

EL BARRANCO DE PORTAINÉ (PIRINEO CENTRAL): UN LABORATORIO IN SITU COMPLETO PARA EL ESTUDIO DE LA ACTIVIDAD TORRENCIAL

**Jordi PINYOL¹, Marcel HÜRLIMANN², Glòria FURDADA³, Miriam MOYSSET¹,
Rosa M^a PALAU², Ane VICTORIANO³, Marta GONZÁLEZ¹, José MOYA², Marta
GUINAU³, Carles RAÏMAT⁴ y Carles FAÑANÁS⁵**

¹Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Parc de Montjuïc s/n, 08038 Barcelona.
Jordi.Pinyol@icgc.cat

²Dpt. de Ingenieria Civil y Ambiental, BarcelonaTECH, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC),
Jordi Girona 1-3 (D2), 08034 Barcelona

³RISKINAT, Institut de Recerca Geomodels, Dpt. De Dinàmica de la Terra i de l'Oceà, Facultat de
Ciències de la Terra, Universitat de Barcelona (UB), Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona

⁴Geobruigg Ibérica, S.A., Gomera 8, 1º B, 28703 San Sebastián de los Reyes, Madrid

⁵Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació (DARP), Generalitat de Catalunya

RESUMEN

Entre 2006 y 2015, el barranco de Portainé y su afluente, el barranco de Reguerals (comarca del Pallars Sobirà, Pirineos de Lleida), han presentado una intensa actividad torrencial. Durante este periodo se han producido diez avenidas, nueve de las cuales han provocado daños importantes en la carretera de acceso a las pistas de esquí de Port Ainé e importantes pérdidas económicas asociadas no sólo a la reparación de las infraestructuras, sino también a la interrupción de la actividad turística después de cada episodio y a las inversiones realizadas para proteger la zona, como la instalación de barreras dinámicas para la retención de sedimentos. En este artículo se presenta una síntesis de los trabajos realizados desde dos ópticas diferentes, el de la gestión del territorio, al ser la estación de esquí uno de los motores socioeconómicos de la zona, y el científico, dado su interés para el estudio de la dinámica torrencial.

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos relacionados con la dinámica torrencial representan un peligro considerable en zonas montañosas por su capacidad de movilizar importantes volúmenes de sedimentos a altas velocidades (Hungar *et al.*, 2014). En Cataluña, la dinámica torrencial es un proceso habitual tanto en zonas de montaña (Hürlimann *et al.*, 2016) como en la vertiente mediterránea (Marquès, 2000). Se destacan los episodios de lluvias intensas que generaron flujos torrenciales en 1907, 1937 y 1982, que comportaron inundaciones, depósito de sedimentos y una gran destrucción de bienes (Balasch *et al.*,

2008) y más recientemente, el episodio de junio de 2013 (Pinyol *et al.*, 2017).

En Portainé, desde 2006, se ha producido un incremento repentino de la actividad, convirtiéndose en el torrente más activo de los Pirineos desde 1982. Los daños en la carretera de acceso a las pistas de esquí y las importantes pérdidas económicas asociadas fundamentalmente a la actividad turística, pero también a la gestión agro-ganadera y forestal del territorio, hacen que el barranco se haya convertido en un lugar de especial interés no sólo para las administraciones públicas, sino también para la comunidad científica. La causalidad de los factores que han conducido a esta nueva dinámica es motivo de controversia, siendo puntos clave para entenderla la existencia de las instalaciones de la estación de esquí (Furdada *et al.*, 2016) y las recientes correcciones hidrológicas (Luis-Fonseca *et al.*, 2011).

En este artículo se presentan los trabajos realizados para el estudio, la comprensión y la mitigación de estos fenómenos torrenciales desde un enfoque multidisciplinar.

2. ZONA DE ESTUDIO

El barranco de Portainé se sitúa en los Pirineos Centrales, en la vertiente norte del macizo del Orri (Pallars Sobirà, Lleida). La cabecera de su cuenca hidrográfica alberga la estación de esquí de Port Ainé, propiedad de la Generalitat de Catalunya (Figura 1). La importancia de la zona, para las diferentes instituciones de la Administración Pública, queda patente si se consideran las inversiones realizadas desde 2009, con 510.000 € en restauraciones hidrológico-forestales y 5.800.000 €, en obras de reparación, estabilización y protección de la carretera.

2.1. Morfología, geología y climatología

La cuenca hidrográfica del barranco (5,72 km²) la conforman los barrancos de Portainé y Reguerals. Estos nacen respectivamente a los pies de la Torreta de l'Orri (2439 m s.n.m.) y del Bony de la Socarrada (2275 m s.n.m.), y trascurren hacia el norte confluyendo en la cota 1285 m s.n.m. para desembocar en el río de Santa Magdalena, a 950 m s.n.m.; recorriendo 5,7 km y con una pendiente media de 28,5% (16°).

Geológicamente, la cuenca se sitúa en la zona axial de los Pirineos, en el manto del Orri, una estructura cabalgante antiformal de edad herciniana y orientación WNW-ESE. En la cuenca de Portainé el substrato está formado por metapelitas y areniscas con intercalaciones de niveles cuarcíticos y, muy localmente, pizarras oscuras. Este substrato, intensamente deformado y fracturado, acostumbra a estar alterado en superficie.

Geomorfológicamente es el resultado de una larga evolución post Alpina en la que se desarrollaron superficies de erosión. Posteriormente, en la zona, se encajaron los circos más meridionales correspondientes al glaciario Pleistoceno, como el de la cabecera del barranco

de Portainé (Hartevelt, 1969; 1970). El intenso periglacialismo en las zonas no ocupadas por glaciares, mayoritarias en la cuenca, produjo una gran cantidad de derrubios generados a expensas de los materiales del sustrato. El resultado de esta evolución es una potente formación superficial detrítica de grosor irregular (> 10 m) rica en clastos de metapelitas y areniscas (García-Oteyza *et al.*, 2015). Como consecuencia, existe gran cantidad de material susceptible de ser movilizado, tanto en las laderas como en los fondos de los barrancos. En la cuenca se distinguen dos grandes sectores: el sector sur, desde la cabecera hasta la cota 2000 aproximadamente, con pendientes entre 10% y 46,5% (6° y 25°) y el sector norte, más pronunciado y densamente poblado por bosques, entre 21 % y 79 % (12° y 35°).

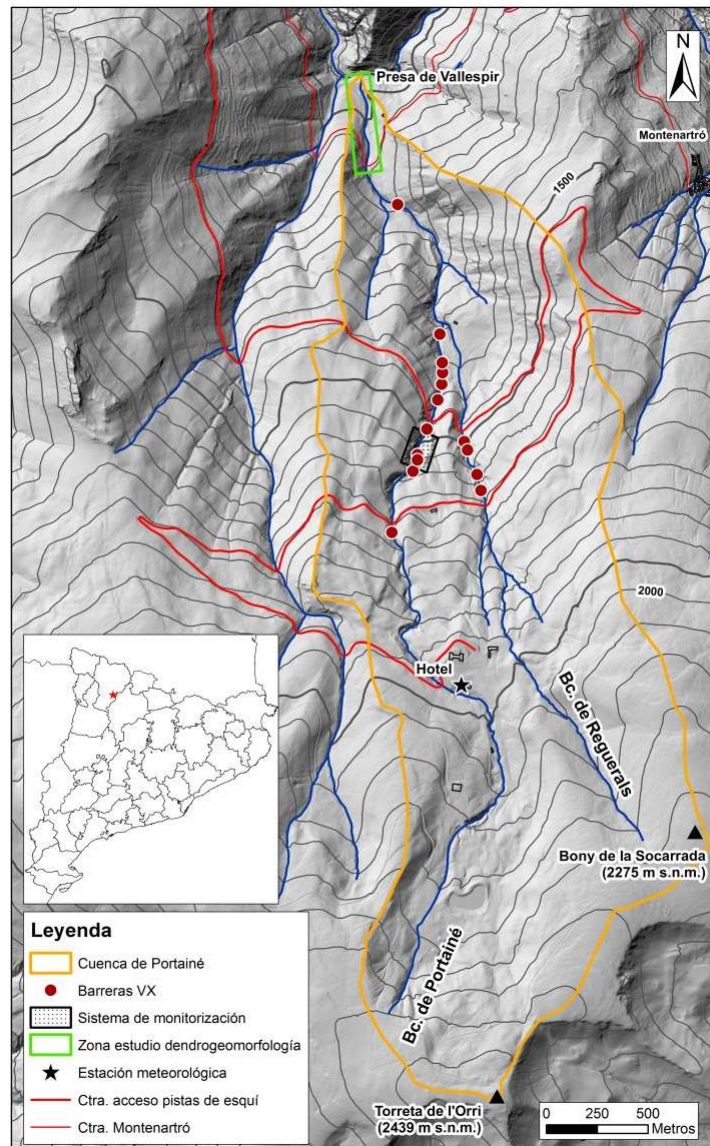


Figura 1. Cuenca de Portainé con los principales elementos identificados.

Climatológicamente, Portainé se encuentra en la zona mediterránea prepirenaica occidental, con un régimen pluviométrico EPTH (máximo en verano o primavera y mínimo en invierno). Según el Atlas climático de Cataluña (ICC, 1996), la precipitación media anual varía de 750 mm en el río de Santa Magdalena a 950 mm en cabecera.

2.2. Actividad humana

Sin duda alguna, la actividad humana ha sido el principal factor que ha modificado la cuenca, ya sea por la construcción de infraestructuras, edificios y un gran reservorio de agua, o por el cambio de uso del suelo como pista de esquí. Los principales cambios empezaron en los años 1970 cuando se inició la construcción la carretera de Roní hasta los 1650 m s.n.m. En el año 1986 se inauguró la estación de esquí. En 1995 se construyó la carretera hasta cota 2000 m s.n.m, y en 1996, la presa de Vallespir. La última gran modificación fue la construcción, en 2010, de un reservorio de agua de 118.000 m³ en la cota 2160 m s.n.m, con la eliminación de otros tres embalses menores situados junto al barranco entre los 2000 y 2100 m s.n.m. La instalación de las barreras flexibles VX, desde 2009, también ha alterado el flujo e inducido una dinámica compleja de erosión y acumulación.

El análisis de la evolución de la cobertura vegetal, realizado a partir de la interpretación de fotografías aéreas y de ortofotografías infrarrojas desde 1956, muestra una disminución de ésta en la cabecera de la cuenca, especialmente de la arbustiva, y a partir de 2008, un aumento importante de la construcción de drenajes de evacuación de agua de las pistas de esquí. Esto conlleva una disminución del tiempo de concentración y un aumento del caudal sobre todo a partir de la cota 2000 m s.n.m. (Furdada *et al.*, 2016).

Para entender la dinámica actual del torrente, debida a la gran antropización de la cuenca, es necesario considerar las interacciones entre la dinámica natural y las intervenciones antrópicas, lo que aumenta todavía más su interés.

3. ACTIVIDAD TORRENCIAL HISTÓRICA Y RECIENTE

La interpretación de las fotografías aéreas disponibles hasta 2006 no identifica rasgos geomorfológicos concluyentes indicativos de actividad torrencial. A escala regional, la zona ha sufrido consecuencias catastróficas en 1907 y 1937, aunque se desconocen sus efectos en la cuenca de Portainé. Por información testimonial se conoce la destrucción del puente de la carretera de Montenartró al principio de los años sesenta. Sobre el episodio de lluvias torrenciales de 1982, Balasch *et al.* 2008 reconocen cerca de Portainé, daños en el camino de Montenartró, en los accesos y en la presa de Romadriu y una gran acumulación de sedimentos en la confluencia del río de Santa Magdalena con el Noguera Pallaresa. Fañanás *et al.* (2009) indican que posiblemente se produjo una torrentada en el barranco y Raïmat *et al.* (2013) determinan mediante la incisión, medidas retrospectivas y simulaciones, que se desplazaron 50.000 m³ de materiales en el barranco. Contrariamente,

las fuentes testimoniales indicaron que el barranco de Portainé no fue especialmente afectado por este episodio, ya que la precipitación descargó sobre todo en la cabecera del valle de Santa Magdalena y en las vertientes orientadas al Sur. Hasta el momento los datos dendrocronológicos han aportado evidencias del funcionamiento del torrente durante este episodio (Furdada *et al.*, 2016) aunque se desconocen sus efectos geomorfológicos.

Desde 2006 se han producido 10 avenidas torrenciales (Tabla 1), 9 de las cuales han provocado daños importantes en la carretera y, en un caso, en la presa de Vallespir (Figura 2). El Instituto Cartográfico y Geológico de Catalunya (ICGC) ha seguido y documentado con detalle los eventos producidos desde 2008 y sus efectos (IGC, 2013).

El episodio más importante fue el de la noche del 11 al 12 septiembre de 2008, que produjo daños graves en los dos barrancos. Según Fañanás *et al.* (2009) la precipitación se estimó en 60 mm en menos de 40 minutos, asumiendo un período de retorno (T) próximo a 20 años y un tiempo de concentración inferior a 20 minutos. Puesto que estos datos provienen de estaciones meteorológicas próximas al barranco, pero fuera de la cuenca, y que las precipitaciones estivales tienen efectos muy intensos y localizados, estos datos podrían diferir de lo que realmente sucedió en la cuenca. A pesar de ello, se considera que la precipitación desencadenante no fue extraordinaria. Referente al tipo de flujo que se produjo, se plantea la hipótesis de que, en un primer momento, el barranco funcionó torrencialmente y, posteriormente, se produjeron una o varias oleadas típicas de un flujo de derrubios, provocadas por la incorporación de una gran cantidad de material procedente de la rotura de los terraplenes de la carretera (IGC, 2010). Diversos autores han cuantificado el volumen de material movilizado; para Fañanás *et al.* (2009) y Hürlimann *et al.* (2009) fue de 26.000 m³, para Luis-Fonseca *et al.*, 2011 fue de 20.000 m³ y para IGC (2010) fue de 43.400 m³.

En el evento de julio del 2010 se movilizaron 30.000 m³ de material, colmatándose prácticamente las 9 barreras dinámicas instaladas (Raimat *et al.*, 2013). En la estación meteorológica de Sort se recogieron 59 mm, con intensidades máximas de 19 mm en 30 minutos, no considerándose una precipitación extraordinaria. El análisis de los datos de precipitación de las avenidas torrenciales desde 2008 muestran que la actividad se produce sin necesidad de lluvias extraordinarias, aunque si fuertes o muy fuertes según criterio de la AEMET, sin llegar a ser torrenciales (IGC, 2013; Palau *et al.*, 2017).

Para conocer la actividad del barranco desde mediados del s.XX se ha recurrido a los análisis dendrogeomorfológicos. A partir de daños en los árboles de ribera situados en el cono de deyección se han datado diferentes años con evidencias dendrogeomorfológicas que muy probablemente se correspondan con avenidas torrenciales (Furdada *et al.*, 2016): 1970-71, 1974-75, 1977-78, 1982-83, 1987-88, 1997-98, y los correspondientes a eventos recientes desde 2006. Hasta 2006 se determina una frecuencia media de 1 evento torrencial cada aproximadamente 5 años. En el periodo 2006-2015, según las avenidas documentadas, la frecuencia media ha aumentado a 1 evento por año. Este aumento no se

considera debido a un aumento de las precipitaciones, ya que el análisis preliminar de las series de precipitaciones históricas muestra que no se ha observado un incremento significativo de tormentas importantes en los últimos 100 años (Hürlimann *et al.*, 2017).

Fecha	Magnitud relativa del proceso torrencial	Daños principales	Barranco afectado (m s.n.m.)
2006/05	Pequeña	Carretera cortada por sedimentos	Reguerals (1465)
2008/09/11-12	Grande. Mayor evento documentado	Carretera cortada por sedimentos, importante erosión en los taludes y destrucción parcial presa de Vallespir	Portainé (1966, 1700, 1450, 950) Reguerals (1665, 1465)
2008/11/02	Pequeña	Carretera cortada por sedimentos	Portainé (1450)
2010/07/22-23	Grande	Carretera cortada por sedimentos y colmatación de barreras flexibles	Portainé (1450) Reguerals (1465)
2010/08/12	Grande	Carretera cortada por sedimentos, erosión en los taludes y colmatación de barreras	Portainé (1450) Reguerals (1465)
2011/08/05	Pequeña	Colmatación desagües carretera y erosión en los taludes	Portainé (1700, 1450) Reguerals (1665, 1465)
2013/07/23	Grande	Carretera cortada por sedimentos	Portainé (1450) Reguerals (1665, 1465)
2014/08/20	Pequeña	Colmatación de barreras flexibles	
2014/08/30	Mediana	Carretera cortada por sedimentos y erosión en los taludes	Portainé (1700, 1450)
2015/08/21	Mediana	Carretera cortada por sedimentos	Portainé (1450)

Tabla 1. Eventos torrenciales recientes con información sobre sus efectos.

4. CORRECCIONES HIDROLÓGICAS

Con el objetivo de retener progresivamente el material aportado por futuros eventos potenciales y disminuir la energía del flujo (disminución de la pendiente y el calado tras el llenado de la barrera), desde 2009 se han instalado 15 barreras flexibles de red con disipadores de anillo VX-160, con capacidad para retener cada una de ellas entre 1.400 m³ y 2.000 m³ (Fañanás *et al.*, 2009): 4 en el barranco de Reguerals, entre las cotas 1490 y 1624 m s.n.m, y 11 en el barranco de Portainé, entre las cotas 1089 y 1715 m s.n.m.

Tres meses después de la instalación, en 2009-2010, de 7 barreras en Portainé y 2 en Reguerals se colmataron prácticamente todas de manera eficiente (Raimat *et al.*, 2013). Sin embargo, el episodio de agosto de 2010 dañó algunas de las barreras (Figura 2C), depositando sedimentos en la carretera y erosionando algún talud (IGC, 2013). Posteriormente, en 2012 y 2013, se instalaron 4 barreras más en Portainé y 2 en Reguerals.



Figura 2. Imágenes de los efectos de las avenidas en Portainé. A) depósito de septiembre de 2008 en la intersección del barranco de Reguerals y la carretera (1465 m s.n.m.). B) depósito de septiembre de 2008 en la confluencia del río de Santa Magdalena con destrucción de la aleta de la presa. C) socavación en una barrera después del evento de agosto de 2010 en el barranco de Portainé (1350 m s.n.m.). D) erosión en el barranco de Portainé (1380 m s.n.m.) en agosto de 2013.

Los daños en las barreras se deben a la desviación del flujo debido a lluvias ordinarias hacia los laterales provocando la erosión entre el terreno y la barrera durante el flujo ordinario. Se propicia así el vaciado lateral de la barrera y el debilitamiento de los anclajes. Este proceso exige una mayor supervisión del funcionamiento y un mayor mantenimiento si se quiere mantener su funcionalidad y evitar la erosión de la ladera donde se sitúan los anclajes. Aunque en general las barreras han cumplido su función correctamente, una vez llenas, éstas no impiden que las avenidas con gran cantidad de carga sólida sigan propagándose hasta la confluencia con el río de Santa Magdalena (Furdada *et al.*, 2016; García-Oteyza *et al.*, 2015). La energía asociada a estos flujos torrenciales es todavía superior a la que pueden disipar las barreras.

5. ESTUDIO DEL FENÓMENO

El estudio de esta dinámica torrencial se ha abordado desde un enfoque multidisciplinar. Por una parte, en julio de 2015 se instaló una estación de auscultación con geófonos y un sensor de ultrasonidos para medir la velocidad y la altura de los flujos. Por otra, se ha analizado la evolución de los barrancos desde mediados del siglo XX integrando fuentes diversas: datos de dendrogeomorfología, datos históricos, evolución de la cobertura vegetal en cabecera, cartografía geomorfológica de detalle, hidrología y antropización de la cuenca (apartados anteriores). Finalmente, se han estudiado los cambios morfológicos recientes mediante la comparación espacio-temporal de los datos de LIDAR aéreo y se ha modelizado el fenómeno a partir de los datos recogidos.

5.1. Análisis de datos LiDAR

En la zona de estudio se dispone de datos LiDAR del ICGC de agosto de 2009 y agosto-septiembre de 2011, fechas entre las cuales ocurrieron tres avenidas (julio de 2010, agosto de 2010 y agosto de 2011) y se instalaron 9 barreras. Victoriano *et al.* (2016) han realizado la comparación espacio-temporal de los modelos digitales del terreno (MDT) obtenidos a partir de estos datos para analizar la evolución morfológica de los torrentes, así como para detectar zonas críticas de erosión y sedimentación, y cuantificar el balance sedimentario. El análisis muestra un fenómeno generalizado de la erosión a lo largo de los torrentes y en sus márgenes. Se ha observado que la erosión es mayor en el barranco de Portainé, más estrecho y encajado, que el de Reguerals. Otras zonas preferentes de erosión son las cicatrices laterales de deslizamientos recientes (algunas producidas por la socavación al pie de la ladera), los laterales y zonas aguas abajo de las barreras de retención y las salidas de los drenajes en los cruces de la carretera. En tramos donde disminuye la pendiente, en el cono de la confluencia con el río, aguas arriba de las redes de retención y de cruces de la carretera, predomina la sedimentación.

El material movilizado entre 2009 y 2011 se ha cuantificado mediante el cálculo de la diferencia en la elevación de cada celda de los MDT comparados. El volumen del material erosionado se ha estimado en 80.500 m³ aproximadamente, y la acumulación, sobre todo debida al llenado de las barreras durante las avenidas, en 72.700 m³. El balance sedimentario, negativo, indica que unos 7.800 m³ de material fueron exportados fuera de la cuenca y aportados al río en 2 años. La detección de las zonas de mayor erosión mediante LiDAR puede ayudar a la elección de las futuras zonas preferentes de actuación.

5.2. Monitorización del barranco

Para caracterizar los flujos torrenciales, en julio de 2015, se instaló una estación de monitoreo entre 1540 m s.n.m. y 1480 m s.n.m., compuesta por 4 geófonos unidireccionales (velocidad del flujo) y un sensor de ultrasonidos (altura del flujo) (Hürlimann *et al.*, 2014). Los datos del monitoreo se complementan con los

meteorológicos recogidos en la estación de esquí desde 2011, a 1985 m s.n.m.

La estación registró el episodio del 21 de agosto de 2015, originado por una precipitación corta pero intensa que causó la movilización de sedimentos del canal. El flujo no bloqueó la carretera en la cota 1700 m s.n.m., pero posteriormente incorporó gran cantidad de material del lecho, convirtiéndose en un flujo de derrubios maduro con varias oleadas, que se detuvo en la carretera a la cota 1450 m s.n.m., colmatando el drenaje. El registro de la vibración del suelo junto con los datos del sensor de ultrasonidos permite determinar la dimensión temporal del flujo y su velocidad. Con estos datos se ha observado que el flujo circuló durante 20 minutos en tres oleadas, la primera duró 10'42'', con una velocidad de 1,7 m/s; la segunda 7'30'', con 1,9 m/s; y la tercera solo 2'06'', con 2,1 m/s. Con estas velocidades de los frentes relativamente bajas (aprox. 2 m/s) se considera que la descarga de flujo máximo fue reducida (aprox. 13 m³/s). El sensor de ultrasonidos registró alturas máximas de flujo entre los 0,75 m y 1,5 m. La combinación de los valores registrados, junto a una anchura de flujo de 4 m, medida en el campo, permite calcular el volumen de sedimentos movilizados en 2130 m³. Este valor es similar a los 1980 m³ estimados en el campo, con un altura máxima del depósito de 2,5 m (Palau *et al.*, 2017).

5.3. Modelización

Con el doble propósito de conocer más sobre los eventos sucedidos y validar el funcionamiento de las barreras flexibles instaladas se han realizado diversas modelizaciones. Hürlimann *et al.* (2009), obtuvo un volumen aproximado de 26.000 m³, para el evento de septiembre de 2008, utilizando el modelo de volúmenes finitos que sigue el método de Godunov "FLATModel" (Medina *et al.*, 2008).

Raimat *et al.* (2013) modelizó el evento de julio de 2010 utilizando los mismos parámetros derivados del evento de septiembre de 2008. El modelo elegido fue el RAMMS, desarrollado por el WSL/SLF. A partir de considerar un comportamiento reológico de Voellmy, para el flujo de 2008, se obtuvieron velocidades de hasta 20 m/s y presiones superiores a 1400 kPa, combinación que justificaría la gran erosión observada. A partir de estos valores, de un volumen de 25.000 m³ y una densidad media de 2 t/m³, se modelizó el flujo considerando la presencia de las barreras construidas, obteniendo alturas, presiones y velocidades de flujo que demostraron la eficiencia de las barreras.

Palau *et al.* (2017), analizó el flujo de 21 de agosto de 2015, mediante el modelo GITS-1D, desarrollado por la UPC. El modelo calibra los parámetros de Voellmy usando, por un lado, el máximo recorrido observado en el campo, y, por otro, la velocidad y el área del flujo estimados mediante el monitoreo. Como resultados de la calibración se obtuvieron como mejores valores 0,29 (μ) para el coeficiente de fricción seca de Coulomb y 8 m^{0,5}/s para coeficiente de Chézy de fricción turbulenta (C). Con estos valores, las velocidades y las áreas del flujo obtenidas son muy similares a las obtenidas a partir de los datos de campo y el monitoreo.

6. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha presentado la dinámica torrencial del barranco de Portainé, así como una síntesis de los estudios realizados y de las correcciones hidrológicas.

A partir de toda la información disponible se puede constatar que la frecuencia de la actividad torrencial en los barrancos ha incrementado desde 2006. Este cambio puede haber sido propiciado por la presencia y desarrollo de la estación de esquí en la cabecera, que ha modificado la cobertura vegetal y la compactación del terreno, y por la construcción de canales de drenaje y terraplenes en la cuenca, que disminuyen la capacidad de infiltración e incrementan la escorrentía superficial.

Las principales afectaciones se observan en las intersecciones de los barrancos con la carretera de acceso a la estación de esquí. Los trabajos de campo y los datos LiDAR demuestran que los barrancos se encuentran en una fase erosiva muy activa.

La rotura del equilibrio geomorfológico ha producido una situación de inestabilidad: la cicatriz erosiva abierta en la formación superficial facilita la erosión de los márgenes durante los eventos, aportando material al canal y generando corrientes de derrubios con mayor facilidad. La erosión se produce de forma cada vez más intensa por lo que se generan flujos con gran cantidad de carga sólida sin necesidad de precipitaciones extraordinarias.

Aunque en general, las barreras han cumplido su función correctamente, reteniendo sedimentos y disminuyendo la energía del flujo, una vez llenas no impiden que las avenidas con gran cantidad de carga sólida sigan propagándose aguas abajo. La interacción entre la evolución natural y las medidas de defensa ha generado una dinámica compleja de erosión y sedimentación, que el modelo de diferencias a partir de datos LiDAR permite localizar. En algunos casos, la elevada erodibilidad del terreno ha conllevado problemas en el perímetro de anclaje de las barreras con el terreno. En otros casos, el flujo se ha concentrado de manera natural en el centro de la barrera, siendo esta situación la más deseable. Estas situaciones han aportado una valiosa experiencia para el diseño, instalación y mantenimiento de este tipo de obras de protección.

Actualmente, las medidas de mitigación realizadas para proteger de la dinámica torrencial a los accesos son únicamente las barreras, donde su situación y mantenimiento son de suma importancia. No obstante esto, hay que valorar, como alternativas, la posibilidad de rediseñar las confluencias entre los torrentes y la carretera mediante puentes.

El conocimiento existente y los resultados de las investigaciones en curso permitirán caracterizar la dinámica torrencial de la cuenca, comprender la evolución geomorfológica del sistema y evaluar la efectividad de las barreras para definir una correcta gestión y mitigación del riesgo en esta zona.

El barranco de Portainé, por su intensa actividad torrencial, se ha convertido en un laboratorio in situ completo para el estudio, la comprensión y la mitigación, desde un enfoque multidisciplinar, de los fenómenos torrenciales en zonas de montaña.

AGRADECIMIENTOS

Beca APIF (UB) y Ministerio de Ciencia e Innovación: DEBRISSTART (CGL2011-23300), CHARMA (CGL2013-40828-R) y SMuCPhy (BIA2015-67500-R).

REFERENCIAS

- Balash, C., Becat, J., Marugan, C.M., Nadal, A., Rapalino, V., Remacha, R., 2008. *Les riuades del segle XX al Pallars Sobirà: 1907, 1937 i 1982*. Colección: Arxius y societats: Quaderns de divulgació històrica nº 2. Barcelona, 240 pp., Departament de Cultura i Mitjans de Comunicació, Generalitat de Catalunya. Barcelona, España.
- Fañanás, C., Aguilar Marín, N., Raïmat Quintana, C. and Luis-Fonseca, R. 2009. Corrección hidrológica en el barranco de Portainé. En: Alonso, E., Corominas, J., Hürlimann, M. (editors). *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Barcelona, 27-30 de Octubre de 2009, p. 999- 1011. CIMNE, Barcelona, España.
- Furdada, G., Génova, M., Guinau, M., Victoriano, A., Khazaradze, G., Díez-Herrero, A. and Calvet, J. 2016. Las avenidas torrenciales de los barrancos de Portainé, Reguerals y Ramaiosa (Pirineo Central): evolución de las cuencas y dinámica torrencial. In: Durán Valsero, J.J., Montes Santiago, M., Robador Moreno, A. and Salazar Rincón, A. (Editors) *Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro*. Instituto Geológico y Minero de España, Geología y Geofísica 5: 315-322
- García-Oteyza, J., Génova, M., Calvet, J., Furdada, G., Guinau, M. and Díez-Herrero, A., 2015. Datación de avenidas torrenciales y flujos de derrubios mediante metodologías dendrogeomorfológicas (barranco de Portainé, Lleida, España). *Ecosistemas* 24(2):43-50.
- Hartevelt, J.J.A., 1969. Geological map of the Central Pyrenees. Sheet 10 Segre-Valira, Andorra-Spain. De Sitter, L.U., Zwart, H.J. and Savage, J.F. (Editors). Geological Institute, Leiden University. In: Zwart, H. J., *The Geology of the Central Pyrenees*. Leidse Geologische Mededelingen, 50-1, Geologisch en Mineralogisch Instituut der Rijksuniversiteit te Leiden, 1979.
- Hartevelt, J.J.A., 1970. Geology of the Upper Segre and Valira Valleys, Central Pyrenees, Andorra/Spain. *Leidse Geologische Mededelingen* 45: 167–236.
- Hungr, O., Leroueil, S. and Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11: 167–194.
- Hürlimann, M., Moya, J., Abancó, C., Portilla, M., Chevalier, G., Baeza, C., Raïmat, C., Graf, C., Torreadella, J., Oller, P., Copons, R., and Mases, M., 2009. Peligrosidad de corrientes de derrubios a escala de cuenca vertiente en el Pirineo oriental. Primeros resultados del proyecto “Debris-Catch”. *VII Simposio Nacional de Taludes y Laderas Inestables*. Alonso, E. & Corominas, J. eds. Barcelona.
- Hürlimann, M., Abancó, C., Moya, J. and Vilajosana, I., 2014. Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain. *Landslides* 11: 939-953.
- Hürlimann, M., Lantada, N., González, M. and Pinyol, J., 2016. Susceptibility assessment of rainfall-triggered flows and slides in the central-eastern Pyrenees. In: International Symposium on Landslides. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice: Proceedings of*

- the 12th International Symposium on Landslides (Napoli, Italy, 12-19 June 2016)*. Napoli, CRC Press, 2016, pp. 1129-1136.
- Hürlimann, M., Palau R.M., Berenguer, M. and Pinyol, J., 2017. Analysis of the rainfall conditions inducing torrential activity in the Portainé catchment (Eastern Pyrenees, Spain). *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 19. EGU2017-12494
- ICC, 1996. *Atles Climàtic de Catalunya*. ICC, Generalitat de Catalunya. Barcelona, 42 pp.
- IGC, 2010. *Estudi de la torrentada de la nit del dia 11 al 12 de setembre de 2008 al barranc de Portainé (Pallars Sobirà)*. Código AP-019/10. Instituto Geológico de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona, España.
- IGC, 2013. *Avaluació de la dinàmica torrencial del torrent de Portainé*, 2 vol. Código AP-035/13. Instituto Geológico de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona, España.
- Luis-Fonseca, R., Raïmat, C., Hürlimann, M., Abancó, C., Moya, J. and Fernández, J., 2011. Debris-flow protection in recurrent areas of the Pyrenees. Experience of the VX systems from output results collected in the pioneer monitoring station in Spain. In: *Italian Journal of Engineering Geology and Environment. 5th International Conference on Debris-Flow Hazards, Mitigation, Mechanics, Prediction and Assessment*. Casa Editrice Università La Sapienza, 2011, pp 1063-1071.
- Marquès, M.A., 2000. Context geomorfològic dels aiguats del 10 de juny de 200 a la zona de Montserrat. In: *Associació Catalana de Meteorologia (Editors), VI Jornades de Meteorologia Eduard Fontserè, Aiguats del 10 de juny de 2000*, Barcelona, pp. 117-127.
- Medina, V., Bateman, A. and Hürlimann, M., 2008. FLATModel: a 2D finite volume code for debris-flow modelling. Application to events occurred in the Eastern Pyrenees. *Int. J. Sediment Research*, 23 (4), 348–360.
- Palau R.M., Hürlimann, M., Pinyol, J., Moya, J., Victoriano, A., Génova, M., and Puig-Polo, C., (2017). Recent debris-flows in the Portainé catchment (Eastern Pyrenees, Spain). Analysis of monitoring and field data focussing on the 2015 event. *Landslides*, doi:10.1007/s10346-017-0832-9.
- Pinyol, J., González, M. and Moysset, M., (2017). Preliminary estimation of Aubeta debris flow deposition and erosion volumes using LiDAR data [Online]. In: *JTC1 Workshop on Advances in Landslide Understanding*. <http://congress.cimne.com/jtc1/admin/files/fileabstract/A39.pdf>
- Raïmat, C., Riera, E., Graf, Ch., Luis-Fonseca, R., Fañanás, C. and Hürlimann, M., 2013. Experiencia de la aplicación de RAMMS para la modelización de flujo tras la aplicación de las soluciones flexibles VX en el barranc de Portainé. In: *Libro del VIII Simp. Nac. Sobre Taludes y Laderas Inestables*, Palma, 2013, pp 1131- 1144.
- Victoriano, A., Guinau, M., Furdada, G., Calvet, J., Cabré, M. and Moysset, M., 2016. Aplicación de datos LiDAR en el estudio de la dinámica torrencial y evolución de los barrancos de Portainé y Reguerals (Pirineos Centrales). In: *Durán Valsero, J.J., Montes Santiago, M., Robador Moreno, A. and Salazar Rincón, A. (Editors) Comprendiendo el relieve: del pasado al futuro*. Instituto Geológico y Minero de España, *Geología y Geofísica* 5: 447-455