



Avances en el análisis del material leñoso en ríos: incorporación, transporte e influencia en el riesgo por inundaciones

Advances in the analysis of in-stream large wood: recruitment, transport and influence on flood risk

Ruiz-Villanueva, V.^(1,2); Díez-Herrero, A.⁽²⁾; Bodoque, J.M.⁽³⁾, Bladé, E.⁽⁴⁾

(1) Dendrolab.ch, Institute of Geological Science, University of Bern, Baltzerstrasse 1, 3012, Bern, Switzerland.
Virginia.ruiz@dendrolab.ch

(2) Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España.

(3) Universidad Castilla-La Mancha, Toledo, España.

(4) Grupo Flumen, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Resumen

El transporte y depósito de restos de vegetación en los ríos (troncos o árboles completos, ramas y raíces, material leñoso en general) puede agravar las consecuencias de los eventos de avenida e inundación e incrementar su peligrosidad potencial. Este material puede afectar especialmente a infraestructuras como drenajes, puentes, etc., que intersectan ríos en cuencas montañosas forestadas. Una práctica muy extendida y aceptada hasta hace pocos años ha sido la extracción sistemática de este material leñoso de los cauces como medida de prevención. Sin embargo, se ha demostrado que esta práctica puede resultar inútil (el material es transportado y depositado tras cada inundación), e incluso no beneficiosa para el equilibrio natural del sistema fluvial a largo plazo. Por lo tanto, es necesario gestionar la presencia del material leñoso en los ríos, e integrar su estudio en los análisis de peligrosidad y riesgo por inundación. Sin embargo, en España existen escasos trabajos en los que el material leñoso haya sido objetivo fundamental de estudio y, por tanto, tampoco existe demasiada bibliografía relacionada con esta temática. En este trabajo, se presenta una exhaustiva revisión de los principales métodos empleados para evaluar la peligrosidad de las avenidas e inundaciones que incorporan material leñoso. Asimismo, se propone una metodología integral para estudiar esta carga de detritos leñosos en ríos. En primer lugar, hay que caracterizar la dinámica de incorporación de este material a los cauces. Para ello, es necesario establecer las áreas contribuyentes que pueden aportar el material a los cursos de agua y los procesos que lo incorporan. De este modo, es posible estimar el volumen de madera potencialmente disponible, para lo cual se presenta un modelo numérico que permite la simulación del transporte de carga leñosa junto con la hidrodinámica. Asimismo, se analiza la incidencia de la carga flotante en la peligrosidad y el riesgo por inundaciones. Esta propuesta metodológica se ha puesto en práctica en diversos ríos de la Sierra



de Gredos (Sistema Central), presentándose una síntesis de algunos de los resultados principales obtenidos. Como conclusión fundamental, se puede afirmar que una correcta gestión de los ríos requiere a su vez de una apropiada gestión de la vegetación de ribera y el material leñoso transportado y depositado en los mismos; y esta gestión debe encontrar el compromiso para mantener las buenas condiciones ecológicas, reduciendo en lo posible los potenciales riesgos.

Palabras clave: material leñoso; detritos leñosos; riesgo de inundación; avenida.

Abstract

The presence of large wood (logs, trees, branches and roots) in rivers may aggravate the consequences of flood events. This material may affect infrastructures such as bridges, weirs, etc., especially those intersecting forested mountain rivers. Until recently, a widely accepted practice (in Spain) was to systematically remove wood from river channels as a preventive measure. However, it is well known now that this practice may be useless as the material is transported and deposited after each flood. In addition, this practice might be not beneficial for the natural balance of the river ecosystem in a long term perspective. Therefore, the presence of this woody material in rivers must be managed and included in flood hazard and risk analysis. However, there is lack of studies in this respect in Spain, and therefore there is a lack of related bibliography in Spanish. In this paper we present a detailed review of recent methods proposed to analyse large wood in rivers, and in addition we propose a comprehensive methodological approach to study the role of large wood in rivers, with a focus on flood hazard. First, to understand the dynamics of wood recruitment, the contributing areas delivering wood to the streams have to be delineated and the recruitment processes studied. Thus, an estimate of the potential volume of deliverable wood can be obtained. To analyse wood transport we present a numerical model, which allows simulating the behaviour of individual pieces of wood together with hydrodynamics. These methods have been tested in several rivers in Gredos Mountain Range (Ávila, Spain), and we present here a synthesis of the main obtained results. As a final conclusion of these results we can affirm that a good river management requires a proper management of the riparian vegetation and in-stream large wood, and this management should find the equilibrium between the good ecological conditions and the potential risks.

Key words: large wood; woody debris; flood risk; flash flood.

1. Introducción

Aunque el papel del material leñoso en la dinámica de los ríos ya fue destacado por científicos como Lyell (1830), Shoecraft (1875) o Russell (1909), no ha sido estudiado de forma sistemática hasta las últimas décadas (Swanson y Lienkaemper, 1984; Bilby y Ward, 1989; Nakamura y Swanson, 1993; Piégay, 1993; Abbe et al., 1997; Gurnell et al., 2001; entre otros). Actualmente no hay duda de que la presencia del material leñoso tiene una influencia significativa en los ecosistemas de agua dulce, condicionando y modificando la morfología y la dinámica fluvial (Wohl, 2013). Además, su transporte y depósito durante las inundaciones puede

incrementar la peligrosidad de los eventos, por lo que se hace necesario su análisis y correcta gestión. En España no existen muchos trabajos que profundicen en esta temática (uno de ellos es el llevado a cabo por Díez et al., 2001), o que incorporen el papel de la carga leñosa al análisis de peligrosidad y al riesgo por inundaciones (Ruiz-Villanueva, 2013). Por esta razón, en este trabajo se realiza una revisión detallada de los principales aspectos que intervienen en la dinámica del material leñoso en ríos, para a continuación presentar una propuesta metodológica integral cuya finalidad es estudiar la carga de detritos leñosos en ríos y sus efectos en la peligrosidad y riesgo por inundaciones. Dicha propuesta metodológica se ha puesto en

práctica en diferentes tramos de ríos de la Sierra de Gredos (Ávila, Sistema Central).

El análisis de la carga leñosa en ríos requiere una visión holística (a nivel de cuenca) así como diferentes escalas espaciales y temporales. Así los objetivos de este trabajo son: (i) el estudio del origen de la carga leñosa, estableciendo las áreas contribuyentes que aportan el material a los cursos de agua; (ii) la estimación del volumen que puede llegar a los cauces; (iii) el análisis de su dinámica una vez ha alcanzado el río y es transportado y depositado; (iv) el estudio de la posible incidencia en la peligrosidad y riesgo por inundación.

1.1. El material leñoso y la dinámica fluvial

En el contexto de la dinámica fluvial se denomina material leñoso a restos de troncos, árboles completos, ramas o raíces depositadas en el corredor fluvial (Figura 1). Además, se diferencia entre detritos gruesos, o fragmentos de grandes dimensiones, que abarca todo el material mayor de un metro de largo y 10 cm de diámetro (Wohl et al., 2010); y la fracción más fina, con restos leñosos de menores dimensiones, como fragmentos de ramas, astillas del tronco o raíces individualizadas.

Estos restos de vegetación se pueden encontrar como piezas depositadas de forma individual (*logs*), o formando acumulaciones (*wood* o *log jams*), que pueden llegar a contener centenares de piezas.

Normalmente los *logs* que se depositan en el cauce o las orillas tienden a colocarse en posición hidrodinámicamente coherente con la dirección y sentido de la corriente; por este motivo, si el tronco conserva aún el aparato radicular, las raíces tienden a colocarse hacia aguas arriba respecto al fuste.

Las características y la frecuencia de las acumulaciones de material en el río dependen principalmente de la dinámica fluvial y la vegetación circundante. La longitud y diámetro de los troncos, en relación con la anchura y al-

tura del cauce, son los factores que determinan la tipología de las acumulaciones leñosas, además de las características propias del flujo que las transporta. También la especie arbórea influye en el movimiento de la madera y el tipo de acumulación que pueda generar. En general, las especies del bosque de ribera (como alisos, fresnos o sauces), se caracterizan por presentar abundantes ramas que dificultan su transporte y facilitan la formación de *log jams*, ya que tienden a captar otros residuos leñosos más pequeños. Por el contrario, las coníferas se comportan de modo diferente dado que, una vez caídas al cauce, tienden a formar piezas cilíndricas fácilmente transportables por la corriente (Montgomery et al., 2003).

Los procesos principales de incorporación del material leñoso a los cauces son los deslizamientos u otros procesos de ladera (desprendimientos, flujos, reptación), la erosión de los bancos de orilla, o el transporte fluvial en el propio cauce durante las inundaciones (Benda y Sias, 2003). No obstante, también pueden incorporar material leñoso otros mecanismos como fuertes rachas de viento, incendios forestales, o el propio deterioro y descomposición de la vegetación de ribera (May y Gresswell, 2003; Swanson, 2003).

Generalmente, en ríos de mayor orden y baja pendiente, los mecanismos predominantes de incorporación de madera son los procesos de erosión de bancos de orilla; mientras que en los ríos de menor orden tienen mayor importancia otros procesos gravitacionales como deslizamientos o flujos de derrubios (Comiti et al., 2008).

Los mecanismos de incorporación de madera al cauce, relacionados con procesos geomorfológicos repentinos (deslizamientos rápidos o avenidas súbitas), pueden provocar que, en un solo evento, llegue al río gran cantidad de troncos y ramas; frente a mecanismos de incorporación más lenta mediante procesos más constantes, como la erosión de las orillas o la reptación de laderas (Braudrick et al., 1997; Wohl, 2011).



Figura 1: (A) Restos de raíces y ramas en el Río Czarny Dunajec en Polonia; (B) Árbol completo en una barra lateral del Río Sense en Suiza; (C) Restos de material leñoso depositados en la Garganta Santa María en España; (D) Acumulación de varios detritos y troncos en el cauce Río Sense en Suiza.

Figure 1: (A) Roots and branches in Czarny Dunajec River in Poland; (B) Tree in a sidebar in the Sense River in Switzerland; (C) Woody material deposited in the Gorge Santa Maria in Spain; (D) Accumulation of various logs on the Sense River in Switzerland.

Una vez depositado en los cursos de agua, el material leñoso tiene una influencia significativa en la morfodinámica fluvial (Abbe y Montgomery, 2003; Gurnell y Petts, 2002; Francis et al., 2008), aunque tradicionalmente la morfología de los cauces se ha relacionado fundamentalmente con su caudal líquido, su régimen de caudales y la carga de sedimentos (Lane, 1955). Estas relaciones entre la morfología fluvial y la vegetación presente en los cauces son un tema aún en estudio y revisión. La vegetación ha condicionado la transformación morfológica de los ríos desde el Carbonífero (Schumm, 1963; Cotter, 1978; Montgomery et al., 2003).

La presencia de material leñoso en los ríos no sólo influye en su dinámica, sino también en

el ecosistema y el equilibrio de algunas especies bióticas (Gippel and White, 2000; Gregory et al., 2003; Kasprak et al., 2011). Desde el punto de vista ecológico, el material leñoso proporciona un hábitat adecuado para la flora y fauna (Carlson et al., 1990; Jackson and Sturm, 2002; Langford et al., 2012), y además regula el flujo de agua y nutrientes (Welty et al., 2002). Por todo ello, actualmente la reintroducción de fracción leñosa en los cauces es cada vez más recomendada como método de restauración fluvial (Kail et al., 2007).

Desde un punto de vista geomorfológico, las acumulaciones de material leñoso en el cauce afectan al comportamiento hidrodinámico y a la capacidad de transporte de sedimentos, condicionando por tanto la tipología y distri-

bución de las formas de fondo (Gurnell et al., 2002). Pero también la presencia de este material es reflejo de la dinámica fluvial y los procesos de la cuenca en su conjunto (Wohl, 2013). De forma general, la presencia de material leñoso en los ríos incrementa la rugosidad, facilita la acumulación de sedimento y materia orgánica, creando obstáculos en el trazado, y forma zonas de bifurcación del flujo (Keller y Swanson, 1979; Piégay y Gurnell, 1997; Buffington y Montgomery, 1999; Andreoli et al., 2007). Aunque los obstáculos formados por el material leñoso incrementan el tiempo de permanencia del sedimento en el río, la ruptura de estas acumulaciones de material puede generar también un pulso repentino de sedimento que será transportado aguas abajo (Adenlof y Wohl, 1994). El incremento local de rugosidad en el tramo con presencia de material leñoso, también facilita la acumulación de sedimento fino y materia orgánica, que proporciona nutrientes a determinados organismos, pudiendo generar hábitats favorables para algunas especies e incrementar la biodiversidad (Bilby y Likens, 1980; Sullivan et al., 1987). A escala de tramo de río, el material leñoso puede alterar la morfología creando escalones, saltos y pozas (Montgomery et al., 2003; Robinson y Beschta, 1990); y en zonas no confinadas, la presencia de acumulaciones de material puede incrementar la anchura del cauce, favoreciendo el desbordamiento de los bancos de orilla (Nakamura y Swanson, 1993; Jeffries et al., 2003), así como propiciar la formación de barras (Wyzga y Zawiejska, 2005) y desencadenar la migración lateral e iniciar la formación de morfologías anastomosadas (O'Connor et al., 2006; Montgomery y Abbe, 2006). De esta manera, podemos afirmar que los cambios en la dinámica fluvial no son debidos exclusivamente a cambios en el flujo, o en la sedimentación, sino también a cambios en la dinámica del material leñoso (Francis et al., 2008). Estos cambios se producen tanto temporalmente como en el espacio. Las variaciones temporales en la dinámica de la carga leñosa son el resultado de los diferentes procesos de incorporación. Esta dinámica temporal se describe más detalladamente en

el apartado 2.1. Los cambios espaciales vienen definidos por la morfología del cauce. De forma simplificada, se produce una disminución de depósitos de madera (tanto en volumen como tamaño de los mismos), a medida que aumenta el área de la cuenca drenante (aumenta la distancia a la zona de cabecera), la anchura del cauce (el orden del río) y decrece su gradiente, lo que genera una disminución de la capacidad de transporte (Marcus et al., 2002; Wohl y Jaeger, 2009; Rigon et al., 2012).

1.2. El material leñoso y la peligrosidad y el riesgo por inundaciones

Otro aspecto relevante del papel de los detritos leñosos en los ríos es, sin duda, su influencia en la peligrosidad y el riesgo debido a su transporte y depósito durante avenidas e inundaciones. Este fenómeno suele ser más frecuente en cuencas de montaña, donde las interacciones entre la vegetación y los procesos geomorfológicos se acentúan por la abundancia de madera disponible, la alta energía de la corriente y las elevadas tasas de transporte de sedimento (Johnson et al., 2000). Especialmente en secciones singulares (estrechamientos del cauce, puentes, azudes y vertederas, aliviaderos, vados naturales, etc.), se pueden producir obstrucciones y como consecuencia una sobrelevación del calado aguas arriba, así como incrementando los procesos de erosión o agradación, anegándose zonas que de otro modo no se verían afectadas.

Así ocurrió durante algunas de las inundaciones ocurridas recientemente en Italia (Lucía et al., 2014), Suiza (Rickenmann y Koschni, 2010; Waldner et al., 2010; Schmocker y Weitbrecht, 2013) u oeste de Austria en 2005 (Rudolf-Miklau y Hübl, 2010). Estos eventos se caracterizaron por transportar elevadas cantidades de material leñoso, ocasionando numerosos daños. En la Península Ibérica también se han generado numerosos problemas y pérdidas económicas. Así, por ejemplo, cabe destacar el corte de la carretera N-632

en Asturias debido al arrastre de abundante material leñoso, que taponó 9 de los 16 vanos del puente sobre el río Nalón en febrero de 2012; o en octubre de ese mismo año, en Aragón; y más recientemente, en junio de 2013, también en la comunidad de Aragón, varios puentes sobre el río Seco quedaron parcialmente taponados (Figura 2).

Por otro lado, la extracción parcial o total de esta fracción de material de los cauces no es siempre la medida más efectiva para mitigar estos problemas, ya que generalmente se producen nuevos transportes y depósitos durante avenidas posteriores (Lassetre y Kondolf, 2012). Sin embargo, la práctica denominada comúnmente “limpieza” de los cauces está muy extendida en España y ha sido aceptada hasta hace pocos años como la única solución a esta problemática. Tras recientes estudios que afirman que la extracción de material leñoso ocasiona desequilibrios irreparables en la dinámica fluvial (Brooks et al., 2006), se ha abierto el debate sobre esta práctica como medida de prevención (Correa, 2013; Ollero, 2013). En paralelo, con la entrada en vigor de la Directiva Europea Marco del Agua y la de gestión y evaluación de los riesgos de Inundaciones (Directivas 2000/60/EC y 40/2007), se definieron las líneas legales para favorecer y preservar las buenas condiciones ecológicas y geomorfológicas de los cursos de agua, lo que podría entrar en conflicto con la eliminación indiscriminada de material leñoso de los cauces.

Por ello, se hace necesario analizar el material leñoso como un componente más del sistema fluvial, y prestar especial atención a su transporte durante los eventos de inundaciones, incluyendo este fenómeno en la gestión general del río y en los análisis de peligrosidad y riesgo. El planteamiento debería considerar que el material leñoso en sí mismo no es el problema, sino, por ejemplo, la incapacidad de las infraestructuras a su correcta evacuación (Lassetre y Kondolf, 2012). Por tanto, una correcta gestión de la vegetación de ribera y el material leñoso depositado en los ríos, debe encontrar el compromiso más equilibrado entre atenuar e incluso eliminar los efectos negativos, sin limitar las funciones positivas de su presencia.

2. Métodos en el estudio del material leñoso en ríos

En este apartado se hace una revisión de las principales metodologías que se pueden encontrar en la bibliografía reciente en relación al estudio del material leñoso en ríos, y se presenta además la propuesta metodológica integral basada en los trabajos de Ruiz-Villanueva (2013). En primer lugar se describen los métodos para identificar las zonas contribuyentes de material y la estimación de volúmenes. A continuación se describe la propagación, hidrodinámica y transporte del material en el río. Para finalmente analizar los efectos que su transporte y depósito genera en la peligrosidad y riesgo por inundaciones.



Figura 2: (A) Río Bernesga en León, marzo de 2014 (fotografía de leónnoticias.com); (B) Puente de Josa en Teruel, agosto de 2013 (fotografía: alcaine.blogia.com); (C) Río Arga, Pamplona, junio de 2013 (lainformacion.com).

Figure 2: (A) Bernesga River in Leon, March 2014 (photo by leónnoticias.com); (B) Bridge Josa in Teruel, August 2013 (Photo: alcaine.blogia.com); (C) Rio Arga, Pamplona, June 2013 (lainformacion.com).

2.1. Origen e incorporación del material leñoso a los ríos y estimación de volumen

La cantidad y el tipo de material leñoso que puede llegar a los cauces depende de las características del bosque de ribera y la vegetación en la cuenca (ej.: densidad, edad, estado fisiológico, etc.) y de los procesos que regulan su incorporación (deslizamientos, avenidas...), además de las propias características morfodinámicas de los ríos. En ríos o arroyos de primer y segundo orden, la mayor parte del material proviene de procesos de inestabilidad de las laderas (desprendimientos, caídas de rocas, deslizamientos, etc.) y de coladas detríticas o flujos; mientras que en ríos de orden superior, el factor principal es la erosión en las orillas (Grant y Swanson, 1995; Johnson et al., 2000). Del mismo modo, en los ríos de primer y segundo orden, la cantidad de material leñoso en los cauces suele ser mayor respecto a aquéllos de orden superior, y su influencia en la morfología también (Nakamura y Swanson, 1993).

Además de esta variabilidad espacial en cuanto al origen e incorporación del material leñoso, también existe una variabilidad temporal. La mortalidad natural de los árboles genera una producción regular de material leñoso a largo plazo. La frecuencia de incorporación por este proceso varía en función de la especie, la tipología y el estado silvicultural de los bosques que se encuentran en los alrededores del río. La producción de material leñoso a medio plazo tiene origen principalmente en la erosión de las orillas. La tasa de erosión de las orillas tiene gran influencia especialmente en grandes ríos. Por último, la incorporación repentina a corto plazo relacionada con eventos extremos, como deslizamientos, flujos de derrubios o avenidas, e incendios, pueden generar grandes cantidades de material leñoso en muy poco tiempo. Es este tipo de "llegada" la que suele generar más problemas cuando esta cantidad de carga leñosa se pone en movimiento durante una inundación. A este tipo de transporte repentino se le denomina "congestionado" (del término anglosajón *congested*; Braudrick et al., 1997) y es el que más

importancia tiene desde el punto de vista de la peligrosidad.

Para conocer la dinámica de incorporación de la carga leñosa a los ríos es necesario identificar las posibles áreas contribuyentes donde actúan los procesos anteriormente descritos (deslizamientos, erosión, inundaciones, etc.). Además de la susceptibilidad a sufrir estos procesos, para que el material leñoso generado llegue al río, las áreas contribuyentes deben de estar conectadas con el cauce (McDade et al., 1990; Robison y Beschta, 1990; VanSickle y Gregory, 1990; Bragg y Kershner, 2004). La conectividad depende de parámetros como la altura del árbol, la pendiente del terreno y la distancia al cauce (Figura 3).

De este modo, la probabilidad de que una pieza de madera llegue al río aumenta con el aumento de la pendiente, la cercanía al cauce y la altura del árbol, así como de la intensidad y frecuencia de los procesos de incorporación. Se requiere además un conocimiento detallado de la tipología y distribución de la vegetación, ya que el tipo de vegetación existente (coníferas o frondosas), la especie, su estado y su densidad serán parámetros fundamentales para entender la facilidad o resistencia a ser incorporados al río por estos procesos y en la cantidad de piezas que lleguen al cauce (Hutte, 1968; Stumbles, 1968; Naka, 1982; Abernethy y Rutherford, 2001; Webb y Erskine, 2003).

Así es posible identificar las áreas contribuyentes y estimar el volumen potencial de material que puede llegar a los cauces, o reconstruir y estimar a posteriori el volumen de material generado en un evento determinado (May y Gresswell, 2003). Por ejemplo, Martin y Benda (2001) y Benda y Sias (2003) propusieron un balance de masas, que permite hacer estimaciones cuantitativas en función de los diferentes flujos de madera en un tramo de río dependiendo de las entradas desde aguas arriba, las pérdidas por descomposición y por flujos hacia aguas abajo, etc. De esta forma es posible analizar la variabilidad temporal del *reclutamiento* (derivado del término anglo-

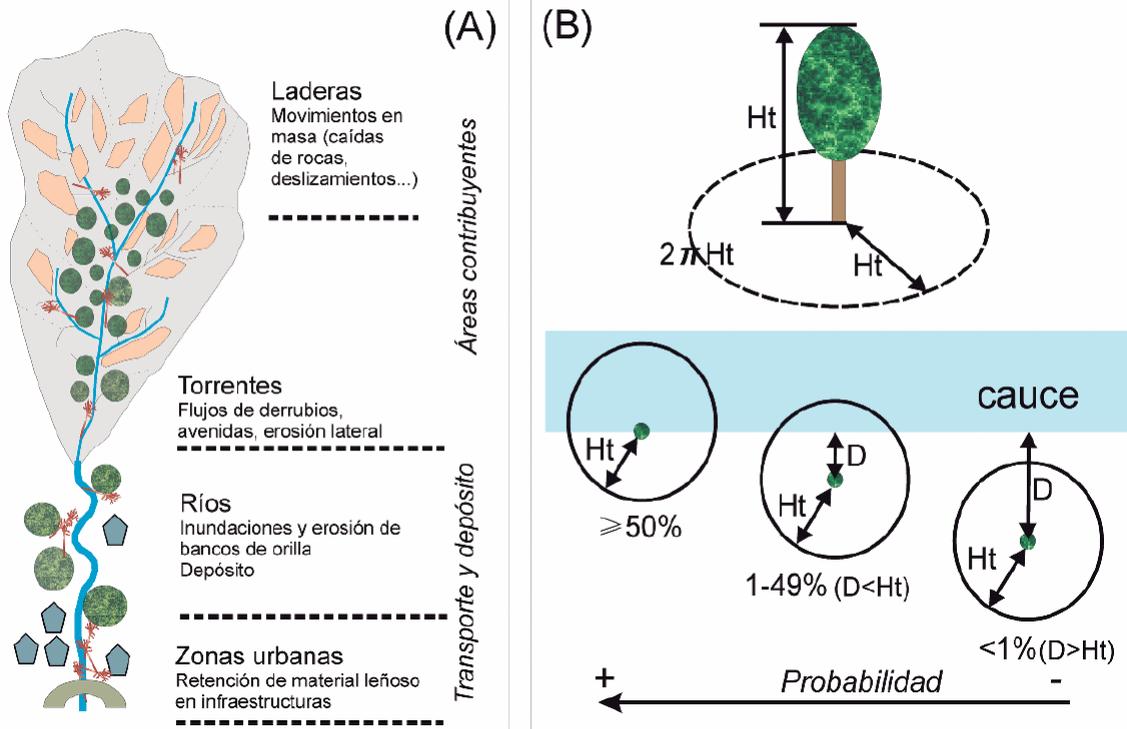


Figura 3: (A) Esquema de los procesos y las diferentes zonas de generación, transporte y depósito de material leñoso; (B) probabilidad de incorporación de detritos leñosos en el corredor fluvial.

Figure 3: (A) Scheme of the processes and the different areas of recruitment, transport and storage of woody material; (B) recruitment and entrainment probability of large wood.

sajón *recruit*) de madera en función de otros procesos (morfológicos, biológicos, etc), a escala de detalle, se pueden analizar las caídas individuales de árboles al cauce, como resultado de la erosión de las orillas y analizar los patrones espaciales de los mismos (Bragg et al., 2004). Mazzorana et al. (2009) propusieron una serie de indicadores empíricos para determinar la capacidad de los arroyos de montaña de generar material leñoso a escala de cuenca y, utilizando análisis ráster, estimar los volúmenes absolutos (Mazzorana et al., 2011a). También a escala de cuenca, Kasprak et al. (2011) desarrollaron un método basado en datos LiDAR para evaluar la incorporación potencial de madera. A escala regional y de cuenca, empleando la evaluación multicriterio, basándose en la generación de escenarios (Scholz y Tietje, 2002) y aplicando los principios de la lógica difusa (*fuzzy logic*; Mazzorana et al. 2011b). Ruiz-Villanueva et al. (2014c) definieron una serie de ecuaciones sencillas,

a la vez que generaron diferentes escenarios en función de la frecuencia e intensidad de los procesos de incorporación, en las que el volumen incorporable se calcula con fórmulas del tipo:

$$V_i = (A_i \cdot C_i \cdot D_i) \cdot F_c$$

Siendo: V_i , el volumen potencialmente incorporable; A_i , el área contribuyente de un determinado proceso i ; C_i , la cubierta forestal; y D_i , la densidad. Este volumen es reducido por un factor de corrección F_c , que equivale a la resistencia a ser reclutado y puede ser igual a 0,1, 0,5 ó 1 en función de las matrices de lógica difusa. Esta resistencia de la vegetación depende del tipo de especie y del estado silvicultural.

De esta manera, se pueden identificar aquellas zonas con mayor probabilidad de generar detritos leñosos, estimándose volúmenes de

madera potencialmente disponible para una o varias cuencas.

2.2. Hidrodinámica y transporte del material leñoso en ríos

La propagación o dinámica y transporte del material leñoso en el río es fundamental para poder entender cómo éste influirá en su morfología.

La física del transporte de la madera es muy diferente de la del sedimento, y muy compleja a causa de las diferencias de forma, densidad, volúmenes movilizados y de los procesos de incorporación del material al cauce (Piégay et al., 2009).

El inicio del movimiento dependerá de las características de la madera y de las condiciones hidrodinámicas en el río. De forma general se puede decir que una pieza de madera se trasladará:

- (i) por arrastre y/o rodadura en el fondo: el material se desliza rodando o arrastrándose sobre el lecho empujado por la corriente. Por ejemplo, cuando la densidad de la madera es mayor a la del agua, siendo el calado mayor al diámetro del tronco; o bien con calados menores y densidad de la madera más cercana a la del agua.
- (ii) por flotación: cuando la densidad de la madera es inferior a la del agua; de tal modo que el empuje es mayor que el peso. También dependiendo de la densidad (aunque siempre siendo inferior a la del agua), el calado necesario para poner en flotación dependerá de las dimensiones de la pieza. La flotación representa el movimiento más común.
- (iii) por un movimiento similar a la suspensión: cuando el calado es mayor al diámetro y la densidad de la madera es bastante alta (cercana a la del agua), la pieza puede trasladarse parcialmente sumergida en el flujo aunque sin contacto con el lecho.

Además de la traslación, también se produce una rotación en la horizontal, ya que la pieza de madera tenderá a colocarse paralela a la dirección y en el sentido de la corriente, buscando la posición hidrodinámica más estable, con menor resistencia al flujo. No obstante, la presencia de ramas y raíces hace que este proceso sea mucho más complejo y aleatorio.

La falta de observación directa en campo es la carencia más importante en el análisis de la dinámica del material leñoso. Existen escasos trabajos que aporten datos de campo, por ejemplo mediante la monitorización con transmisores (MacVicar et al., 2009); o los trabajos pioneros de seguimiento del material mediante grabaciones con videocámaras (MacVicar y Piégay, 2012). Esta carencia en observaciones directas ha sido tradicionalmente solventada mediante ensayos de laboratorio (Braudrick y Grant, 2000; Welber et al., 2013), o aplicando modelos hidráulicos para su análisis (Mazzorana et al., 2010; Merten et al., 2010; Comiti et al., 2012).

Los primeros trabajos realizados por Braudrick y Grant (2000) y Braudrick et al. (2001), proporcionaron el marco básico para abordar la movilidad de la madera en los ríos. Seguidamente, algunos otros trabajos han explorado la dinámica de la madera en los ríos, como los trabajos de Haga et al. (2002) o Bocchiola et al. (2002 y 2006). En estos estudios fue posible definir y predecir el movimiento de material leñoso, basándose en el balance de fuerzas y en algunos casos definiendo regímenes de transporte. Otros trabajos posteriores han utilizado estos mismos enfoques para describir la movilidad de la madera en arroyos (Manners et al., 2007; Curran, 2010), o utilizando modelos experimentales para analizar la influencia del material leñoso sobre el transporte y depósito de sedimentos (Svoboda y Russell, 2011; Wallerstein, 2004).

Recientemente, se ha desarrollado un modelo numérico bidimensional acoplado al modelo hidráulico IBER (Bladé et al., 2014) que

permite simular el transporte de la madera junto con la hidrodinámica en los ríos (Ruiz-Villanueva et al., 2014a y 2014b). En este modelo, el inicio del movimiento de una pieza de madera (suponiendo ésta como un cilindro) situada en un cauce, se determina mediante un análisis de las fuerzas que actúan sobre ella. Para ello, se han tomado como referencia los trabajos mencionados anteriormente de Braudrick y Grant (2000), Bocchiola et al. (2002), Merten et al. (2010) y Mazzorana et al. (2011a), aunque aportando algunas modificaciones. Las fuerzas involucradas en el balance son, por un lado, la fuerza gravitacional (F_g) y la fuerza de arrastre (F_d) que facilitan el movimiento, y por otro lado, la fuerza de rozamiento o fricción (F_f) que se opone al movimiento: $F_f = F_g + F_d$

En su forma desarrollada sería:

$$(g \cdot \rho_w \cdot L_w \cdot A_w - g \cdot \rho \cdot L_w \cdot A_{sub}) \cdot (\mu_{bed} \cdot \cos\alpha - \sin\alpha) \\ = U_{flow}^2 / 2 \cdot \rho \cdot C_d \cdot (L_w \cdot h \cdot \sin\theta + A_{sub} \cdot \cos\theta)$$

Así, en función de la densidad de la madera (ρ_w), su longitud (L_w) y diámetro (D_w), el ángulo que forma con respecto al flujo (θ), el área total (A_w), el área sumergida (A_{sub}), las condiciones hidrodinámicas del flujo (densidad (ρ), calado (h) y velocidad (U_{flow})) y unos coeficientes de fricción con el lecho y de arrastre (μ_{bed} y C_d), una pieza de madera iniciará su movimiento y se desplazará, bien por flotación, o

por rodadura o arrastre de fondo (a una velocidad diferente a la del agua, Figura 4).

En el modelo numérico se integró la posibilidad de simular y analizar el transporte de piezas individuales de diferentes características, desplazándose mediante los diferentes regímenes de movimiento y, por tanto, de permitir la interacción entre varias piezas de madera, y entre éstas y el cauce, o con condiciones internas (como puentes). Aunque sin duda la parte más importante en el modelo es la influencia que ejerce la presencia de piezas de madera en la hidrodinámica, incluyéndose una resistencia adicional que no está presente en las ecuaciones de Saint Venant de flujo en lámina libre:

$$\tau_{wood,i} = \frac{\sum F_d}{A_i}$$

Siendo $\tau_{wood,i}$ la tensión en cada volumen finito o elemento $_{wood,i}$ de la malla i , de área A_i y F_d la fuerza de arrastre.

2.3. Efectos en la peligrosidad y riesgo por inundación

Como ya se adelantaba en la introducción, el estudio de la influencia de la presencia de carga leñosa en la morfodinámica y en la ecología de los ríos ha sido extensamente

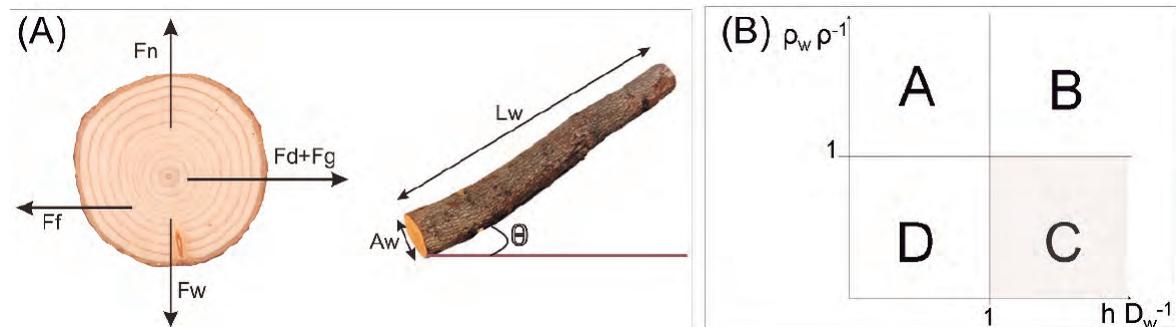


Figura 4: (A) Balance de fuerzas sobre una pieza leñosa (términos definidos en el texto). (B) Regímenes de transporte de una pieza leñosa en función de su densidad y del calado: A, B, D: rodadura o arrastre por el fondo; C: flotación.

Figure 4: (A) Balance of forces on a woody piece; (B) Transport regimes depending on its density and water depth: A, B, D: rolling or sliding; C: Flotation.

explorado (Montgomery, 2003; Sedell et al., 1989). Sin embargo no hay tanta experiencia en relación al papel que juega la carga leñosa en eventos extremos de avenida (Comiti et al., 2012; Lucia et al., 2014). A partir de la década de los 80 algunos autores han analizado el efecto de material leñoso en la hidráulica, o su movilización en los ríos (Bilby, 1984; Lienkaemper y Swanson, 1987; Berg et al., 1998; Gippel, 1995; Wohl y Goode, 2008). También se ha estudiado el transporte de material leñoso mediante ensayos de laboratorio en flumes, como los llevados a cabo por Haga et al. (2002), Curran y Wohl (2003), o Bocchiosa et al. (2006). Asimismo, cabe destacar las investigaciones llevadas a cabo para analizar la amplificación de los efectos negativos de una avenida debido a la presencia de material leñoso, especialmente en secciones críticas como puentes u otras estructuras (Bezzola et al. 2004; Lange y Bezzola 2006; Lyn et al., 2007; Schmocker y Hager, 2010). No obstante, hay pocos estudios de avenidas que tengan en cuenta explícitamente la presencia de material leñoso; y sólo en los últimos años se han presentado algunas metodologías para

incorporar este tipo de carga en los análisis de avenidas e inundaciones (Merten et al., 2010; Mazzorana et al., 2011a y 2011b).

Algunos de los efectos del transporte y depósito de detritos leñosos durante una inundación hacen que las áreas inundadas y calados sean diferentes de aquéllas definidas en ausencia de carga leñosa. Esto se debe, en primer lugar, a que la carga ejerce sobre el flujo una resistencia adicional, y además produce una reducción del área efectiva de la sección. Como consecuencia, se genera un incremento en el calado y, por tanto, en la magnitud de la avenida, que puede quedar expresada mediante las denominadas curvas obstrucción / calado (Figura 5).

La figura 5 muestra un ejemplo de este tipo de curvas, en las que se relaciona un porcentaje de obstrucción en el área efectiva de la sección debido a la presencia de material leñoso, y el consiguiente calado para un determinado caudal. Esta figura muestra un ejemplo extraído de uno de los tramos de río analizados en la Sierra de Gredos, sin

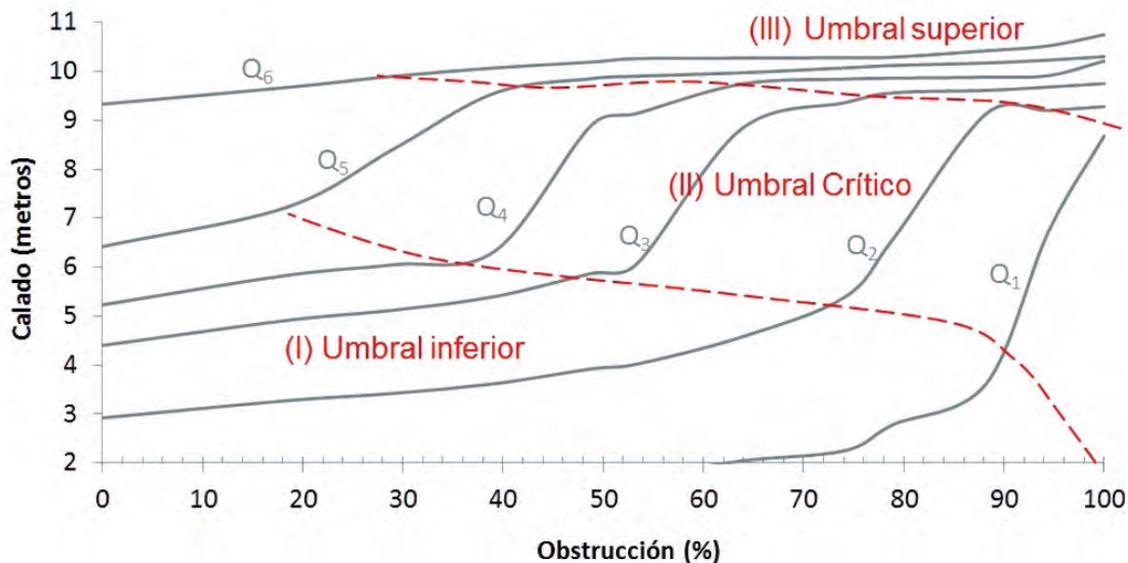


Figura 5: Curvas obstrucción/calado para una sección transversal al cauce de un río, en este caso con una infraestructura de tipo puente. Se pueden apreciar diferentes curvas para distintos caudales (Q_1 a Q_6) y cómo hay unas curvas (líneas discontinuas) que definen tres zonas de umbral de obstrucción (I, II y III).

Figure 5: Clogging curves for a cross sectional area of a bridge in a river. Different curves for different discharges (Q_1 to Q_6) and these curves (dashed lines) define three zones with a clogging threshold (I, II and III).

embargo, el comportamiento hidrodinámico que representa es extrapolable a secciones con geometrías equivalentes. En estas curvas es posible diferenciar tres regiones: (i) la región definida por el umbral inferior, que representa porcentajes de obstrucción que no generarán un elevado aumento del calado, permitiendo al flujo desplazarse en régimen subcrítico; (ii) la región crítica, en la que una pequeña reducción de la sección generará un elevado aumento del calado, provocando que el flujo se desplace en régimen rápido; y (iii) la región definida por un umbral superior, donde ya se ha superado el calado máximo para esa sección y un determinado caudal (Ruiz-Villanueva et al., 2012). La zona más importante es la zona crítica; por tanto, el conocimiento del volumen de material que puede llegar a una determinada sección y, en consecuencia, el porcentaje de reducción de la misma, es fundamental para conocer los efectos que se pueden desencadenar.

También es posible determinar la eficiencia de la estructura caracterizando el material que potencialmente puede llegar al puente y analizando la geometría del mismo (Gipfel, 1995; Lyn et al. 2007; Schmocker y Hager, 2010). Aunque no sólo se producen sobreelevaciones y desbordamientos en las secciones donde hay puentes; también los propios depósitos de material leñoso en el cauce, las barras o la llanura de inundación pueden generar una diversificación del flujo anegándose áreas que sin los depósitos leñosos no se verían afectadas (Welber et al., 2013).

Por otro lado, la presencia de material también puede generar una reducción de la capacidad de transporte y el consiguiente depósito adicional de material leñoso y sedimento en un efecto de retroalimentación. En este caso, la repentina destrucción de las acumulaciones de material puede generar un flujo instantáneo de agua con abundante carga sólida.

Como resultado, es indispensable identificar aquellas secciones más sensibles y con mayor probabilidad a acumular el material y analizar los posibles efectos que pueden generarse.

3. Análisis del material leñoso en ríos de la Sierra de Gredos (Ávila)

La propuesta metodológica explicada en los epígrafes previos, se ha puesto en práctica en diversos tramos de ríos de la Sierra de Gredos (Sistema Central, Ávila; Figura 6). En esta sección, se presentan los resultados obtenidos a este respecto. Siguiendo los objetivos marcados, se presenta un resumen del análisis de la capacidad de generación de material leñoso en 14 cuencas, así como la estimación, mediante la generación de escenarios, del volumen que podrían proporcionar estas cuencas. Por último, se describe la hidrodinámica y el transporte del material depositado en el río, analizándose por último la influencia en el riesgo por inundación.

3.1. La Sierra de Gredos, ríos y cuencas analizadas

Geográficamente la Sierra de Gredos forma parte del Sistema Central, situándose en su tramo medio, entre las sierras de Guadarrama (al Este) y Béjar (al Oeste). La Sierra de Gredos posee un relieve acusado y asimétrico, presentando la vertiente Sur un mayor desnivel y laderas más escarpadas. Desde el punto de vista hidrológico, la Sierra de Gredos forma la divisoria natural entre las cuencas del Duero (al Norte) y el Tajo (al Sur), quedando circunscrita por algunos de sus afluentes principales: el Tiétar y el Alberche por el Sur y el Noreste; y el Tormes y el Jerte por el norte y el Suroeste, respectivamente.

La morfología actual de la Sierra de Gredos es el resultado del modelado de los materiales graníticos, desnivelados en bloques elevados y fosas durante la orogenia Alpina, principalmente por meteorización, la actividad glacial, periglacial y fluvio-torrencial intensa; favorecidas por una densa red de fracturas frágiles que suelen generar bandas de trituración fácilmente erosionables por arroyada.

Las características fisiográficas y su posición geográfica son determinantes para los princi-

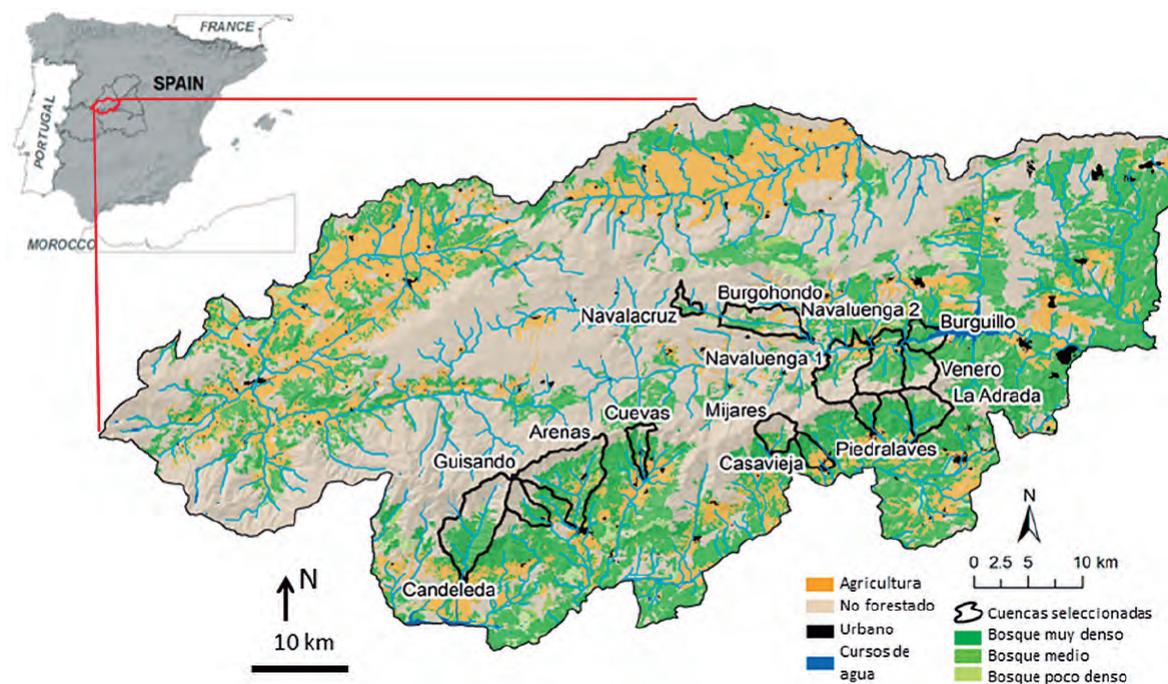


Figura 6: Localización de las cuencas de estudio en el sector central de la Sierra de Gredos en Ávila.

Figure 6: Location of studied basins in the central sector of the Sierra de Gredos in Ávila.

pales rasgos climáticos del sector central de la Sierra de Gredos. El clima se puede definir como mediterráneo continentalizado con inviernos largos y fríos y veranos cortos calurosos. La temperatura media anual es superior a 10°C, siendo la media del mes más frío (enero) inferior a 0°C, y la media del mes más caluroso (julio) igual o superior a 22 °C (AEMET, 2011).

Respecto a las precipitaciones, cabría esperar una mayor cantidad de precipitación al norte, sin embargo, sucede lo contrario. Así queda reflejado en las cantidades máximas de precipitación registradas en 24 horas en la estación de Navaredonda de Gredos (165 mm en el año 1989) frente a las registradas en Guisando el Risquillo (239 mm en 1956). Mientras que las precipitaciones medias anuales son en torno a 800 mm (para altitudes alrededor de los 1000 a 1500 m s.n.m.) en la vertiente norte; en la sur ascienden a casi 2000 mm y en altitudes mucho menores (en torno a 800 m s.n.m.).

Las estaciones más lluviosas son el otoño y la primavera, caracterizándose la primera por la llegada de temporales de origen atlántico de varios días de duración; y la segunda por la ocurrencia de episodios con precipitaciones más intensas y de más corta duración. En verano, las precipitaciones son por lo general escasas, aunque en las zonas montañosas pueden formarse nubes de gran desarrollo vertical por ascensos convectivos de aire cálido y húmedo, produciendo precipitaciones relativamente abundantes. En estas condiciones, las precipitaciones son de carácter torrencial, pudiéndose presentar en ocasiones en forma de granizo. En esta zona de la Sierra de Gredos se localiza uno de los núcleos de máximos pluviométricos de la Península Ibérica. Para cualquiera de los periodos de retorno considerados se localiza el valor máximo regional de la precipitación diaria en la zona de Guisando, con cantidades que van desde 175 mm para un periodo de retorno de 5 años a más de 250 mm para 50 años y en torno a 300 mm para 100 años (MIMAN, 2000).

La vegetación en esta zona está marcada principalmente por la altitud y el régimen de precipitaciones y temperaturas. La zona de más baja cota (entre 400 y 800 m s.n.m.) se caracteriza por la presencia de la encina y el pino piñonero (*Quercus ilex*, *Quercus suber*, *Pinus pinea*), acompañados por enebros (*Juniperus oxycedrus*) y jaras (*Cistus ladanifer*). En la zona de media montaña (de 900 a 1500 m s.n.m.) la encina empieza a mezclarse con el roble melojo (*Quercus pirenaica*) o el pino resinero o negral (*Pinus pinaster*). A éstos les acompañan como arbustos el piorno (*Cytisus scoparius*) y la retama (*Genista falcata*). A continuación en la zona de alta montaña (1500 a 2000 m s.n.m.) se presentan los piornales y pinares de altura (*Pinus sylvestris* y *Pinus nigra*) acompañados de matorrales de leguminosas y enebros (*Cytisus oromediterraneus*, *C. scoparius*, *Genista cinerascens*, *Juniperus communis*). Algunos de los bosques mencionados anteriormente son sustituidos en las zonas de influencia de los cursos de agua por otras especies. Sólo algunas especies de árboles pueden sobrevivir manteniendo sus raíces sumergidas, como los chopos (*Populus nigra*), los sauces (*Salix atrocinerea*, entre otros), y los alisos (*Alnus glutinosa*). De esta forma, las inundaciones prolongadas pueden determinar el tipo de bosque en una franja particular de vegetación a lo largo del río. La asociación de robles (*Quercus spp.*), olmos (*Ulmus glabra*) y fresnos (*Fraxinus angustifolia*) sólo puede desarrollarse en las terrazas más altas que se inundan menos que los sitios colonizados por chopos y sauces (Ellenberg, 1988). Por otro lado, las formaciones de alisos se caracterizan porque no soportan los fríos intensos y no aguantan el estiaje, por lo que concentran su presencia en los tramos medios y bajos de los ríos y arroyos.

La acción antrópica (principalmente deforestadora) ha sido un fenómeno muy importante a lo largo de la historia holocena reciente, además el paisaje forestal está ineludiblemente unido a las actividades socio-económicas de la población rural (Cantero, 2003).

3.2. Capacidad de generación y estimación de volumen de material leñoso

Para analizar los procesos de incorporación del material leñoso a los ríos de la Sierra de Gredos, se desarrolló una nueva metodología basada en sistemas de información geográfica, cuya finalidad fue la delimitación de las áreas contribuyentes. Complementariamente, se realizó un estudio de la vegetación al objeto de estimar los volúmenes que podrían llegar al río, que suponen un factor amplificador del riesgo debido al transporte del material leñoso y su depósito durante avenidas. Esta metodología se aplicó para el Sector Central de la Sierra de Gredos perteneciente a la provincia de Ávila, donde se disponía de la información necesaria para llevar a cabo el análisis. Este estudio se describe en detalle en el trabajo publicado por Ruiz-Villanueva et al. (2014c), de manera que en este documento únicamente se presenta una síntesis de los resultados obtenidos.

Las áreas contribuyentes fueron delimitadas utilizando la información cartográfica disponible. Seguidamente, se analizaron los factores de conectividad de estas áreas con el río. Para ello, a partir de matrices de lógica difusa, se establecieron criterios en función de la intensidad de los eventos y su frecuencia. De este modo, se pudo establecer la probabilidad de que un árbol sea incorporado como detrito leñoso desde las laderas o desde el corredor fluvial. Estos criterios se definieron en función de la distancia al cauce, la altura del árbol, la pendiente de la ladera, la inundabilidad y la capacidad de erosión del río. Además, se analizó en detalle la tipología y distribución de la vegetación que fueron empleadas para definir la resistencia (o facilidad) a ser incorporado como detrito leñoso en el río y, por tanto, la probabilidad de generar material leñoso (Figura 7).

Siguiendo los criterios anteriores, se establecieron diversos escenarios que representan posibles mecanismos de incorporación de madera dependiendo de la severidad y frecuencia con la que los procesos de incorporación

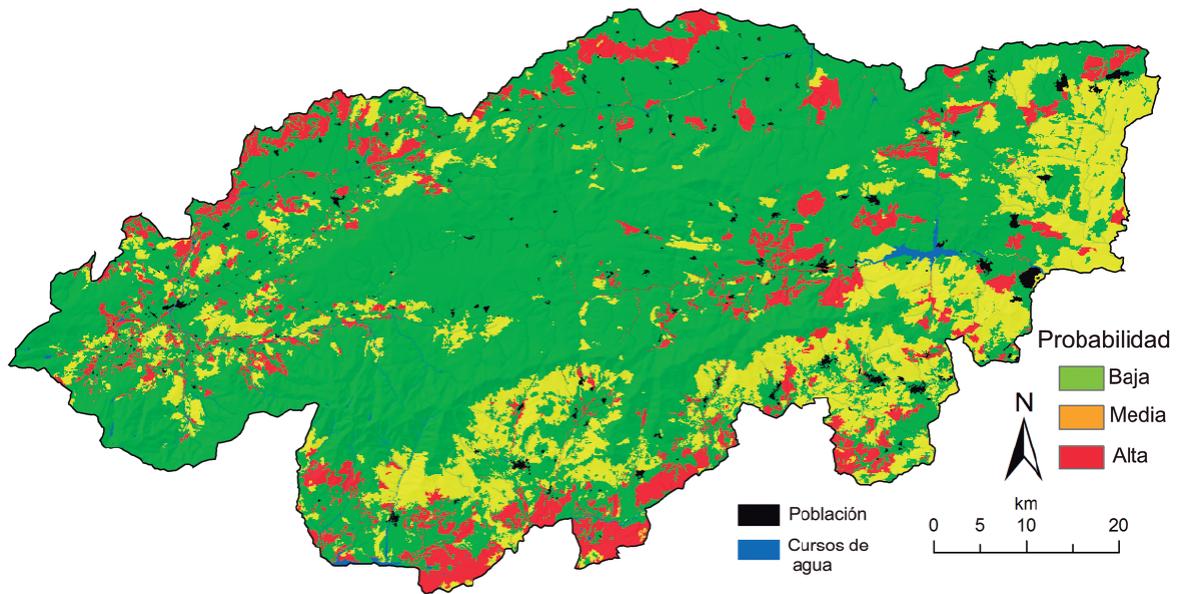


Figura 7: Resistencia de la vegetación a ser incorporada a los ríos, en términos de probabilidad baja, media y alta para el sector central de la Sierra de Gredos.

Figure 7: Resistance of vegetation to be recruited to the rivers, in terms of low, medium and high resistance, for the central sector of the Sierra de Gredos.

tienen lugar. De este modo, es posible estimar el volumen de madera potencialmente disponible para cada uno de los escenarios. El análisis estuvo enfocado en el riesgo potencial ocasionado por el transporte y depósito del material leñoso durante avenidas; de ahí que el análisis se centró en estudiar aquellas cuencas cuyos ríos atraviesan núcleos urbanos.

Como resultados, en primer lugar se identificaron las cuencas con mayor capacidad de generar material leñoso. Los resultados resaltaron 7 de las 14 cuencas estudiadas (cuenca del río Arenal, cuenca del río Pelayo, cuenca del arroyo Cabrera, subcuencas 1 y 2 del río Alberche en Navalunga, La Adrada, Piedralaves y Mijares; Figura 8). También revelaron que para la zona de estudio, son los deslizamientos los procesos que mayor volumen de material aportarían a los ríos, seguidos de las avenidas y de la erosión de bancos de orilla (Figura 8).

El escenario menos probable es aquél en el que todos los procesos tienen lugar a la vez (simultáneamente), afectando a todas las

zonas susceptibles; en contraposición con el escenario más probable para la zona de estudio, que es aquél en el que la incorporación de madera tiene lugar principalmente por inundaciones y erosión de bancos de orilla, y sólo en las zonas delimitadas como de elevada susceptibilidad. Por otro lado, se observó que el volumen de material estimado no está directamente relacionado con el área de la cuenca, ni con el área forestada, sino con la frecuencia e intensidad de los procesos que desencadenan su incorporación. Así, se realizaron estimaciones para los diversos escenarios establecidos, y para cada uno de los procesos estudiados. La Tabla 1 presenta los volúmenes máximos estimados, suponiendo para cada escenario que todos los procesos tienen lugar.

Se realizaron observaciones de campo que permitieron, basándose en ciertos indicadores, validar cualitativamente estos resultados. No obstante, las cifras obtenidas deben tomarse como indicación de órdenes de magnitud para la comparación relativa, más que en cifras absolutas precisas.

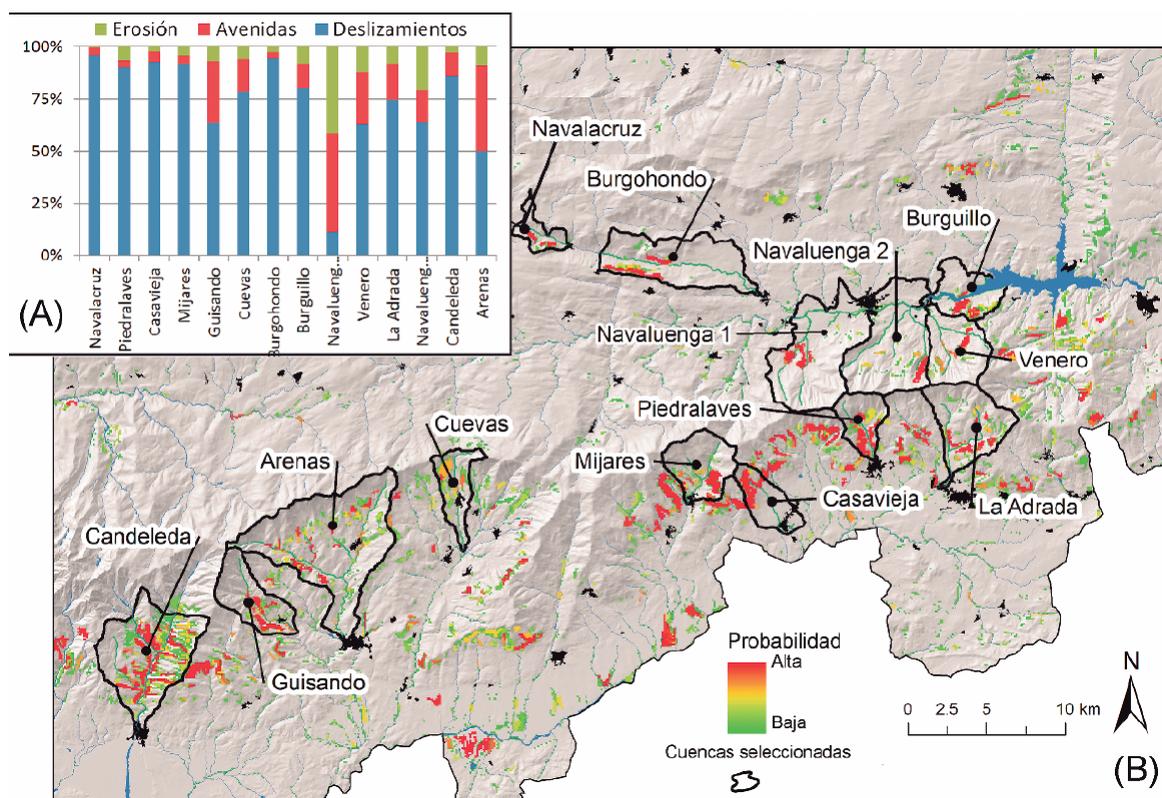


Figura 8: (A) Probabilidad de incorporación de la vegetación en forma de material leñoso a los ríos en el sector central de la Sierra de Gredos; en negro se resaltan las 14 cuencas estudiadas. (B) Porcentajes de material absoluto generado por los tres procesos de incorporación analizados.

Figure 8: (A) Vegetation probability to be recruited to rivers in the central sector of the Sierra de Gredos; the 14 studied basins are highlighted in black; (B) Total percentages recruited by the three main processes.

3.3. Análisis del transporte y depósito de material leñoso en los ríos de la Sierra de Gredos

Al analizar el transporte de material leñoso es importante definir cómo llega este material al tramo de estudio y, por tanto, la relación temporal con el hidrograma de la inundación. Así, por ejemplo, hay que discernir si el aporte de material se produce repentinamente, o bien llega de forma constante y escalonada a lo largo del evento.

En una de las cuencas de estudio, la cuenca del arroyo Cabrera en Venero Claro (Cuenca Venero en la tabla anterior) tuvo lugar en 1997 una avenida súbita que transportó y depositó abundante material leñoso. Siguiendo el método anterior se analizó el área afectada por

esta avenida y se hizo una estimación del volumen de vegetación movilizadora y, por tanto, de material leñoso generado. A continuación, y empleando el modelo descrito en la sección 2.2, se generaron diferentes escenarios de entrada de material distribuido a lo largo del hidrograma para tratar de reconstruir el proceso de obstrucción de uno de los principales puentes (que quedó parcialmente bloqueado) y tratar de caracterizar el régimen de transporte del material. Además, se disponía de abundante información derivada de estudios anteriores, como la cota de la lámina de agua en diferentes secciones transversales, el porcentaje de obstrucción de la sección del puente y el hidrograma reconstruido mediante simulación hidrológica. A este respecto, los resultados del modelo pudieron ser parcialmente validados, al menos de forma cualitativa.

Tabla 1: Estimaciones de volúmenes máximos de material leñoso disponible para las 14 cuencas estudiadas, en términos de m^3 (suponiendo un diámetro medio en los troncos de 25 cm y una longitud media de 10 metros). SC1, SC2 y SC3 se refieren a los tres escenarios de volumen de madera.

Table 1: Estimates of maximum volumes of woody material available for the 14 basins in terms of m^3 (assuming an average diameter of logs 25 cm and an average length of 10 meters). SC1, SC2 and SC3 refer to the three wood volume scenarios.

Cuenca	Área (km ²)	Área forestada (km ²)	Volumen máximo (m ³)		
			SC1	SC2	SC3
Arenas	50,71	27,03	11902	8842	4829
Burgohondo	25,85	7,14	3392	1714	159
Burguillo	12,06	8,44	3135	2192	363
Candeleda	54,40	25,62	18940	14765	2234
Casavieja	10,05	5,04	4646	4234	226
Cuevas	10,06	5,79	1445	890	117
Guisando	14,47	5,71	6964	5738	2075
La Adrada	20,42	14,45	5986	4688	1201
Mijares	14,70	5,21	4363	3559	160
Navalacruz	5,33	1,48	958	741	32
Navaluenga 1	30,54	8,65	1905	1656	1495
Navaluenga 2	32,19	15,99	2858	1451	522
Piedralaves	9,52	5,00	5138	4209	214
Venero	15,59	9,42	2607	1958	631

En primer lugar, se estimó el volumen de material que pudo llegar al tramo de estudio, evaluando el tipo de vegetación situada en la zona afectada por la avenida y el proceso de avulsión que tuvo lugar aguas arriba de este tramo. Siguiendo la metodología propuesta, se calculó un volumen medio de 186 *logs*, con una longitud media de 7 metros y 0,75 m de diámetro. Este volumen se utilizó como condición de entrada y se distribuyó en el tiempo suponiendo que el máximo transporte se produce poco antes de la punta del hidrograma. Se plantearon tres escenarios: (i) transporte repentino, el 100% de la carga es transportado durante el pico del hidrograma; (ii) transporte escalonado, el material es incorporado en diferentes pulsos, distribuido a intervalos a lo largo del hidrograma; (iii) transporte continuo, el 100% del material leñoso es transportado a lo largo de toda la duración del evento de forma constante.

Los resultados de la simulación numérica permitieron estimar la probabilidad de depósito

a lo largo del tramo y para cada uno de los escenarios. Además, se pudo analizar la probabilidad de obstrucción del puente que resultó como media para todos los escenarios. En concreto la obstrucción fue de un 25% para las características y parámetros definidos en los escenarios.

Los resultados también permitieron observar los patrones espaciales simulados de depósito del material leñoso, así como compararlos con la abundante información gráfica (fotografías) recopilada unos días después del evento de 1997 (Figura 9).

Se pudo comprobar que los patrones de depósito no varían significativamente entre los tres escenarios, ya que vienen definidos por la morfometría del cauce y el hidrograma, y no tanto por la cantidad de material o su llegada al tramo de estudio. En todos los casos la sección donde se acumula más material es la sección del puente.



Figura 9: Tramo analizado del arroyo Cabrera, las fotografías muestran los depósitos de material leñoso y el puente principal unos días después de la inundación de 1997. La imagen de la derecha muestra los resultados de la simulación, con el patrón espacial de los depósitos y el nivel del agua (calado).

Figure 9: *Cabrera Stream*, the photographs show deposits of woody material and the main bridge few days after the flood in 1997. The right-hand image shows the results of the model simulation, the spatial pattern of wood deposits and the effect on water level.

3.4. Influencia en la peligrosidad y el riesgo

Continuando con el caso anterior, en el arroyo Cabrera se analizó la influencia de la acumulación de material en la sección del puente y se prestó especial atención a los efectos en el calado en aquellas secciones donde se disponía de información complementaria (marcas de aguas altas, como líneas de flotantes, marcas en edificios o evidencias den-drogeomorfológicas), para poder comparar

los tres escenarios y tratar de reconstruir el evento de 1997.

En todos los casos la simulación de la obstrucción del puente, debida a la acumulación de árboles y material leñoso, produce un aumento en el calado aguas arriba del puente y un descenso de la velocidad de la corriente. De acuerdo a los datos disponibles, es el escenario 2 el que mejor reconstruye el evento de avenida de 1997 (Tabla 2).

Tabla 2: Diferentes escenarios establecidos para reconstruir el evento de 1997 en el Arroyo Cabrera, valores de calados simulados, velocidad de la corriente, número de piezas depositadas y porcentaje de obstrucción de la sección del puente. En gris se resalta el escenario 2 que más se ajusta a los datos observados.

Table 2: *Different scenarios to reconstruct the 1997 event in the Arroyo Cabrera, simulated values of water depth, flow velocity, number of pieces and percentage of bridge section obstruction. Scenario 2 is highlighted in grey since it is the best fits the observed data.*

Escenario	Calado en puente (m)	Calado en edificio (m)	Velocidad media (SD) ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Piezas depositadas	% obstrucción puente
Sin madera	4,7	1,5	3,00 (1,88)	-	-
SC1	8,3	3,2	1,45(1,35)	213	> 70
SC2	7,3	2,8	1,63 (1,28)	180	~ 50
SC3	6,8	2,3	1,94 (1,40)	137	< 40
Observado	7,1	2,9	3,5 (no obstrucción), 1,25 (1,09)	-	48 ± 8

Estos efectos en la peligrosidad (magnitud) de las inundaciones tendrán consecuencias en términos del riesgo. Para analizar esta influencia en el riesgo, se realizó otro análisis mediante la definición de escenarios de diferente peligrosidad, según el papel de la carga leñosa en las márgenes del río Arenal a su paso por el núcleo urbano de Arenas de San Pedro (Ávila). Para cada escenario establecido, primero sin incorporar el transporte de material leñoso y a continuación con los tres tipos de transporte mencionados en la sección anterior, se trató de identificar las zonas más problemáticas donde el material queda depositado bloqueando las infraestructuras y causando la inundación de las zonas adyacentes (Figura 10). Para estimar el riesgo potencial asociado a este evento, se empleó la información catastral con el fin de evaluar la exposición y la vulnerabilidad de la zona. Los elementos expuestos fueron clasificados en siete tipologías diferentes, según su clase de uso y régimen de utilización; además se tuvo en cuenta la existencia de un aparca-

miento de vehículos en las cercanías del río y por tanto las posibles pérdidas asociadas a los daños a automóviles. No existían en la zona funciones calado-daño específicas basadas en datos empíricos, por lo que la vulnerabilidad se asignó empleando curvas construidas mediante simulaciones estocásticas con objeto de obtener los límites predictivos, utilizando como datos de entrada las propuestas en otros análisis de riesgo similares llevados a cabo en España (Ruiz-Villanueva et al., 2014d).

La consecuencia principal de la presencia de material leñoso en la inundación es el efecto de remanso aguas arriba de los puentes, donde la madera queda retenida, reduciendo el área de la sección transversal. De acuerdo con los resultados del modelo, la sección más problemática es el puente 1, situado aguas arriba en el tramo, y donde se deposita gran cantidad de material. El diseño de este puente, de estructura de piedra con un solo arco, junto con el hecho de que es la primera in-

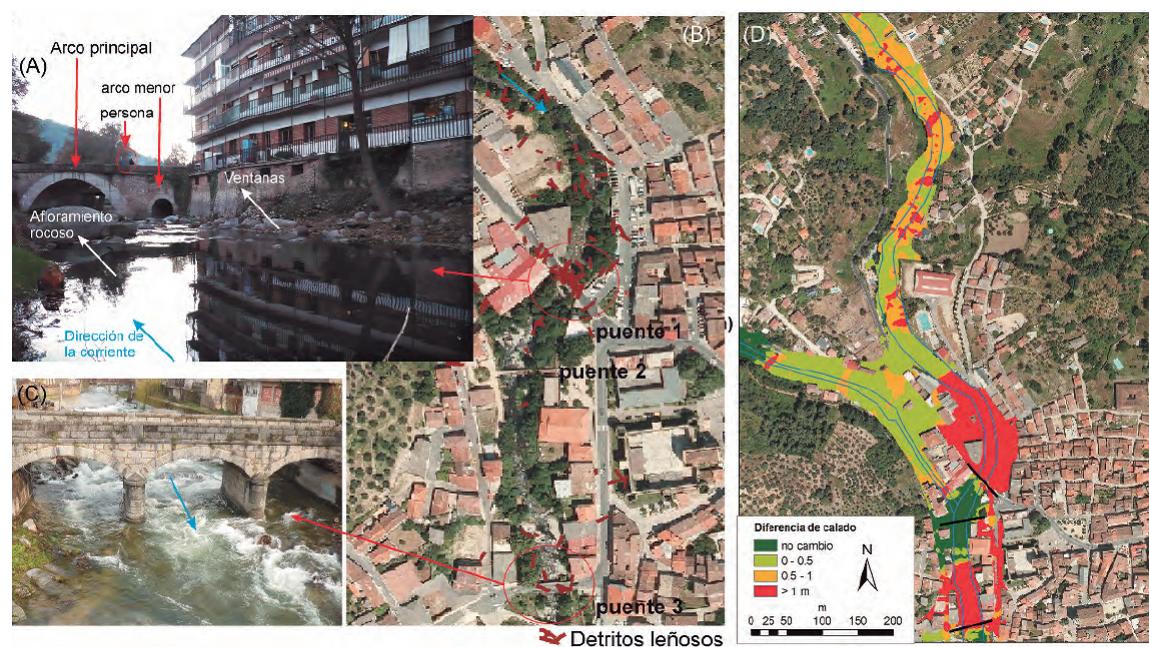


Figura 10: Fotografías y resultados de la simulación del transporte de material leñoso en el Río Arenal. Las imágenes (A) y (C) muestran los puentes identificados como problemáticos, en (B) se muestra la distribución espacial (resultado de la simulación) de los depósitos, (D) aumento del calado debido a la obstrucción de los puentes.

Figure 10: Photographs and simulation results of the Arenal River. Images (A) and (C) show the bridges identified as problematic, in (B) the spatial distribution (simulation result) of wood deposits, (D) increase in water depth due to the bridge clogging.

Tabla 3: Características geométricas de los tres puentes situados en el tramo analizado del Río Arenal.

Table 3: Geometrical characteristics of the three bridges on the analyzed section in the Arenal River.

	Altura puente (m)	Anchura puente (m)	Calado (m)			Geometría puente	
			No madera	SC1	SC2		SC3
Puente 1	7	11	6,6	8,5	9,1	9,7	1 Arco
Puente 2	5*	18	7,7	8,3	8,4	8,6	Rectangular
Puente 3	6	14	4,8	4,9	7,4	9,0	3 Arcos y 2 pilares

fraestructura localizada en el tramo de río estudiado, podría ser la razón. Sin embargo, el puente 3 queda parcialmente bloqueado también, como puede verse en la figura 10. Estas dos infraestructuras serían las más sensibles al paso de material leñoso. En la Tabla 3 se resumen las características de los tres puentes y el calado en esas secciones.

Los resultados del análisis de riesgo mostraron también que la presencia de material leñoso incrementa el riesgo hasta en un 50% para los daños tangibles directos y un 35% en el caso del riesgo a las personas.

4. Breve discusión y conclusiones

Tal y como se ha explicado en la introducción y a lo largo de las secciones anteriores, existen diversas técnicas y métodos para estudiar la dinámica del material leñoso en ríos. Sin embargo, el conocimiento de los procesos que generan el material, así como la dinámica una vez llega a los ríos es todavía muy limitado.

Hasta ahora la medida de gestión más generalizada es la extracción indiscriminada de este material de los ríos, como medida de prevención; sin embargo, como ya se ha discutido anteriormente, esta medida debe ser reconsiderada en función de cada caso en particular. El material leñoso que se deposita en los cauces de forma natural es un elemento más del sistema, y por tanto debe ser integrado en la gestión global del ecosistema fluvial. Es posible integrar su análisis empleando tanto medidas no estructurales como estructurales. Como medidas no estructurales, la identificación de las áreas contribuyentes, o de las zonas de depósito, son fundamentales.

Como conclusión de lo expuesto en los apartados anteriores, se destaca:

- En este trabajo se ha mostrado una propuesta metodológica basada en la generación de escenarios y el desarrollo de un modelo numérico. La propuesta ha sido ensayada en diversos tramos de río, y puede ser fácilmente extrapolable a otras regiones. La flexibilidad de los métodos utilizados hace fácilmente adaptable el análisis a otros objetivos, como la evaluación de escenarios de cambios de usos del suelo, fases de proyectos de infraestructuras, etc. Sin embargo, los modelos son representaciones abstractas de nuestro conocimiento sobre un proceso determinado y están limitados intrínsecamente por la información con la que se desarrollan (Knight, 2013). Por tanto, el máximo potencial se conseguirá combinando el poder de ambos, modelos (numéricos) junto con observaciones y datos de campo.
- El modelo desarrollado en este trabajo de investigación permite simular el transporte de material leñoso junto con la hidrodinámica simultáneamente, de modo que la carga leñosa influye en la hidrodinámica y viceversa. Además de las simplificaciones asumidas en el modelo, como por ejemplo la forma de los detritos (cilindros), la mayor limitación en su aplicación directa en ríos es la disponibilidad de datos observados que permitan validar o calibrar los resultados. Para obtener este tipo de datos, se han propuesto diferentes metodologías de monitorización y seguimiento de material en el río. Por ejemplo, los trabajos llevados a cabo por Mao et al. (2013) o los trabajos publicados por MacVicar y Piégay (2012).

- Cuando el objetivo es estimar el volumen potencial de material leñoso que podría llegar al río (como el caso mostrado en el apartado 3.1) la generación de escenarios es una potente herramienta de decisión empleada en diversos estudios (Cooke, 1991; Scholz y Tietje, 2002). Esta perspectiva de análisis ha sido utilizada a lo largo de este trabajo de investigación, de forma similar a otros autores que también proponían esta aproximación para el análisis de riesgos en zonas de montaña (Mazzorana et al., 2009, 2010, 2011a y 2011b). Los escenarios generados en este trabajo, se definieron siguiendo las propuestas de Godet (1986) consistentes en identificar el menor número de posibilidades que puedan representar diversos estados, incluyendo el denominado peor caso posible, con el objetivo final de obtener diferentes posibilidades para evaluar situaciones probables o posibles.
- La metodología basada en sistemas de información geográfica para estudiar los procesos de incorporación del material leñoso y delimitar las áreas contribuyentes, permite incorporar otros procesos al análisis. Esta metodología permite obtener unos órdenes de magnitud de material leñoso potencialmente disponible, lo que muchas veces es suficiente para el diseño y dimensionamiento de infraestructuras y ordenación territorial.

Para finalizar, de todo lo expuesto en el presente trabajo se deriva que es necesario seguir avanzando en el conocimiento de la dinámica del material leñoso, tanto analizando su influencia en el ecosistema fluvial, como en su papel en el riesgo de inundaciones.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido elaborado con parte de los resultados obtenidos en la tesis doctoral de la primera firmante del trabajo. Dicha tesis doctoral fue financiada con una beca FPI (BES-2008-003725) del Ministerio de Ciencia

e Innovación, en el contexto de los proyectos Dendro-Avenidas y MAS Dendro-Avenidas (CGL2010-19274) coordinados desde el Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

REFERENCIAS

- Abbe, T.B.; Montgomery, D.R. (2003). Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets River basin, Washington. *Geomorphology*, 51, 81-107. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00326-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00326-4)
- Abbe, T.B.; Montgomery, D.R.; Petroff, C. (1997). Design of stable in-channel wood debris structures for bank protection and habitat restoration: an example from the Cowlitz River, WA, in: Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration, edited by: Wang, S.S.Y.; Langendoen, E. J.; and Shields, F. D., University of Mississippi, Mississippi, 809-815.
- Abbe, R.T.B.; Buffington, J.M.; Peterson, N.P.; Schmidt, K.M.; Stock, J.D. (1996). Distribution of bedrock and alluvial channels in forested mountain drainage basins. *Nature*, 381, 587-589.
- Abernethy, B.; Rutherford, I.D. (2001). The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes*, 15, 63-79. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.152>
- Adenlof, K.A.; Wohl, E.E. (1994). Controls on bedload movement in a subalpine stream of the Colorado Rocky Mountains, USA. *Arct. Alp. Res.*, 26, 77-85. <http://dx.doi.org/10.2307/1551881>
- AEMET (2011). Atlas Climático Ibérico. Clasificación climática de Köppen-Geiger en la Península Ibérica. Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España.
- Andreoli, A.; Comiti, F.; Lenzi, M.A. (2007). Characteristics, distribution and geomorphic role of large woody debris in a mountain stream of the Chilean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 1675-1692. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1593>
- Benda, L.E.; Sias, J.C. (2003). A quantitative framework for evaluating the mass balance of in-stream organic debris. *Forest ecology and management*, 172, 1-16. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00576-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00576-X)
- Berg, N.; Carlson, A.; Azuma, D. (1998). Function and dynamics of woody debris in stream re-

- aches in the central Sierra Nevada, California. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 55, 1807-1820. <http://dx.doi.org/10.1139/f98-064>
- Bezzola, G.; Sigg, H.; Lange, D. (2004). Schwemmholzrückhalt in der Schweiz. In: International Symposium Interpraevent 2004, Riva, Trient. *Tagungspublikation*, 3, 29-40.
- Bilby, R.E. (1984). Removal of wood debris may affect stream channel stability. *Journal of Forestry*, 82 (10), 609-613.
- Bilby, R.E.; Likens, G.E. (1980). Importance of organic debris dams in the structure and function of stream ecosystems. *Ecology*, 61, 1107-1113. <http://dx.doi.org/10.2307/1936830>
- Bilby, R.E.; Ward, J.W. (1989). Changes in characteristics and function of woody debris with increasing size of streams in western Washington. *Transactions of the American Fisheries Society*, 118, 368-378. [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659\(1989\)118%3C0368:CICAFO%3E2.3.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659(1989)118%3C0368:CICAFO%3E2.3.CO;2)
- Bladé, E.; Cea, L.; Corestein, G.; Escolano, E.; Puer-tas, J.; Vázquez-Cendón, M.E.; Dolz, J.; Coll, A. (2014). Iber Herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bocchiola, D.; Catalano, F.; Menduni, G.; Passoni, G. (2002). An analytical-numerical approach to the hydraulics of floating debris in river channels. *Journal of Hydrology*, 269, 65-78. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00195-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00195-6)
- Bocchiola, D.; Rulli, M.C.; Rosso, R. (2006). Transport of large woody debris in the presence of obstacles. *Geomorphology*, 76, 166-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.08.016>
- Bragg, D.C.; Service, U.F.; Uam, P.O.B.; Kershner, J.L.; Unit, F.E. (2004). Sensitivity of a Riparian Large Woody Debris Recruitment Model to the Number of Contributing Banks and Tree Fall Pattern. *USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-181* 19, 117-122.
- Bragg, J.L.; Kershner D.C. (2004). Coarse woody debris in riparian zones: opportunity for interdisciplinary interaction. *Journal of Forestry*, 97, 30-35.
- Braudrick, C.; Grant, G.E. (2000). When do logs move in rivers? *Water Resources Research*, 36, 571-583. <http://dx.doi.org/10.1029/1999WR900290>
- Braudrick, C.A.; Grant, G.E.; Northwest P.; Forest U.S. (2001). Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. *Geomorphology*, 41, 263-283. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00058-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00058-7)
- Braudrick, C.A.; Grant, G.E.; Ishikawa, Y.; Ikeda, H. (1997). Dynamics of Wood Transport in Streams: A Flume Experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 7669-683. [http://dx.doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199707\)22:7%3C669::AID-ESP740%3E3.0.CO;2-L](http://dx.doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199707)22:7%3C669::AID-ESP740%3E3.0.CO;2-L)
- Brooks, A.P.; Abbe, T.; Cohen, T.; Marsh, N.; Mika, S.; Boulton, A.; Broderick, T.; Borg, D.; Rutherford, I. (2006). Design guidelines for the reintroduction of wood into Australian streams. Land & Water Australia, Canberra.
- Buffington, J.M.; Montgomery, D.R. (1999). Effects of hydraulic roughness on surface textures of gravel-bed rivers. *Water Resour. Res.*, 35, 3507-3521. <http://dx.doi.org/10.1029/1999WR900138>
- Cantero, A. (2003). El paisaje forestal está ineludiblemente unido a las actividades socio-económicas de la población rural. Actas de la II Reunión sobre Historia Forestal. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 16, 309-313.
- Carlson, J.; Andrus, C.; Froelich, H. (1990). Woody debris, channel features, and macroinvertebrates of streams with logged and undisturbed riparian timber in north-eastern Oregon, U.S.A. *Can. J. Fish. Aquatic Sci.*, 47, 1103-1111. <http://dx.doi.org/10.1139/f90-127>
- Comiti, F.; Agostino, V.D.; Moser, M.; Lenzi, M.A.; Bettella, F.; Agnese, A.D.; Rigon, E.; Gius, S.; Mazzorana, B. (2012). Preventing wood-related hazards in mountain basins: from wood load estimation to designing retention structures, 651-662. 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 - Grenoble, / France Conference Proceedings.
- Comiti, F.; Andreoli, A.; Mao, L.; Lenzi, M.A. (2008). Wood storage in three mountain streams of the southern Andes and its hydro-morphological effects. *Earth Surface Processes. and Landforms*, 33, 244-262. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1541>
- Cooke, R. (1991). Experts in Uncertainty. Oxford University Press.
- Correa, L. (2013). ¿Para qué Sí hay que limpiar los ríos? Online disponible en: <http://www.iagua.es/blogs/lorenzo-correa/%C2%BFpara-que-si-hay-que-limpiar-los-rios>.
- Cotter, E. (1978). The evolution of fluvial style, with special reference to the central Appalachian Paleozoic. In: Miall, A.D. (Ed.), *Fluvial Sedimentology: Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir*, vol. 5, pp. 361-383.

- Curran, J.C. (2010). Mobility of large woody debris (LWD) jams in a low gradient channel. *Geomorphology*, 116, 320-329. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.11.027>
- Curran, J.H.; Wohl, E.E. (2003). Large woody debris and flow resistance in step-pool channels, Cascade Range, Washington. *Geomorphology*, 51, 141-157. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00333-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00333-1)
- Diez, J.R.; Elosegi, A.; Pozo, J. (2001). Woody debris in north Iberian streams: influence of geomorphology, vegetation, and management. *Environmental Management*, 28, 687-698. <http://dx.doi.org/10.1007/s002670010253>
- Ellenberg, H. (1988). *Vegetation ecology of central Europe*, Cambridge University Press, Cambridge
- Francis, R.A.; G.E. Petts, A.M.; Gurnell, A. (2008). Wood as a driver of past landscape change along river corridors. *Earth Surface. Processes and Landforms*, 33, 1622-1626. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1626>
- Gippel, C.J. (1995). Environmental Hydraulics of Large Woody Debris in Streams and Rivers. *Journal of Environmental Engineering*, 121, 388. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1995\)121:5\(388\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:5(388))
- Gippel, C.J.; White, K. (2000). Re-introduction techniques for instream large woody debris. In: A Rehabilitation Manual for Australian Streams, Volume 1, Rutherford ID, Jerie K, Marsh N (eds). Land and Water Resources Research and Development Corporation and Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology: Canberra; 313-321.
- Godet, M. (1986). Introduction to 'la prospective': Seven key ideas and one scenario method. *Futures*, 2, 134-57. [http://dx.doi.org/10.1016/0016-3287\(86\)90094-7](http://dx.doi.org/10.1016/0016-3287(86)90094-7)
- Grant, G.; Swanson, F.J. (1995). Morphology and processes of valley floors in mountain streams, western Cascades, Oregon. In *Natural and Anthropogenic influences in fluvial geomorphology*, edited by J.E. Costa, A.J.; Miller, K.W. Potter and P.R. Wilcock, pp. 83-101. Geophysical Monograph 89, American Geophysical Union, Washington D.C. <http://dx.doi.org/10.1029/GM089p0083>
- Gregory, S.; Boyer, K.L.; Gurnell, A.M. (2003). The ecology and management of wood in world rivers. *Am. Fish. Soc. Symp.* 37.
- Gurnell, A.M.; Petts, G.E. (2002). Island-dominated landscapes of large floodplain rivers, a European perspective. *Freshwater Biology*, 47, 581-600. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00923.x>
- Gurnell, A.M.; Petts, G.E.; Hannah, D.M. (2001). Riparian vegetation and island formation along the gravel-bed Riume Tagliamento, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 31-62. [http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837\(200101\)26:1%3C31::AID-ESP155%3E3.0.CO;2-Y](http://dx.doi.org/10.1002/1096-9837(200101)26:1%3C31::AID-ESP155%3E3.0.CO;2-Y)
- Gurnell, A.M.; Piégay, H.; Swanson, F.J.; Gregory, S.V. (2002). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biol.*, 47, 601-619. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x>
- Haga, H.; Kumagai, T.; Otsuki, K.; Ogawa, S. (2002). Transport and retention of coarse woody debris in mountain streams: An in situ field experiment of log transport and a field survey of coarse woody debris distribution. *Water Resources Research*, 38, 1-16. <http://dx.doi.org/10.1029/2001WR001123>
- Hutte, P. (1968). Experiments on windflow and wind damage in Germany: Site and susceptibility of spruce forests to storm damage. *Forestry*, 41, 20-26.
- Jackson, C.R.; Sturm, C.A. (2002). Woody Debris and Channel Morphology in First- and Second-Order Forested Channels in Washington's Coast Ranges. *Water Resources Research*, 38, 1177-1190. <http://dx.doi.org/10.1029/2001WR001138>
- Jeffries, R.; Darby, S.E.; Sear, D.A. (2003). The influence of vegetation and organic debris on flood-plain sediment dynamics: case study of a low-order stream in the New Forest, England. *Geomorphology*, 51, 61-80. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00325-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00325-2)
- Johnson, S.L.; Swanson, F.J.; Grant, G.E.; Wondzell, S.M. (2000). Riparian forest disturbances by a mountain flood? The influence of floated wood. *Hydrological Processes*, 14, 3031-3050. [http://dx.doi.org/10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17%3C3031::AID-HYP133%3E3.0.CO;2-6](http://dx.doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17%3C3031::AID-HYP133%3E3.0.CO;2-6)
- Kail, J.; Hering, D.; Muhar, S.; Gerhard, M.; Preis, S. (2007). The use of large wood in stream restoration: experiences from 50 projects in Germany and Austria. *Journal of Applied Ecology*, 44, 1145-1155. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01401.x>
- Kasprak, A.; Magilligan, F.J.; Nislow, K.H.; Snyder, N.P. (2011). A LIDAR - derived evaluation of watershed - scale large woody debris sources and recruitment mechanisms: Ccoastal maineMaine, USA. *River Research and Applications*, 28, 1462-76. doi: 10.1002/rra
- Keller, E.A.; Swanson, F.J. (1979). Effects of large organic material on channel form and

- fluvial processes, *Earth Surface Processes and Landforms*, 4, 361-380. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290040406>
- Knight, D.W. (2013). River hydraulics - a view from midstream. *Journal of Hydraulic Research*, 51, 2-18. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2012.749431>
- Lane, E.W. (1955). The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering. *American Society of Civil Engineering, Proceedings* 81, paper 745, 1-17.
- Lange, D.; Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholz: Probleme und Lösungsansätze [Driftwood: Problems and solutions]. *VAWMitteilung* 188, H.-E. Minor, ed., ETH Zürich, Zurich, 188.
- Langford, T.E.L.; Langford, J.; Hawkins, S.J. (2012). Conflicting effects of woody debris on stream fish populations: implications for management. *Freshwater Biology*, 57, 1096-1111. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02766.x>
- Lassetre, N.S.; Kondolf, G.M. (2012). Large woody debris in urban stream channels: redefining the problem. *River Research and Applications*, 28, 1477-1487. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.1538>
- Lienkaemper, G.W.; Swanson, F.J. (1987). Dynamics of large woody debris in streams in old-growth Douglas-fir forests. *Can. J. For. Res.*, 17, 150-156. <http://dx.doi.org/10.1139/x87-027>
- Lucia, A.; Comiti, F.; Borga, M.; Cavalli, M.; Marchi, L. (2014). Large wood recruitment and transport during a severe flash flood in North-western Italy. *IAEG 2014 Conference proceedings*.
- Lyll, C. (1830). Principles of Geology. Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes now in Operation, vol. 1. John Murray, London. 512 pp. <http://dx.doi.org/10.5962/bhl.title.50860>
- Lyn, D.; Cooper, T.; Condon, D.; Gan, L. (2007). Factors in debris accumulation at bridge piers, Washington, US Department of Transportation, Federal Highway Administration Research and Development, Turner- Fairbank Highway Research Center.
- MacVicar, B.; Piégay, H. (2012). Implementation and validation of video monitoring for wood budgeting in a wandering piedmont river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1272-1289.
- MacVicar, B.J.; Piégay, H.; Henderson, A.; Comiti, F.; Oberlin, C.; Pecorari, E. (2009). Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 2031-2046. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1888>
- Manners, R.B.; Doyle, M.W.; Small, M.J. (2007). Structure and hydraulics of natural woody debris jams. *Water Resources Research*, 43, 1-17. <http://dx.doi.org/10.1029/2006WR004910>
- Mao, L.; Andreoli, A.; Iroumé, A.; Comiti, F.; Lenzi, M. (2013). Dynamics and management alternatives of in-channel large wood in mountain basins of the southern Andes. *BOSQUE*, 34, 319-330. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002013000300008>
- Marcus, W.A.; Marston, R.A.; Colvard Jr., C.R.; Gray, R.D. (2002). Mapping the spatial and temporal distributions of large woody debris in rivers of the Greater Yellowstone Ecosystem. *U.S.A. Geomorphology*, 44, 323-335. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00181-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00181-7)
- Martin, D.J.; Benda, L.E. (2001). Patterns of in-stream wood recruitment and transport at the watershed scale. *Transactions of the American Fisheries Society*, 130, 940-958. [http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659\(2001\)130%3C0940:POIWRA%3E2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1577/1548-8659(2001)130%3C0940:POIWRA%3E2.0.CO;2)
- May, C.L.; Gresswell, R.E. (2003). Large wood recruitment and redistribution in headwater streams in the southern Oregon Coast Range, U.S.A. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, 1352. <http://dx.doi.org/10.1139/x03-023>
- Mazzorana, B.; Hübl, J.; Fuchs, S. (2009). Improving risk assessment by defining consistent and reliable system scenarios. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 145-159. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-9-145-2009>
- Mazzorana, B.; Hübl, J.; Zischg, A.; Largiader, A. (2010). Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Natural Hazards*, 56, 425-449. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-009-9492-y>
- Mazzorana, B.; Comiti, F.; Fuchs, S. (2011a). A structured approach to enhance flood hazard assessment in mountain streams. *Natural Hazards*, 67, 991-1009. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9811-y>
- Mazzorana, B.; Comiti, F.; Volcan, C.; Scherer, C. (2011b). Determining flood hazard patterns through a combined stochastic-deterministic approach. *Natural Hazards*, 59, 301-316. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-011-9755-2>
- McDade, M.H.; Swanson, F.J.; McKee, W.A.; Franklin, J.F.; Van Sickle, J. (1990). Source distances for coarse woody debris entering small streams in western Oregon and Washington. *Can. J. For. Res.*, 20, 326-330. <http://dx.doi.org/10.1139/x90-047>

- Merten, E.; Finlay, J.; Johnson, L.; Newman, R.; Stefan, H.; Vondracek, B. (2010). Factors influencing wood mobilization in streams. *Water Resources Research*, 46, 1-13. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008772>
- MIMAN (2000). Libro Blanco del Agua. Ministerio de Medio Ambiente. Secretaría de Estado, de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas.
- Montgomery, D. (2003). Wood in rivers: interactions with channel morphology and processes. *Geomorphology*, 51, 1-5. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00322-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00322-7)
- Montgomery, D.R.; Abbe, T.B. (2006). Influence of logjam-formed hard points on the formation of valley-bottom landforms in an old-growth forest valley, Queets River, Washington, USA. *Quat. Res.*, 65, 147-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.yqres.2005.10.003>
- Montgomery, D.R.; Collins, B.D.; Buffington, J.M.; Abbe, T.B. (2003). Geomorphic effects of wood in rivers, *The Ecology and Management of Wood in World Rivers*, edited by S. V.Gregory, K. L.Boyer, A. M.Gurnell, 21-47, Am. Fish. Soc., Bethesda, Md.
- Naka, K. (1982). Community dynamics of evergreen broadleaf forests in southwestern Japan. I. Wind damaged trees and canopy gaps in an evergreen oak forest. *Journal of Plant Research*, 95, 385-399. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02489476>
- Nakamura, F.; Swanson, F.J. (1993). Effects of coarse woody debris on morphology and sediment storage of a mountain stream system in western Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18, 43-61. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290180104>
- O'Connor, D.; Renting, H.; Gorman, M.; Kinsella, J. (2006). The Evolution of Rural Development in Europe and the Role of EU Policy. In O'Connor, D.; Renting, H.; M. Gorman and J. Kinsella (Eds.) *Driving Rural Development: Policy and Practice in Seven EU Countries*. Assen: Van Gorcum.
- Ollero, A. (2013). ¿Por qué NO hay que limpiar los ríos? Online disponible en: <http://riverkeeper.blogspot.ch/2013/01/por-que-no-hay-que-limpiar-los-rios.html>.
- Piégay, H. (1993). Nature, mass and preferential sites of coarse woody debris deposits in the lower Ain valley (Mollon Reach), France. *Regulated Rivers: Research and Management*, 8, 359-372. <http://dx.doi.org/10.1002/rrr.3450080406>
- Piégay, H.; Alber, A.; Slater, L.; Bourdin, L. (2009). Census and typology of the braided rivers in the French Alps. *Aquatic Sciences*, 71, 371-388. <http://dx.doi.org/10.1007/s00027-009-9220-4>
- Piégay, H.; Gurnell, A.M. (1997). Large woody debris and river geomorphological pattern: Examples from S. E. France and S. England. *Geomorphology*, 19, 99-116. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(96\)00045-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(96)00045-1)
- Rickenmann, D.; Koschni, A. (2010). Sediment loads due to fluvial transport and debris flows during the 2005 flood events in Switzerland. *Hydrological Processes*, 24, 993-1007. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7536>
- Rigon, E.; Comiti, F.; Lenzi, M.A. (2012). Large wood storage in streams of the Eastern Italian Alps the relevance of hillslope processes. *Water Resources Research*, 48, W01518. <http://dx.doi.org/10.1029/2010WR009854>
- Robison, E.G.; Beschta, R.L. (1990). Coarse woody debris and channel morphology interactions for undisturbed streams in southeastern Alaska, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 149-156. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290150205>
- Rudolf-Miklau, F.; Hübl, J. (2010). Managing risks related to drift wood (woody debris). *INTERPRAEVENT 2010 - Int. Symposium in Pacific Rim, Taipei*, 26. - 30. April 2010 In: Chen, Su-Chin (Ed.), *Symposium Proceedings*, S. 868 - 878; ISBN: 978-3-901164-11-8.
- Ruiz-Villanueva, V.; Bodoque, J.M.; Díez-Herrero, A.; Eguibar, M.A.; Pardo-Igúzquiza, E. (2012). Reconstruction of an ungauged flash flood event with large wood transport and its influence on hazard patterns. *Hydrological Processes*, 27, 3424-3437. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9433>
- Ruiz-Villanueva, V. (2013). Nuevas Metodologías para el análisis de la peligrosidad y riesgo por inundación en zonas de montaña. Tesis Doctoral Universidad Complutense de Madrid. Febrero 2013.
- Ruiz-Villanueva, V.; Bladé-Castellet, E.; Sánchez-Juny, M.; Martí, B.; Díez-Herrero, A.; Bodoque, J.M. (2014a). Two dimensional numerical modelling of wood transport. *Journal of Hydroinformatics*, 16.5, 1077-1096.
- Ruiz Villanueva, V.; Bladé Castellet, E.; Díez-Herrero, A.; Bodoque, J. M.; Sánchez-Juny, M. (2014b). Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 438-449. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3456>

- Ruiz-Villanueva, V.; Díez-Herrero, A.; Ballesteros, J.A.; Bodoque, J.M. (2014c). Potential Large Woody Debris recruitment due to landslides, bank erosion and floods in mountain basins: a quantitative estimation approach. *River Research and Applications*, 30, 81-97. <http://dx.doi.org/10.1002/rra.2614>
- Ruiz-Villanueva, V.; Bodoque, J.M.; Díez-Herrero, A.; Bladé, E. (2014d). Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. *Natural Hazards*, 74, 967-987. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-014-1222-4>
- Russell, I.C. (1909). *Rivers of North America*. G.P. Putnam's Sons, New York, NY. 522 pp.
- Schmocker, L.; Hager, W.H. (2010). Drift accumulation at river bridges. River Flow Dittrich, Koll, Aberle & Geisenhainer (eds). Bundesanstalt für Wasserbau ISBN 978-3-939230-00-7.
- Schmocker, L.; Weitbrecht, V. (2013). Driftwood: Risk Analysis and Engineering Measures. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139, 683-695. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000728](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000728)
- Scholz, R.W.; Tietje, O. (2002). *Embedded Case Study Methods: Integrating Quantitative and Qualitative Knowledge*. Sage Publications.
- Schumm, S.A. (1963). A tentative Classification of Alluvial River Channels, U.S. Geol. Surv. Circ. 477, 10.
- Sedell, J.R.; Richey, J.E.; Swanson, F.J. (1989). The river continuum concept: A basis for expected ecosystem behavior of very large rivers? *Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.*, 106, 110-127.
- Shoecraft, R.P. (1875). Map of Township No. 31 North, Range No. 5 East, Willamette Meridian, Washington Territory. U.S. Bureau of Land Management, Plates of Washington Territory, Olympia, WA.
- Stumbles, R.E. (1968). How wind influences silviculture and management as a district officer sees it. *Forestry Supplement*, 45-50.
- Sullivan, K.; Lisle, T.E.; Dolloff, C.A.; Grant, G.E.; Reid, L.M. (1987). Stream channels: The link between forests and fishes, *Streamside Management: Forestry and Fishery Implications*, edited by E. O. Salo, T. W. Cundy, 39-97, Univ. of Washington, Institute of Forest Resources, Seattle.
- Svoboda, C.D.; Russell, K. (2011). Flume Analysis of Engineered Large Wood Structures for Scour Development and Habitat. *Proceedings of ASCE World Environmental and Water Resources Congress 2011*. p. 2572-2581. [http://dx.doi.org/10.1061/41173\(414\)267](http://dx.doi.org/10.1061/41173(414)267)
- Swanson, F.J. (2003). Wood in rivers: a landscape perspective. *American Fisheries Society Symposium*, 37, 299-313.
- Swanson, F.J.; Lienkaemper, G.W. (1984). Interactions among fluvial processes, forest vegetation, and aquatic ecosystems, South Fork Hoh River, Olympic National Park. In: Starkey, E.E.; Franklin, J.F.; Matthews, J.W. (Eds.), *Proceedings of the Second Conference on Scientific Research in the National Parks*. Oregon State Univ. Forest Research Lab. Publ., Corvallis, OR, pp. 30-34.
- Van Sickle, J.; Gregory, S.V. (1990). Modeling inputs of large woody debris from falling trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 1593-1601. <http://dx.doi.org/10.1139/x90-211>
- Waldner, P.; Köchli, D.; Usbeck, T.; Schmocker, L.; Sutter, F.; Rickli, C.; Rickenmann, D.; Lange, D.; Hilker, N.; Wirsch, A.; Siegrist, R.; Hug, C.; Kaennel, M. (2010). Schwemmholz des Hochwassers 2005 (Driftwood during the 2005 flood event). Final Report. Federal Office for the Environment FOEN, Swiss Federal Institute for Forest, Snow, and Landscape Research, WSL, Birmensdorf (in German).
- Wallerstein, N. (2004). Influence of large woody debris on morphological evolution of incised, sand-bed channels. *Geomorphology*, 57, 53-73. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00083-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00083-7)
- Webb, A.A.; Erskine, W.D. (2003). A practical scientific approach to riparian vegetation rehabilitation in Australia. *Journal of Environmental Management* 68, 329-341. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4797\(03\)00071-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4797(03)00071-9)
- Welber, M.; Bertoldi, W.; Tubino, M. (2013). Wood dispersal in braided streams: results from physical modeling. *Water Resources Research*, 49, 7388-7400. <http://dx.doi.org/10.1002/2013WR014046>
- Welty, J.J.; Beechie, T.; Sullivan, K.; Hyink, D.M.; Bilby, R.E.; Andrus, C.; Pess, G. (2002). Riparian aquatic interaction simulator (RAIS): a model of riparian forest dynamics for the generation of large woody debris and shade. *Forest Ecology and Management*, 162, 299-318. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00524-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00524-2)
- Wohl, E. (2010). Mountain Rivers Revisited, *Water Resour. Monogr. Ser.*, 19, 573 pp.
- Wohl, E. (2011). Threshold-induced complex behavior of wood in streams. *Geology* 39, 587-590. <http://dx.doi.org/10.1130/G32105.1>
- Wohl, E. (2013). Floodplains and wood. *Earth Science Reviews*, 123, 194-212. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.009>

- Wohl, E.; Cenderelli, D.A.; Dwire, K.A.; Ryan-Burkett, S.E.; Young, M.K.; Fausch, K.D. (2010). Large in-stream wood studies: a call for common metrics. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 618-625. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1966>
- Wohl, E.; Jaeger, K. (2009). A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34, 329-344. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1722>
- Wohl, E.E.; Merritt, D.M. (2008). Reach-scale channel geometry of mountain streams, *Geomorphology*, 93, 168-185. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.014>
- Wyżga, B.; Zawiejska, J. (2005). Wood storage in a wide mountain river: Case study of the Czarny Dunajec, Polish Carpathians. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30, 1475-1494. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1204>
- Wyżga, B.; Zawiejska, J. (2010). Large wood storage in channelized and unmanaged sections of the Czarny Dunajec River, Polish Carpathians: Implications for the restoration of mountain rivers. *Folia Geographica, Series Geographica Physica*, 41, 5-34.

