

FACTORES E ÍNDICES DE PELIGROSIDAD DE LAS AGUAS DE AVENIDA EN CRUCES DE CARRETERAS CON RAMBLAS. ESTUDIO APLICADO A LA VERTIENTE LITORAL SUR DE LA REGIÓN DE MURCIA

Carmelo Conesa García y Rafael García Lorenzo

Departamento de Geografía. Universidad de Murcia

RESUMEN

Uno de los mayores peligros naturales que afectan a las redes viarias y a su tráfico, dentro del ámbito semiárido, se debe a la acción de las aguas de avenida en los tramos de cruce con cauces efímeros. El presente trabajo tiene como objetivo principal proponer una metodología para la evaluación de la peligrosidad de cruces de carreteras con ramblas, basada en criterios hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos y de exposición. Dicha metodología ha sido aplicada a la franja costera meridional de la Región de Murcia, obteniendo un total de 54 mapas de indicadores de peligrosidad para cruces de carreteras con ramblas bajo diferentes condiciones hidrológicas.

Palabras clave: índices de peligrosidad, cruce carretera-rambla, obras de drenaje, aguas de avenida.

ABSTRACT

An important natural hazard affecting to the road networks and to the traffic in semiarid areas is caused by the flood waters in road stream crossings. The paper has as principal aim to propose a methodology for evaluating the hazard of road-ephemeral channel crossings, from exposition levels and hydrological, hydraulic and morphological criteria. This approach has

Fecha de recepción: marzo 2010.

Fecha de aceptación: octubre 2011.

been applied to the coastal southern area of the Murcia Region, obtaining 54 maps of hazard indicators for road-ephemeral channel crossings under different hydrological conditions.

Key words: Hazard indexes, road-ephemeral channel crossings, drainage works, flood waters.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de los tramos potenciales de desbordamiento y de la propia dinámica fluvial es de gran utilidad en el proceso de decisión del trazado de infraestructuras lineales (carreteras, vías de ferrocarril, conducciones, canales, etc.) y en el diseño de sus sistemas de drenaje transversal. Así lo indican Pedernal y Barahona (2004) en su artículo ‘Pasos sobre grandes cauces y llanuras de inundación’, donde se describen las directrices de cálculo que marca la Instrucción 5.2 I.C. «Drenaje Superficial», y los factores que influyen en el diseño y efectos derivados del mismo, aludiendo al caso particular del cruce de la autovía A-49, entre Sevilla y la frontera portuguesa, con el río Odiel. En el diseño de las obras de drenaje transversal influyen otros factores, además de los hidráulicos. Tales factores derivan de las características de la carretera, de la morfología de los cauces, de la evaluación de los daños que puede ocasionar la concentración del flujo y otras consideraciones, fundamentalmente económicas, relativas a los costes de construcción y mantenimiento y a la estimación de la vida de la carretera. Jaén Diego y Romana García (2004) analizan la influencia de estos factores en un diseño adecuado, tratando aspectos como la pendiente de la obra, su alineación, la idoneidad de las bajantes o encauzamientos, la situación de la obra y el diseño de la embocadura y de la salida, aportando criterios y soluciones para la consideración de las características específicas de las obras. En España existen leyes específicas sobre trazado (Norma 3.I-C), los firmes aconsejables y los materiales en el pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes. Dicha Norma 3.1-IC. Trazado, de la Instrucción de Carreteras es aprobada por Orden de 27 de diciembre de 1999. En ella se define la redacción de estudios de carreteras en materia de trazado, que han de proporcionar unas características adecuadas de funcionalidad, seguridad y comodidad de la circulación compatibles con consideraciones económicas y ambientales. La Norma es de aplicación a todos los proyectos de carreteras de nuevo trazado, con las peculiaridades derivadas de su función y tipo, que se exponen en los sucesivos capítulos y apartados de la misma.

También han sido redactadas leyes sobre el drenaje de carreteras. En concreto, por Orden de 21 de junio de 1965 se aprobó la Instrucción de carreteras 5.1-IC «Drenaje». Más recientemente, el 14 de mayo de 1990, a la vista de los avances técnicos habidos en este campo de la técnica vial durante el tiempo transcurrido, la Dirección General de Carreteras procedió a la revisión del texto de dicha Instrucción, en lo relativo al drenaje superficial de las carreteras, con la denominación de Instrucción de carreteras 5.2-IC «Drenaje superficial». El objeto de la presente Instrucción es facilitar normas y recomendaciones para proyectar, construir y conservar adecuadamente los elementos del drenaje superficial de una carretera.

Sobre la base de observaciones directas de campo y, cuando ha sido posible, tras la consulta de proyectos de obras de drenaje, independientemente del grado de cumplimiento

de las leyes mencionadas, el presente trabajo plantea una propuesta metodológica para la confección de índices de peligrosidad de las aguas de avenida en cruces de carreteras con ramblas, basada en criterios hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos y de exposición. Dicha propuesta, aplicable a cursos efímeros en general, ha sido ensayada en la vertiente litoral sur de la Región de Murcia, donde este tipo de peligros está claramente vinculado a la dinámica torrencial de sus sistemas fluviales y a la presencia de una densa red de carreteras. El fin último en cada caso de aplicación es el de ofrecer un instrumento útil para las administraciones e instituciones implicadas en la gestión del medio ambiente y la planificación territorial. Este tipo de estudios resultan preceptivos y necesarios en la toma de decisiones sobre el uso del territorio, sobre todo en áreas, como ésta, donde el carácter torrencial y la imprevisibilidad de la corriente que circula por ramblas y barrancos se convierten en amenazas constantes, por causa del vertiginoso ritmo de ocupación humana experimentado en las últimas décadas. El creciente desarrollo de las infraestructuras viarias en la Región de Murcia no siempre va acompañado de trazados adecuados y diseños de obras de drenaje acordes con la dinámica fluvial de la zona. En la zona costera existen numerosos ejemplos de cruces de carreteras críticos carentes de las condiciones de desagüe mínimas necesarias o altamente expuestos a las avenidas.

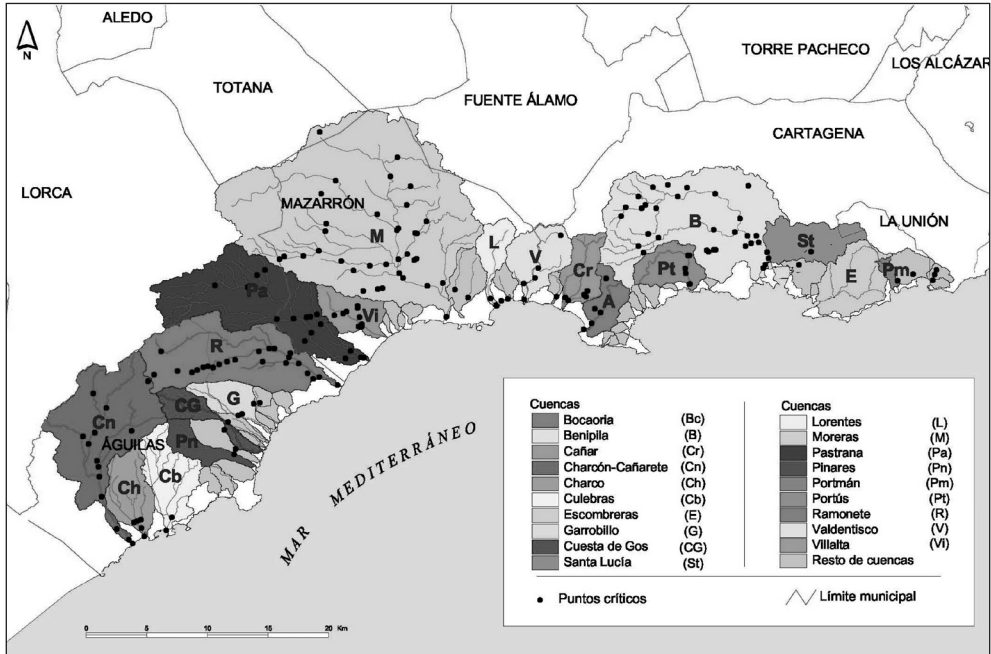
II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se halla constituida por el conjunto de cuencas vertientes al litoral meridional de la Región de Murcia. Toda su superficie queda incluida en las hojas 953, 954, 955, 975, 977, 997 y 997B del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000 editado por el Instituto Geográfico Nacional. La franja costera que engloba estas cuencas tiene 190 km de litoral, comprendidos entre las inmediaciones de Cala Reona y Cabo de Palos, y vierte sus aguas directamente al Mar Mediterráneo.

La franja costera meridional de la Región se enmarca dentro de las Cordilleras Béticas y más concretamente en el sector suroccidental de la Zona Bética en sentido estricto. Dentro de este ámbito, las sierras litorales (Almagrera, Almenara, Algarrobo, Cartagena, etc.) forman un gran cordón montañoso generalmente próximo a la línea de costa, al pie del cual se desarrollan las actuales depresiones litorales. El cingulo montañoso pertenece a la Zona Bética interna, en concreto a los complejos Nevado-Filábride y Alpujárride, caracterizados por la presencia de materiales del Precámbrico al Triásico, mientras que las depresiones litorales han sido labradas sobre materiales de relleno neógeno-cuaternario.

La escorrentía superficial vertiente al litoral sur de la Región de Murcia se organiza en redes de drenaje independientes, con salida directa al mar, estructura dendrítica predominante, fuertes pendientes y carácter torrencial. Estas redes forman parte de un conjunto de 52 cuencas con tamaños comprendidos entre 0,51 y 246,5 km² (figura 1). Casi la mitad de ellas tienen una superficie muy reducida, inferior a 10 km², pudiendo ser ésta abarcada en su totalidad por un único suceso de tormenta. Otras 11 cuencas cuentan con áreas también pequeñas, de menos de 30 km², completamente abordables por precipitaciones de mesoescala, y sólo cinco cuencas igualan o superan los 70 km²: las drenadas por las ramblas de Benipila, Cañarete, Moreras, Pastrana y Ramonete. Las más extensas y peligrosas por la magnitud de sus caudales de avenida son las cuencas de las Moreras y de Benipila. La primera (246,5

Figura 1
IDENTIFICACIÓN Y SITUACIÓN DE LAS CUENCAS VERTIENTES ESTUDIADAS CON INDICACIÓN DE CRUCES PELIGROSOS DE CARRETERAS CON RAMBLAS



km²) puede incrementar sus caudales punta con la incorporación de los procedentes del río-rambla del Guadalentín, cuando éstos constituyen un grave peligro aguas abajo en su cauce natural. Por su parte, la cuenca de la rambla de Benipila ha aumentado su superficie vertiente a 147 km² tras la reciente conexión, mediante canal y tubería, de la rambla de Miranda.

Las cuencas costeras meridionales de la Región de Murcia ocupan una extensión de 921,9 km², aproximadamente el 8,2% de la superficie regional. De ellas, 19 cuencas (843 km²) pueden considerarse involucradas en procesos de riesgos que tienen su origen en sucesos fluvio-torrenciales.

III. FACTORES DE PELIGROSIDAD

3.1. Factores generales indicadores de peligrosidad

Una primera valoración general de la peligrosidad-vulnerabilidad de los cruces de carreteras con ramblas requiere conocer: a) el nivel de exposición de las infraestructuras viarias y su uso; b) el grado de ineficiencia de las obras de drenaje en ellas instaladas (capacidad de desagüe de las estructuras menos los caudales punta de diferente tiempo de retorno o caudales morfológicos); c) el tipo de cruces de carreteras con ramblas; y d) el peligro de obstrucción de las estructuras de drenaje.

a) Los niveles de exposición en las carreteras suelen definirse básicamente en función de la intensidad media diaria de tráfico (IMD). Este parámetro se adopta a menudo como indicador de referencia para el diseño del drenaje transversal y de protección de todo tipo de infraestructuras, incluidas las carreteras. De este modo, se propone con cierta frecuencia dimensionar las obras de drenaje para desaguar caudales de 500 años de tiempo de retorno en las infraestructuras estratégicas de alta vulnerabilidad, tales como carreteras de IMD superior a 2.000 vehículos/día; y de 100 años en las infraestructuras de vulnerabilidad media con IMD mayor de 500 vehículos/día. Un segundo factor intrínseco de exposición de las carreteras es su propia categoría. Ésta representa la importancia inicialmente asignada en el contexto de la red de carreteras en función de las poblaciones conectadas y el volumen de tráfico comercial. Además, cada categoría de carretera lleva implícitas unas exigencias y costes de mantenimiento que incorporan en mayor o menor grado vulnerabilidad a este tipo de infraestructuras.

b) Relación entre caudales pico de avenida y capacidad de desagüe de las estructuras. Índices de eficiencia (EF) e ineficiencia de las obras de drenaje (INEF). El grado de eficiencia de las obras de drenaje instaladas en los cruces de carretera con ramblas para la evacuación de las aguas de avenida resulta de comparar su capacidad de desagüe con los caudales dominantes (*bankfull*) y de inundación (*flood-prone area*) de dichos cursos. Con el fin de establecer distintos órdenes de eficiencia (ó ineficiencia) tal comparación puede realizarse también con caudales de diferente tiempo de retorno.

c) Tipos de cruces de carreteras con ramblas

1. Carretera enrasada con fondo de rambla aguas arriba y salto fuerte aguas abajo
2. Carretera enrasada con fondo de rambla aguas arriba y salto notorio aguas abajo
3. Carretera enrasada con fondo de rambla aguas arriba y salto leve aguas abajo
4. Carretera enrasada con fondo de rambla aguas arriba y abajo
5. Cruce de carretera con rambla salvado por caños y tajeas ($\emptyset \leq 1$ m)
6. Cruce de carretera con rambla salvado por alcantarillas ($1 \text{ m} \leq \emptyset \leq 3$ m)
7. Cruce de carretera con rambla salvado por pontones ($3 \text{ m} \leq \emptyset \leq 10$ m)
8. Cruce de carretera con rambla salvado por puentes ($\emptyset \geq 10$ m)

d) Peligro de obstrucción

Todas las estructuras menores de drenaje transversal de las carreteras a su paso por ramblas (alcantarillas de paso, puentes y pontones) son susceptibles de ser obstruidas a corto y medio plazo bajo condiciones áridas y semiáridas, netamente dominadas por la ocurrencia de flujos torrenciales. El peligro de obstrucción de estas estructuras, principalmente por sedimentos y restos de vegetación arrastrados por la corriente, depende de su pendiente y dimensiones, su disposición frente a la dirección del flujo de avenida, la capacidad de transporte de la corriente, las características granulométricas de los cauces y áreas inundables y los usos del suelo afectados. Considerando de forma conjunta tales variables para el caso de obras de desagüe tipo caños, alcantarillas y pontones, se proponen los siguientes niveles de peligrosidad de obstrucción:

— *Nivel de peligrosidad muy alto*: Cauces y lechos de inundación ocupados por arbustos altos, cañaverales, árboles u objetos de tamaño similar poco estables, cauces trenzados con barras aluviales especialmente activas, barras transversales o centrales próximas a las obras de drenaje, lechos de cauce con fuerte pendiente formados por cantos y bloques.

— *Nivel de peligrosidad alto*: Cauces y lechos de inundación ocupados por arbustos de porte medio, matorrales densos, gramíneas altas, carrizos, juncos u objetos de tamaño parecido y cierta rigidez, cauces de sinuosidad baja o media, con pendiente media alta, márgenes erosionables, lecho de topografía irregular y depósitos aluviales activos de textura gruesa y media.

— *Nivel de peligrosidad medio*: Cauces y lechos de inundación ocupados por matorrales y gramíneas, arbustos aislados, parcialmente desnudos de vegetación. Pendiente media y baja. Fuentes de sedimentos próximas (terrazas aluviales y márgenes poco cohesivos sometidos a procesos de erosión basal, reactivación de la erosión del lecho por causa de nuevos ajustes, inducidos o no por el hombre, desmoronamiento de muros de protección,...). Lechos con textura variable, incluidos los sedimentos finos que, en estado seco, pueden actuar como elemento aglutinante y fijador del resto de materiales arrastrados por la corriente.

— *Nivel de peligrosidad bajo*: Cauces y lechos activos de inundación de escasa pendiente y gran estabilidad. Cauces labrados en sustrato rocoso resistente a la erosión mecánica. No es previsible el arrastre de objetos en tamaño y cantidad suficiente como para obstruir el desagüe.

3.2. Factores hidrológicos e hidráulicos indicadores de peligrosidad

La efectividad de las obras de drenaje depende básicamente de la combinación de dos factores: i) el tiempo de retorno de los caudales que pueden evacuar en relación con los daños potenciales atribuibles a los mismos; y ii) la susceptibilidad a su obstrucción total o parcial, por causa de las características técnicas de diseño y construcción, y/o por la actividad geomorfológica del sistema fluvial. El empleo de caudales de tiempos de retorno considerados en la legislación hidráulica como peligrosos puede ser reemplazado por la aplicación de caudales de umbral geomorfológico. La Directiva Marco del Agua 2000/60/CE por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas da particular importancia a este tipo de criterios en cualquier tipo de actuación y estrategia desarrollada en torno a los sistemas fluviales. La elección de los umbrales de caudal impuestos por los niveles de geometría hidráulica «*bankfull*» y área «*flood prone*» es una excelente opción en cauces efímeros como los del presente estudio. En este tipo de sistemas el grado de incertidumbre obtenido a partir de parámetros de geometría hidráulica directamente medibles en el campo resulta menor que el derivado de la predicción de caudales basada en distribuciones probabilísticas de precipitaciones máximas diarias.

Una obra de drenaje transversal que se muestra ineficaz por incapacidad de desagüe, puede también actuar como barrera, sobreelevando el nivel de la corriente en el cauce, y causar la inundación de sectores adyacentes a la carretera con daños materiales de diversa magnitud.

Por otra parte, en el firme de la carretera se considera peligroso todo nivel de agua que impida dejar un borde libre de más de 10 cm. En cualquiera de los elementos de drenaje

superficial la velocidad del agua ha de ser tal que no produzca daños por erosión o sedimentación. Cuando el producto de la velocidad y calado de la corriente supera el valor 0,5 el uso de la carretera es totalmente impracticable.

3.3. Factores geomorfológicos indicadores de peligrosidad

Con la construcción de infraestructuras lineales transversales a los cauces se inicia un proceso de adaptación morfológica e hidráulica que hace variar las condiciones de estabilidad del lecho de forma constante hasta lograr nuevas situaciones de equilibrio. La inestabilidad del lecho, unida a una fuerte carga de fondo, puede amenazar la propia estabilidad de las infraestructuras viarias y de sus dispositivos de drenaje, y con ello constituir un grave peligro para quienes las utilizan. Elevadas tasas de transporte de fondo en tramos de cruces bajos dotados de escaso o nulo drenaje incrementan de forma muy significativa la peligrosidad de las aguas de avenida.

3.3.1. Grado de estabilidad del lecho

La influencia de infraestructuras transversales (incluidas las carreteras) y obras de drenaje asociadas en la dinámica morfológica de los cursos de agua torrenciales está todavía poco estudiada. Existen muy escasos datos sobre variaciones de la estabilidad del lecho inducida por estas obras y sobre la propia estabilidad del lecho en los tramos inmediatos aguas arriba de tales estructuras. Este último aspecto es de gran importancia como factor de peligrosidad en los cruces de carreteras con ramblas, en particular si se trata de badenes o cruces escasamente elevados provistos de alcantarillas pequeñas, que pueden hacer de barreras frente a los flujos de avenida. El grado de estabilidad de estos tramos depende de múltiples factores relacionados con el funcionamiento de la cuenca y del sistema fluvial en que se ubican: dimensionamiento hidráulico de la estructura en función del área vertiente, condiciones de ubicación, conocimiento de las características ambientales de la cuenca y de las variables geomorfológicas del curso (pendiente de equilibrio del cauce, granulometría del lecho,...), diseño de las alcantarillas en relación con el tipo de utilidad deseada, normativa de cálculo según el dimensionado estático de la obra, etc.

Un tramo de cauce estable es siempre un tramo en equilibrio dinámico, donde el fondo apenas varía de cota aun en presencia de transporte de sedimentos. Son muchas las variables físicas que intervienen en este equilibrio, si bien pueden sintetizarse en cuatro esenciales, de acuerdo con la analogía de la Balanza de Lane (Lane, 1954): la corriente de agua (q , caudal unitario), la carga de fondo (q_s , caudal sólido unitario), la pendiente del lecho (i) y el tamaño de los sedimentos (D). Si una de estas variables cambia en un curso de agua, una o más de las tres restantes han de cambiar también para acomodarse y recobrar de nuevo el equilibrio.

En general, y sobre todo en medios áridos y semiáridos, la intercalación de pasos de carretera con escasa elevación y drenaje deficiente o nulo supone una interrupción brusca del régimen de transporte produciéndose una rápida respuesta en los tramos inmediatos a dichas estructuras, que se transmite aguas arriba y abajo a un ritmo diferente de acuerdo con la magnitud de los efectos locales. Entre los posibles tipos de respuesta, la variación textural, definida como un cambio en la abundancia relativa de los tamaños de partículas del lecho,

es considerada por Lisle *et al.* (1993) la única variable hidráulica que responde de forma consistente a las variaciones producidas en la carga de sedimentos. En cursos semiáridos torrenciales atravesados por infraestructuras lineales con drenaje insuficiente, estos cambios texturales son rápidos, en consonancia con el ritmo acelerado con que se ajusta la pendiente para recuperar el equilibrio perdido. La estabilidad del lecho en tales casos depende básicamente de la obtención de una nueva pendiente de equilibrio que mantenga estables sus propiedades texturales.

3.3.2. Magnitud de la carga de transporte

Un buen indicador de la efectividad geomorfológica de las corrientes torrenciales en el Sureste peninsular es la magnitud del transporte sólido. En el presente trabajo se analiza la carga de fondo de los tramos de rambla atravesados por carreteras, en particular badenes y pasos ligeramente elevados con drenaje escaso o nulo. En dichos tramos el transporte de fondo puede añadir un importante grado de peligrosidad geomorfológica, sobre todo si sus altas tasas se dan en cruces con elevada intensidad de tráfico. En la zona costera meridional de la Región de Murcia existe un número significativo de este tipo de cruces, de manera que el estudio de la carga de lecho reviste aquí una enorme importancia.

Normalmente la magnitud del transporte de fondo en cauces torrenciales, dentro de la vertiente mediterránea semiárida, está asociada al suministro de material disponible en las áreas fuente (sectores de ladera inestables, erosión de márgenes entallados en depósitos coluviales,...) y a la energía desarrollada por las corrientes de avenida. Estos cursos efímeros se caracterizan por la ocurrencia de avenidas de generación rápida y corta duración, originadas por lluvias muy intensas de gran variabilidad (Wheater *et al.*, 1991; Poesen y Hooke, 1997; López Bermúdez *et al.*, 1998; López Bermúdez *et al.*, 2002; Conesa García, 2005). Dado que el nivel freático suele hallarse en estos casos por debajo del lecho, dichos cauces no experimentan una recarga suficiente para mantener un caudal base; de hecho, sufren pérdidas por transmisión. Como resultado, los cursos efímeros permanecen secos excepto en períodos muy breves, durante sucesos de avenidas.

La pendiente del cauce es uno de los factores importantes que inciden en la capacidad que tiene el flujo para transportar sedimentos, por cuanto está relacionada directamente con la velocidad del agua. En los tramos de pendiente fuerte los cauces tienen pendientes superiores al 3%, y las velocidades de flujo resultan tan altas que pueden movilizar una importante cantidad de material grueso.

La carga realmente transportada a través de estos cauces depende de la energía de las corrientes de avenida, la conformación del fondo y la potencialidad de las áreas fuente de sedimentos. De estos factores depende también el ritmo de obstrucción y relleno de las alcantarillas infradimensionadas, directamente expuestas a los acarreo de material, y, por consiguiente la velocidad de ajuste de los tramos de afección. No debe olvidarse que en tales casos el proceso de ajuste morfológico al que tiende el propio curso en busca de su equilibrio dinámico genera peligrosidad, ya que aumenta la carga movilizada en los tramos expuestos.

En las cuencas de cauces torrenciales labrados sobre materiales blandos (arcillas, margas, etc.) y bajo condiciones áridas o semiáridas, como la parte central y baja de las ramblas de las Moreras y de Benipila, los suelos tienen muy escasa protección por parte de la vegetación

e inician un rápido proceso de erosión laminar, en regueros, cárcavas y barranqueras, deslizamientos y derrumbes, que sobrecargan de sedimentos las aguas de avenida.

La mayoría de las ramblas costeras meridionales de la Región de Murcia pertenecen al grupo de cursos de régimen efímero con lechos de gravas. Este tipo de cursos poseen una capa superficial de material más grueso que el inmediatamente subsuperficial (Parker y Klingeman, 1982; Andrews y Parker, 1987; Sutherland, 1987). Aunque la capa superficial más gruesa, denominada acorazamiento o pavimento (Parker, 1980), contiene prácticamente todos los tamaños de las partículas disponibles en la subsuperficie, en general presenta una mayor proporción de gruesos (Parker *et al.*, 1982; Diplas, 1987; Ryan y Troendle, 1997). Esta segregación vertical de tamaños causan serios problemas a la hora de escoger la capa más apropiada para tomarla como base en los cálculos de las tasas de transporte (Parker, 1990). En ciertos casos, ocurre el fenómeno contrario, con una capa de material relativamente fino sobre sedimentos más gruesos (Reid *et al.*, 1995; Laronne *et al.*, 1994).

Algunos autores han enfatizado las diferencias de comportamiento de este tipo de cursos respecto a los de régimen permanente (Laronne y Reid, 1993; Reid y Laronne, 1995). Reid y Laronne (1995) observaron que, bajo las mismas condiciones de corriente, los cauces efímeros tienen tasas de transporte de fondo significativamente mayores que los otros tipos de cursos. Laronne y Reid (1993), Reid *et al.* (1997), y Powell *et al.* (2001) han sugerido que el suministro creciente de sedimentos en corrientes efímeras desfavorece el acorazamiento del lecho y, en cambio, tiende a reducir el tamaño de los materiales superficiales. Este proceso de disminución de tamaños sugerido para cursos efímeros es básicamente similar al experimentado por corrientes permanentes, donde el incremento de material grueso de superficie se debe al desequilibrio local entre las entradas de sedimentos y la capacidad de la corriente para transportar una mayor carga de fondo (Dietrich *et al.*, 1989). Sin embargo, dadas las diferentes condiciones hidrológicas bajo las que operan ambos tipos de cursos, cabe esperar que los procesos responsables de la evolución textural del lecho en uno y otro caso sean también distintos. Tal dinámica textural, ampliamente descrita por Almedej (2002) para cauces de régimen efímero, no se cumple en absoluto cuando éstos se hallan afectados por obras de control hidrológico y contra la erosión, o atravesados por estructuras de drenaje insuficientes, como las del presente estudio. La capacidad de carga tractiva en estos cursos no sólo depende de las variaciones de pendiente provocadas por el relleno total o parcial de los huecos que forman los terraplenes de carreteras, sino también de los cambios texturales producidos en los tramos de influencia inmediata. Aunque el fenómeno de acorazamiento del lecho es más propio de los tramos extendidos al pie de tales estructuras, también puede desarrollarse aguas arriba de los cruces que actúan como barrera. En el primer caso, la amortiguación del flujo por la acción del resalto hidráulico, el rebajamiento local de la cota del lecho y el incremento de rugosidad superficial de éste hacen que la capacidad de transporte de fondo sea considerablemente menor de la prevista en condiciones naturales. En cambio, aguas arriba de la infraestructura viaria, los efectos pueden ser muy desiguales, dependiendo de las variaciones y ajustes producidos.

En este trabajo se analizará la respuesta de los tramos afectados por la construcción de badenes de carreteras y terraplenes ciegos o dotados de caños y alcantarillas. Para ello son examinados los parámetros adimensionales que intervienen en las ecuaciones de inicio de movimiento, entre ellos el parámetro de tensión adimensional de Shields y el número de

Reynolds granular. Asimismo en los tramos de afección, las tasas de transporte unitario de fondo, expresadas en volumen, masa y peso, han sido relacionadas con la tensión límite de corte y la pendiente del *talweg*.

3.3.3. Significado y papel de la erosión transitoria del lecho

Como erosión transitoria se entiende el descenso del fondo durante la fase ascendente de una avenida. Cuando crece el volumen de avenida y sube la superficie libre del agua, el fondo de un cauce aluvial tiende a descender; y viceversa, una bajada del nivel de agua produce un recrecimiento del fondo que rellena total o parcialmente el espacio erosionado de forma transitoria. A este fenómeno se le conoce como «respiración» del cauce, siéndole atribuida una enorme importancia en los estudios de hidráulica y geomorfología fluvial. De hecho, el área que la erosión transitoria deja libre puede facilitar el desagüe y/o provocar incisiones momentáneas capaces de poner en peligro la estabilidad de las obras instaladas en el cauce. En el caso de los pasos de carreteras con puentes, el cálculo de la erosión transitoria resulta necesario para establecer el volumen de cimentación y evitar así posibles riesgos de destrucción. Incluso una vez lograda la estabilización de la estructura, también reviste cierta utilidad al permitir comparar el potencial erosivo de la corriente aguas arriba y abajo de aquélla.

Aparentemente, la erosión transitoria es causada por un aumento de la tensión de corte sobre el fondo, acorde con un ascenso del nivel de agua (Martín Vide, 1997), pero ésta no es una explicación satisfactoria si no hay un desequilibrio entre la capacidad de arrastre [$q_s \leftrightarrow (\tau_0 - \tau_c)$] y los sedimentos aportados desde aguas arriba. Es preciso que exista un desfase relativo entre los valores punta del hidrograma y del sedimentograma; es decir, una rama ascendente del hidrograma con déficit de sólidos (subalimentación) y erosión, seguida de un descenso del mismo con superávit de sólidos (sobrealimentación) y sedimentación.

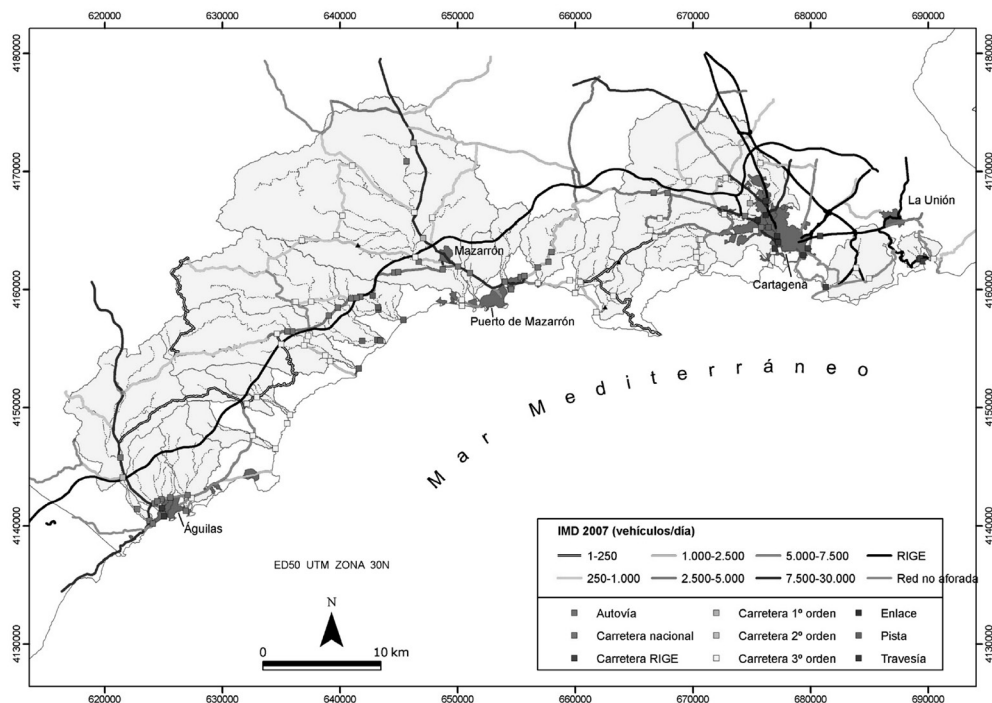
IV. ÍNDICES DE PELIGROSIDAD

4.1. Índice General de Peligrosidad de los cruces de carreteras con ramblas (IGP_{CR})

En una primera aproximación se ha optado por desarrollar un índice general de peligrosidad de carreteras, basado únicamente en la combinación de tres capas de información: cobertura de red vial con especificación de clases de carreteras, datos vectoriales de tramos con peligro de inundabilidad o circulación de aguas y datos vectoriales de tramos con distinta categoría de carretera e intensidad de tráfico (IMD) (figura 2).

Los datos vectoriales de la delimitación de cuencas se utilizan para intersectar la cobertura de carreteras. Al superponer sendas coberturas se añade otro campo a la red vial que contiene el código de cada cuenca vertiente. A continuación, se calcula por cuencas el número de tramos de carreteras según clases o categorías. El tercer paso consiste en reclasificar las carreteras de acuerdo con el tipo y nivel de peligrosidad. Los datos vectoriales de inundabilidad en tierras bajas y de desbordamiento potencial en ramblas y barrancos son superpuestos a la cobertura de red vial de cada cuenca, dando por resultado un mapa de peligrosidad, que

Figura 2
 CLASIFICACIÓN DE LAS CARRETERAS SEGÚN CATEGORÍA DE LAS MISMAS E INTENSIDAD DE TRÁFICO (IMD).
 CUENCAS COSTERAS MERIDIONALES DE LA REGIÓN DE MURCIA



incluye los tramos de carreteras con peligro de desbordamiento e inundabilidad (incluidos los tramos de intersección de carreteras enrasados con el fondo de rambla, susceptibles de ser invadidos por aguas de escorrentía del propio cauce, aun no existiendo desbordamiento). A partir de ellos, se determinan los puntos conflictivos de la red viaria que entrañan peligrosidad para cada cuenca y categoría de carretera.

Los niveles de exposición se establecen de acuerdo con dos criterios: clase de carretera e intensidad de tráfico. Como clasificación de carreteras se ha empleado la realizada por la DG de Carreteras de la CARM. Los datos de intensidad de tráfico corresponden a los aforos de IMD de vehículos y IMDp de tráfico pesado efectuados para 2007 por la misma Dirección General. En la ponderación de la categoría de carretera se otorga más peso específico a las carreteras primarias, dándose un valor de 6 a las autovías y autopistas, 5 a las nacionales, 4 a las autonómicas de 1^{er} orden, 3 a las autonómicas de 2^o orden, 2 a las carreteras locales y secundarias (autonómicas de 3^{er} orden) y 1 a los caminos vecinales, pistas y travesías. Respecto a la ponderación de la intensidad de tráfico (IMD) se establecen las siguientes categorías: 1 para IMD inferior a 250 vehículos/día, 2 para 250 < IMD < 1000, 3 para 1000 < IMD < 2500, 4 para 2500 < IMD < 5000, 5 para 5000 < IMD < 7500 y 6 para IMD superior a 7500 vehículos/día.

$$I_{EXP} = (((IMD + IMDp)/2) + C_{ctra}) / 12 \quad (1)$$

donde I_{EXP} = índice de exposición, IMD = intensidad media diaria de tráfico; $IMDp$ = intensidad media diaria de tráfico de vehículos pesados; C_{ctra} = Categoría de la carretera, y el valor 12 una constante para definir el rango de variación del coeficiente entre 0 y 1.

Finalmente, se calcula el índice general de peligrosidad de las carreteras (IGP_{CR}) ante las aguas de avenida, considerado como el producto entre el índice de exposición y el índice de ineficiencia de las obras de drenaje. Dependiendo del tipo de cruce y obra de drenaje el IGP_{CR} adopta diferentes expresiones.

a) Para pasos de carretera altos drenados por puentes y pontones:

$$IGP_{CR} = ((I_{EXP} \cdot 2) \cdot INEF_{p,*}) \quad (2a)$$

$$INEF_p = 1/EFM_p; \quad INEF_{p,*} = INEF_p^{1/INEF} \quad (2b)$$

$$EFM_p = ((QMD/Q100) \cdot 0,1) + ((QMD/Q200) \cdot 0,05) + ((QMD/Q500) \cdot 0,02) / 0,17 \quad (2c)$$

siendo $INEF_p$ = índice de ineficiencia; $INEF_{p,*}$ = índice de ineficiencia corregido mediante un factor de ponderación con función potencial; EFM_p = grado medio de eficiencia; QMD = caudal máximo de desagüe del vano; Qx = caudal máximo diario para un tiempo de retorno x . El valor 0,17 es la suma de las probabilidades de los caudales estimados para los tiempos de retorno de 100, 200 y 500 años. Según tal formulación, un cruce de carretera con rambla dotado de puente o pontón se considerará peligroso cuando $IGP_{CR} \geq 0,75$, y con peligrosidad alta cuando $IGP_{CR} \geq 1$. (Tabla 1).

Tabla 1

CATEGORÍAS Y RANGOS DEL ÍNDICE GENERAL DE PELIGROSIDAD (IGP_{CR}) Y DE VARIABLES RELACIONADAS PARA CRUCES CON PUENTES Y PONTONES

Categoría	EFM_p	$INEF_p$	Categoría	I_{EXP}	IGP_{CR}
Muy baja	<0,5	<0,5	Baja	$\leq 0,33$	<0,75
Baja	0,5-1,0	0,5-1,0	Moderada	0,33 – 0,5	0,75-1,0
Alta	1,0-1,5	1,0-1,5	Alta	0,5 – 0,67	1,0-2,0
Muy alta	>1,5	>1,5	Muy alta	$\geq 0,67$	>2,0

b) Para cruces de carreteras con ramblas drenados por caños y alcantarillas:

$$IGP_{CR} = (((I_{EXP} \cdot 2) + (V \cdot H))/2) \cdot INEF_{AL} \quad (3a)$$

$$INEF_{AL} = 1 - EF_{AL} \quad (3b)$$

Este índice puede calcularse para condiciones de caudal dominante o bankfull, en cuyo caso se utilizan los parámetros de velocidad (V) y calado (H) de la corriente bankfull, y $EF_{AL} = Q_{AL} / Q_{BK}$; ó para condiciones de área «flood-prone», en cuyo caso se emplean los parámetros de velocidad y calado de la corriente que cubre el lecho activo de inundación, siendo $EF_{AL} = Q_{AL} / Q_{FP}$.

EF_{AL} = grado de eficiencia de las alcantarillas; $INEF_{AL}$ = índice de ineficiencia de caños y alcantarillas. Los subíndices BK y PR hacen referencia a los niveles de avenida bankfull (caudal formativo del cauce) y flood-prone (lecho activo de inundación).

Tabla 2

CATEGORÍAS Y RANGOS DEL ÍNDICE GENERAL DE PELIGROSIDAD (IGP_{CR}) Y DE VARIABLES RELACIONADAS PARA CRUCES CON CAÑOS Y ALCANTARILLAS

Categoría	I_{EXP}	V·H	$INEF_{AL}$	IGP_{CR}
Baja	$\leq 0,33$	$< 0,25$	$< 0,1$	$< 0,1$
Moderada	0,33 – 0,5	0,25 – 0,5	0,1 – 0,3	0,1 – 0,3
Alta	0,5 – 0,67	0,5 – 1,0	0,3 – 0,7	0,3 – 0,7
Muy alta	$\geq 0,67$	$> 1,0$	$> 0,7$	$> 0,7$

c) Para cruces de carreteras enrasadas con fondos de ramblas:

$$IGP_{CR} = (((I_{EXP} \cdot 2) + (V \cdot H))/2) + (W/1000) \quad (4)$$

donde W es la anchura de la corriente en el tramo de carretera afectado. Además de los intervalos propuestos, puede emplearse en cruces de este tipo el calificativo de peligrosidad alta cuando $IMD > 1.000$ vehículos/día (\geq clase 3), $V \cdot H \geq 0,5$, y se da $0,4 < IGP_{CR} < 0,7$; y de peligrosidad muy alta cuando $IMD > 1.000$ vehículos/día (\geq clase 3), $V \cdot H \geq 0,5$ y el índice $IGP_{CR} \geq 0,7$.

Tabla 3

CATEGORÍAS Y RANGOS DEL ÍNDICE GENERAL DE PELIGROSIDAD (IGP_{CR}) Y DE VARIABLES RELACIONADAS PARA CRUCES TIPO BADÉN

Categoría	I_{EXP}	V·H	IGP_{CR}
Baja	$\leq 0,33$	$< 0,25$	$< 0,4$
Moderada	0,33 – 0,5	0,25 – 0,5	0,4 – 0,7
Alta	0,5 – 0,67	0,5 – 1,0	0,7 – 1,0
Muy alta	$\geq 0,67$	$> 1,0$	$> 1,0$

4.2. Índice de peligrosidad hidrológica e hidráulica (IP_H)

Este índice se ha desarrollado para dos tipos de cruces: i) pasos de carretera provistos de caños y alcantarillas, y ii) cruces de carreteras enrasados con fondos de ramblas.

a) Para cruces de carreteras con ramblas drenados por caños y alcantarillas:

$$IP_H = (INEF_{AL} \cdot (V \cdot H)) + qr \quad (5a)$$

siendo qr el caudal unitario que desborda y circula sobre la carretera. Como el grado de eficiencia (o ineficiencia) varía según el caudal circulante, se han considerado las dos situaciones comúnmente adoptadas en la elaboración del resto de índices de peligrosidad: caudal *bankfull* (Q_{BK}) y caudal *flood-prone* (Q_{FP}). De este modo, el IP_H ha sido estimado según las dos expresiones siguientes:

$$IP_{H(bk)} = (INEF_{AL(bk)} \cdot (V \cdot H_{(bk)})) + qr_{(bk)} \quad (5b)$$

$$IP_{H(fp)} = (INEF_{AL(fp)} \cdot (V \cdot H_{(fp)})) + qr_{(fp)} \quad (5c)$$

Tabla 4

RANGOS DEL ÍNDICE DE PELIGROSIDAD HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA (IP_H) Y DE VARIABLES RELACIONADAS PARA CRUCES CON ALCANTARILLAS (*) Y BADENES (**)

Categoría	V·H	INEF _{AL}	IP _H (*)	IP _H (**)
Baja	< 0,25	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Moderada	0,25 – 0,5	0,1 – 0,3	0,1 – 0,5	0,1 – 0,5
Alta	0,5 – 1,0	0,3 – 0,7	0,5 – 1,0	0,5 – 1,0
Muy alta	> 1,0	> 0,7	> 1,0	> 1,0

b) Para cruces de carreteras enrasadas con fondos de ramblas:

$$IP_H = (V \cdot H) + (W/1000) \quad (6)$$

donde W es la anchura de la corriente en el tramo de carretera afectado. Al igual que en el caso anterior, IP_H ha sido calculado para las situaciones de *bankfull* y área *flood-prone*. La velocidad (V) y el calado (H) de la corriente de avenida han sido incorporados en la formulación de acuerdo con el criterio de peligrosidad asociado a inundaciones que utiliza la Agència Catalana de l'Aigua (ACA, 2004). Este criterio clasifica una inundación en un punto dado como de peligro elevado, peligro moderado o sin peligro según el valor del calado, de la velocidad y el producto de ambos. (Tabla 5).

Tabla 5

CRITERIOS DE PELIGROSIDAD DE LAS INUNDACIONES ADOPTADOS POR LA AGÈNCIA CATALANA DE L'AIGUA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO Y DE SU CALADO

Peligrosidad	Criterios
Alta	$V > 1 \text{ m/s}$ ó $H > 1 \text{ m}$ ó $V \cdot H > 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Moderada	$0,4 < V < 1 \text{ m/s}$ ó $0,4 < H < 1 \text{ m}$ ó $0,1 < V \cdot H < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	$V < 0,4 \text{ m/s}$ ó $H < 0,4 \text{ m}$ ó $V \cdot H < 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$

4.3. Índice de Peligrosidad Geomorfológica (IP_{GEOM})

Este índice se ha adoptado para los tres tipos de cruces analizados: i) pasos de carretera elevados con drenaje a través de puentes y pontones, ii) pasos de carretera provistos de caños y alcantarillas, y iii) cruces de carreteras enrasados con fondos de ramblas.

a) Para pasos de carretera altos drenados por puentes y pontones:

$$IP_{\text{GEOM}} = (SGI + (Vcr^* \cdot ET^*)) / 2 \quad (7a)$$

$$SGI = 1 - ((Ac D_{84}) \cdot 5) \quad (7b)$$

$$Vcr^* = ((Vcr_{100}) \cdot 0,1 + (Vcr_{200}) \cdot 0,05) + (Vcr_{500}) \cdot 0,02) / 0,17 \quad (7c)$$

$$ET^* = ((ET_{100}) \cdot 0,1 + (ET_{200}) \cdot 0,05) + (ET_{500}) \cdot 0,02) / 0,17 \quad (7d)$$

donde SGI es la susceptibilidad granular a la incisión del lecho, que varía de 0 a 1; Ac, la tasa de acorazamiento del lecho obtenida mediante el cociente entre los tamaños D_{84} de las partículas que integran la capa superficial y subsuperficial del lecho; D_{84} es el tamaño correspondiente al 84 centilo en la curva granulométrica acumulativa de cada muestra; Vcr, la velocidad crítica de la corriente utilizada, de acuerdo con el método de Neill, para el cálculo de la erosión transitoria (ET). Vcr^* y ET^* son las medias ponderadas de sendas variables estimadas en función de las probabilidades de ocurrencia de las tasas atribuibles a los caudales de 100, 200 y 500 años de tiempo de retorno. Ambas variables, velocidad crítica y erosión transitoria se han elegido en este caso como indicadores de peligrosidad geomorfológica (tabla 6), en tanto que pueden afectar a la estabilidad de las zapatas de los pilares que sustentan los puentes.

Tabla 6
CATEGORÍAS Y RANGOS DEL ÍNDICE DE PELIGROSIDAD GEOMORFOLÓGICA (IP_{GEOM}) Y DE VARIABLES RELACIONADAS PARA CRUCES CON PUENTES Y PONTONES

Categoría	SGI	ET	$Vcr^* \cdot ET^*$	IP_{GEOM}
Baja	< 0,25	< 0,3	< 0,5	< 0,25
Moderada	0,25 – 0,50	0,3 – 0,6	0,5 – 1,0	0,25 – 0,5
Alta	0,50 – 0,75	0,6 – 1,20	1,0 – 1,5	0,50 – 0,75
Muy alta	> 0,75	> 1,20	> 1,5	> 0,75

b) Para pasos de carretera provistos de alcantarillas y para cruces de carreteras enrasadas con fondos de ramblas se ha adoptado el mismo Índice de Peligrosidad Geomorfológica (IP_{GEOM}):

$$IP_{\text{GEOM}} = ((q_{bv} \cdot 100) + IRL) / 2 \quad (8a)$$

$$IRL = 1 - (RBS) \quad (8b)$$

donde q_{bv} es la carga de fondo unitaria (por unidad de anchura del cauce) (m^2/s); IRL, el Índice de Inestabilidad Relativa del lecho; y RBS (*Relative Bed Stability*), el Índice de Estabilidad Relativa del lecho descrito por Olsen *et al.* (1997) como una *ratio* entre la tensión crítica del lecho requerida para movilizar las partículas de tamaño D_{84} (τ_{c84}) y la tensión de corte de la corriente *bankfull*. (τ_{bk}).

Adicionalmente, para el caso de los cruces con alcantarillas, se ha calculado el índice de Peligrosidad de Obstrucción (IP_{OBSTR}), como parámetro dependiente del Índice de Obstáculos (I_{OBSTA}) y del acarreo potencial de gruesos (APG) (tabla 7), según la siguiente expresión:

$$IP_{OBSTR} = (I_{OBSTA} + APG) / 2 \quad (9a)$$

$$APG = (D_{84} \cdot Ac) \cdot (q_{bv} \cdot 100) \quad (9b)$$

$$I_{OBSTA} = n \cdot 10 \quad (9c)$$

siendo Ac la tasa de acorazamiento del lecho, y n el coeficiente de rugosidad del lecho.

Tabla 7
CATEGORÍAS Y RANGOS DEL ÍNDICE DE PELIGROSIDAD GEOMORFOLÓGICA (IP_{GEOM}) Y DE VARIABLES RELACIONADAS PARA CRUCES CON ALCANTARILLAS Y BADENES

Categoría	APG	I_{OBSTA}	I_{OBSTR}	IP_{GEOM}
Baja	< 0,01	< 0,35	< 0,18	< 0,25
Moderada	0,01 – 0,1	0,35 – 0,50	0,18 – 0,3	0,25 – 0,50
Alta	0,1 – 0,5	0,50 – 0,65	0,3 – 0,67	0,50 – 1,00
Muy alta	> 0,5	> 0,65	> 0,67	> 1,00

Para los cruces enrasados con el propio lecho de rambla la aplicación de este índice debe entenderse en relación con el peligro que entraña el acarreo de sedimentos gruesos sobre la carretera durante y después de la avenida. En tal caso la obstrucción se produce en el tramo de carretera afectado y no en las obras de drenaje. Para la asignación de los valores «n» se ha tenido también en cuenta la presencia de escombros y basuras. Tanto el Índice de Peligrosidad Geomorfológica (IP_{GEOM}) como el Índice de Peligrosidad de Obstrucción (IP_{OBSTR}) han sido obtenidos para las situaciones de *bankfull* y *flood-prone area*.

V. OBTENCIÓN DE MAPAS DE PELIGROSIDAD PARA CRUCES DE CARRETERAS CON RAMBLAS

La metodología propuesta ha sido aplicada a la franja costera meridional de la Región de Murcia, obteniendo un total de 54 mapas de indicadores de peligrosidad para tramos de cruces de carreteras con ramblas bajo diferentes condiciones hidrológicas, en particular en situaciones de *bankfull* y *flood-prone area*. De ellos, 12 mapas representan los índices de peligrosidad general de las avenidas en tramos de puentes y pontones, así como las principales variables empleadas en su estimación (capacidad y grado de eficiencia hidráulica, y nivel

de ineficiencia de los ojos del puente), correspondientes a caudales con diferentes tiempos de retorno (100, 200 y 500 años). Otros 15 mapas se destinan a representar para los mismos tiempos de retorno el índice de Peligrosidad Geomorfológica (IP_{GEOM}), y las variables a partir de las que éste ha sido deducido (velocidad crítica, erosión transitoria, medias ponderadas de sendas variables estimadas en función de las probabilidades de ocurrencia de las tasas atribuibles a dichos caudales, y susceptibilidad granular a la incisión del lecho). A modo de ejemplo, la figura 3 representa los índices de ineficiencia hidráulica y de peligrosidad de los puentes y pontones obtenidos para caudales con tiempo de retorno de 100 años en las cuencas vertientes meridionales de la Región de Murcia.

La mayoría de los puentes (63%) tiene capacidad suficiente para desaguar caudales con tiempos de retorno de hasta 500 años. Atendiendo a su grado medio de eficiencia, deducido a partir de la media ponderada de las ratios Q_{TR}/QMD en función de las probabilidades de ocurrencia de avenidas con tiempos de retorno de 100, 200 y 500 años, el porcentaje de puentes con drenaje medio eficiente se estima en torno al 84%, y el de los considerados ineficientes el 16% restante. Para evaluar el grado de peligrosidad geomorfológica en este tipo de los tramos se ha calculado la tasa de erosión transitoria. A pesar de ser ésta elevada en muchos casos, la erosión neta apenas resulta apreciable y la estabilidad de las estructuras no resulta generalmente afectada.

Para representar los índices de peligrosidad general, hidrológico-hidráulica y geomorfológica en cruces dotados de caños y alcantarillas, se han confeccionado 22 mapas correspondientes a las situaciones de *bankfull* y *flood prone area*. Entre ellos merece resaltar los mapas de peligrosidad general incluidos en las figuras 4 y 5, donde los índices obtenidos se hallan más condicionados por el grado de ineficiencia de las alcantarillas que por los niveles de exposición.

En este tipo de cruces y obras de drenaje, la peligrosidad hidráulica se halla muy relacionada con la dinámica geomorfológica de los tramos de rambla inmediatos aguas arriba. Así lo demuestra el análisis de los resultados, a partir del cual se deducen las siguientes consideraciones:

— Las avenidas con caudal dominante o *bankfull* son soportadas por el diseño de las alcantarillas existentes en el 41,2% de los casos. Se trata en general de cruces de carretera situados en tramos altos de sus respectivas redes fluviales o tramos de cauce abarrancados con pendiente superior a la media. Los cruces con capacidad de alcantarillado insuficiente constituyen el 23,5 %. Los casos más graves corresponden a las alcantarillas situadas en lechos con predominio de grava y gran movilidad, acusada pendiente y alta capacidad de transporte.

— Obviamente con el aumento del nivel de las aguas de avenidas las alcantarillas pierden capacidad relativa de desagüe, siendo su utilidad cada vez menor. Para avenidas con inundación ordinaria, así definida cuando el agua de la corriente ocupa un área transversal del cauce cuya profundidad máxima equivale al doble de la profundidad *bankfull* (*flood prone area*), el porcentaje de alcantarillas con capacidad suficiente se restringe a dos casos, o sea el 11,8% del total de cruces de este tipo analizados. En una inmensa mayoría de cruces (88,2%) las alcantarillas desaguan caudales muy por debajo de los que circulan por las ramblas y llanos adyacentes, produciéndose su desbordamiento y la inundación de la carretera.

Figura 3
 ÍNDICE DE INEFICIENCIA HIDRÁULICA ($INEF_p$) E ÍNDICE GENERAL DE PELIGROSIDAD (IGP_{Gr}) DE PUENTES Y PONTONES, ESTIMADOS PARA AVENIDAS CON TIEMPO DE RETORNO DE 100 AÑOS EN RAMBLAS MERIDIONALES DE LA REGIÓN DE MURCIA

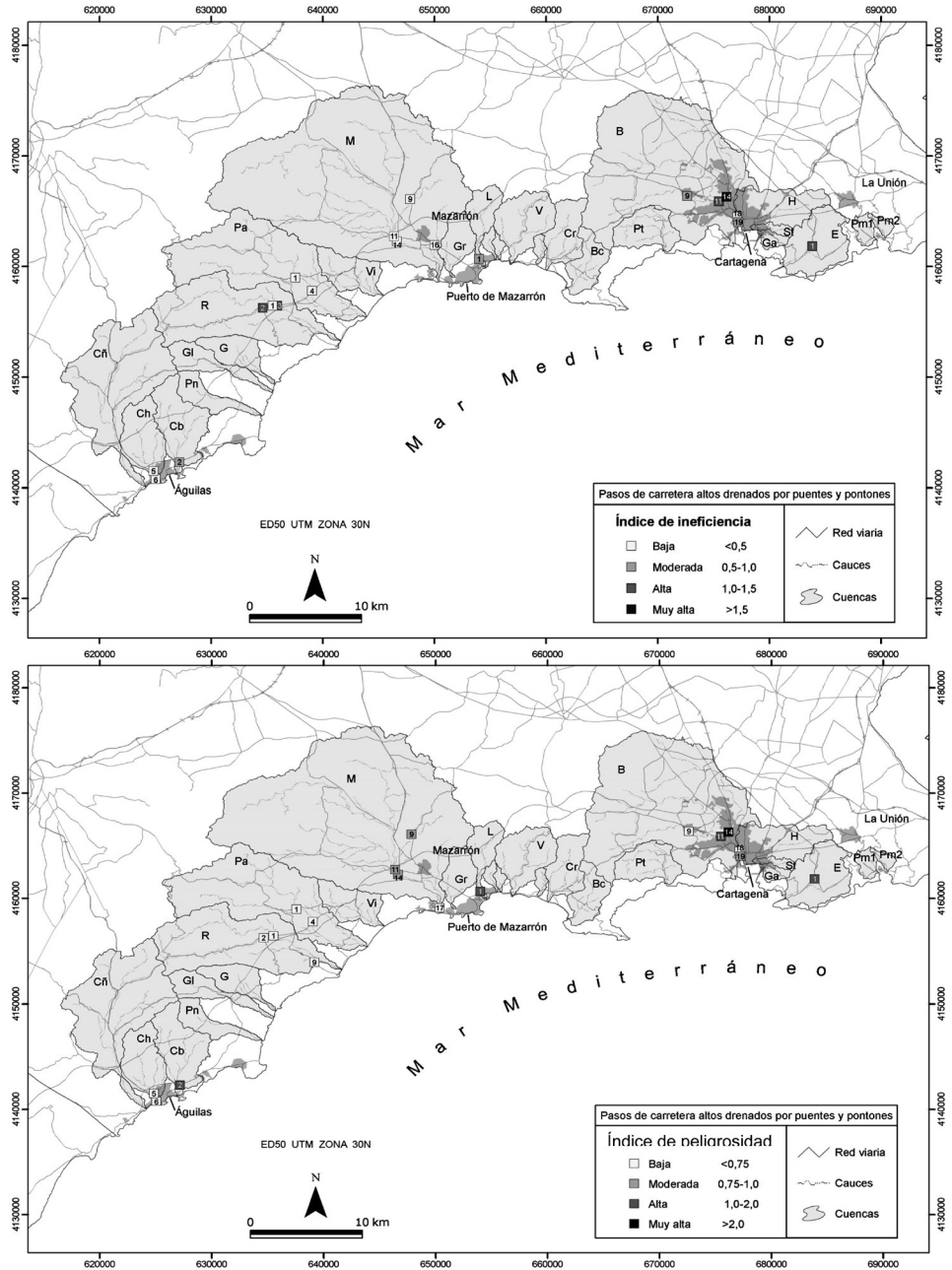
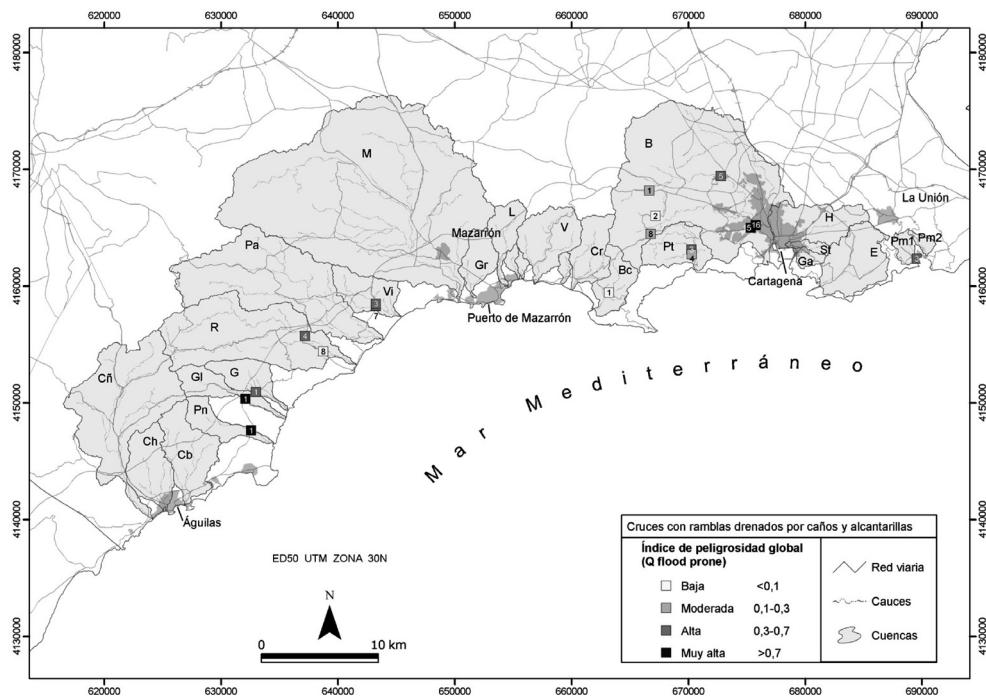


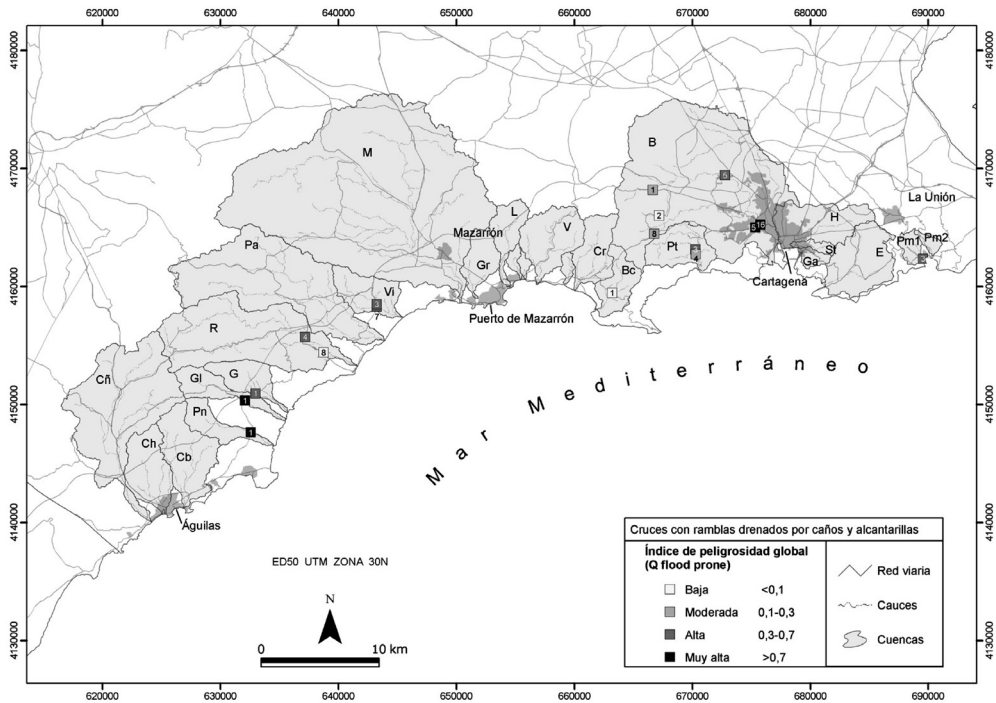
Figura 4
ÍNDICE GENERAL DE PELIGROSIDAD (IGP_{CP}) DE TRAMOS DE CARRETERAS CON ALCANTARILLAS, ESTIMADOS PARA CAUDALES BANKFULL EN RAMBLAS MERIDIONALES DE LA REGIÓN DE MURCIA



— Las situaciones más críticas provocadas por los aportes de sedimentos, la inestabilidad del lecho y la movilidad de sus formas aluviales se producen en avenidas con desbordamientos, cuyo radio hidráulico y velocidad de la corriente incrementan sensiblemente el potencial de acarreo. En estas circunstancias, el Índice de Peligrosidad Geomorfológica puede llegar a dispararse, máxime si los cruces de carreteras con alcantarillas son puntos receptores de las aguas que drenan áreas vertientes extensas.

Los cruces de carreteras enrasadas con fondos de ramblas o badenes constituyen el 38,5% del total de cruces muestreados en las ramblas costeras meridionales de la Región de Murcia. Tanto la intensidad media diaria de tráfico como la categoría de carretera en este tipo de cruces enrasados son bastante inferiores a las observadas en los cruces con puentes y pontones, pero algo superiores a las de los cruces con alcantarillas, lo cual no deja de ser un hecho bastante llamativo. De acuerdo con la valoración dada a las IMD de vehículos ligeros y pesados, el valor promedio de estas variables se sitúa en 3,5 y 2,6 respectivamente, frente a los valores promedios de IMD (3,1) e IMDp (2,1) de los cruces drenados mediante alcantarillas. Igualmente, el promedio de los valores asignados a las categorías de carretera pasa de un 2,5 en tramos sobre alcantarillas a un 3,2 en tramos con badén o enrasados. En definitiva, la intensidad media diaria de tráfico hallada como promedio en este tipo de cruces está dentro del rango 1000-2500 vehículos/día, y la de tráfico pesado en el intervalo 50-100 vehículos/día.

Figura 5
ÍNDICE GENERAL DE PELIGROSIDAD (IGP_{CR}) DE TRAMOS DE CARRETERAS CON ALCANTARILLAS, ESTIMADOS PARA CAUDALES FLOOD PRONE EN RAMBLAS MERIDIONALES DE LA REGIÓN DE MURCIA

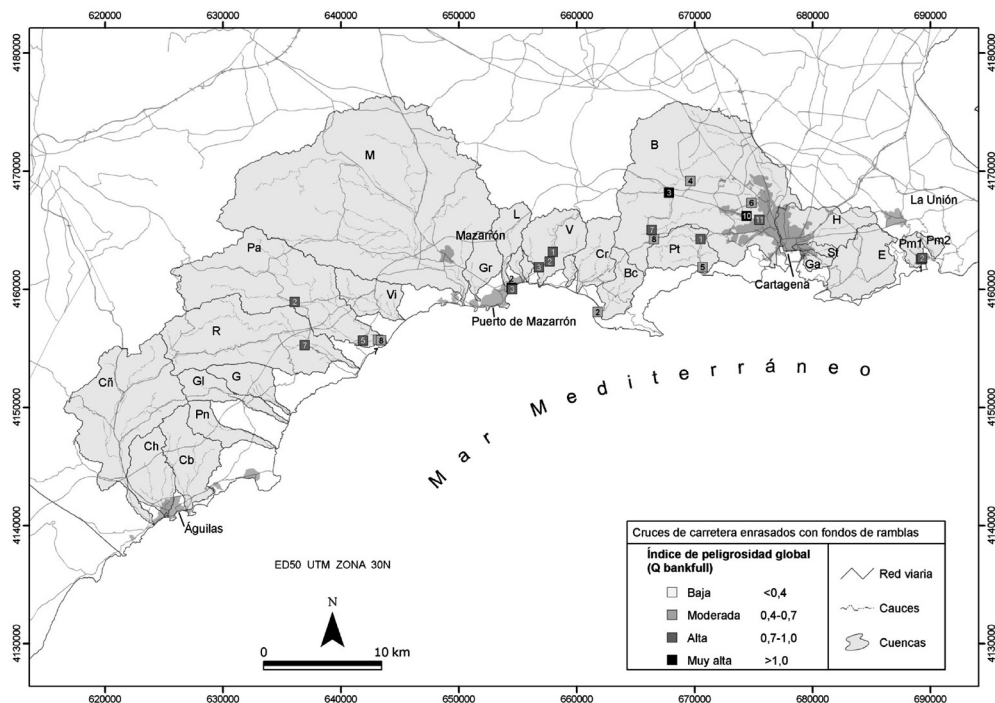


La mayoría de las carreteras (61,8%) son carreteras autonómicas de tercer orden, a las que se ha asignado el valor 2, pero llama la atención el hecho de que el porcentaje restante (38,2%) tenga categoría 5, equivalente a carreteras nacionales, o 4, asignada a carreteras autonómicas de primer orden. Dicho porcentaje es singularmente significativo, máxime cuando se trata de cruces al ras del fondo de la rambla a menudo muy peligrosos.

En avenidas de caudal dominante, los valores del Índice General de Peligrosidad estimados para estos cruces, desprovistos de todo tipo de obras de drenaje (figura 6), reflejan la combinación del grado de exposición y de los factores de peligrosidad hidrológica e hidráulica (energía, velocidad, calado y régimen hidráulico). Sólo adoptando como indicadores de peligrosidad el producto de la velocidad (V) de la corriente por su profundidad (H), $V \cdot H$, y la longitud del tramo de carretera afectado, los caudales *bankfull* pueden resultar altamente peligrosos en el 68,2% de los cruces tipo badén. Esta situación se agrava aún más cuando sobrevienen avenidas de inundación ordinaria (*flood prone area*). En tales casos, la totalidad de los cruces enrasados con lechos de rambla muestran una peligrosidad alta y muy alta, siendo los más peligrosos los situados en las cuencas del Ramonete, Pastrana, Valdelentisco y Benipila.

Respecto al Índice de Peligrosidad Geomorfológica, se consideran altamente peligrosos, por su energía de transporte e inestabilidad, los tramos localizados en zonas de pendientes

Figura 6
ÍNDICE GENERAL DE PELIGROSIDAD (IGP_{CR}) DE TRAMOS DE BADENES, ESTIMADOS PARA CAUDALES BANKFULL EN RAMBLAS MERIDIONALES DE LA REGIÓN DE MURCIA



acusadas (barrancos y tramos medios y altos de las ramblas). No obstante, en general, el índice de obstrucción de los badenes en función del acarreo potencial de gruesos (APG) y del grado de obstáculos existentes en el cauce (I_{OBSTA}) es menos elevado que en los tramos con alcantarillas.

CONCLUSIONES

En la prevención radica la base principal de toda política de lucha contra los riesgos asociados a avenidas e inundaciones. En este tipo de política ocupa un papel importante la prevención relativa a los puntos de paso de las vías de comunicación en tramos fluviales. Todas las medidas diseñadas y planificadas con anticipación para paliar, disminuir o evitar posibles daños en tales puntos deben ir precedidas de un adecuado conocimiento de la peligrosidad que entrañan, tanto natural como inducida por las infraestructuras viarias y sus obras de drenaje.

En tal sentido, sería deseable incorporar la cartografía temática de peligrosidad de los cruces de carreteras con tramos fluviales en los procesos de ordenación del territorio, especialmente a las escalas de cuenca, regional y municipal. Dicha cartografía deberá servir como herramienta de orientación en la planificación hidrológica, territorial y urbana. También

puede utilizarse como instrumento de gestión en los Planes de Emergencia de Protección Civil (sobre todo en su fase de alerta). La diversidad de situaciones de peligro hidrológico y geomorfológico creadas por la interferencia de las infraestructuras transversales en los flujos de avenida obliga a hacer un análisis detallado de la consideración que merecen en las diferentes escalas en que se organiza la planificación de usos del suelo en España. El presente trabajo aporta diversos criterios y planteamientos metodológicos para la elaboración de una cartografía de peligrosidad global y específica asociada a este tipo de situaciones.

Los índices y mapas de peligrosidad propuestos han sido ensayados en las cuencas de drenaje costeras meridionales de la Región de Murcia, donde existen numerosos puntos de cruce de carreteras con ramblas altamente peligrosos. El drenaje de los cruces con puentes es el menos problemático. Una situación bien distinta se observa en los badenes y los tramos provistos de obras pequeñas de drenaje (caños y alcantarillas), cuyos niveles de peligrosidad reflejan situaciones asociadas a altos grados de exposición, regímenes hidráulicos críticos y supercríticos, tasas acusadas de transporte y una gran inestabilidad del lecho.

REFERENCIAS

- AGENCIA CATALANA DEL AGUA (2004): *Guía técnica. Recomendaciones técnicas para el diseño de infraestructuras que interfieren con el espacio fluvial*, ACA, enero, 2004.
- ALMEDEIJ, J.H. (2002): *Bedload transport in gravel-bed streams under a wide range of shields stresses*. Doctoral Thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia. 123 p.
- ANDREWS, E. D. y PARKER, G. (1987): Formation of a coarse surface layer as the response to gravel mobility, in *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, edited by C. R. Thorne, J. C. Bathurst, and R. D. Hey, pp. 269-300, John Wiley, New York.
- CONESA GARCÍA, C. (2005): «Les 'ramblas' du Sud-est Espagnol: Systèmes hydromorphologiques en milieu méditerranéen sec». *Zeitschrift für Geomorphologie*, N° 49, 2. Gebrüder Borntraeger · Berlin · Stuttgart, pp. 205-224.
- DIETRICH, W.E.; KIRCHNER, J.W.; IKEDA, H. y ISEYA, F. (1989): Sediment supply and the development of the coarse surface layer in gravel-bedded rivers, *Nature*, 340, 215-217.
- DIPLAS, P. (1987): Bedload transport in gravel-bed streams, *J. Hydraul. Eng., Am. Soc. Civ. Eng.*, 113(3), 277-291.
- JAÉN DIEGO, P. y ROMANA GARCÍA, M. (2004): Diseño de obras de drenaje transversal. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera*, N°. 136 (número monográfico dedicado a: El agua y la carretera), pp. 32-50.
- LANE, E. W. (1954): River-Bed Scour During Floods. American Society of Civil Engineers Transaction 89, pp. 1069-1079.
- LARONNE, J.B. y REID, I. (1993): Very high bedload sediment transport in desert ephemeral rivers. *Nature* 366, 148-150.
- LARONNE, J.B., REID, I., YITSHAK, Y. y FROSTICK, L.E. (1994): The non-layering of gravel streambeds under ephemeral flood regimes, *J. Hydrol.*, 159, 353-363.
- LISLE, T.E.; ISEYA, F. y IKEDA, H. (1993): Response of a Channel With Alternate Bars to a Decrease in Supply of Mixed-Size Bed Load: A Flume Experiment. *Water Resources Research*, 29(11): 3623-3629.

- LÓPEZ BERMÚDEZ, F.; CONESA GARCÍA, C. y ALONSO SARRÍA, F. (1998): «Ramblas y barrancos mediterráneos: medio natural y respuesta humana», *Mediterrâneo, Num.12/13: Desertificação*. Instituto Mediterrânico, Universidade Nova de Lisboa, pp. 223-242.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F.; CONESA GARCÍA, C. y ALONSO SARRÍA, F. (2002): «Floods: Magnitude and Frequency in Ephemeral Channels». In L. BULL & M. KIRKBY (Eds) *Dryland Rivers*. Chap. 11, John Wiley & Sons, Ltd. Chichester., pp. 329-350.
- MARTÍN VIDE, J.P. (1997): *Ingeniería Fluvial*. Politéx 58, Àrea d'Enginyeria Civil. Ediciones UPC Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 209 p.
- OLSEN, D.S., A.C. WHITAKER, y D.F. POTTS, (1997): Assessing Stream Channel Stability Thresholds Using Flow Competence Estimates at Bankfull Stage. *Journal of the American Water Resources Association*. 33:1197-1207.
- PARKER, G. (1980): Armored versus paved gravel beds, Discussion, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 106 (HY11), 1120-1121.
- PARKER, G. (1990): Surface-based bedload transport relation for gravel rivers, *J. Hydraul. Res.*, 28(4), 417-436.
- PARKER, G. y KLINGEMAN, P.C. (1982): On why gravel bed streams are paved, *Water Resour. Res.*, 18(5), 1409-1423.
- PARKER, G.; KLINGEMAN, P.C. y MCLEAN, D.G. (1982): Bedload and size distribution in paved gravel bed streams, *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, 108(HY4), 544-569.
- PEDERNAL ÁLVAREZ, J. y BARAHONA FERNÁNDEZ, I. (2004): Localización: Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera, ISSN 0212-6389, Nº. 136, 2004 (Ejemplar dedicado a: El agua y la carretera), pp. 120-138.
- POESEN, J.W.A. y HOOKE, J.M. (1997): Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21, 2: 157-199.
- POWELL, D.M.; REID, I. y LARONNE, J.B. (2001): Evolution of bed load grain size distribution with increasing flow strength and the effect of flow duration on the caliber of bed load sediment yield in ephemeral gravel bed rivers, *Water Resour. Res.*, 37(5), 1463-1474.
- REID, I. y LARONNE, J.B. (1995): Bed load sediment transport in an ephemeral stream and a comparison with seasonal and perennial counterparts, *Water Resour. Res.*, 31(3), 773-781.
- REID, I.; BATHURST, J.C.; CARLING, P.A.; WALLING, D.E. y WEBB, B.W. (1997): Sediment erosion, transport and deposition, in *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*, edited by C. R. Thorne, R. D. Hey, and M. D. Newson, pp. 95-135, John Wiley, New York.
- RYAN, S.E. y TROENDLE, C.A. (1997): Measuring bedload in coarse-grained mountain channels: procedures, problems and recommendations. En: *Water Resources Education, Training and Practice: Opportunities for the Next Century*. AWRA Symposium, June 29-July 3, Keystone, CO, pp. 949-958.
- SUTHERLAND, A.J. (1987): Static armour layers by selective erosion, in *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, edited by C. R. Thorne, J. C. Bathurst, and R. D. Hey, pp. 243-267, John Wiley, New York.

WHEATER, H.S., BUTLER, A.P., STEWART, E. J. y HAMILTON, G. S. (1991): A multivariate spatial-temporal model of rainfall in southwest Saudi Arabia. I. Data characteristics and model formulation, *J. Hydrol.*, 125, 175-199.