de Ingeniería de Ríos. Series del Instituto de Ingeniería 584, UNAM.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948). Formulations of the Bed-load Transport. Proc. of the II IAHR, Stockholm, pp. 39-64.
- Michaud, J. Sorooshian, S. (1994). Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed. Water Resour Research. 30(3), pp. 593-605.
- Mizuyama, T. y Shimohigashi, H. (1985). Influence of fine sediment concentrations on sediment transport rates (in Japanese). Japan Civil Engr. J. 27(1) pp. 46-49.
- Nanía, L. S., (2008). Apuntes del curso Cálculo de Caudales de Avenida con HEC-HMS y GeoHMS. Universidad de Granada, Instituto Euromediterráneo y Universidad de Murcia. Murcia diciembre de 2008.
- Niño, Y. (2005). Hidráulica fluvial y transporte de sedimentos. Transporte hidráulico de sólidos. Apuntes del curso. Universidad de Chile.
- Parker, G., Klingeman, P. C. y McLean, D. C. (1982). Bedload and size distribution in paved, gravelbed streams. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division, 108, 544-571.
- Reid, I., Powell, D.M. y Laronne, J.B. (1995). The Nahal Yatir bedload database: sediment dynamics in a gravel-bed ephemeral stream. Earth Surface Processes and landforms, Vol.20, pp. 845-857.
- Richards, K.S. (1982). Rivers, Form and Process in Alluvial Channels. Methuen, London.
- Rickenmann, D. (1991). Hyperconcentrated Flow and Sediment Transport at Steep Slopes. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, November 1991, Vol. 117, pp. 1419-1439.
- Salas, J.D., (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. Ingeniería del Agua, 7(4), pp.409-429.
- Sala, M. y Farguell, J. (2002). Exportación de agua y sedimento en dos pequeñas cuencas mediterráneas bajo diferentes usos del suelo. Sistemas costero catalán. Revista C&G. No 16(1-4), pp. 97-109.
- Smart, G.M. y Jaeggi, M. (1983). Sediment Transport on Steep Slopes. V.A.W. Mitteil 64. Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zurich, Swiss, p. 191.

- Shields, A. (1936). Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenz Forschung auf die Geschiebebewegung. Mitt. der Preussische Versuchanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Germany, No. 26.
- Simons, D.B. and Sentürk F. (1992). Sediment transport technology. Water and sediment dynamics. Water Resources Publications. Colorado, USA.
- Soler, M. Regüés, D. y Gallart, F. (2003). Estudio del tamaño de las partículas en suspensión en relación con el caudal y la concentración de sedimento en una cuenca de montaña. Revista C&G. n^o 17, 3-4, pp. 67-77.
- 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. (1986). Manual sediment transport measurements in rivers, estuaries and coastal seas, Rijkswaterstaat y Aqua publications. Documento electrónico.
- Van Rijn, L.C. (1987). Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. Delft Hydraulics Communication No. 382.
- Wan, Z. Wang, Z. (1994). Hyperconcentrated Flow. I.A.H.R. Monograph Series, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Yang, S.Q. (2005). Sediment Transport Capacity, J. Hydraulic Research, IAHR 43(1), pp. 12-22.
- Yang, C.T. (1996). Sediment Transport: Theory and Practice. McGraw-Hill International Editions, NY, USA.

5. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

5.1. Contribuciones a congresos

Los documentos resumidos y extendidos de las siguientes contribuciones a congresos científicos, también han sido publicados.

Autor(es): Castillo Elsitdié, L. G.; Martín Vide, J. P.; Marín Martín, M. D.

Título: Coeficiente de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas.

Tipo de participación: Comunicación y Ponencia.

Congreso/Reunión científica: I Jornadas Sobre Ingeniería del Agua.

Lugar de celebración: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España.

Fecha: 27 – 28 Octubre 2009.

Autor(es): Castillo Elsitdié, L. G.; Marín Martín, M. D., Lima Guamán, P. R.

Título: Sistemas de captación en cauces efímeros.

Tipo de participación: Comunicación.

Congreso/Reunión científica: I Jornadas Sobre Ingeniería del Agua.

Lugar de celebración: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España.

Fecha: 27 – 28 Octubre 2009.

Autor(es): Castillo Elsitdié, L. G.; Marín Martín, M. D.

Título: Caracterización hidrológica e hidráulica en regiones semiáridas.

Tipo de participación: Comunicación.

Congreso/Reunión científica: XXIV Congreso latinoamericano de hidráulica. IAHR

Lugar de celebración: Punta del Este, Uruguay.

Fecha: 21 – 25 Noviembre 2010.

Autor(es): Castillo Elsitdié, L. G.; Marín Martín, M. D.

Título: Hydrologic properties and sediment transport in ephemeral streams.

Tipo de participación: Comunicación.

Congreso/Reunión científica: XXIV River Basin Management 2011.

Lugar de celebración: Riverside, California, Estados Unidos.

Fecha: 25 – 27 Mayo 2011.

Autor(es): Castillo Elsitdié, L. G.; Marín Martín, M. D.

Título: Hydrologic Characterization of ephemeral rivers.

Tipo de participación: Comunicación.

Congreso/Reunión científica: 34th IAHR World Congress.

Lugar de celebración: Brisbane, Australia.

Fecha: 26 Junio – 1 Julio 2011.

Autor(es): Marín Martín, M. D.; Castillo Elsitdié, L. G.

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

Tipo de participación: Comunicación.

Congreso/Reunión científica: II Jornadas Sobre Ingeniería del Agua.

Lugar de celebración: Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.

Fecha: 5 – 6 Octubre 2011.

5.2. Publicaciones

Autores: Marín, M. D.; Castillo, L. G.

Título: Modelización hidrológica e hidráulica y sistemas de captación en cauces efímeros.

Revista: II Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT.

ISSN: 1888-8356

Páginas, inicial: 16 final: 20

Fecha: Mayo 2009

Lugar de publicación: Cartagena (España)

Autores: Marín, M. D.; Castillo, L. G.

Título: Coeficientes de resistencia y transporte de sedimentos en zonas semiáridas.

Revista: III Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT.

ISSN: 1888-8356

Páginas, inicial: 102 final: 105

Fecha: Mayo 2010

Lugar de publicación: Cartagena (España)

Autores: Marín, M. D.; Castillo, L. G.

Título: Análisis hidrológico e hidráulico y de transporte de sedimentos en cauces efímeros.

Revista: IV Jornadas de Introducción a la Investigación de la UPCT.

ISSN: 1888-8356

Páginas, inicial: 30 final: 32

Fecha: Mayo 2010

Lugar de publicación: Cartagena (España)

6. OTRAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS

Como participante en el grupo Hidr@am he participado en los siguientes proyectos y seminarios:

Autor(es): Castillo Elsitdié, L. G.; Marín Martín, M. D.

Título: Sistemas de captación en cauces efímeros.

Tipo de participación: Ponencia.

Congreso/Reunión científica: II Seminario sobre las líneas de prioritarias de investigación de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España.

Lugar de celebración: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España.

Fecha: 18 Junio 2009.

Autor(es): Castillo Elsitdié, L. G.; Marín Martín, M. D.

Título: Evaluación de transporte e sedimentos en regiones semiáridas.

Tipo de participación: Ponencia.

Congreso/Reunión científica: III Seminario sobre las líneas de prioritarias de investigación de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España.

Lugar de celebración: Universidad Politécnica de Valencia, España.

Fecha: 10 Junio 2010.

Autor(es): Castillo Elsitdié, L. G.; Marín Martín, M. D.

Título: Simulación hidrológica agregada y distribuida, y evaluación del transporte de sedimentos en zonas semiáridas.

Tipo de participación: Ponencia.

Congreso/Reunión científica: IV Seminario sobre las líneas de prioritarias de investigación de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España.

Lugar de celebración: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, España.

Fecha: 09 Junio 2011.

Título del proyecto: Estudio de eficiencia de la red de conducciones de la mancomunidad de los canales del Taibilla.

Empresa/administración financiadora: Ministerio Mancomunidad de los Canales del Taibilla (Ministerio de Medio Ambiente).

Entidad u Organismo en el que lo realizó: Universidad Politécnica de Cartagena.

Duración: Desde Enero de 2009 hasta febrero 2011.

Responsable del Proyecto/Trabajo/Estudio: Luis Castillo.

7. PLANTEAMIENTO DE LA TESIS DOCTORAL

Las actividades desarrolladas durante el periodo de investigación y los resultados obtenidos han marcado pautas para la continuación de la investigación e inicio de estudios posteriores. Bajo este enfoque la tesis doctoral tendría como objetivo final:

- La determinación de los parámetros hidrológicos e hidráulicos para el diseño de sistemas específicos de captación en zonas semiáridas.

Para ello los objetivos específicos serían:

1. Lograr un mayor conocimiento de los procesos hidrológicos en las zonas semiáridas del sureste de la península a diferente escala temporal y espacial, lo que implica un estudio en el comportamiento del pronóstico de las crecidas mediante la aplicación de modelos matemáticos agregados-semidistribuidos y distribuidos a varias cuencas semiáridas. Se han seleccionado los programas HEC-HMS y MIKE-SHE como representante de cada uno de ellos. Requerirá estudiar y analizar las diferentes metodologías que existen para simular los procesos de transformación lluvia-escorrentía, de propagación de caudales, y de pérdidas, para aplicar las más adecuadas. Así como la calibración de parámetros y variables, y la validación de los modelos, para lo que se usarán datos reales tomados de medición en campo, o recogidos en otros estudios.
2. Se validará la metodología desarrollada en cuanto al cálculo del transporte de sedimentos, coeficiente de rugosidad y caudal dominante, mediante la aplicación a varias cuencas semiáridas. Para ello se emplearán datos de campo y muestras que se realizarán, o ya existentes de diferentes cuencas situadas en la Región de Murcia y en zonas mediterráneas (bibliografía).
3. Se evaluará el transporte de sedimentos con la aplicación de modelos y programas informáticos que incluyan módulos de transporte de sedimentos, tales como: HEC-RAS, IBER y MIKE 11.

ANEXO: PARTICIPACIONES EN CONGRESOS Y PUBLICACIONES