

IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables  
Santander, Junio 2017  
E.Alonso, J. Corominas y M. Hürlimann (Eds.)  
CIMNE, Barcelona, 2017

## SISTEMA DE ALERTA PARA PROCESOS TORRENCIALES A ESCALA REGIONAL COMBINANDO MAPAS DE SUSCEPTIBILIDAD Y DATOS DEL RADAR METEOROLÓGICO

**Marcel HÜRLIMANN\***, **Marc BERENGUER†**, **Rosa PALAU\*,†**, **Daniel SEMPERE†**

\* Division of Geotechnical Engineering and Geosciences  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental,  
BarcelonaTECH UPC

† Centro de Investigación Aplicada en Hidrometeorología CRAHI  
BarcelonaTECH UPC

### RESUMEN

*Los procesos torrenciales como las corrientes de derrubios o flujos hiperconcentrados causan frecuentemente daños importantes e incluso muertos en zonas montañosas. Para afrontar este peligro, los sistemas de alerta son una herramienta muy útil en la mitigación de los impactos de estos procesos hidro-morfológicos. El presente estudio ha desarrollado, implementado y validado un sistema de alerta a escala regional que determina en tiempo real el nivel de alerta en cada subcuenca de una zona seleccionada. Los principales datos de entrada son un mapa de susceptibilidad y la situación meteorológica que se obtiene mediante el radar. Mediante la aplicación de la técnica de lógica difusa y funciones de pertenencia, el mapa de susceptibilidad y el campo de lluvia se determina en cada subcuenca una de tres posibles clases, y finalmente con una matriz de alerta se calcula uno de los tres niveles de alerta (baja, media o alta). Los resultados del sistema de alerta y su validación han sido muy positivos y demuestran la gran utilidad de estas herramientas.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos torrenciales como las corrientes de derrubios o flujos hiperconcentrados son fenómenos naturales comunes en la mayoría de las zonas montañosas del mundo y causan pérdidas económicas importantes y humanas (p.ej. Petley 2012). La ocurrencia de estos flujos en los Pirineos ha sido menos estudiada que en otras regiones, pero los datos recientes

sobre su impacto han demostrado su importancia (p.ej. Alcoverro et al. 1999; Portilla et al. 2010).

Los sistemas de alerta temprana son herramientas muy útiles para la mitigación del riesgo reduciendo las consecuencias y finalmente las pérdidas económicas (United Nations Environment Programme 2012). La mayoría de las publicaciones recientes sobre sistemas de alerta temprana incluyen umbrales de lluvia y están relacionados con deslizamientos superficiales y/o corrientes de derrubios (p.ej. Aleotti 2004; Jakob et al. 2006; Baum y Godt 2010; Brunetti et al. 2010). Sin embargo, también hay algunos sistemas de alerta temprana basados en la humedad del suelo (Baum y Godt 2010; Greco et al. 2010). Los sistemas de alerta temprana se deberían basar en: i) la información sobre la susceptibilidad ante procesos torrenciales en la zona de estudio, y ii) mediciones y pronósticos de lluvia (p.ej. Hong y Adler 2007). La evaluación de la susceptibilidad se realiza generalmente relacionando la probabilidad de ocurrencia del proceso con una serie de variables que controlan su formación para identificar las ubicaciones más propensas a eventos futuros. Por otra parte, la medición de la lluvia se tiene que analizar y evaluar mediante umbrales que determinan la probabilidad de desencadenar procesos torrenciales.

El objetivo principal de este estudio es el desarrollo y la validación de un sistema de alerta temprana para procesos torrenciales a escala regional. La herramienta final deberá cumplir las siguientes condiciones: i) el tiempo computacional debe ser razonable para obtener un sistema operativo en tiempo real, ii) el resultado debe ser simple utilizando una clasificación de tipo semafórico (es decir tres clases de alertas: baja, media y alta), y iii) la herramienta debe tener una estructura flexible para poder ser aplicada fácilmente en otras zonas de estudio. Hay que añadir que esta comunicación es un resumen adaptado de la publicación Berenguer et al. (2015).

## **2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

El estudio se ha llevado a cabo en dos zonas de los Pirineos Centrales-Orientales (Figura 1) sobre un área que abarca un total de unos 2750 km<sup>2</sup>. Las zonas están situadas en el Pirineo Axial y Pre-Pirineo, respectivamente, y las elevaciones de las zonas de estudio oscilan entre 400 y 3100 m snm.

Las condiciones climáticas en estas zonas se ven afectadas por tres factores: i) los vientos del oeste provenientes del Atlántico Norte, ii) la proximidad del Mar Mediterráneo, y iii) los efectos orográficos de los Pirineos. Hay dos tipos comunes de precipitaciones que desencadenan flujos torrenciales en esta zona: por una parte, las lluvias de corta duración y alta intensidad relacionadas con tormentas convectivas de verano, y por otra parte las lluvias de intensidad moderada y duración más larga durante el período otoño / invierno (Hürlimann et al. 2003).

En este estudio también se utilizan datos de la cuenca instrumentada El Rebaixader (Hürlimann et al. 2014). Es una cuenca torrencial con una auscultación muy sofisticada que se instaló el año 2009 y que sigue estando operativa en la actualidad. La validación del sistema de alerta propuesto se ha realizado en esta cuenca y también en la cuenca Portainé. Las ubicaciones de estas dos cuencas están indicadas en Figura 1.

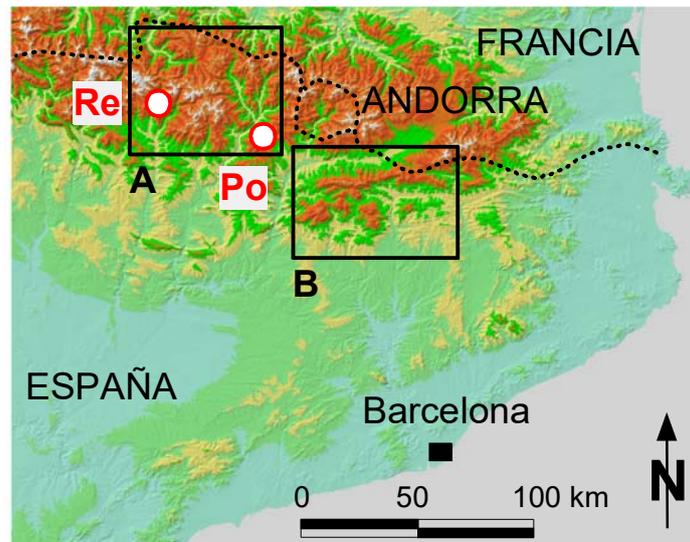


Figura 1. Situación general de la zona de estudio en el Pirineo Central-Oriental. Los rectángulos negros indican las zonas de estudio A y B y los puntos muestran las dos subcuencas seleccionadas para la validación del sistema de alerta (Re: El Rebaixader y Po: Portainé).

### 3. METODOLOGÍA APLICADA

La metodología se puede dividir en dos partes principales (Figura 2). Por un lado, el análisis de susceptibilidad (con factores principalmente estáticos) y por otro lado el análisis de las lluvias desencadenantes (factores dinámicos).

Las dos zonas de estudio (Figura 1) se han dividido en subcuencas de primer orden utilizando el método de Strahler y un modelo digital de elevación (MDE) con un tamaño de celda de 5 metros. Esta subdivisión ha dado lugar a un total de 896 subcuencas con áreas de 0.5 a 13 km<sup>2</sup>.

Los datos del mapa de susceptibilidad se superponen en tiempo real con la situación meteorológica que observa el radar, y se calcula en tiempo real el nivel de alerta en cada subcuenca mediante una matriz de alerta (Figura 2).

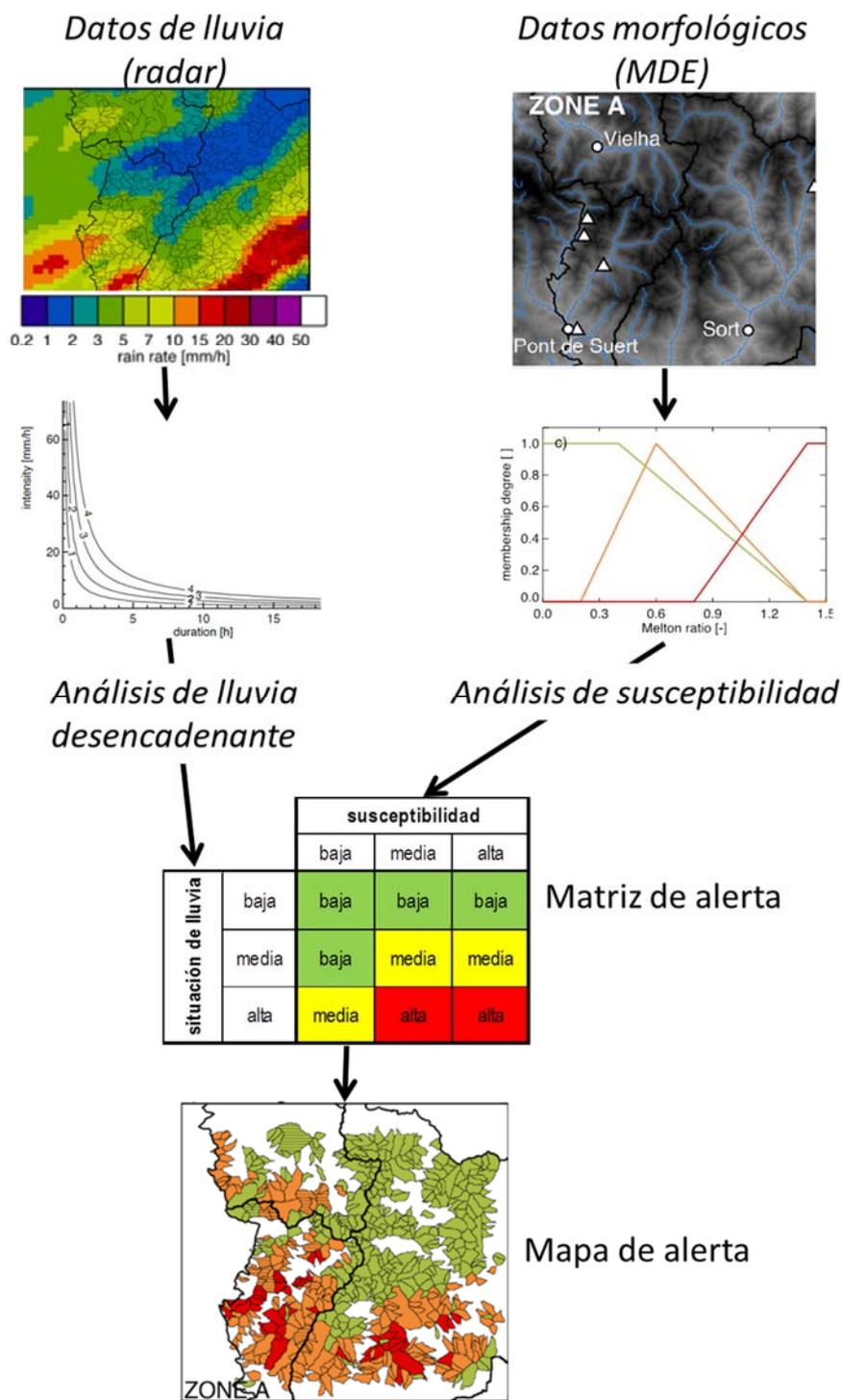


Figura 2. Metodología general del sistema de alerta elaborado en este estudio.

### 3.1. Análisis de susceptibilidad

En el presente estudio, el análisis de susceptibilidad se centra solamente en parámetros morfológicos de las subcuencas definidas anteriormente. Chevalier (2013) inventarió 342 corrientes de derrubios e investigó mediante herramientas estadísticas la susceptibilidad de las subcuencas incluyendo un total de 18 parámetros morfológicos. En el presente estudio se han seleccionado los siguientes cuatro parámetros, ya que son los más significativos de cara a evaluar la susceptibilidad de cada subcuenca: Melton ratio, pendiente media, orientación media y altura máxima.

Mediante la técnica llamada lógica difusa (“fuzzy logic”) y funciones de pertenencia (“membership functions”) se han definido una clase de susceptibilidad para cada subcuenca utilizando los cuatro parámetros morfológicos definidos anteriormente. Un ejemplo de funciones de pertenencia se ilustra en la Figura 3 para el Melton ratio que incluye la diferencia entre elevación máxima y mínima de la cuenca y su área (Wilford et al. 2004).

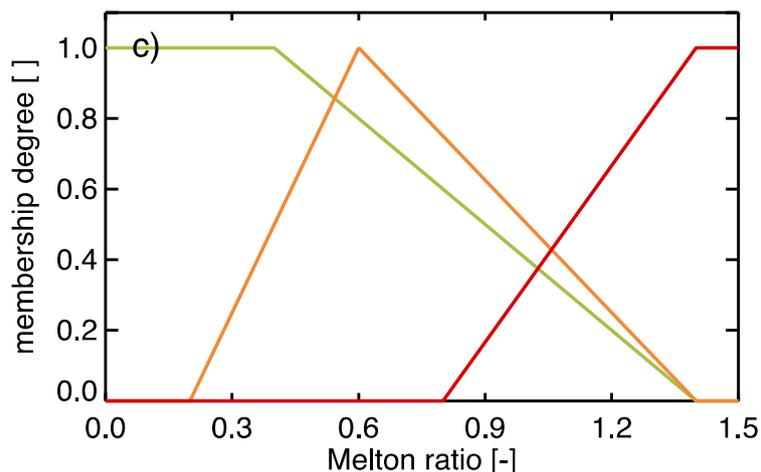


Figura 3. Ejemplo de una función de pertenencia del parámetro morfológico “Melton Ratio” utilizada para el análisis de susceptibilidad. Las líneas verde, naranja y roja corresponden a las clases de susceptibilidad baja, media y alta.

### 3.1. Análisis de la lluvia crítica

Las lluvias críticas que pueden desencadenar procesos torrenciales, corrientes de derrubios o deslizamientos, se definen normalmente con umbrales de lluvia (Guzzetti et al. 2008). Las técnicas para establecer estos umbrales se dividen en dos tipos principales: empíricas y físicas. En la Figura 4 se muestran un ejemplo de umbrales de cada uno de estos dos tipos.

En el presente estudio se ha escogido un umbral que está basado en un modelo físico de

infiltración de lluvia en el suelo (Papa et al. 2013). Este modelo determina finalmente el porcentaje de la superficie de la subcuenca en condiciones inestables. Estos porcentajes y las correspondientes funciones de pertenencia clasifican la situación de lluvia en cada subcuenca distinguiendo entre tres diferentes clases: baja, media y alta (Figura 2).

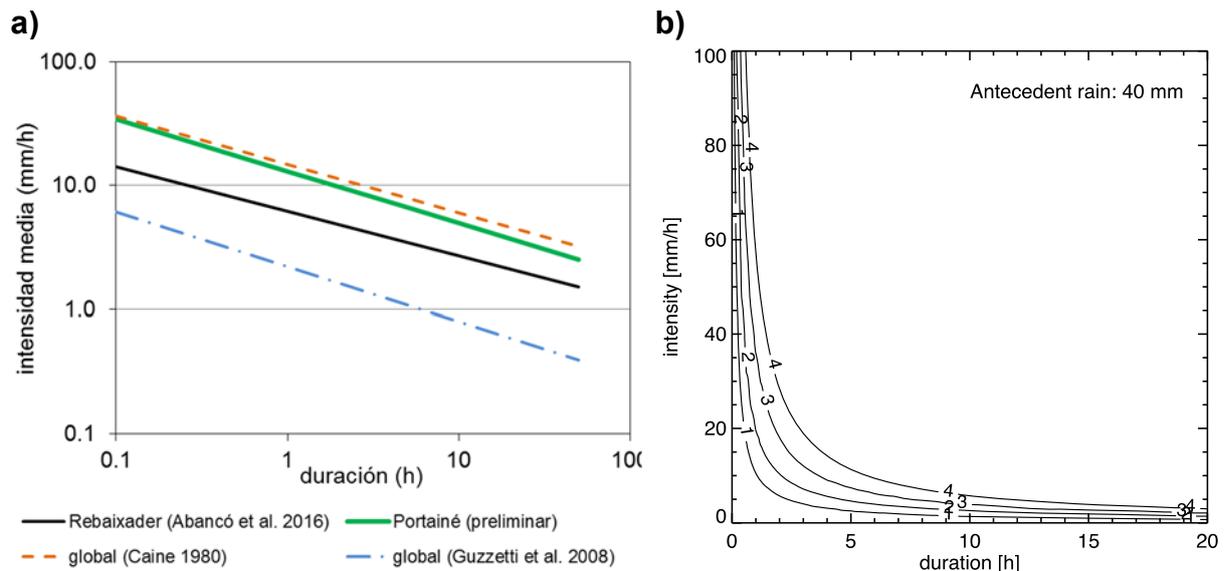


Figura 4. Umbrales de lluvia crítica para desencadenar procesos torrenciales, corrientes de derrubios o deslizamientos superficiales utilizando la relación duración - intensidad. a) Umbrales definidos mediante métodos empíricos (modificado de Hürlimann et al. 2017), y b) umbrales definidos mediante el modelo físico de Papa et al. (2013) que muestran el porcentaje del área inestable en la subcuenca con una lluvia antecedente de 40 mm.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis de susceptibilidad

En la Figura 5 se puede observar el resultado del análisis de susceptibilidad para la zona A. Los resultados en las dos zonas (A y B) muestran que aproximadamente el 44 % (463 de las subcuencas) tienen una susceptibilidad baja. Solamente en 4 de estas (463 subcuencas) se han observado rasgos geomorfológicos que indican una actividad de corrientes de derrubios. Por el otro lado, casi la totalidad de subcuencas con índices de actividad tienen una clasificación de susceptibilidad media o alta.

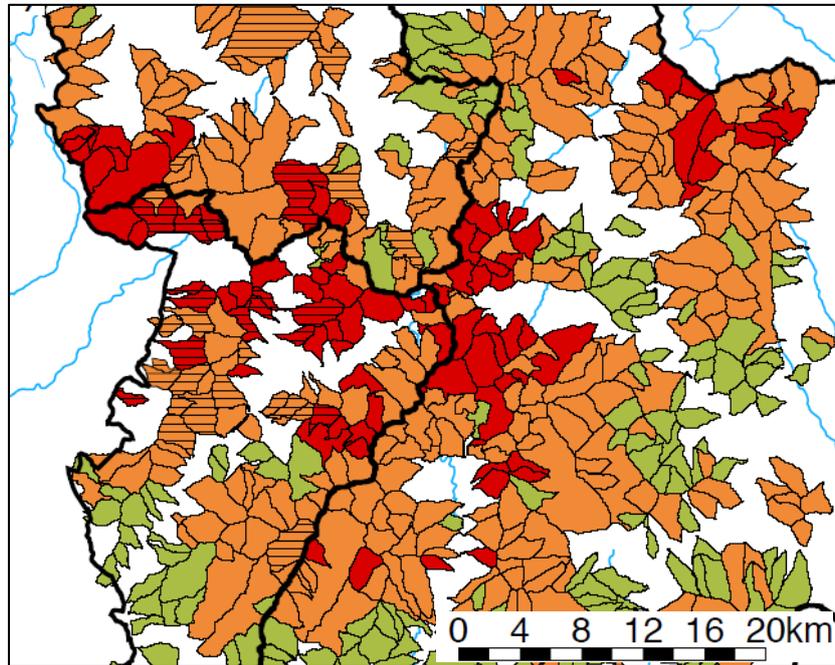


Figura 5. Mapa de susceptibilidad de la zona A. Cada subcuenca está clasificada en una de las tres clases de susceptibilidad: baja (verde), media (naranja) y alta (rojo). Las subcuencas que incluyen una o varias corrientes de derrubios en el inventario están indicadas con líneas horizontales. Modificado de Berenguer et al. (2015).

#### 4.2. Implementación del sistema de alerta

Para la implementación del sistema de alerta propuesto en este estudio, se han utilizado el mapa de susceptibilidad como factor estático y los datos de lluvia como factor dinámico. Finalmente, se ha escogido la lluvia acumulada durante 30 min en cada subcuenca como dato de entrada de este factor dinámico.

En la Figura 6, se muestra un ejemplo del campo de lluvia para el día 23 de julio de 2010 a la 1:30 UTC. La primera imagen (Figura 6a) indica la lluvia acumulada durante los 30 minutos anteriores observada en el radar meteorológico. La segunda imagen (Figura 6b) muestra la clasificación de la situación de lluvia en cada subcuenca según las tres clases. La tercera imagen (Figura 6c) presenta el resultado final del sistema de alerta indicando el nivel de alerta en cada subcuenca (utilizando las tres clases: baja, media y alta).

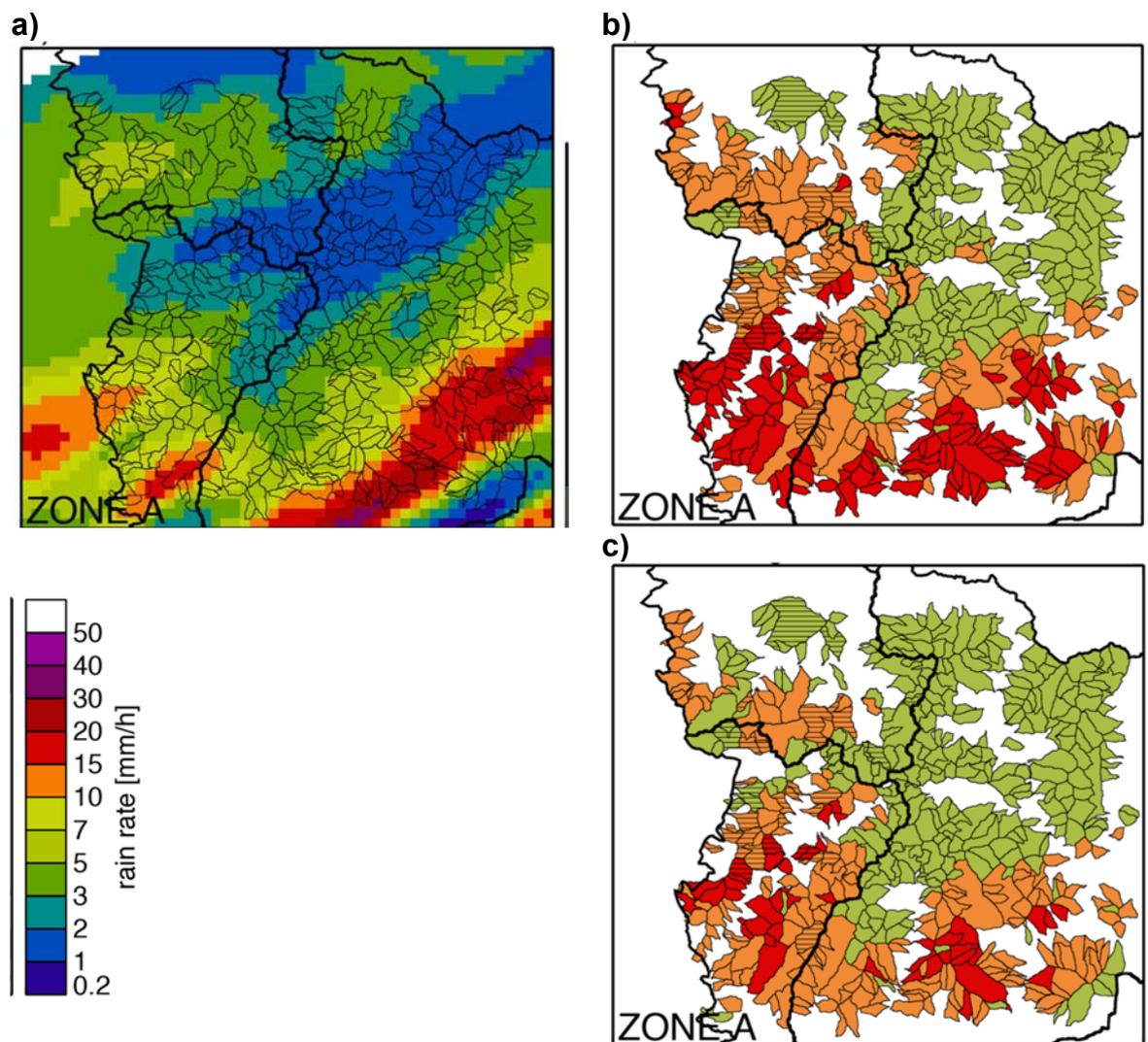


Figura 6. Ejemplo del sistema de alerta para el día 23 de julio de 2010 a la 1:30 UTC. a) Situación de lluvia observada mediante el radar meteorológico. b) Mapa de la situación de lluvia en cada subcuenca clasificada en una de las tres clases baja (verde), media (naranja) y alta (roja) mediante el modelo físico y el porcentaje del área inestable. c) Mapa de la situación de alerta indicando el nivel de alerta en cada subcuenca (utilizando los mismos colores y niveles que en b). Modificado de Berenguer et al. (2015).

### 4.3. Validación del sistema de alerta temprana

En este apartado se resume la validación realizada en las dos subcuencas, Rebaixader y Portainé, situadas en la zona A (ver Figura 1). La primera subcuenca está auscultada mediante múltiples sensores y ha sufrido frecuentes eventos de procesos torrenciales durante los últimos años (Hürlimann et al. 2014).

En la Figura 7 se muestran los tres eventos seleccionados para la validación del sistema de alerta en la subcuenca del Rebaixader. Hemos comparado tres registros diferentes que muestran las medidas de la lluvia para esta subcuenca: 1) el radar meteorológico, 2) el pluviómetro llamado “Senet” que forma parte del sistema de auscultación y que está instalado dentro de la cuenca de drenaje, y 3) el pluviómetro llamado “Barruera” que está situado a 6 km del Rebaixader. Los resultados son muy prometedores, ya que el sistema de alerta ha clasificado correctamente los niveles de alerta en cada uno de los tres eventos seleccionados. En los dos eventos con procesos torrenciales, el sistema ha llegado a indicar el nivel alto, sin embargo, en el segundo evento (que era un flujo hiperconcentrado) lo hizo con un retraso de varias horas. El día en que no se desencadenó ningún proceso torrencial, pero en el que se registró una lluvia acumulada de aproximadamente 50 mm, el sistema de alerta mantuvo correctamente el nivel bajo durante toda la duración.

La validación en Portainé ha sido menos exacta, ya que en su momento carecía de un sistema de auscultación. Tampoco hay registro de lluvia de un pluviómetro situado en la subcuenca. Sin embargo, hay la evidencia de una corriente de derrubios que ocurrió en esta subcuenca durante la noche del 22 al 23 de julio de 2010. El sistema de alerta cambió de nivel bajo a nivel medio casi a medianoche, pero no subió al nivel alto (Figura 7).

## **5. CONCLUSIONES**

Los sistemas de alerta son una herramienta muy útil en la mitigación de los impactos de procesos torrenciales como corrientes de derrubios o flujos hiperconcentrados. La metodología presentada en esta contribución muestra un sistema de alerta a escala regional que determina en tiempo real el nivel de alerta en cada subcuenca de una zona seleccionada. Los datos de entrada necesarios son un mapa de susceptibilidad que se ha elaborado en este estudio mediante factores morfológicos, y la situación meteorológica que se obtiene mediante el radar. La aplicación de la técnica de lógica difusa y funciones de pertenencia divide el mapa de susceptibilidad y el campo de lluvia en tres clases en cada subcuenca. Finalmente, se determina uno de los tres niveles de alerta (baja, media o alta) en cada subcuenca mediante la matriz de alerta.

El sistema de alerta ha sido implementado con éxito en dos zonas del Pirineo y su validación en dos subcuencas específicas ha sido muy positiva. Una futura línea de trabajo sería la incorporación de la previsión del campo de lluvia con el fin de crear una herramienta más potente y predecir la posibilidad de procesos torrenciales con un adelanto de tiempo de unas horas.

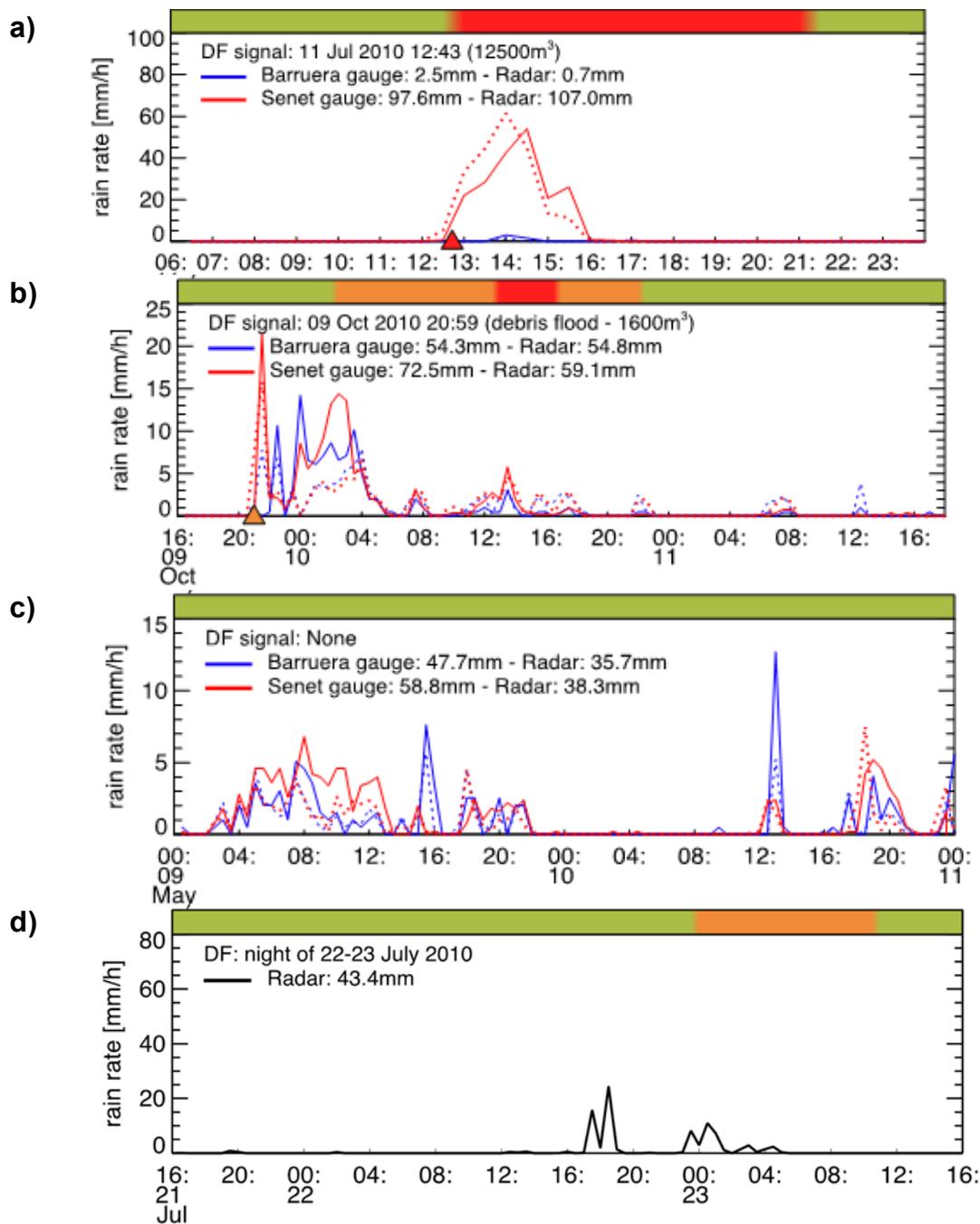


Figura 7. Validación del sistema de alerta para flujos torrenciales ocurridos en las subcuena del Rebaixader (a, b y c) y de Portainé (d). La barra superior de color indica el nivel de alerta. Los triángulos en el eje inferior muestran el momento de la detección de los flujos torrenciales por el sistema de auscultación. Las líneas discontinuas indican la lluvia medida mediante el radar meteorológico. Modificado de Berenguer et al. (2015).

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado por los siguientes proyectos: IMPRINTS (FP7-ENV-2008-1 226555), ProFEWS (CGL2010-15892) y DEBRISTART (CGL2011-23300). También se da las gracias al Servei Meteorològic de Catalunya por facilitar datos de radar y de estaciones meteorológicas.

## REFERENCIAS

- Abancó C, Moya J, Berenguer M (2016) Critical rainfall conditions for the initiation of torrential flows. Results from the Rebaixader catchment (Central Pyrenees). *J Hydrol* 541:218–229. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.01.019
- Alcoverro J, Corominas J, Gomez M (1999) The Barranco de Arás flood of 7 August 1996 (Biescas, Central Pyrenees, Spain). *Eng Geol* 51:237–255.
- Aleotti P (2004) A warning system for rainfall-induced shallow failures. *Eng Geol* 73:247–265.
- Baum RL, Godt JW (2010) Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides* 7:259–272.
- Berenguer, M., Sempere-Torres, D., Hürlimann, M., 2015. Debris-flow forecasting at regional scale by combining susceptibility mapping and radar rainfall. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 587–602. doi:10.5194/nhess-15-587-2015
- Brunetti MT, Peruccacci S, Rossi M, et al (2010) Rainfall thresholds for the possible occurrence of landslides in Italy. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:447–458. doi: 10.5194/nhess-10-447-2010
- Caine N (1980) The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geogr Ann* 62A:23–27.
- Chevalier G., 2013. Assessing debris-flow hazard focusing on statistical morpho-fluvial susceptibility models and magnitude-frequency relationships. UPC BarcelonaTECH, PhD-thesis. 351pp.
- Greco R, Guida A, Damiano E, Olivares L (2010) Soil water content and suction monitoring in model slopes for shallow flowslides early warning applications. *Phys Chem Earth* 35:127–136.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5, 3–17.
- Hong Y, Adler RF (2007) Towards an early-warning system for global landslides triggered by rainfall and earthquake. *Int J Remote Sens* 28:3713–3719. doi:10.1080/01431160701311242

- Hürlimann M, Corominas J, Moya J, Copons R (2003) Debris-flow events in the Eastern Pyrenees. Preliminary study on initiation and propagation. In: Rickenmann D, Chen C (eds) 3rd Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation. Millpress, Davos, pp 115–126
- Hürlimann M, Abancó C, Moya J, Vilajosana I (2014) Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain. *Landslides* 11:939–953.
- Hürlimann, M., Palau, MR., Berenguer, M., 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.
- Jakob M, Holm K, Lange O, Schwab JW (2006) Hydrometeorological thresholds for landslide initiation and forest operation shutdowns on the north coast of British Columbia. *Landslides* 3:228–238.
- Papa, M.N., Medina, V., Ciervo, F., Bateman, A., 2013. Derivation of critical rainfall thresholds for shallow landslides as a tool for debris flow early warning systems. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 4095–4107.
- Petley, D., 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology* 40, 927–930.
- Portilla M, Chevalier G, Hürlimann M (2010) Description and analysis of major mass movements occurred during 2008 in the Eastern Pyrenees. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:1635–1645. doi:10.5194/nhess-10-1635-2010
- United Nations Environment Programme (2012) *Early Warning Systems: A State of the Art Analysis and Future Directions*. Division of Early Warning and Assessment, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi
- Wilford, D.J., Sakals, M.E., Innes, J.L., Sidle, R.C., Bergerud, W.A., 2004. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. *Landslides* 1, 61–66.