



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

**Análisis de la distribución temporal
de lluvias umbral y de su capacidad
predictiva de flujos torrenciales.
Aplicación en el barranco del
Rebaixader (Lleida, Pirineos)**

Treball realitzat per:
Pablo Heras Mateo

Dirigit per:
Marcel Hürlimann

Grau en:
Enginyeria Civil

Barcelona, **22 de septiembre de 2016**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

TREBALL FINAL DE GRAU

Análisis de la distribución temporal de lluvias umbral y de su capacidad predictiva de flujos torrenciales.
Aplicación en el barranco del Rebaixader (Lleida, Pirineos)

Resumen

Este trabajo se enmarca en los estudios que desde hace años se realizan en el Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental en el ámbito del desarrollo de sistemas de alerta temprana (EWS) y de alarma (AS) de fenómenos torrenciales que originan flujos de derrubios (debris flow) y que pueden comportar riesgos para vidas humanas o infraestructuras.

Después de resumir las características de este tipo de movimientos en masa, de la zona concreta del trabajo (barranco del Rebaixader, en Senet) y de comentar diferentes antecedentes de episodios catastróficos causados fenómenos torrenciales en esta zona del Pirineo de Lleida, el trabajo se centra en el análisis de los datos de 2015 proporcionados por los pluviómetros instalados en el barranco. Como también se conocen los eventos torrenciales producidos realmente, se estudian sistemas establecer un sistema EWS o AS efectivo que minimice las falsas alarmas.

Abstract

This Bachelor Thesis is part of the studies that has been researched for years in the Civil and Environmental Engineering Department, in particular, in the field of development of early warning systems (EWS) and alarm systems (AS) for torrential phenomena that causes debris flows and generate risks to human lives and infrastructures.

First, the characteristics of this type of mass movements in the particular area (Barranc of Rebaixader in Senet) are explained. In addition, historical facts that have greatly affected some infrastructures in the past are exposed to the rising awareness of these kinds of geological occurrences. Then, the analysis of the data provided by the rain gauges in 2015 is done using international and local thresholds.

A proposal for an alarm system is done with the objective of minimizing false alarms.

Agradecimientos

A Carles Fañanás Aguilera, por la documentación y los comentarios aportados.

A mi hermana María, por su apoyo en la maquetación del documento.

Al director del trabajo, Marcel Hürlimann por su atención e interés.

I would like to thank Lily Bee, from the other side of the world (LA), for giving me a hand with the English writing.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 5 |
| 2. MOVIMIENTOS DE MASA..... | 6 |
| 2.1 Clasificación de los movimientos de masa..... | 6 |
| 2.2 Caracterización de los flujos de derrubios y factores que los condicionan..... | 8 |
| 2.2.1 Morfología..... | 8 |
| 2.2.2 Formación..... | 11 |
| 2.3. Evento de lluvia y efectos sobre el terreno..... | 12 |
| 3. DESCRIPCIÓN Y ZONA DE ESTUDIO | 14 |
| 3.1. Situación geográfica..... | 14 |
| 3.2. Descripción geológica e historia glaciar..... | 15 |
| 3.3. Descripción climática y meteorología..... | 17 |
| 3.4. Descripción del medio natural..... | 17 |
| 4. SÍNTESIS DE LOS ANTECEDENTES..... | 18 |
| 4.1 Historia..... | 18 |
| 4.2 Corrección..... | 20 |
| 4.3 Corrección del barranco de Senet..... | 21 |
| 5. GESTIÓN DE LOS DATOS A ANALIZAR..... | 23 |
| 5.1 Sistema..... | 23 |
| 5.2 Antecedentes de datos..... | 25 |
| 5.3 Umbrales..... | 26 |
| 5.3.1 Métodos de obtención de umbrales..... | 26 |
| 5.3.2 Umbrales internacionales..... | 28 |
| 6. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LLUVIA Y LOS UMBRALES OBTENIDOS..... | 30 |
| 6.1 Datos..... | 30 |
| 6.2 Avenida 2015..... | 36 |
| 6.3 Aplicación de umbrales..... | 38 |
| 6.4 Sistema de alarma..... | 39 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 42 |
| 8. BIBLIOGRAFÍA..... | 43 |
| ANEJO: GRÁFICOS DE LOS EVENTOS DE LLUVIA..... | 44 |

1. INTRODUCCIÓN

Las avenidas torrenciales son, en ocasiones, un riesgo para las infraestructuras y la vida de las personas. Las avenidas dependen de la cantidad de sedimento disponible en el torrente y de la intensidad y de la distribución temporal de la lluvia. El objetivo de este trabajo es determinar un valor límite para el cual la probabilidad de que se produzca una avenida sea la mayor posible en un barranco concreto del Pirineo de Lleida: el del Rebaixader, en Senet. Este barranco se halla instrumentado tanto con pluviómetros como con geófonos.

La dificultad reside en determinar dicho umbral garantizando que se produzcan las mínimas falsas alarmas posibles. Como el establecimiento de dicho umbral se basa en datos pasados, su eficacia está vinculada a que se produzcan situaciones parecidas a las anteriormente sucedidas; teniendo bastantes dificultades en representar casos muy dispares a los sucedidos con anterioridad.

En 2009 se instaló en el torrente del Rebaixader un sistema de auscultación y medición muy precisa de precipitación (cada 5 minutos). Desde entonces se observaron 25 avenidas torrenciales mientras que se dieron un total de 142 falsas alarmas; es decir, avisos de posible avenida que no llegaron a desencadenarla. El objetivo de esta instalación es caracterizar los episodios de lluvia que dieron lugar a una avenida y compararlos con los que no la generaron. También se quiere definir el umbral límite por el cual debido a una intensidad de lluvia durante un tiempo concreto se produce una avenida.

Los antecedentes de lluvia no son significativos en el caso de diferenciar entre Trig y NonTrig (avenida y falsa alarma)

El objetivo final del trabajo es saber cuál es el umbral a utilizar en nuestra zona de estudio.

El efecto de un episodio de lluvia produce movimientos de tierra y flujos de derrubios poco profundos (2 o 3 metros) de forma indirecta. La lluvia influye en la estabilidad del terreno de forma indirecta ya que ésta depende del efecto del agua en los poros de las rocas y de la interacción con la capa superior de tierra. Para ello se usan términos como lluvia crítica para definir el margen entre suceso o no suceso de una avenida torrencial.

El objeto de este trabajo es contribuir a determinar las condiciones de lluvia crítica que generan el inicio de una avenida torrencial para poder implementar sistemas de alerta temprana (EWS) y de alarma (AS). Este tipo de sistemas tienen particular interés en casos como el del barranco estudiado en los cuales tanto por la tipología de los fenómenos (se trata de fenómenos de erosión de origen geológico y no antrópico) como por los riesgos previstos (no afectan a viviendas o infraestructuras principales) resulta inviable plantearse medidas de corrección efectivas.

2. MOVIMIENTOS DE MASA

Los movimientos de tierra son desplazamientos de la masa de suelo o roca causados generalmente por exceso de agua en el terreno. Dicha agua, proviene de episodios lluviosos de intensidades y duraciones muy variables. Las avenidas torrenciales (tanto debris flows como debris floods) están formadas por una mezcla de agua y materiales sólidos de distintos tamaños.

Dichas avenidas se producen en mayor medida cuando se dan episodios de precipitación intensa y corta duración. Esto genera un aumento de agua en el terreno y una predominancia de las fuerzas desestabilizadoras frente a las estabilizadoras porque se reduce la resistencia del suelo al deslizamiento.

Estos movimientos, debido a la gran magnitud de masa desplazada y a la capacidad erosiva de dichos sedimentos, son de gran riesgo geológico, social y económico. Pueden generar catástrofes y por ello es muy importante caracterizarlos y en la medida de lo posible preverlos. La selección apropiada de las medidas de contención y estabilización de los taludes y laderas depende en gran medida del conocimiento preciso del tipo de mecanismo actuante, su velocidad y dimensiones. Una incorrecta apreciación del mecanismo de rotura, puede tener como consecuencia que las soluciones adoptadas para estabilizarla sean ineficaces y a veces, contraproducentes.

Los episodios de lluvia son el fenómeno desencadenante más común y en el estudio de ella nos centramos en este trabajo.

2.1. Clasificación de los movimientos de masa

Existen distintas clasificaciones de movimientos de masas, todas ellas basadas en el mecanismo de rotura y en la naturaleza de los materiales involucrados. A continuación, se describen brevemente y se ilustran los diferentes tipos siguiendo la clasificación planteada por Corominas y García Yagüe (1997), que está basada en la de Varnes (1978), y la de Hutchinson (1988) que son las más aceptadas por la comunidad internacional.

Los principales tipos de movimientos de masa son: desprendimientos, vuelcos, deslizamientos, expansiones laterales y flujos.

Desprendimientos (falls)

Se origina por el despegue de una masa de suelo o roca de una pared empinada o acantilado. Es un movimiento muy rápido. Inicialmente se produce caída libre y posteriormente rebote o rodadura.

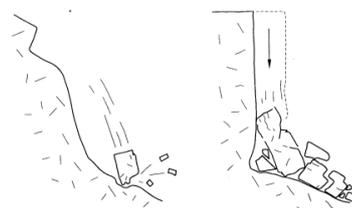


Figura 1 Mecanismo de los desprendimientos y colapsos (Fuente: Corominas et al, 1997)

Vuelcos (topples)

Se trata de una rotación hacia delante y hacia el exterior de la ladera, de una masa de suelo o roca alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad. La fuerza desestabilizadora es la gravedad, así como el empuje ejercido por el terreno adyacente o los fluidos (agua o hielo) en las grietas.

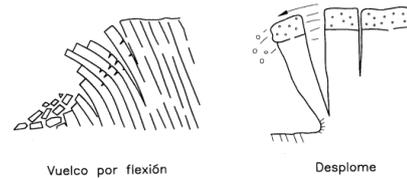


Figura 2 Mecanismo y tipos de vuelco (Fuente: Corominas et al., 1997)

Deslizamientos (slides)

Es un desplazamiento de ladera que tiene lugar sobre una o más superficies de rotura relativamente delgadas con intensa deformación de cizalla. Un elemento característico de este tipo de rotura es la presencia de superficies de rotura definidas. Existen de tipo rotacionales y de tipo traslacionales.

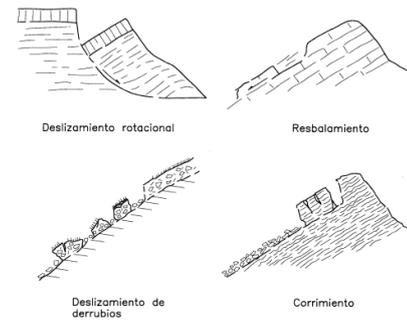


Figura 3 Tipos de deslizamiento (Fuente: Corominas et al., 1997)

Expansiones laterales (lateral spreads)

Existen dos tipos: La fracturación y extensión de material compacto por licuefacción del material subyacente (característico de sedimentos arcillosos; arcillas sensibles) y movimientos que afectan al conjunto de formación sin que se identifiquen zonas basales de cizalla. Suelen afectar a litologías blandas y deformables.

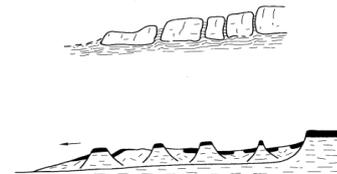


Figura 4 Expansiones laterales (Fuente: Corominas et al. 1997)

Flujos (flows)

Son movimientos continuos en los que las superficies de cizalla tienen corta vida. La masa movida no conserva la forma en su movimiento descendente debido a que su distribución de velocidades se parece a la de un fluido viscoso. Habitualmente la masa adopta morfologías lobuladas. Existe una gradación desde los deslizamientos hasta los flujos dependiendo del contenido de agua, movilidad y evolución del movimiento. Un deslizamiento de derrubios puede convertirse en una corriente o avalancha a medida que el material pierde cohesión, incorpora agua y discurre por pendientes más empinadas.

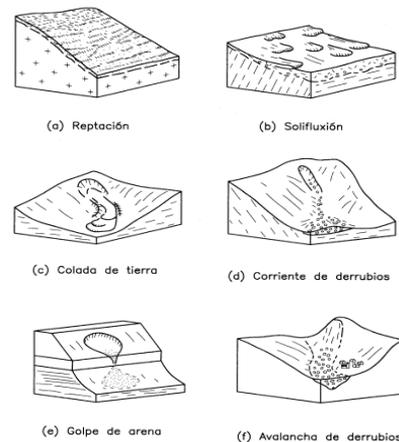


Figura 5 Tipos de flujos (Fuente: Corominas et al., 1997)

Los diferentes tipos de movimientos en masa aparecen en la tabla 1, que es una versión abreviada de la clasificación de Varnes.

Tabla 1 Clasificación abreviada de los movimientos en masa (Fuente: Varnes, 1978)

| TYPE OF MOVEMENT | | TYPE OF MATERIAL | | |
|------------------|---------------|--|--------------------------|-------------------------|
| | | BEDROCK | ENGINEERING SOILS | |
| | | | Predominantly coarse | Predominantly fine |
| FALLS | | Rock fall | Debris fall | Earth fall |
| TOPPLES | | Rock topple | Debris topple | Earth topple |
| SLIDES | ROTACIONAL | Rock slide | Debris slide | Earth slide |
| | TRANSLACIONAL | | | |
| LATERAL SPREADS | | Rock spread | Debris spread | Earth spread |
| FLOWS | | Rock flow (deep creep) | Debris flow (soil creep) | Earth flow (soil creep) |
| COMPLEX | | Combination of two or more principal types of movement | | |

2.2. Caracterización de los flujos de derrubios y factores que los condicionan

2.2.1 Morfología

Los flujos de derrubios, en inglés debris flow, son los movimientos de masa sobre los cuales trataremos en este estudio. Son movimientos continuos de masa donde las partículas que lo forman no se mueven ni a la misma velocidad ni en trayectorias paralelas entre ellas. Si el material transportado es mayormente cohesivo el transporte adopta formas lobulares y si es granular se esparce o forma conos de deyección.

A lo largo de los años muchos investigadores han estudiado este tipo de movimientos en masa, intermedios entre los deslizamientos y las avenidas fluviales y con características mecánicas diferentes. Son movimientos rápidos de un cuerpo compuesto por sólidos granulares, agua y aire que se mueve como un flujo viscoso.

La definición más precisa hasta el momento es la siguiente; publicada por Iverson en 1997:

“Una corriente de derrubios es una masa de sedimento poco seleccionado, en agitación y saturado en agua, que progresa rápidamente pendiente abajo a consecuencia de la gravedad; la masa –finita- de sedimento saturado mantiene una superficie libre”.

Según este autor, las fuerzas “sólidas” y las “fluidas” intervienen en el movimiento distinguiéndolo de avalanchas rocosas, donde predominan las fuerzas físicas, y avenidas fluviales, donde domina física de las corrientes de agua.

Los materiales más favorables para la formación de corrientes de derrubios son los depósitos coluviales, suelos de meteorización (regolitos), depósitos glaciares, fluviales y volcánicos.

Existen tres tipos distintos de flujos: flujo de tierra, flujo de derrubios y flujo de rocas.

El primer tipo se caracteriza por tener deformaciones plásticas no muy rápidas. Suele darse en barrancos de baja pendiente donde predominan los materiales cohesivos con alto contenido en limos y arcillas. Dan generalmente lugar a depósitos alargados y lobulares.

Los flujos de derrubios son movimientos rápidos de materiales gruesos (arenas, gravas y bloques). Generalmente formados por materiales detríticos, se caracterizan por tener poca cohesión y descender las pendientes canalizados por depresiones en el terreno.

Los últimos se desplazan a gran velocidad.

Las corrientes de derrubios, por lo general, tienen mucha más longitud que anchura. Esta proporción puede llegar a ser de 10:1 o ser incluso mayor. En ellas se distinguen tres zonas muy diferenciadas: zona de salida o nacimiento, zona de canal (esencialmente de tránsito) y zona de acumulación o cono de deyección.



Figura 6 Zonificación de una corriente de derrubios: Barranc del Rebaixader (1. Zona de nacimiento 2. Canal principal 3. Zona de acumulación) (Fuente propia)

Zona de nacimiento: Suele ser escarpada y con poca vegetación. Abundan los suelos detríticos o existe un suelo de meteorización del sustrato. La pendiente es elevada (entre 25 y 40º)



Figura 7 Aspecto de la zona de nacimiento del Barranc del Rebaixader (Fuente propia)

Canal principal: Suele seguir barrancos preexistentes pero también puede avanzar sin confinamiento. Los diques laterales limitan el canal transversalmente al barranco. La parte alta del canal no tiene depósitos mientras que la parte baja es completamente al contrario ya que es donde empieza la zona de acumulación.



Figura 8 Detalle del canal principal del barranco del Rebaixader (Fuente propia)



Figura 9 Zona de acumulación de la corriente de derrubios (debris flow) del barranco del Rebaixader (Fuente propia)

Zona de acumulación:

Depósito del material. El flujo deja de estar confinado por el canal y los diques laterales y coincide con una disminución del pendiente del barranco. En este tramo, cuando la velocidad es suficientemente baja, el proceso de erosión desaparece y los materiales se sedimentan.

El material de las corrientes de derrubios se asemeja al propio de la zona de salida y muestra un amplio abanico de tamaños de grano que van desde el tamaño arcilla a cantos y bloques del orden del metro. La gran mayoría de corrientes de derrubios se movilizan en primera instancia a partir de deslizamientos de masas de sedimentos cargadas

de agua. Cuando tiene lugar el deslizamiento, la mezcla de sedimento y agua se transforma en un flujo que, después, durante la deposición, se transforma de nuevo en un cuerpo casi rígido.

La proporción granulométrica y de agua en un debris flow se resume en la tabla 2.

Tabla 2 Composición de un debris flow (Fuente: Corominas et al., 1997)

| | Porcentaje en peso |
|------------------|--------------------|
| %sólidos | Entre 35 y 90% |
| % limo y arcilla | Entre 10 y 20% |
| % arcilla | No superior a 5% |
| %agua | Entre 10 y 30% |

La velocidad de las corrientes de derrubios depende del material que forma la corriente (granulometría, concentración de sólidos y clasificación de los granos) y de las características de la zona de propagación (topografía, confinamiento, rugosidad), entre otras variables.

2.2.2. Formación

Las principales condiciones que favorecen la formación de corrientes de derrubios son: En primer lugar que el área esté compuesta por formaciones superficiales relativamente permeables (sustrato rocoso meteorizado, coluviones o tills). Esto permite que cuando se produce un aumento en la presión de los poros de las rocas debido a un aporte de agua se desestabilice el terreno con mayor facilidad.

En segundo lugar, el hecho de que la zona tenga una gran pendiente topográfica hace que sea más probable el inicio de un movimiento en masa de este tipo, ya que a mayor pendiente más probable es que un deslizamiento de masa se transforme en un flujo de derrubios.

Es imprescindible que se produzca un aumento intenso de humedad, no necesariamente continuo, para que se forme este tipo de movimientos en masa. Generalmente, se producen en episodios de lluvia muy intensa y de corta duración o debido al deshielo. Estos dos eventos meteorológicos saturan rápidamente la formación superficial, aumentan la presión de agua de poro y causan una pérdida considerable de resistencia del material.

Por último, cabe destacar el papel que juega la cobertura vegetal en estos casos. Tanto arboles como matorrales dan una gran cohesión y compacidad al terreno debido a sus raíces. Por tanto, una zona susceptible a la formación de flujos de derrubios será más sensible si dispone de una escasa cobertera vegetal.

La formación se debe a tres mecanismos básicos:

- La transformación directa a partir de un deslizamiento,
- Socavación de las márgenes de barrancos durante una avenida torrencial e incorporación de grandes masas de sedimento a la corriente
- Formación de una presa natural de sedimentos (por un deslizamiento), represamiento del agua y posterior rotura.

Sin embargo, la mayoría de corrientes de derrubios se originan a partir de deslizamientos. El movimiento se inicia como un deslizamiento traslacional o rotacional de una formación superficial granular. La formación superficial puede ser un till glacial, otro coluvión, o un suelo residual (de meteorización) granular. El desencadenante puede ser una lluvia muy intensa, una fusión rápida del manto nival o un terremoto. La rotura puede estar situada en una ladera o en una vaguada, las cuales son muy susceptibles a ser inestables.

La superficie de rotura puede aprovechar el contacto entre el sustrato y la formación superficial (rotura plana), o desarrollarse en el interior de esta última (rotura circular). El grosor de las formaciones superficiales suele ser reducido (desde algunos decímetros a 2-4 metros) y por eso se suelen producir numerosas roturas superficiales de pequeño tamaño, pero en gran número.

El paso de un deslizamiento a un flujo torrencial puede darse según los procesos siguientes:

- Rotura generalizada de la masa deslizada,
- Licuefacción parcial o completa de la masa causada por las elevadas presiones de agua de poro
- Conversión de la energía cinética de traslación del deslizamiento en energía de vibración interna.

Los procesos anteriores pueden actuar independientemente, pero en muchas circunstancias operan simultáneamente y sinérgicamente.

2.3. Evento de lluvia y efectos sobre el terreno

El hecho de que se produzca o no un flujo de derrubios en muchos casos es debido a causas meteorológicas y climáticas. Está directamente relacionado con el volumen, la intensidad, la duración y distribución de las precipitaciones en un evento de lluvia. Para garantizar la seguridad de las zonas a las que pueda afectar un movimiento de masa de este tipo, es muy importante conocer la respuesta del terreno a eventos de lluvia muy intensa, muy duradera y en general a todo tipo de evento que se pueda producir en la zona estudiada.

El agua crea presiones que alteran los estados tensionales, debido a presiones intersticiales y aumento de peso. También provoca procesos de erosión internos y externos, así como cambios mineralógicos, aspectos que modifican las propiedades y resistencia de materiales, sobretodo en suelos (González de Vallejo, 2002).



Figura 10 Detalle de los efectos de las filtraciones del agua en el margen derecho del canal del barranco del Rebaixader (Fuente propia)

La infiltración del agua de lluvia genera flujos subterráneos y superficiales en las vertientes de un barranco. Aumenta el contenido de agua en la zona no saturada y el nivel freático, hecho que condiciona la recarga de la zona saturada, incrementando las presiones intersticiales. El aumento de la presión en los poros produce un

cambio de consistencia, a la vez que disminuye la cohesión y la fricción interna, hecho que facilita los movimientos de deslizamiento. Por consiguiente, se produce una pérdida de resistencia del material y por tanto un movimiento de masa.

El agua tiene una doble repercusión negativa sobre el terreno:

- Reduce la resistencia al corte debido a la generación de presiones intersticiales y por la reducción de los parámetros resistentes en determinados suelos.
- Aumenta los esfuerzos de corte por incremento del peso del terreno y por la generación de fuerzas desestabilizadoras en grietas y discontinuidades.

La capacidad de infiltración y movilización de materiales depende de la intensidad y duración del episodio de lluvia, así como del tamaño de la cuenca, del contenido de agua previo en el terreno, de la permeabilidad del terreno, de la topografía, de la cubierta vegetal y de la existencia de materiales sueltos y la posible generación previa de inestabilidades.

Nuestra zona de estudio se considera zona de alta permeabilidad, con lo cual podemos afirmar que la lluvia antecedente no es demasiado significativa a la hora de generar un movimiento de masa. Esto es debido a que el terreno tiene bastante capacidad de drenaje. Lo que hace susceptible al terreno a la iniciación de un proceso de movimiento de masa es un evento de lluvia de alta intensidad y poca duración.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Situación geográfica

El barranco del Rebaixader se encuentra al lado del pueblo de Senet (término municipal de Vilaller), en la comarca de la Alta Ribagorça (provincia de Lleida). Está, por tanto, en los Pirineos centrales, a 6 km del pantano de Baserca, a 20 km del Pont de Suert y a 8,5 km de la boca sur del túnel de Vielha. Está en la parte alta de la cuenca del Noguera Ribagorçana, del que es tributario directo.



Figura 11 Situación general del barranco del Rebaixader en Cataluña (Fuente: ICC)

Está orientado hacia el noroeste con una cota superior de 2310m y una cota inferior de 1345m sobre el nivel del mar y tiene una extensión de 0.53km². En la figura 15 aparece el mapa de la zona.

La propensión de esta zona a que se produzca desestabilización, erosión y movimientos en masa es grande debido a las grandes pendientes y a sus características e historia a escala glaciar.

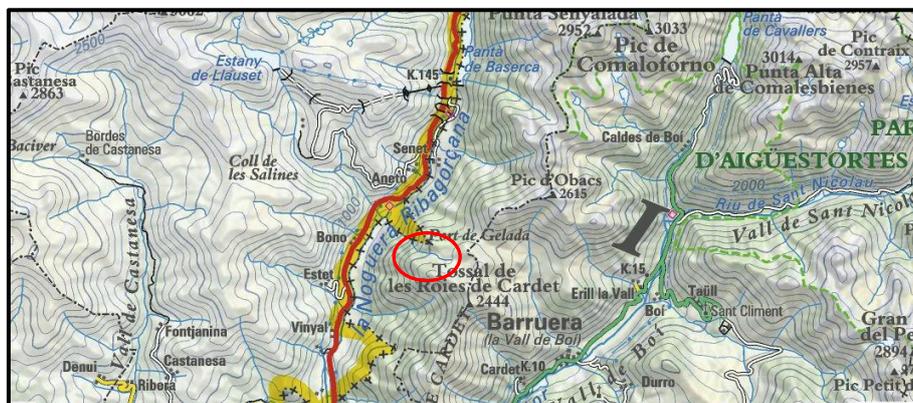


Figura 12 Situación del barranco del Rebaixader (de l'Esbornada) sobre mapa a escala aprox. 1/250.000 (Fuente: ICC)

En la figura siguiente aparece la cuenca del barranco del Rebaixader, tanto sobre base topográfica como sobre ortofoto. También se puede apreciar el barranco de la Baixada, ya corregido con hidrotécnicas.

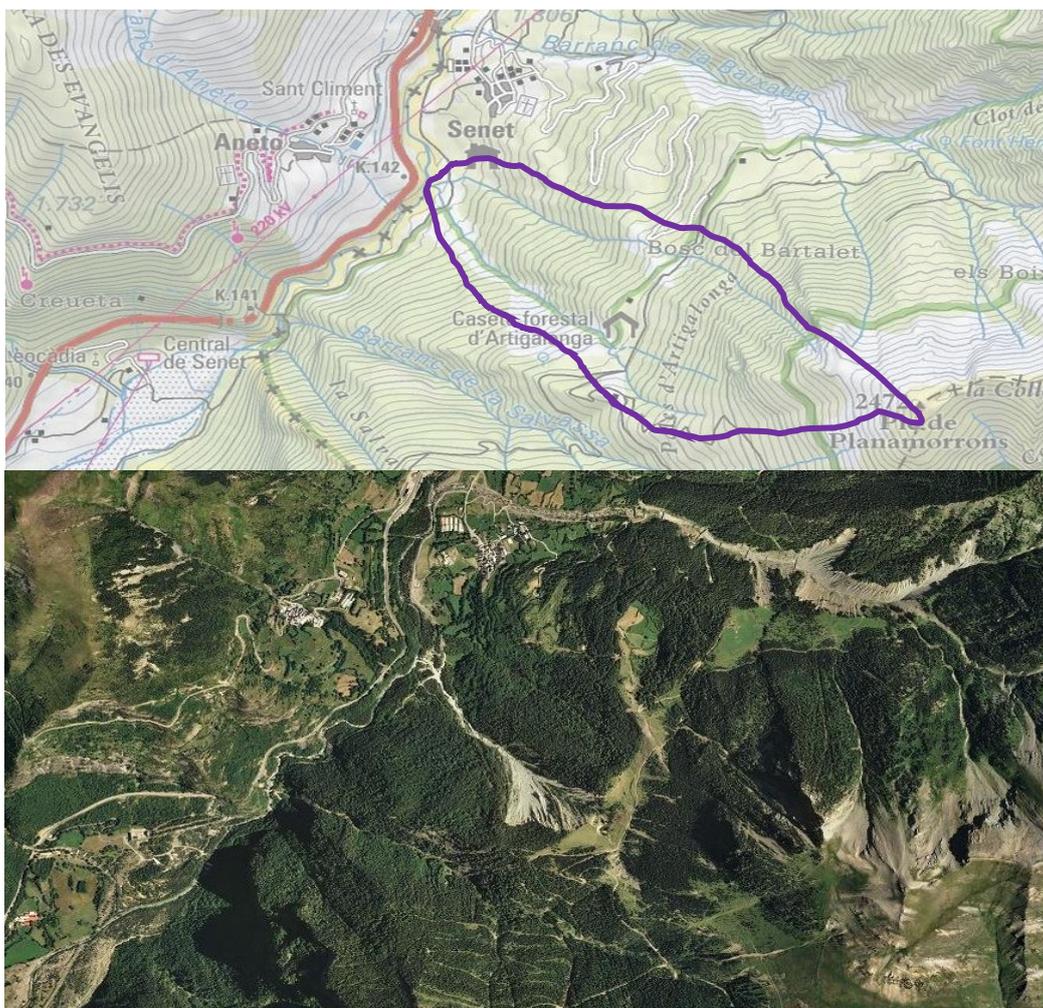


Figura 13 Cuenca del Barranc del Rebaixader sobre mapa y sobre orto a escala aprox. 1/25.000 (Fuente: ICC)

3.2. Descripción geológica e historia glacial

El emplazamiento del barranco es claramente alta montaña. Se caracteriza por pendientes muy elevadas de pizarras devónicas y filitas. Estas formaciones rocosas son inestables debido a que ya no existen glaciares en esta zona. Existen restos de morrenas colgadas y de depósitos de lagos glaciares constituidos por arenas, gravas y piedras prácticamente sin cementar y muy permeables.

La cuenca se asienta sobre el Devoniano y está recubierta de depósitos morrenicos y lacustres (encima de la curva de nivel 1700m aproximadamente). Aparecen también formaciones de pizarras y calizas negras.

Durante las glaciaciones de la época Magdalenense la cuenca de la Noguera Ribagorzana estuvo sometida a morrenas laterales que se aglomeraban en el eje longitudinal del valle principal (a).

Posteriormente, con la subida de la temperatura dejaron de formarse los glaciares y se produjeron ciclos de nieve y deshielo anuales dando lugar a arrastres mucho más finos y a la formación de un lago postglacial(b).

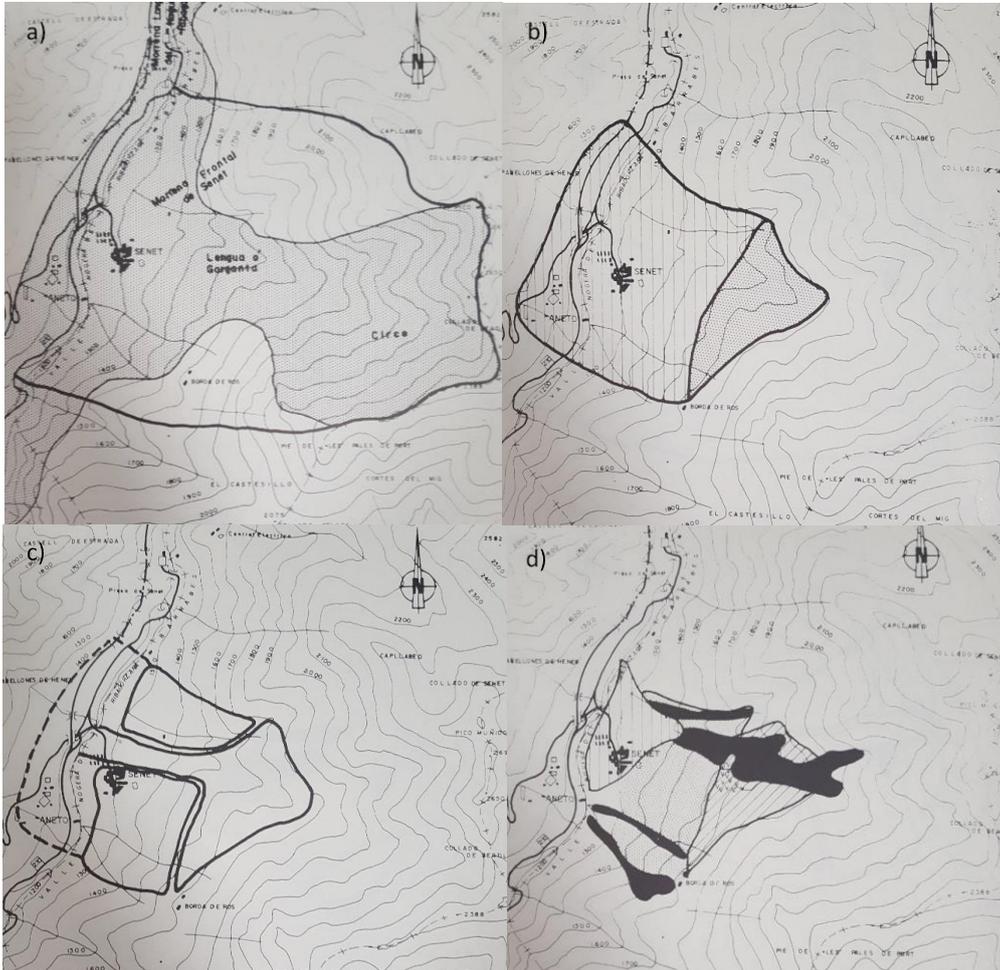


Figura 14 Hipótesis evolutiva de los fenómenos de erosión y depósito en el entorno de Senet: a) Glaciar de Senet (17 a 11 mil BP) b) Morrena y lago postglacial (11 a 6 mil BP) c) Fenómenos periglaciares holocenos (6 a 4 mil BP) d) Fenómenos actuales de erosión activa (Fuente: Soto, 1992)

Durante el Holoceno, se produjo la rotura de la morrena frontal con la apertura de los cauces del Noguera Ribagorzana y del torrente de Senet, y el vaciado del lago (c).

En la actualidad se aprecian las zonas de erosión activa sobre los distintos sustratos: cono de deyección, materiales del lago periglacial y materiales morrénicos (d).

Los mecanismos de erosión actual son los siguientes: desprendimientos gravitacionales, gelifracción y gelipresión y regueros pluviales. Los principales fenómenos nivo-torrenciales son:

- Avenidas con corrientes de gran peso específico y arrastre de materiales gruesos
- Formación de aludes con transporte de piedras en masa
- Desprendimientos de materiales sueltos en las laderas y desestabilización de éstas por gelifracción (rotura) y gelipresión (empuje)
- Importantes erosiones (laminar, lineal, ...)

3.3. Descripción climática y meteorología

El clima en la zona se corresponde a un clima mediterráneo de alta montaña. La temperatura media anual oscila entre los 2 y los 9°C.

En cuanto a las precipitaciones, los factores que influyen en su régimen e intensidad en esta zona además de la orografía son la proximidad con el mar Mediterráneo y el efecto de los vientos de la zona Atlántica procedentes del oeste.

Las relacionadas con la proximidad del mar se generan debido al ascenso de masas de aire húmedo que se hallan en los valles del Pirineo. Al subir, el aire se condensa y provoca precipitaciones de cierta intensidad y poca duración, generalmente en verano.

Las lluvias debidas a los efectos del viento de la zona Atlántica se dan cuando entra un frente frío en las proximidades del barranco. Esto genera lluvias intensas en primavera y otoño.

La precipitación media anual en la zona varía entre 800mm y 1200mm con máximos en otoño y primavera. Alturas de la capa de nieve superior a 1m.

Los debris flows y debris floods principalmente son causadas por eventos de lluvia de poca duración y alta intensidad. Estas lluvias corresponden a lluvias conectivas que se dan principalmente en verano. Cabe destacar que también se da actividad torrencial en estaciones como primavera u otoño y, en menor cantidad, en el periodo estival.

3.4. Descripción del medio natural

En la cuenca del barranco del Rebaixader la estructura de la vegetación está condicionada principalmente por la pendiente del terreno (presencia, estabilidad y profundidad del suelo) y por la temperatura y la acumulación de nieve, que limitan las posibilidades de persistencia de las diferentes especies.

Por debajo del límite altitudinal para las especies arbóreas (timberline) se encuentran masas de pino silvestre (*Pinus sylvestris*) y, a mayor altitud de pino negro (*Pinus uncinata*). Por encima hay prados alpinos en las zonas con poca pendiente y a altitudes superiores únicamente vegetación rupícola.

Existen antecedentes en la zona de revegetación mediante siembra de arbustos para estabilizar las cuencas, con resultado limitado.

4. SÍNTESIS DE LOS ANTECEDENTES

4.1. Historia

La primera referencia documentada de catástrofes en la zona del barranco del Rebaixader data del siglo XVI. Se refiere, no concretamente al barranco del Rebaixader, sino al más cercano a la población de Senet, el barranco de la Baixada. La traducción del latín de una inscripción que se encuentra en la iglesia románica del pueblo informa que en 1632 un alud de nieve destruyó la iglesia y el pueblo entero al año siguiente. Sin embargo, por la traducción no se puede precisar si se trató de un alud o de una avenida torrencial y no se han encontrado más referencias históricas (Soto, 1992).

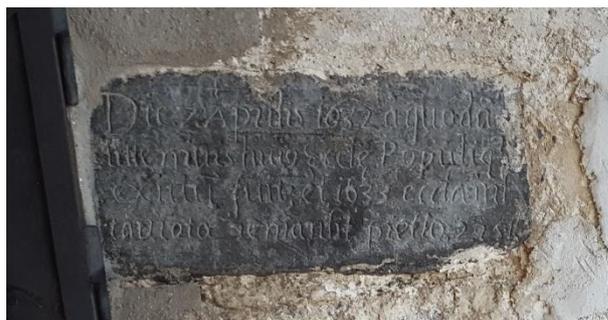


Figura 15 Imagen la lápida de la lápida en la iglesia románica de Senet, en que se indica la destrucción de la iglesia y del pueblo entero por un alud el año 7 abril de 1632 (Fuente propia)

La magnitud de los movimientos de masa en alta montaña puede llegar a tener una capacidad erosiva y de transporte devastadora. Es un claro ejemplo de ella la avenida que se produjo en 1937 en las proximidades del pueblo pirenaico de Cabdella.



Figura 16 Gran cantidad de bolos que transportó la riada y la destrucción que generó en el pueblo de Cabdella en 1937 (Fuente: San Roman, 2010)

Las fotografías de la central eléctrica antes y después de las lluvias torrenciales describen la magnitud de los fenómenos torrenciales en la zona.

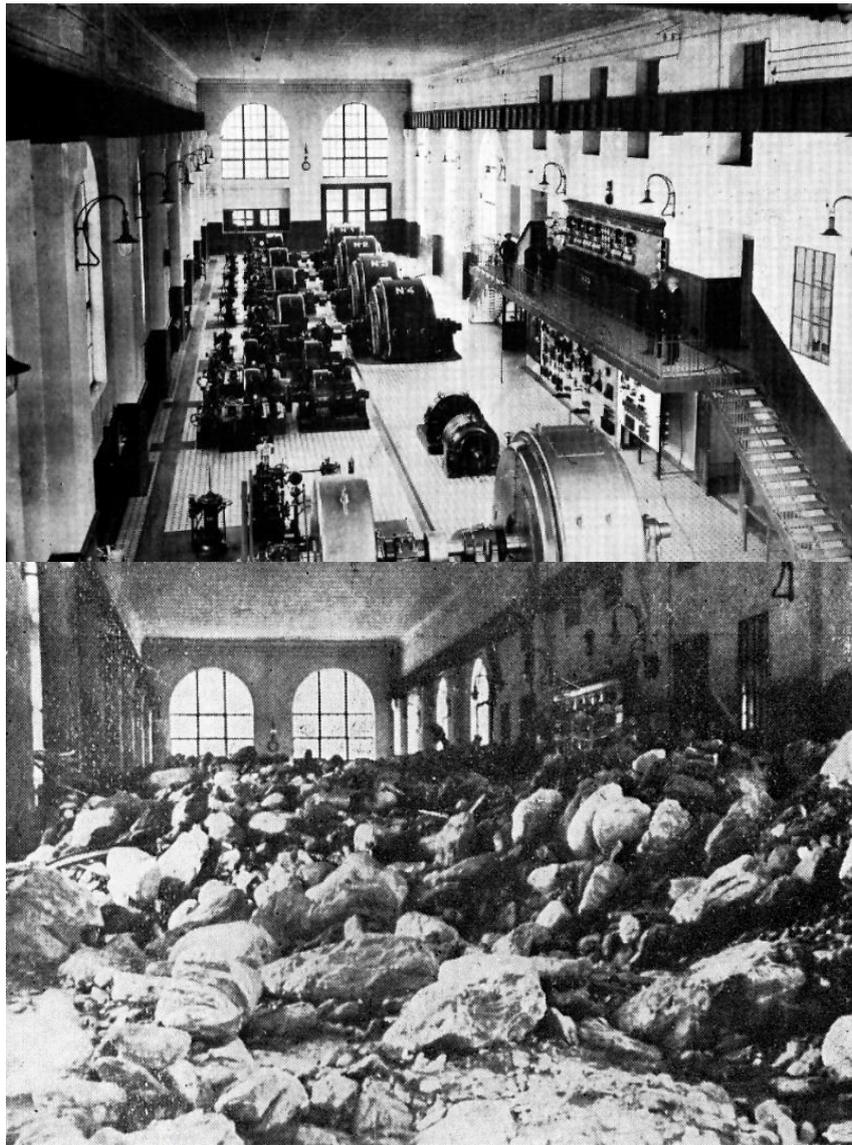


Figura 17 Central eléctrica de Cabdella antes y después de la avenida de 1937 (Fuente: San Roman, 2010).



Figura 18 Cuenca del Barranco de Cabdella a principio de siglo XX y en 1987 (Fuente: San Roman, 2010).

4.2. Corrección

Debido a la peligrosidad que conllevan estos movimientos de tierras, a lo largo de los años se han realizado trabajos de restauración hidrológico forestal con el objetivo de evitar catástrofes humanas y económicas.

Los objetivos de estos trabajos son los siguientes:

- Disminuir la erosión hídrica
- Controlar el transporte y sedimentación de materiales
- Prevenir los posibles daños producidos por lluvias torrenciales
- Regular el ciclo hidrológico
- Contribuir a la evolución progresiva de los suelos y la cubierta vegetal

Tabla 3 Actuaciones para la corrección hidrológica de una cuenca según el área de actuación y el tipo de medida llevada a cabo (Fuente: TRAGSATEC, 1994).

| Área de actuación | Tipo | Clasificación |
|---|----------------------|---|
| Cuenca de recepción | Obras biológicas | Repoblaciones |
| | | Mejoras de la cubierta vegetal |
| | Terrazas | Terrazas |
| | | Bancales |
| | Pequeñas obras | Drenajes |
| | | Albarradas |
| Fajinas | | |
| Lechos de drenaje (torrentes y ríos torrenciales) | Obras transversales | Diques de consolidación |
| | | Diques de retención |
| | Obras longitudinales | Espigones |
| | | Muros de defensa de márgenes (escolleras) |
| | | Canalizaciones |
| | Obras biológicas | Cobertura vegetal de los márgenes |

4.3. Corrección del barranco de la Baixada de Senet

Nuestro trabajo se centra en el estudio del barranco del Rebaixader, también conocido como barranco de la Runada o l'Esbornada. Por su proximidad y semejanza con el barranco de la Baixada de Senet expondremos estudios previos y las medidas correctoras realizados en el ya corregido para conocer una posible solución ingenieril al barranco estudiado.

El núcleo urbano de Senet (t.m. Vilaller, Alta Ribagorça, Lleida) se encuentra en el cono de deyección del barranco de la Baixada, cuya superficie de cuenca es de 8,5km². Ya se ha comentado anteriormente un episodio catastrófico que comportó la destrucción del pueblo en 1632 (punto 4.1 y la figura 15).

La ubicación del pueblo de Senet y las características de la zona han originado diferentes episodios de diversa gravedad. Por esa razón, desde 1948 en que la administración forestal realizó el primer proyecto de corrección y, sobre todo, entre 1962 y 1990 se fueron ejecutando diferentes obras de corrección consistentes, principalmente, en diques transversales de retención y consolidación.

En tiempos recientes hay que recordar el episodio catastrófico de 1963, cuando una lluvia torrencial sifonó el único dique existente en aquella fecha, y produjo un transporte en masa de todo el barranco que cortó la corriente del Noguera Ribagorzana al originar en éste una presa de unos 15 m de altura (Soto, 1992). También en 1982 se produjo una importante avenida torrencial.

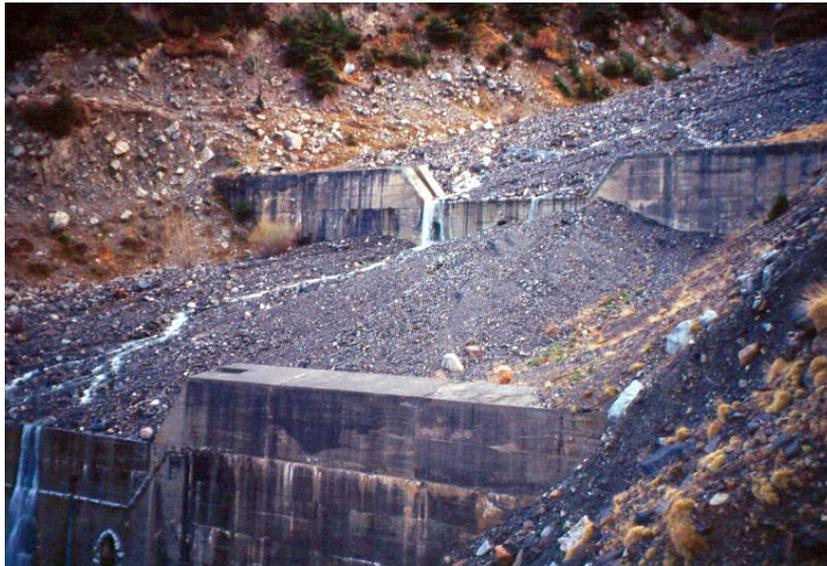


Figura 19 Diques n°0 y n°1 aterrados en el barranco de la Baixada de Senet. (Fuente: San Roman, 2010).

La incapacidad de las obras planteadas hasta ese momento para disminuir los riesgos producidos por unas precipitaciones de recurrencia media o alta sobre la población de Senet (que, cada pocos años veía cortada su principal vía de acceso) hizo que en 1992 se decidiera abordar el problema con otro enfoque, eligiendo una solución que comportaba unos trabajos de una envergadura mucho mayor. Así, se redactó y ejecutó un “Proyecto hidrológico de defensa de Senet” que incluía la canalización escalonada del cono de deyección con tramos erosionables y rastrillos de perfil hidrodinámico. También se realizaron otros trabajos como la repoblación con pino negro de 25ha en el margen derecho del barranco. El importe de ejecución del proyecto superó los 700 millones de pta. en 1993-1995 (4.2 millones de euros).



Figura 20: Cono del barranco de la Baixada de Senet antes y después de los trabajos de canalización y de construcción del puente de acceso. (Fuente: San Roman, 2010).

5. GESTIÓN DE DATOS

5.1. Sistema

Para conocer el comportamiento del barranco del Rebaixader se instalaron en 2009 una red de sensores y receptores de información. Se dispone de estaciones meteorológicas (una en la parte del canal y otra en la parte superior), una estación de infiltración (en la parte superior) y una estación de detección de procesos torrenciales en el canal. También se dispone de cámaras de video que graban para confirmar el movimiento de masa visualmente. Debido al emplazamiento de las estaciones, éstas funcionan con paneles solares y baterías, y envían la información mediante GPRS.

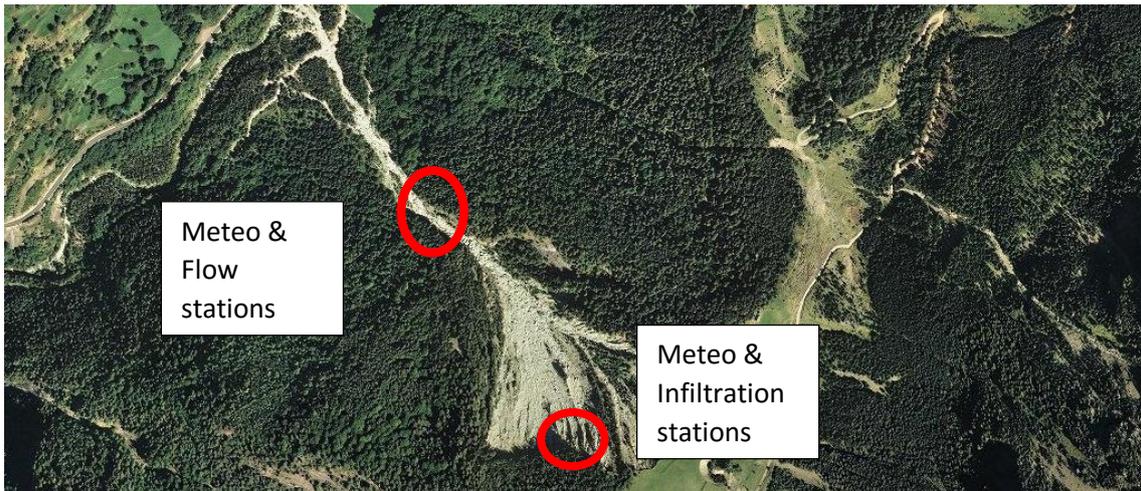


Figura 20 Emplazamiento de las estaciones meteorológicas y de infiltración (Fuente: ICC)

Sobre la imagen del barranco del Rebaixader tomada desde la ermita de Sant Climent, al otro lado de la N-230, en el pueblo de Aneto, se indica la ubicación de los geófonos y la cámara de video.



Figura 21 Localización de los geófonos (recuadros azules) y de la cámara de video (círculo rojo) instalados (Fuente propia)

| Instrumento | Geófonos | Sensores de ultrasonidos | Pluviómetro | Sonda de temperatura | Cámara de video |
|--------------------------|---|---|--|--|---|
| ¿Qué miden? | Miden la vibración del suelo generada por un movimiento de masa. | | Mide la precipitación. | Mide la temperatura del terreno. | Permite visualizar la existencia de un movimiento de masa. |
| Objetivo | Determinar el momento de formación, la intensidad y la velocidad de los movimientos de masa en el barranco. | Determinar la distancia respecto al sensor del movimiento de masa. | Determinar la lluvia que cae con gran precisión para poder determinar si se producirá o no una avenida torrencial. | Calibra y corrige los datos del sensor de ultrasonidos y determina si la precipitación ha sido nival o no. | Tomar fotos y video de una zona donde se puede apreciar muy bien la caída de bloques o el inicio de un debris flow. |
| Funcionamiento | Transmite las vibraciones en forma de impulsos por segundo mediante una placa electrónica. | Genera ondas acústicas de alta frecuencia y evalúan el eco que rebota desde el objeto medido hasta el sensor. Determina el tiempo y la distancia que recorre el sonido. | Pluviómetro de cazoletas basculantes. | Mide la temperatura del aire, del suelo y del agua, dentro de una variedad de usos. | Captura una imagen diaria a las 12:00h y graba cuando hay un evento. |
| Localización | En el canal principal. | | En la parte más elevada de la cuenca. | | Encima de un árbol en un margen del barranco. |
| Características técnicas | GEOSPACE 20 DX | UC6000-30GM-IUR2-V15 de Pepperl+Fuchs | marca RM YOUNG con resolución de 0,1mm | BetaTherm 10K3A1 de CAMPBELL SCIENTIFIC | MX-M12D-Sec-DNight-D43N43 |

Tabla 4 Características técnicas de los sensores instalados en el barranco del Rebaixader (Fuente: Hürliman, 2014)

Todos los datos se almacenan en registros de datos (dataloggers): CR100 para los geófonos y el sensor de ultrasonido y CR200 para la estación meteorológica. El almacenamiento se hace mediante programas que definen la frecuencia de escaneo y el registro de cada sensor. Los dataloggers funcionan con placas solares y baterías recargables y están conectados mediante GPRS (General Packet Radio Service) gracias a lo cual la descarga de datos se puede hacer desde cualquier lugar con un ordenador portátil.

El motivo de la localización de geófonos y del sensor de ultrasonido en el canal principal se debe a que éste es el lugar por donde pasará la mayor parte de material ya que es la zona que se encuentra entre el cono de deyección y el nacimiento de los movimientos de masa. En el caso de la estación meteorológica, se ha escogido la parte superior de la cuenca y aislada de posibles impactos de grandes bloques. Esto es debido a que el objetivo es obtener la precipitación que llega a toda la cuenca, por lo que situarla en un sitio inferior, supondría perder información de la precipitación que afecta a la cuenca.

5.2. Antecedentes de datos

A lo largo de los cinco años precedentes a 2015, entre julio de 2009 y octubre de 2014 exactamente, se dieron 167 casos de episodios de lluvia potencial de desencadenar una avenida torrencial. De entre estos casos, solo 28 realmente desencadenaron una avenida frente a 142 que no lo hicieron. Debido a problemas de malfuncionamiento de los aparatos de medida meteorológicos durante tres tormentas, solo se dispuso de 25 eventos a estudiar. En el estudio de Abancó (2016) se analiza la información proporcionada por el pluviómetro instalado en el Rebaixader y la de otros cinco puntos cercanos al barranco para estudiar la variabilidad espacial de los episodios de lluvia. En este estudio se impuso que la selección de un episodio ya fuera creador de una avenida como no, debía tener una lluvia mínima diaria superior a 10mm. No obstante, puede darse el caso en el que se dé más de un episodio a lo largo de 24 horas. Se observó que la mayor parte de los flujos de derrubios se producía en verano, concretamente en julio, con una media de 1.7 eventos a lo largo de los cinco años de estudio. Más del 70% de los eventos de lluvia en julio generaron movimiento de masa. En cambio, en invierno no se produjo ninguno. El hecho de que también se generaran en primavera se debe a que la fusión de la nieve aumenta la cantidad de agua en el terreno y facilita el desencadenamiento de dichos movimientos.

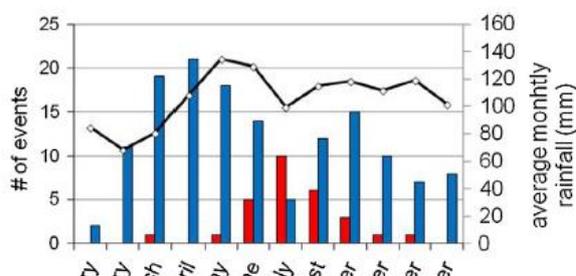


Figura 212 Distribución mensual de los eventos en los que se produjo flujo de derrubios (TRIG) y los que no (NonTRIG), así como la lluvia mensual en la zona de estudio (Fuente: Abancó et al, 2016)

Se realizaron histogramas de distintos parámetros relacionados con los episodios de lluvia para seleccionar cuales presentaban mayores diferencias entre los casos de TRIG (generación de flujo de derrubios) o NonTRIG (no generación). Estos parámetros fueron la lluvia acumulada, la duración del episodio de lluvia, la media de intensidad de lluvia y los antecedentes de lluvia con distintos intervalos de tiempo previo al potencial evento.

5.3. Umbrales

Un umbral es un conjunto de valores de intensidad y duración de lluvia (tanto una recta como una curva) que generan una desestabilización en el terreno y producen un flujo de derrubios.

Es muy importante determinar la consistencia del umbral. Para ello se analiza la relación entre la superación del umbral y la formación o no de avenidas. Se diferencian dos tipos de eventos:

- Los que producen un movimiento de masa, tanto debris flow como debris flood. En inglés son conocidos como “triggering” y usualmente abreviados con el término *Trig*.
- Los que no producen un movimiento de masa. En inglés “Non Triggering”, abreviado NonTrig.

5.3.1 Métodos de obtención de umbrales

Para determinar el umbral de lluvia que desencadena un movimiento de tierras usamos dos métodos basados en las variables Intensidad (I) y Duración Total (D) de lluvia. El primero representa cada episodio como un punto en un gráfico con ejes D-I. El segundo se trata de un método nuevo que define los umbrales teniendo en cuenta conceptos de hidrología. El primer método será el que se usará en este estudio.

Método del corrimiento: Intensidad media de lluvia- duración total.

Este método es muy utilizado porque se puede usar cuando no se dispone de medidas de precipitación muy precisas. Caine y Guzzetti han usado y desarrollado este método en los años 1980 y 2007-2008 respectivamente. Este método expresa con una ley una correlación independiente de la morfología del terreno estudiado.

$$I = \alpha D^{-\beta}$$

Alfa y beta son factores de escala y de forma que se estiman con distintas técnicas de ajuste. En primer lugar la línea que mejor se ajusta a la ley de todas las avenidas se grafica en escala logarítmica. Una vez definida, sin cambiar el valor de beta, se grafican líneas inferiores correspondientes a probabilidades de suceso inferiores al 100%.

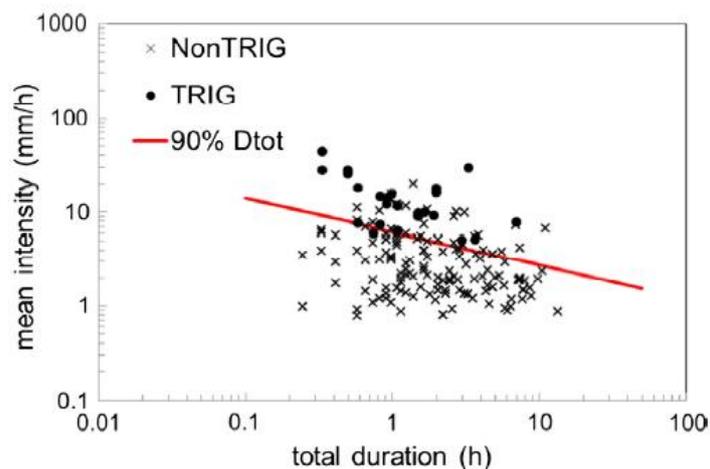


Figura 2322 Intensidad media frente duración total. Relación de las lluvias desencadenantes de movimiento de masa (TRIG) y las no desencadenantes (NonTRIG). El umbral del 90%, que se justifica su uso posteriormente, se indica en color rojo. (Fuente: Abancó et al., 2016)

Método hidrológico: Máxima intensidad circulante- Duración circulante.

Parte de la representación de un evento mediante múltiples puntos en el gráfico I-D definido anteriormente. El intervalo mínimo entre episodios de lluvia es de 5 minutos ya que es la mínima medida que disponemos. Cada evento tiene un punto en el gráfico por cada duración analizada, es decir, no se trata de un solo punto como en el método anterior. Posteriormente, las líneas que representan estos puntos son curvas que representan la máxima intensidad de lluvia para un intervalo de tiempo dado. Los umbrales en este segundo método corresponden a distintas probabilidades como en el método anterior, pero en forma de curvas en lugar de rectas. Dichas curvas se calculan a partir de los porcentajes de inicio de una avenida situada por encima del umbral en cuestión. Para comparar ambos métodos se usan rectas que aproximan las curvas de este segundo método.

Este segundo método aporta información extra sobre la variación de la intensidad de lluvia durante el episodio y permite usar esta información para sistemas de alarma. En cambio las variables del método anterior solo pueden aproximarse cuando el evento de lluvia ha terminado.

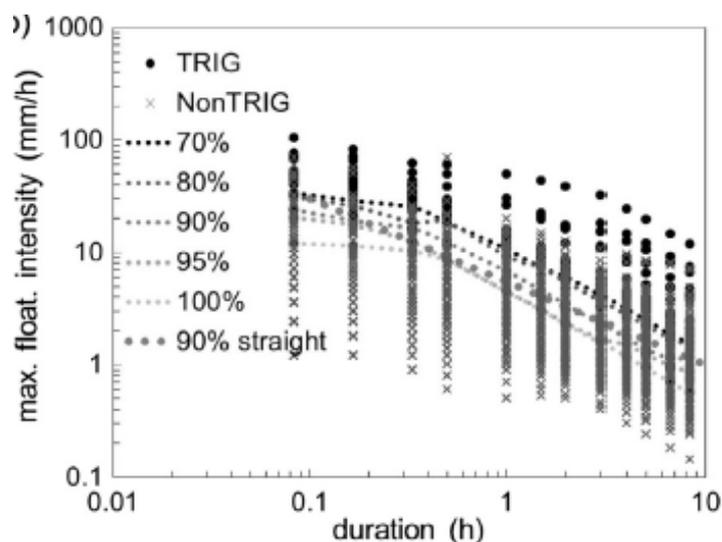


Figura 24: Máxima intensidad circulante contra duración relacionando los eventos que dieron lugar a flujos torrenciales (TRIG) y los que no (NonTRIG). Umbrales correspondientes a los distintos percentiles y el umbral final del 90% como línea de mejor ajuste. (Fuente: Abancó et al., 2016)

5.3.2 Umbrales internacionales

Los umbrales determinan unas condiciones de lluvia, que cuando se alcanzan o exceden, es probable que se produzca un movimiento torrencial. Hay dos tipos de umbrales: Los físicos; basados en modelos que simulan infiltración y comportamiento hidrológico de los episodios de lluvias sobre una capa susceptible de ser desplazada y los empíricos; basados en medidas de lluvia de eventos anteriores. Dentro de estos últimos destaca el modelo de Caine 1980. También destaca el modelo propuesto por Guzzetti en el año 2008. Obtener medidas de lluvia cerca de las zonas de avenida es una tarea compleja por ello umbrales como el de Brunetti se determinan con datos de lluvia tomados a varios kilómetros del área de inicio del movimiento torrencial.

En nuestro estudio usaremos los umbrales de Caine y de Guzzetti, de carácter mundial, a la vez que los nuestros propios para tener una valoración de dichos valores límite. La definición de la duración de la lluvia es clave ya que en la mayoría de movimientos torrenciales la determinación del inicio exacto del flujo torrencial es complicada, pero en cambio, el momento de inicio y de fin de la lluvia es bastante preciso. Cabe destacar que el historial de lluvias anterior al chaparrón que detona el movimiento de tierras es determinante a la hora de definir el umbral.

Caine, Nel, 1980: Intensidad de lluvia-Duración de movimientos de tierra y flujos de derrubios.

$$I = 14,82 * D^{-0.39}$$

Esta ecuación delimita los valores de duración e intensidad de lluvia que generan dichos movimientos de los que no los generan. Su definición idónea se da cuando la lluvia se mide en intervalos de 10 minutos durante 10 días.

Guzzetti, 2008:

La curva global de este autor tiene en cuenta una base de datos que contiene eventos de muchas cuencas alrededor del mundo. Por esa razón, su precisión en un caso concreto como el nuestro no es muy elevada. También creó una curva regional que se basó en cuencas concretas en la zona alpina entre Italia y Suiza. Esta última curva es más precisa ya que las condiciones climatológicas y geológicas son más constantes en su área de estudio.

$$I = 2,2 * D^{-0.44}$$

En nuestro estudio; partiendo de lo previamente analizado en el artículo de Abancó et al., (2016) se usan los umbrales siguientes:

$$I_{mean} = 6.2 * D_{tot}^{-0.36}$$

$$I_{f190\%} = 5,49 * D^{-0.75}$$

6. ANÁLISIS DE LOS DATOS DE LLUVIA Y LOS UMBRALES OBTENIDOS

6.1. Datos

Disponemos de la altura de lluvia en el pluviómetro situado en el Rebaixader de Senet con un intervalo entre las mediciones de 5 minutos. Dicha información se encuentra en una hoja de cálculo en tres columnas. La primera indicando el día, la segunda indicando la hora cada 5 minutos, y la tercera indicando el registro del pluviómetro en mm. Como los datos de los que disponemos son de 5 minutales de lluvia hay un total de 105.122 registros a lo largo del año estudiado. Se obtienen alturas de lluvia en un periodo tan corto de tiempo debido a que los eventos de precipitación que generan movimientos de masa en zonas montañosas suelen ser de poca duración y mucha intensidad.

También disponemos de una hoja de cálculo con los datos de lluvia y los eventos que se produjeron en el periodo estudiado en la publicación de Abancó (2016).

Como la división de un año en fracciones de tiempo de cinco minutos es demasiado extensa para estudiarla se generan columnas con intervalos de tiempo de 10 minutos, 30 minutos, una hora, dos horas, cuatro horas, 12 horas y por último un día.

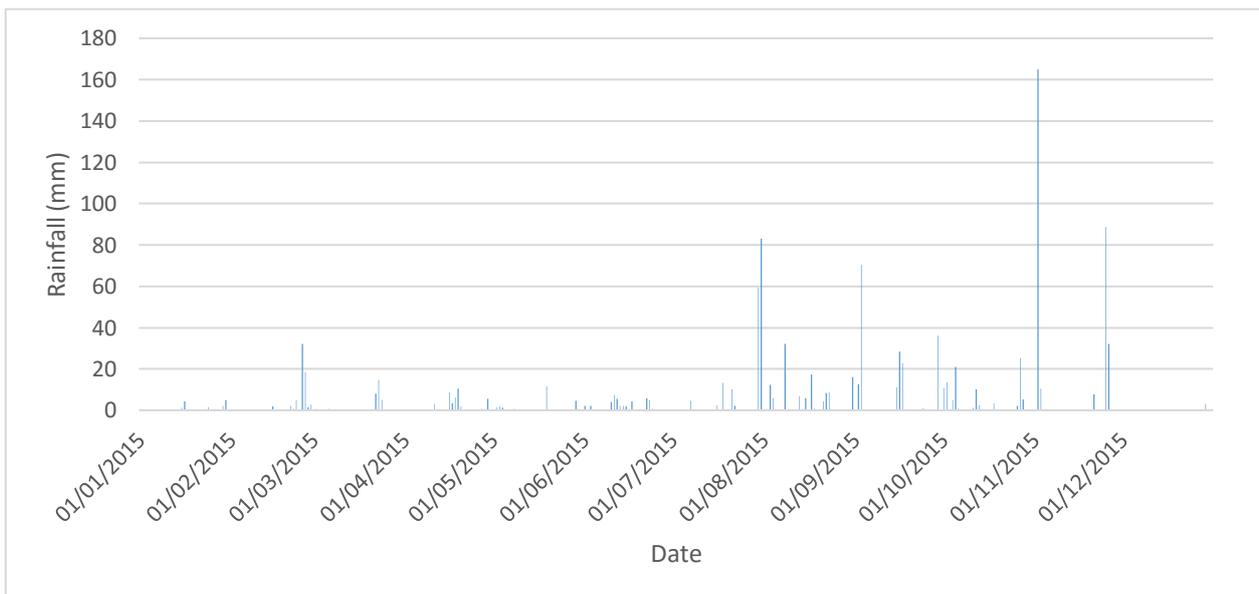


Figura 23 Intensidad de lluvia a lo largo del año considerando precipitación diaria total (Fuente propia)

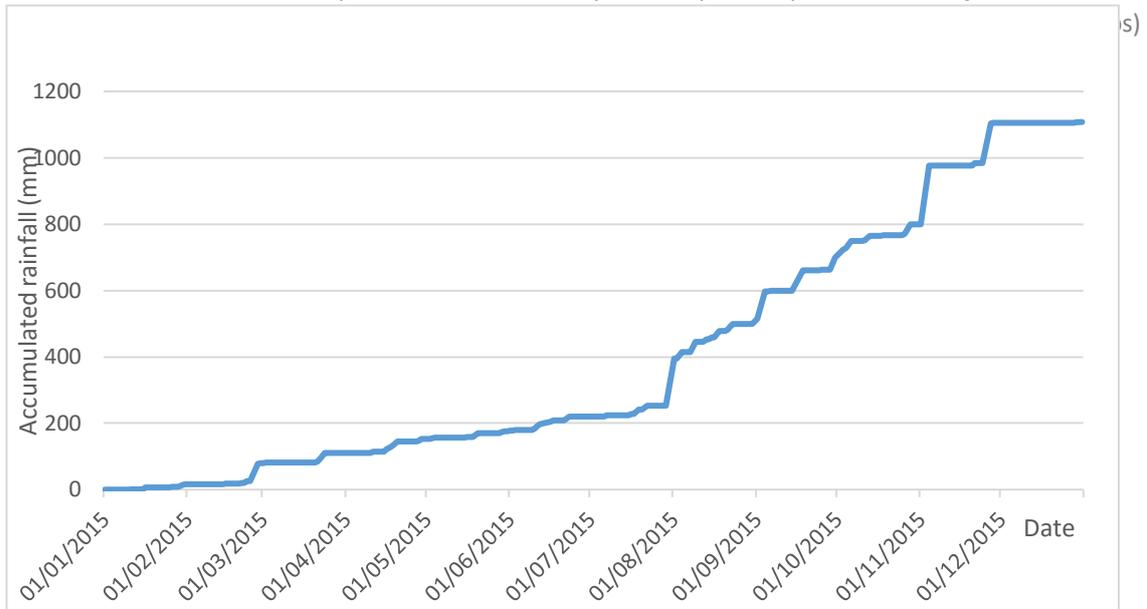


Figura 24 Lluvia acumulada a lo largo del año con una duración de 24h. (Fuente propia)

La primera restricción considerada es despreciar los días en los que se produjo una intensidad de lluvia diaria menor o igual a 10mm. Esta condición prescinde de los días en los que no llovió así, como de los días en los que llovió lo que se considera insuficiente para generar cualquier movimiento de masa. Esta consideración reduce enormemente los días a evaluar.

Esta restricción nos permite observar que la gran mayoría de los días se producen lluvias inferiores al valor mínimo relevante (del total de días del año; 337 días tuvieron un lluvia total inferior a 10mm y el resto una lluvia total superior).

Con lo cual, aplicando el filtro, nos quedan 28 días de 365 potenciales para que la lluvia genere una avenida. Como se hizo en el estudio de los años 2009 a 2014, se considera un evento de lluvia aquel que inicia después de una hora sin producirse lluvia. Es decir, en un mismo día pueden producirse más de un evento ya que puede iniciar el día uno, detenerse la lluvia un mínimo de una hora y volver a llover, con lo cual se considera otro evento. Es muy importante considerar eventos completos aunque la duración de dicho episodio empiece un día y termine al día siguiente.

Los días que se estudian a raíz de esta simplificación son:

Tabla 5 Días con intensidad diaria superior al límite (Fuente propia)

| Fecha | Intensidad diaria (mm) |
|------------|------------------------|
| 25/02/2015 | 32,1 |
| 26/02/2015 | 18,4 |
| 23/03/2015 | 14,7 |
| 19/04/2015 | 10,5 |
| 19/05/2015 | 11,7 |
| 18/07/2015 | 13,4 |
| 1/07/2015 | 10,2 |
| 30/07/2015 | 59,2 |
| 31/07/2015 | 83,2 |
| 03/08/2015 | 12,4 |
| 08/08/2015 | 32,2 |
| 17/08/2015 | 17,2 |
| 31/08/2015 | 16 |

| Fecha | Intensidad diaria (mm) |
|------------|------------------------|
| 02/09/2015 | 12,6 |
| 03/09/2015 | 70,4 |
| 15/09/2015 | 11 |
| 16/09/2015 | 28,4 |
| 17/09/2015 | 23 |
| 29/09/2015 | 36,2 |
| 01/10/2015 | 10,8 |
| 02/10/2015 | 13,6 |
| 05/10/2015 | 21 |
| 12/10/2015 | 10,2 |
| 27/10/2015 | 25,2 |
| 02/11/2015 | 165 |
| 03/11/2015 | 10,4 |
| 25/11/2015 | 88,8 |
| 26/11/2015 | 32 |

Entre los días seleccionados, solo hay uno en el que se han encontrado dos eventos de lluvia. Se trata del día 3 de septiembre. Esto se debe a que se produjo un intervalo de lluvia intenso, posteriormente se detuvo la lluvia una hora y acto seguido reanudó en forma de un evento nuevo. En cambio hay eventos que empiezan las últimas horas de un día y continúan al día siguiente. Ejemplo de estos son el evento producido entre el 25 y el 26 de febrero y el producido el 18 y el 19 de abril.

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores obtenemos los siguientes 25 eventos. La tabla siguiente representa en columnas el día o días en los que se produce el evento, la precipitación en mm del evento, la duración del mismo y su respectiva intensidad media.

Tabla 6 Eventos potenciales (Fuente propia)

| Fecha | Evento | Ptot (mm) | Duration (h) | I (mm/h) |
|-------------|--------|-----------|--------------|----------|
| 25/ 26 feb | 1 | 50,2 | 24 | 2,091 |
| 23 mar | 2 | 14,5 | 19 | 0,763 |
| 18/19 abr | 3 | 14,7 | 16 | 0,91875 |
| 19 may | 4 | 7,3 | 4 | 1,825 |
| 18-jul | 5 | 13,4 | 2 | 6,7 |
| 21-jul | 6 | 4,6 | 2 | 2,3 |
| 30-jul | 7 | 55,2 | 12 | 4,6 |
| 31-jul | 8 | 83,2 | 15 | 5,546 |
| 03-ago | 9 | 6,4 | 4 | 1,6 |
| 08-ago | 10 | 31 | 5 | 6,2 |
| 17-ago | 11 | 16,4 | 4 | 4,1 |
| 31-ago | 12 | 16 | 2 | 8 |
| 02-sep | 13 | 6 | 3 | 2 |
| 03-sep | 14 | 17,4 | 4 | 4,35 |
| 03-sep | 15 | 46,6 | 4 | 11,65 |
| 15/16 sep | 16 | 17 | 11 | 1,545 |
| 16/17 sep | 17 | 31,4 | 7 | 4,485 |
| 17/18 sep | 18 | 7,8 | 2 | 3,9 |
| 29-sep | 19 | 36,2 | 8 | 4,525 |
| 02-oct | 20 | 9 | 2 | 4,5 |
| 05-oct | 21 | 19,2 | 4 | 4,8 |
| 12 y 13 oct | 22 | 9,2 | 6 | 1,533 |
| 27-oct | 23 | 16,6 | 6 | 2,766 |
| 2 y 3 nov | 24 | 164,4 | 16 | 10,275 |
| 25 y 26 nov | 25 | 120,8 | 37 | 3,264 |

Las lluvias potenciales de generar un flujo de derrubios a lo largo de 2015 se dieron durante los meses de febrero, marzo, abril, mayo, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre. Entre los eventos estudiados, destacan por su intensidad el producido el 3 de septiembre con una intensidad media de 11,65mm a lo largo de 4horas y el producido los días 2 y 3 de noviembre, con una intensidad media de 10,275mm a lo largo de 16 horas.

Sin embargo, la única avenida que se produjo este año no se dio en ninguna de estas dos fechas. Para profundizar en los eventos de lluvia potenciales se generan los hietogramas de los eventos seleccionados. Estos se definen como las curvas de variación de la intensidad de precipitación en el tiempo.

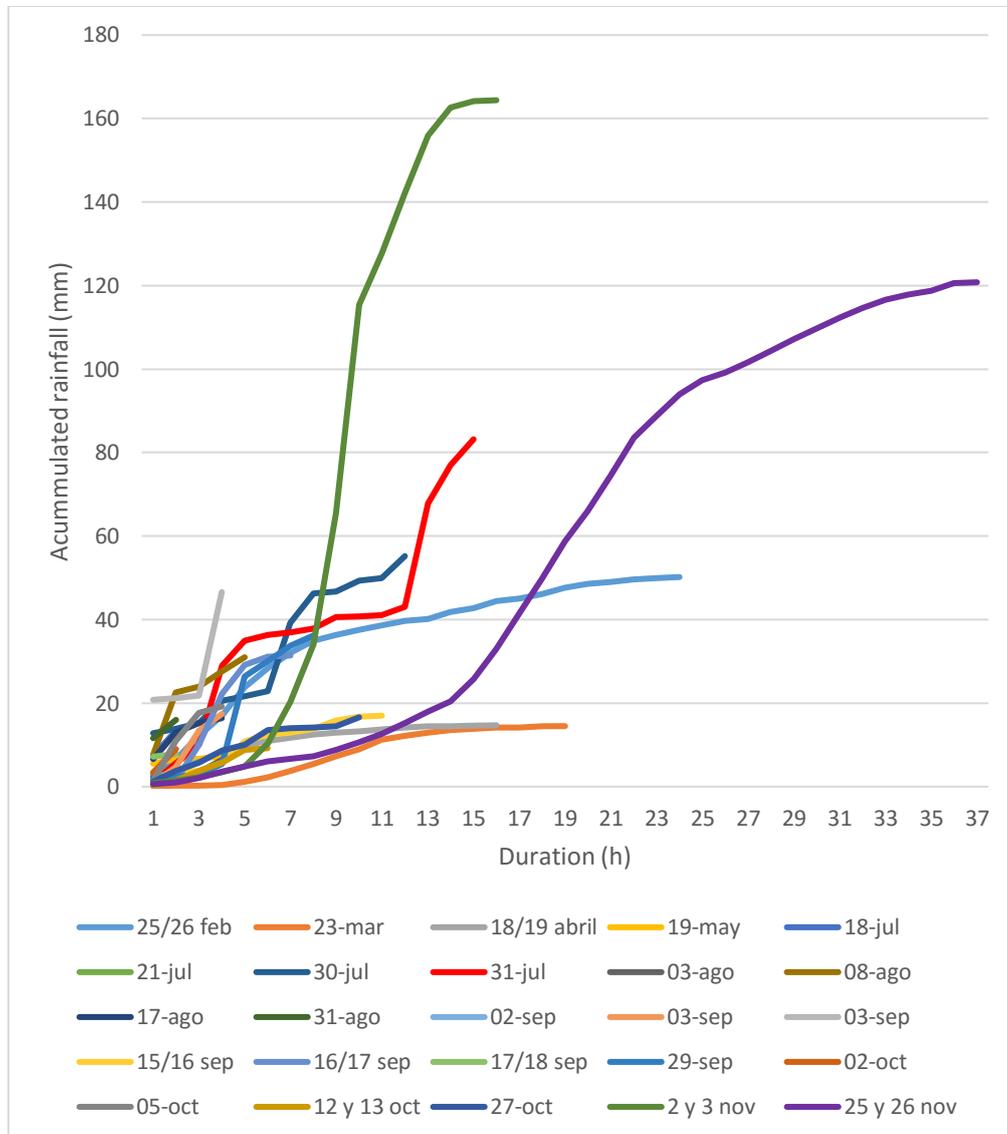


Figura 25 Hietogramas de los eventos de lluvia. Donde se representa precipitación acumulada y la duración de cada evento. (Fuente propia)

Claramente se observa que el evento más extendido en el tiempo es el que se produjo entre los días 25 y 26 de noviembre. El que tuvo una mayor precipitación a lo largo de toda su duración fue el que se produjo entre los días 2 y 3 de noviembre.

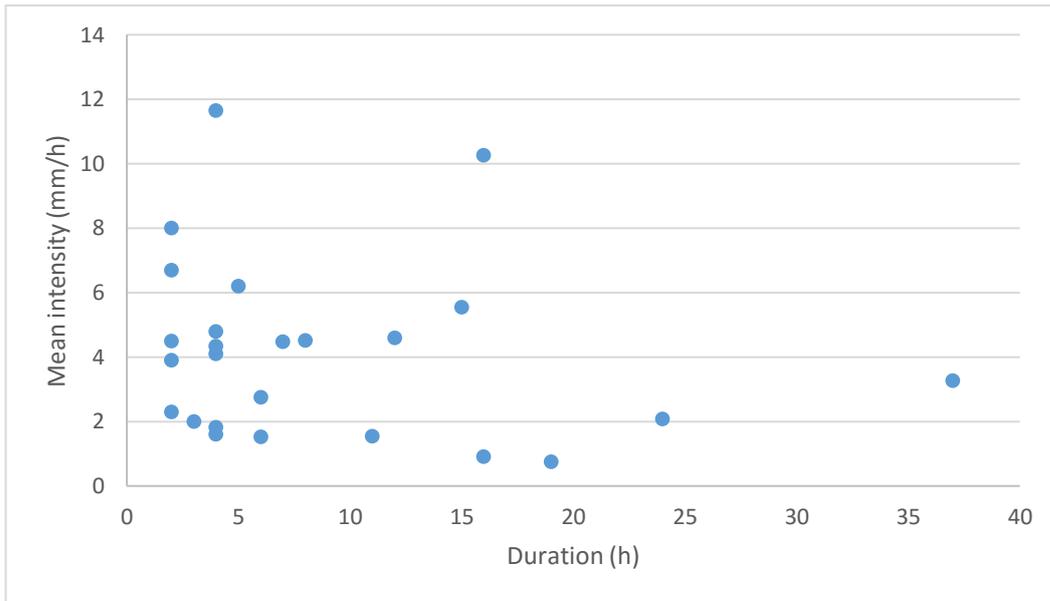


Figura 26 Sobre los ejes precipitación media y duración del evento se representan los 28 eventos analizados en 2015 (Fuente propia)

6.2. Avenida 2015

El único evento de lluvia que produjo un flujo de derrubios en el año de estudio fue el 31 de julio a las 15:13h. Durante esa hora se midió una altura de lluvia de 24,8 mm y a lo largo del día un total de 83,2mm. El día anterior se produjo una altura de lluvia de 59,2mm y los siguientes siete días anteriores no se registró lluvia en el pluviómetro.

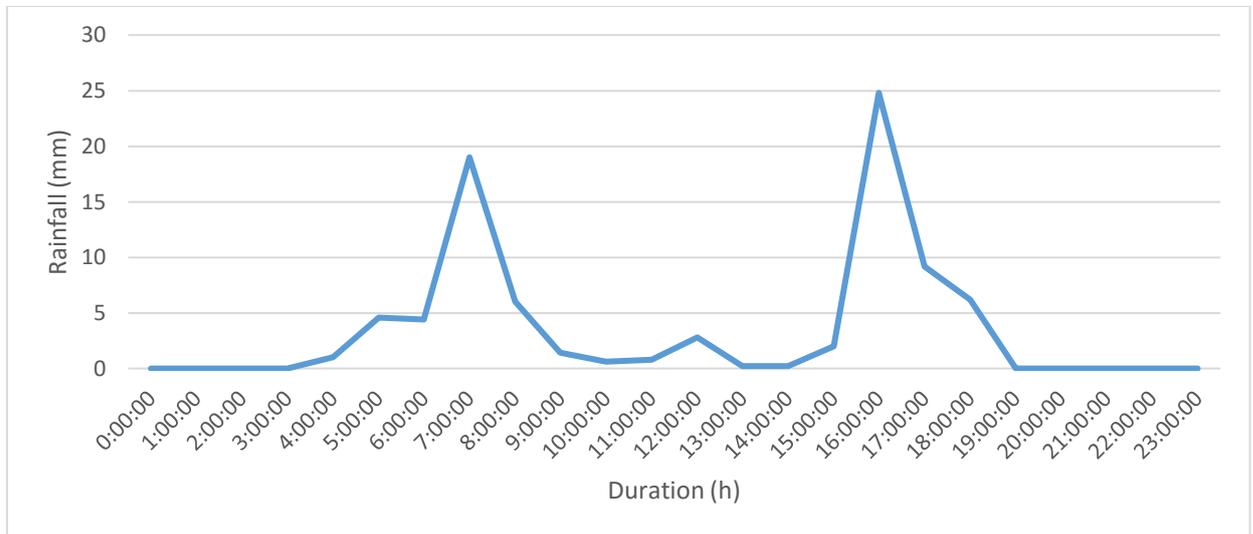


Figura 27 Variación de la precipitación a lo largo del día 31 de julio de 2015 (Fuente propia)

El evento tuvo una duración de 15 horas con lo cual se dio una intensidad media de lluvia de 5,54667 mm/h. Debido a que los criterios de selección de un evento son muy estrictos, no se pueden aislar los dos picos del grafico considerándolos eventos aislados ya que en ningún momento se produjo un parón del evento de lluvia igual o superior a una hora.

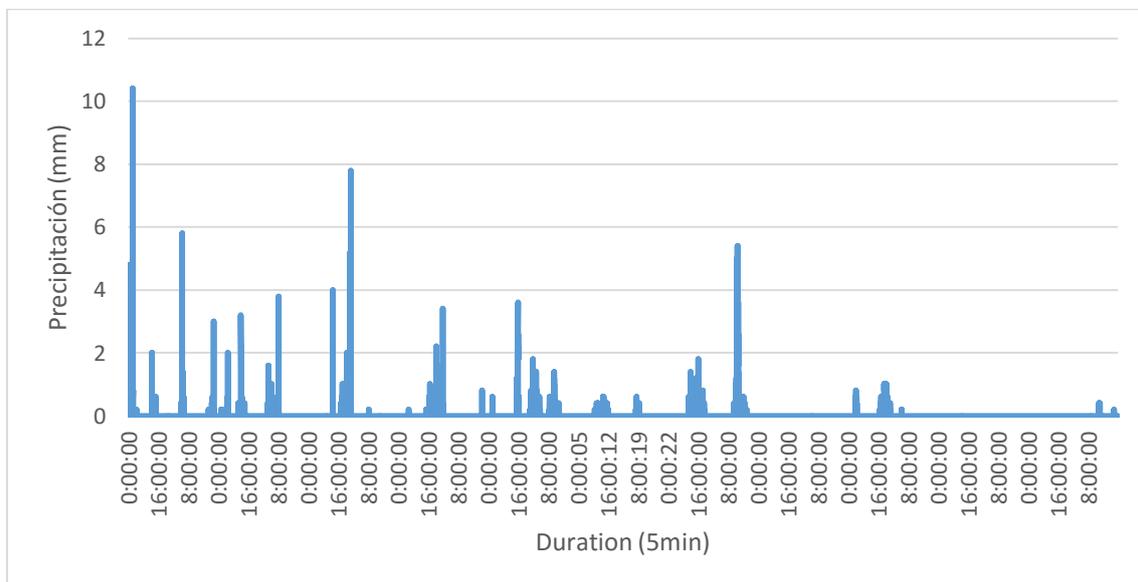


Figura 28 Variación de la precipitación (5 minutos) a lo largo del día 31 de julio de 2015 (Fuente propia)

La figura anterior muestra la distribución de lluvias a lo largo del día en que se produjo el flujo de derrubios. La precisión del grafico es la misma que el sistema de medias de la lluvia (registro

cada 5 minutos). Se ve claramente un pico entre las 15h y las 16h. Este aumento drástico de la lluvia caída fue el principal causante de la avenida.

Viendo los datos de lluvia caídos el día del evento y el 2 de noviembre parecería lógico pensar que si con una lluvia máxima de 24,8mm en una hora se había producido una avenida también debería producirse otro con una lluvia de 157,8 a lo largo de nueve horas. Y, sin embargo, no es así. La razón es que **la iniciación de un proceso de movimiento de masa en alta montaña es más sensible a lluvias muy intensas en un corto periodo de tiempo que a lluvias más intensas pero más duraderas.**

Los siguientes gráficos representan la intensidad de lluvia horaria del 31/07 y del 02/11. Como la escala del eje de ordenadas es la misma, podemos comparar las pendientes de los eventos de lluvia intensa. La pendiente que se produce en el primer caso es de 22,8 ya que la intensidad medida a las 16h fue de 24,8mm y a las 15h de 2mm. En cambio, la del segundo caso es de 18.2 aunque las intensidades de lluvia fueron mayores (49.8mm a las 20h y 31,6mm a las 19h).

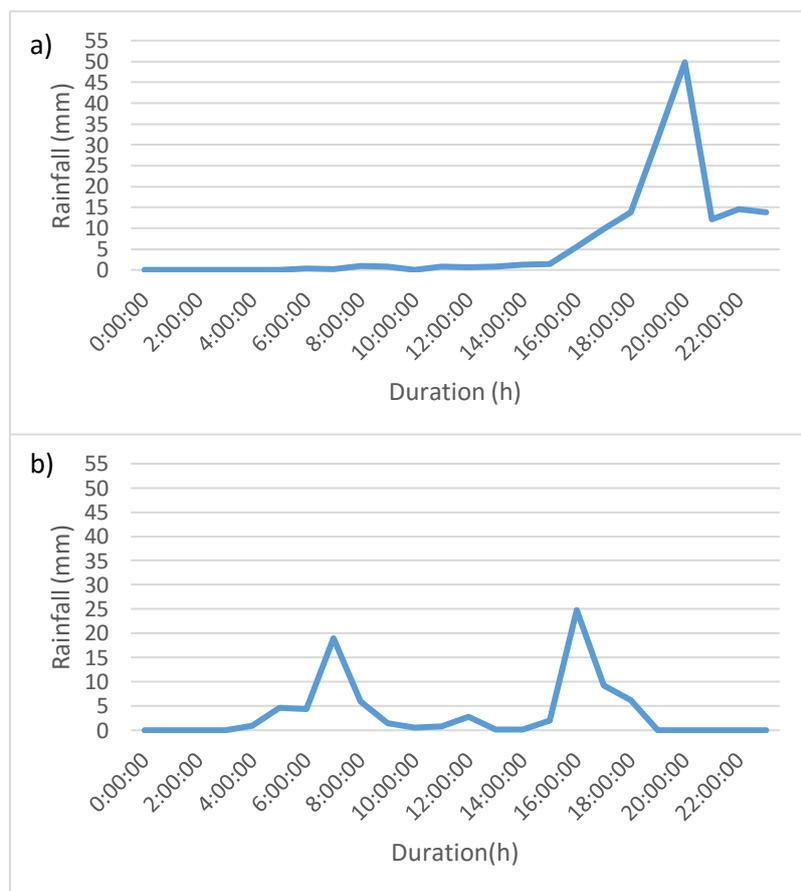


Figura 29 Hidrogramas de los días comparados a) 02/11/2015 No event b) 31/07/2015 Event (Fuente propia)

6.3. Aplicación de umbrales

En el estudio de Abancó (2016), se concluyeron una serie de umbrales que determinan el comportamiento del barranco del Rebaixader de Senet. Nuestro objetivo es elaborar con criterio razonable un sistema de alarma en el barranco basándonos tanto en los datos de los años pasados como en los de 2015. Para ello incluimos los datos de los 25 eventos considerados potenciales de desencadenar un flujo de derrubios en 2015 junto a los del resto de los años.

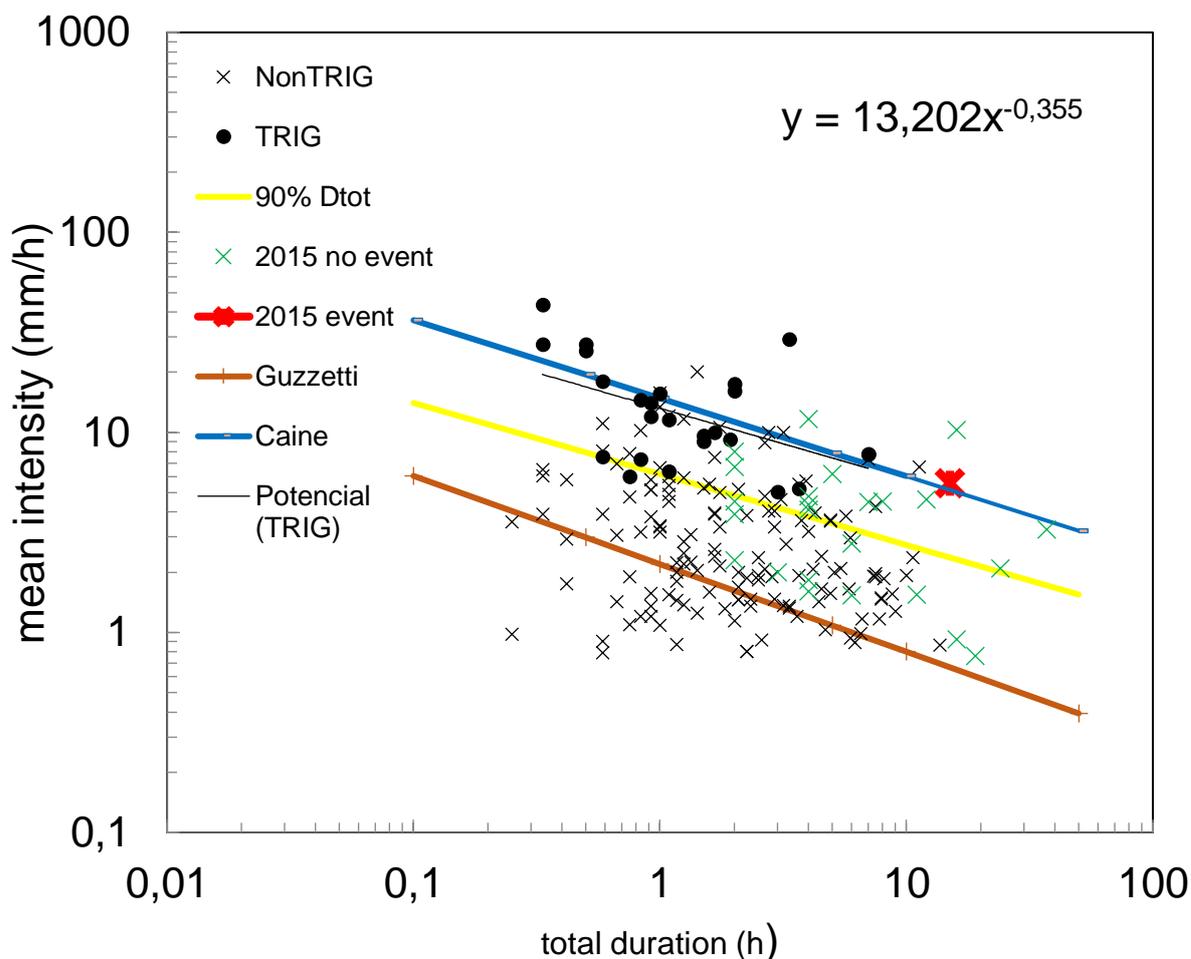


Figura 30 Representación en ejes logarítmicos de: Eventos de lluvia que produjeron TRIG y eventos NonTRIG según año (entre 2009-2014 y 2015), línea de tendencia potencial de los eventos de avenida y umbrales locales e internacionales (Fuente propia).

Los puntos representados por cruces negras son los eventos entre 2009 y 2014 que no dieron lugar a un flujo de derrubios (NonTRIG). En cambio, los del mismo color pero con forma circular son los que sí que produjeron uno (TRIG). Los puntos de color verde en forma de cruces son los eventos que no dieron lugar a una avenida durante el 2015. Por último, el punto en forma de cruz roja negrita es el único evento que se dio a lo largo de 2015.

La línea de tendencia potencial representa la tendencia dentro de los eventos de avenida entre 2009 y 2014. Su ecuación es $13,202 * x^{-0,355}$.

El umbral representado es el $6.2 * x^{-0.36}$. Este umbral deja el 90% de los casos de avenida por encima de él. Junto a él se representan los umbrales internacionales de Guzzetti (2008) y Caine (1980)

Una vez añadidos los datos de 2015 el umbral anterior variará. El cambio se debe al aumento en un evento el total de eventos que generaron flujo de derrubios. Se utiliza una línea de tendencia de tipo potencial y se ajusta visualmente dejando el 10% de los eventos por debajo de ella. Como la pendiente de la recta no se debe modificar, se cambiará el coeficiente para obtener el porcentaje deseado.

Entre 2009 y 2014 se produjeron 25 eventos y en 2015 sólo uno. Significa que 2,5 eventos deben quedar por debajo del umbral. La variación del umbral es muy pequeña si se consideran los eventos de 2015 o si no se consideran; por lo cual no variaremos la ecuación del mismo.

Se debe estudiar de forma muy exhaustiva el número de casos que superaron el umbral y no produjeron una avenida. Estos eventos son las consideradas falsas alarmas.

En primer lugar se calcula la diferencia entre la intensidad de cada evento y la intensidad del umbral para esa duración. Obtenemos una columna de valores positivos y negativos. Los valores positivos resultados de esta diferencia, significan que el punto se encuentra por encima del umbral en el gráfico. Los negativos significan lo contrario. A continuación se usa un filtro para seleccionar unos u otros.

6.4. Sistema de alarma

En los sistemas ya instalados en países como Suiza o Austria no solo utilizan datos de lluvia sino que también disponen de sistemas instalados en los barrancos que detectan el movimiento. También disponen de cables instalados en el canal del barranco que se usan para dar un aviso crítico cuando se rompen debido a la caída de un bloque.

La tarea más compleja es la de crear un criterio de elección de los distintos niveles de alarma.

La propuesta se basa en un sistema de colores en el grafico anterior. Considerando amarillo el nivel de peligrosidad menor. En segundo lugar está el color naranja y por último el rojo. Las medidas que se podrían tomar para cada nivel de peligrosidad son las siguientes:

Tabla 7 Propuestas y colores para los distintos niveles de alerta (Fuente propia)

| Nivel de alerta | Propuesta | Color |
|-----------------|--|---------|
| Alerta amarilla | Un SMS al alcalde o a Protección Civil | Amarelo |
| Alerta naranja | Activación de una sirena de alarma | Naranja |
| Alerta roja | Preparar desalojo | Rojo |

El hecho de que se produzca un flujo de derrubios, como ya hemos expuesto a lo largo de este estudio, no solo depende de la intensidad de lluvia en una duración determinada. Por ello, el hecho de fijar unos valores de umbrales, refiriéndonos a unos porcentajes, no se refiere en ningún caso a la probabilidad de que se produzca una avenida. Estos porcentajes están

relacionados con el número de eventos que se encuentran por encima y por debajo del umbral. No solo eso, sino que los valores sobre los que se calcula el umbral son datos de eventos ya ocurridos.

Los límites que daremos a nuestras franjas de alerta son:

Límite inferior **rojo**: El umbral internacional de Caine (1980) deja por encima un número reducido de eventos en los que no se dio un flujo de derrubios. Por ello hemos usado el coeficiente de dicho umbral junto al exponente de nuestro umbral para determinar el límite superior de nuestra propuesta de sistema de alarma.

$$I_{red} = 14.82 * D_{tot}^{-0.36}$$

Límite inferior **naranja**: El umbral elegido para este caso es el que deja un 80% de los casos de generación de un flujo de derrubios por encima de él.

$$I_{naranja} = 10 * D_{tot}^{-0.36}$$

Límite interior **amarillo**: Se trata del umbral utilizado por Abancó (2016) que deja un 90% de los casos de debris flow por encima de él.

$$I_{amarillo} = 6.2 * D_{tot}^{-0.36}$$

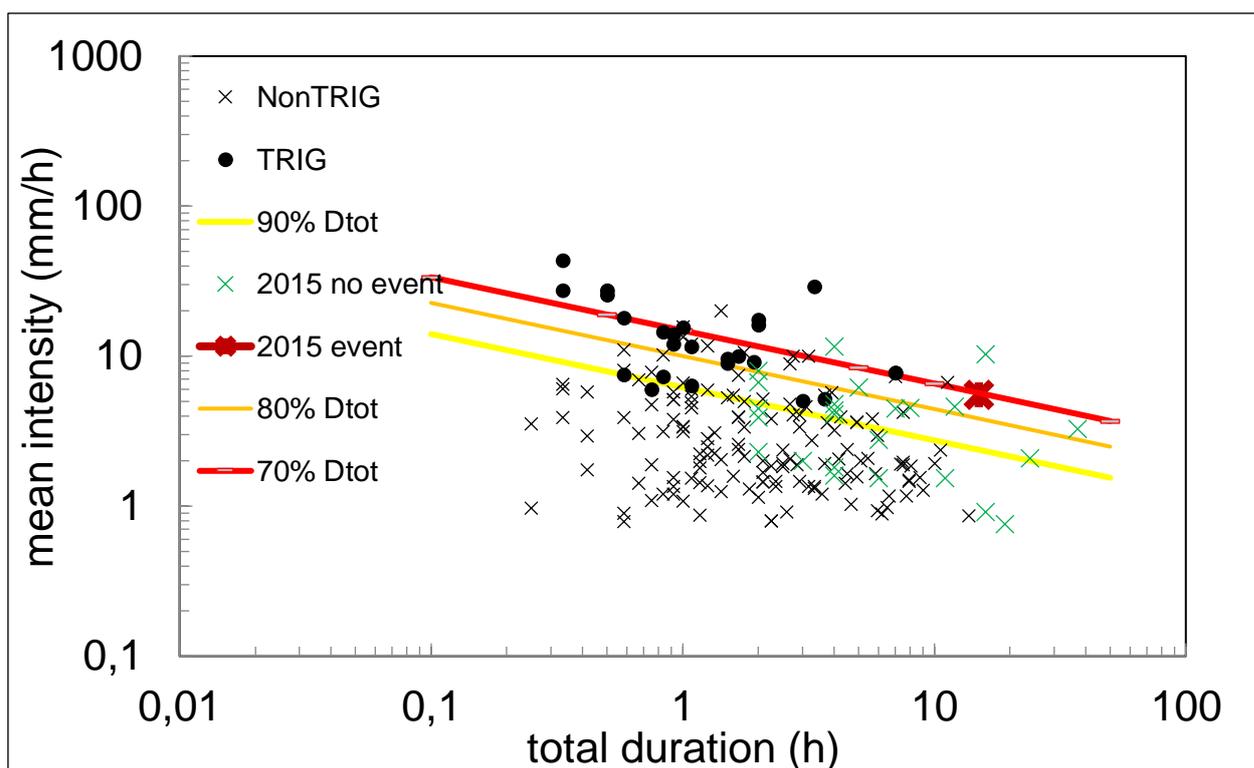


Figura 31 Representación de los tres niveles de alarma en ejes logarítmicos de Intensidad media vs Duración total (Fuente propia)

El resultado de aplicar el umbral del 90% nos expone que se dieron 29 (de 142) eventos por encima del umbral que no dieron lugar a ninguna avenida entre 2009 y 2014. En 2015 se dieron 13 de un total de 25 estudiados. Lógicamente, tanto los 25 eventos que dieron lugar a avenida

en el primer intervalo de años como el evento solitario de 2015 se encuentran por encima del umbral.

El conjunto de los 29 eventos entre 2009 y 2014 y los 13 de 2015 forman las llamadas falsas alarmas.

Existen dos tipos de falsas alarmas. Los eventos que no generan un flujo de derrubios y se encuentran por encima del umbral (falsa alarma tipo 1) y los eventos que generan un flujo de derrubios y se encuentran por debajo del umbral (falsa alarma tipo 2).

La diferencia entre ambos reside claramente en la peligrosidad. Las falsas alarmas de tipo 2 son avenidas que no se han tenido en cuenta, esto puede generar daños de mayor o menor magnitud dependiendo de las características de la misma. En cambio, las falsas alarmas de tipo 1 avisan o pueden llegar a movilizar a la población por un hipotético evento que no se produce.

Ambas son el objetivo a minimizar, principalmente las de tipo 2, mediante creación de umbrales más precisos y sistemas de alarma más eficaces.

7. CONCLUSIONES

Los movimientos de masa estudiados, los flujos de derrubios, son movimientos rápidos que tienen lugar en canales cortos, de gran pendiente y en un tiempo muy corto. Como consecuencia, los sistemas de alarma tienen un papel fundamental en la seguridad de la zona.

A demás, se tiene que minimizar el riesgo de falla del sistema cuando emite una alerta de un posible movimiento de masa ya que para que se forme uno, entran en juego importantes factores como el material disponible i el agua infiltrada anteriormente, además de la lluvia caída. Es importante minimizar las falsas alarmas, hecho que se puede conseguir a través de una elección racional de los sensores utilizados y su localización.

La gran importancia de los umbrales en los episodios de lluvia para caracterizar movimientos en masa está probada. Su definición es compleja porque depende de muchas incertidumbres. Tres de ellas son el método para obtener los umbrales, la variabilidad espacial de las lluvias y la definición de una lluvia desencadenante de una avenida (Abancó et al. 2016).

Tanto el análisis de las lluvias de 2015 como el de los años 2009 hasta 2014 demostró que se produce un flujo de derrubios cuando se dan lluvias cortas e intensas. Generalmente se producen en verano y en menor medida en primavera. La iniciación del movimiento se ve afectada por la fusión nival, que influye los resultados obtenidos aumentando la cantidad de agua que tiene el suelo.

La gran diferencia constatada gracias al estudio de Abancó (2016) es que la lluvia total, la lluvia media y la intensidad máxima (floating) son los parámetros que permiten diferenciar los eventos que producen avenida de los que no la producen. Por otro lado la duración y la lluvia los días anteriores al evento no fueron características para discernir entre una avenida y una no-avenida.

Los umbrales que definen los tres niveles de alarma son una propuesta para establecer un sistema de alarma para proteger la zona de afectación del barranco del Rebaixader de caídas de bloques. Afortunadamente, este barranco no tiene elementos susceptibles de ser destruidos en su zona de acumulación. Por ello se puede estudiar sin poner en riesgo real tanto a personas como a infraestructuras.

Más allá del estudio de un barranco concreto como el del Rebaixader, sería de gran interés elaborar unos criterios generales para la instalación de sistemas de alarma en barrancos de forma genérica.

Actualmente se conocen en amplia medida las correcciones que se pueden llevar a cabo en un barranco para proteger su zona de transporte y deposición de sedimentos. Lo primordial es saber discernir cuando una obra de ese tipo está justificada y cuando no.

8. BIBLIOGRAFÍA

- ABANCÓ, C.; HÜRLIMANN, M.; MOYA, J. & BERENQUER, M. (2016): "Critical rainfall conditions for the initiation of torrential flows. Results from the Rebaixader catchment (Central Pyrenees)". *Journal of Hydrology*
- BATLLE, M. (2011): "Llindars de pluja desencadenants de corrents d'arrossegalls. Aplicació al barranc del Rebaixader". Trabajo Final de Carrera. UPC
- COROMINAS, J. & GARCÍA YAGÜE, A. (1997): "Terminología de los movimientos de ladera". IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. Vol. 3: 1051-1072
- GONZÁLEZ DE VALLEJO (2002): "Ingeniería geológica". Ed. Pearson Educación
- HÜRLIMAN, M.; ABANCÓ, C.; MOYA, J., BERENQUER, M. & VILAJOSANA, I. (2016): "Debris-Flow Monitoring for the Set-Up of a Warning and Alarm System -Experiences from the Pyrenees". *International Journal of Erosion Control Engineering* Vol. 9, No. 3, 2016
- HÜRLIMAN, M.; ABANCÓ, C.; MOYA, J. & VILAJOSANA, I. (2014): "Results and experiences gathered at the Rebaixader debris-flow monitoring site, Central Pyrenees, Spain, Landslides", DOI: 10.1007/s10346-013-0452-y
- HÜRLIMAN, M.; CHEVALIER, G.; ABANCÓ, C. & MOYA, J. (2011): "Preparing conditions and trigger factors of debris flows in the pyrenees. Case studies from Catalonia-Andorra and comparison with other mountain ranges". *International Debris Flow Conference*. Barcelona 3th-5th May 2011
- IVERSON, R.M. (1997): "The physics of debris flows". *Reviews of Geophysics*, 35, 3. Pp 245–296
- MOYA, J.; HÜRLIMAN, M.; ABANCÓ, C.; VILAJOSANA, I. (2014): "Experiences of rapid landslides monitoring and warning at catchment scale in the Pyrenees. The example of the Rebaixader test site". Andorra. *International road weather conference*
- MADRID, I. (2012): "Monitoreo de la humedad y de las presiones intersticiales en un depósito de origen glaciar y su efecto en la formación de roturas superficiales. Aplicación en un till en Senet, Alta Ribagorça." Trabajo Final de Carrera. UPC
- SAN ROMAN, C. (2010): "Experiencias en el diseño y construcción de hidrotecnias para la corrección hidrológico-forestal realizadas en Lleida". Presentación curso DARP.
- SOTO, D. (1992): "Propuesta de gastos para la redacción del *Proyecto hidrológico de defensa de Senet*". En "Hidrología forestal y protección de suelos. Técnicas y experiencias en dirección de obras". ICONA: 49-94
- TRAGSAEC (1994): "Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión". Mundiprensa.
- VARNES, D.J. (1978): "Slope movement types and processes". In R.L. Schuster y R. J. Krizek (Eds.) *Landslides: analysis and control*. Transportation Research Board. Special report 176: 11-33

ANEJO

GRÁFICOS DE LOS EVENTOS DE LLUVIA

EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 1

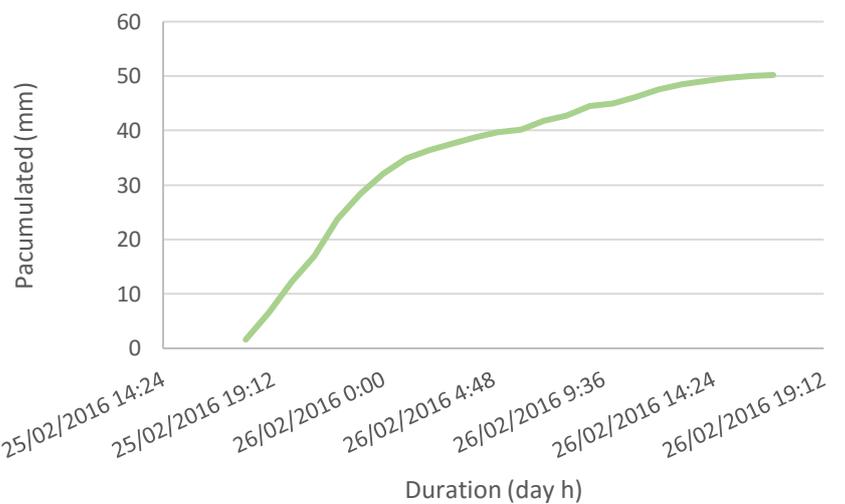
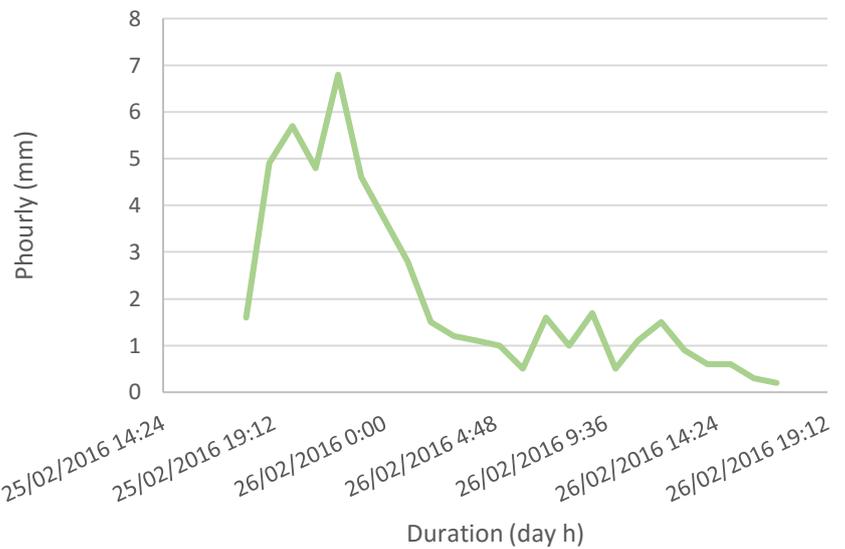
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 50,2 mm

Duración: 24h

Intensidad media: 2,091

| Duration (DD/MM/AAA hour) | Hourly (mm) | Pacumulated (mm) |
|---------------------------------|----------------|---------------------|
| 25/02/2016 18:00 | 1,6 | 1,6 |
| 25/02/2016 19:00 | 4,9 | 6,5 |
| 25/02/2016 20:00 | 5,7 | 12,2 |
| 25/02/2016 21:00 | 4,8 | 17 |
| 25/02/2016 22:00 | 6,8 | 23,8 |
| 25/02/2016 23:00 | 4,6 | 28,4 |
| 26/02/2016 0:00 | 3,7 | 32,1 |
| 26/02/2016 1:00 | 2,8 | 34,9 |
| 26/02/2016 2:00 | 1,5 | 36,4 |
| 26/02/2016 3:00 | 1,2 | 37,6 |
| 26/02/2016 4:00 | 1,1 | 38,7 |
| 26/02/2016 5:00 | 1 | 39,7 |
| 26/02/2016 6:00 | 0,5 | 40,2 |
| 26/02/2016 7:00 | 1,6 | 41,8 |
| 26/02/2016 8:00 | 1 | 42,8 |
| 26/02/2016 9:00 | 1,7 | 44,5 |
| 26/02/2016 10:00 | 0,5 | 45 |
| 26/02/2016 11:00 | 1,1 | 46,1 |
| 26/02/2016 12:00 | 1,5 | 47,6 |
| 26/02/2016 13:00 | 0,9 | 48,5 |
| 26/02/2016 14:00 | 0,6 | 49,1 |
| 26/02/2016 15:00 | 0,6 | 49,7 |
| 26/02/2016 16:00 | 0,3 | 50 |
| 26/02/2016 17:00 | 0,2 | 50,2 |

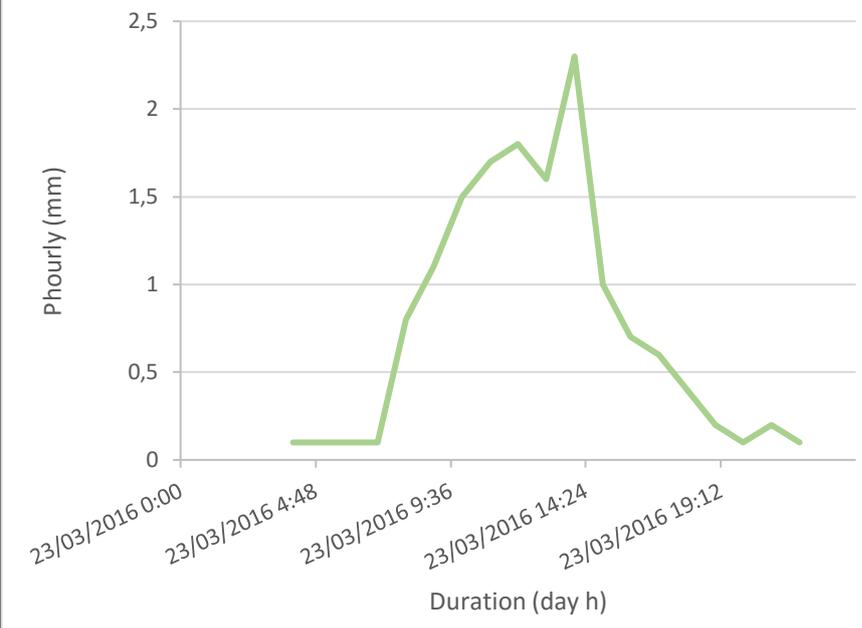


EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 2

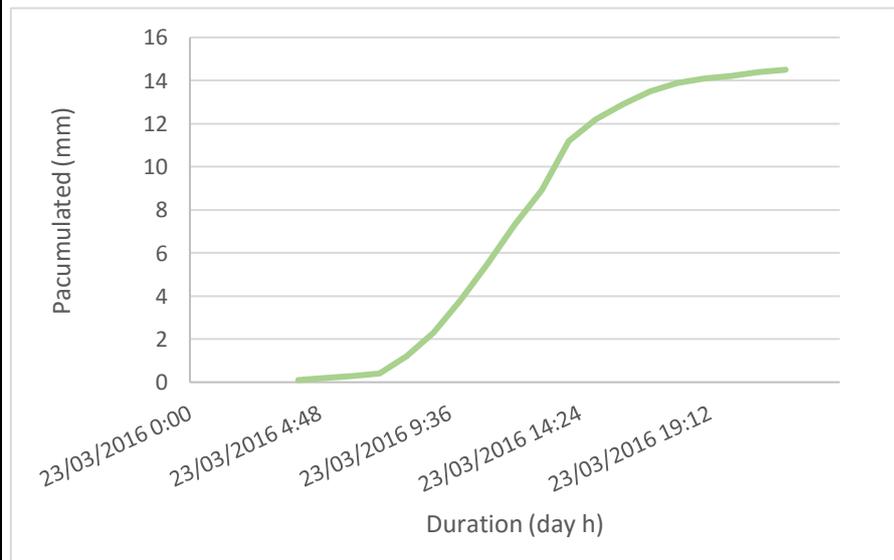
FECHA DEL EVENTO:

Datos principales: Lluvia total: 14,5 mm Duración: 19h Intensidad media:0,763

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 23/03/2016 4:00 | 0,1 |
| 23/03/2016 5:00 | 0,1 |
| 23/03/2016 6:00 | 0,1 |
| 23/03/2016 7:00 | 0,1 |
| 23/03/2016 8:00 | 0,8 |
| 23/03/2016 9:00 | 1,1 |
| 23/03/2016 10:00 | 1,5 |
| 23/03/2016 11:00 | 1,7 |
| 23/03/2016 12:00 | 1,8 |
| 23/03/2016 13:00 | 1,6 |
| 23/03/2016 14:00 | 2,3 |
| 23/03/2016 15:00 | 1 |
| 23/03/2016 16:00 | 0,7 |
| 23/03/2016 17:00 | 0,6 |
| 23/03/2016 18:00 | 0,4 |
| 23/03/2016 19:00 | 0,2 |
| 23/03/2016 20:00 | 0,1 |
| 23/03/2016 21:00 | 0,2 |
| 23/03/2016 22:00 | 0,1 |



| Duration (day h) | Pacumulated (mm) |
|------------------|------------------|
| 23/03/2016 4:00 | 0,1 |
| 23/03/2016 5:00 | 0,2 |
| 23/03/2016 6:00 | 0,3 |
| 23/03/2016 7:00 | 0,4 |
| 23/03/2016 8:00 | 1,2 |
| 23/03/2016 9:00 | 2,3 |
| 23/03/2016 10:00 | 3,8 |
| 23/03/2016 11:00 | 5,5 |
| 23/03/2016 12:00 | 7,3 |
| 23/03/2016 13:00 | 8,9 |
| 23/03/2016 14:00 | 11,2 |
| 23/03/2016 15:00 | 12,2 |
| 23/03/2016 16:00 | 12,9 |
| 23/03/2016 17:00 | 13,5 |
| 23/03/2016 18:00 | 13,9 |
| 23/03/2016 19:00 | 14,1 |
| 23/03/2016 20:00 | 14,2 |
| 23/03/2016 21:00 | 14,4 |
| 23/03/2016 22:00 | 14,5 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 3

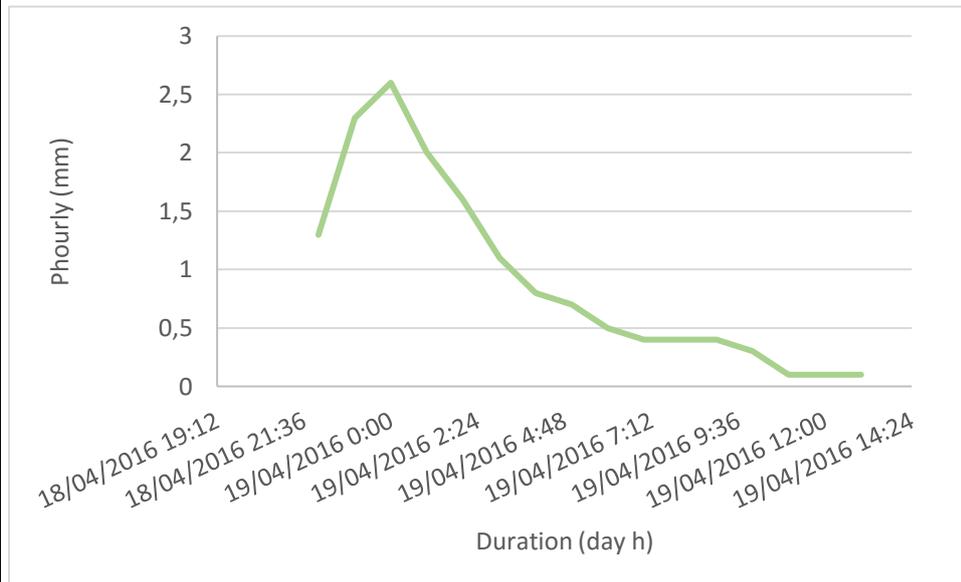
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total:14,7 mm

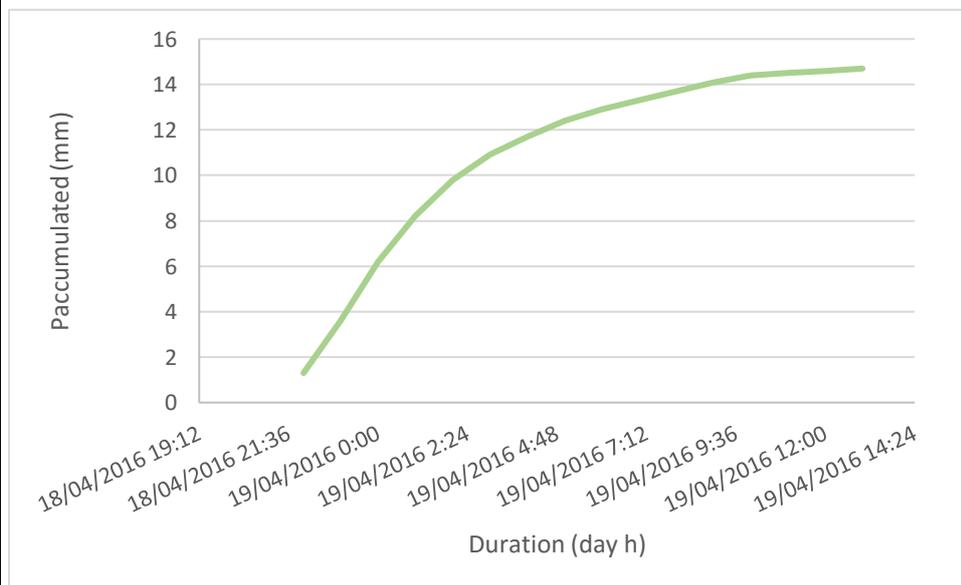
Duración: 16 h

Intensidad media:0,918

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 18/04/2016 22:00 | 1,3 |
| 18/04/2016 23:00 | 2,3 |
| 19/04/2016 0:00 | 2,6 |
| 19/04/2016 1:00 | 2 |
| 19/04/2016 2:00 | 1,6 |
| 19/04/2016 3:00 | 1,1 |
| 19/04/2016 4:00 | 0,8 |
| 19/04/2016 5:00 | 0,7 |
| 19/04/2016 6:00 | 0,5 |
| 19/04/2016 7:00 | 0,4 |
| 19/04/2016 8:00 | 0,4 |
| 19/04/2016 9:00 | 0,4 |
| 19/04/2016 10:00 | 0,3 |
| 19/04/2016 11:00 | 0,1 |
| 19/04/2016 12:00 | 0,1 |
| 19/04/2016 13:00 | 0,1 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 18/04/2016 22:00 | 1,3 |
| 18/04/2016 23:00 | 3,6 |
| 19/04/2016 0:00 | 6,2 |
| 19/04/2016 1:00 | 8,2 |
| 19/04/2016 2:00 | 9,8 |
| 19/04/2016 3:00 | 10,9 |
| 19/04/2016 4:00 | 11,7 |
| 19/04/2016 5:00 | 12,4 |
| 19/04/2016 6:00 | 12,9 |
| 19/04/2016 7:00 | 13,3 |
| 19/04/2016 8:00 | 13,7 |
| 19/04/2016 9:00 | 14,1 |
| 19/04/2016 10:00 | 14,4 |
| 19/04/2016 11:00 | 14,5 |
| 19/04/2016 12:00 | 14,6 |
| 19/04/2016 13:00 | 14,7 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 4

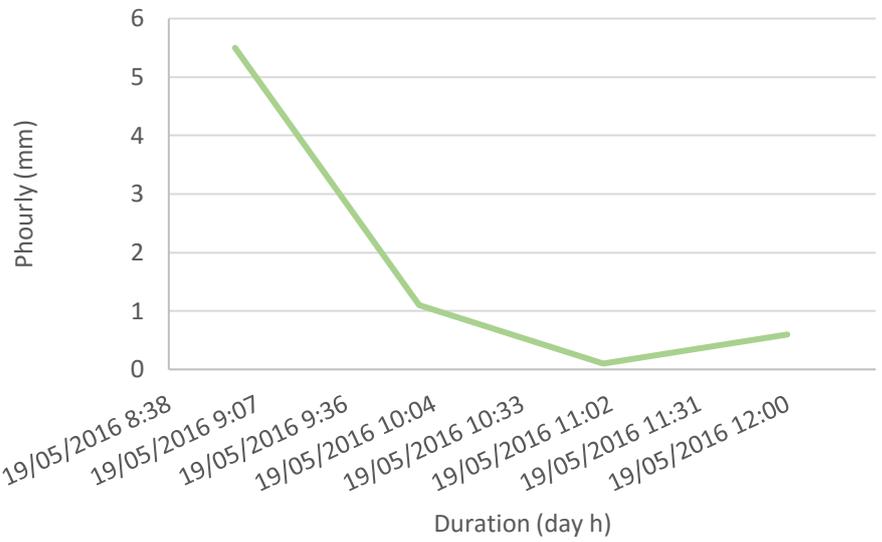
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 7,3 mm

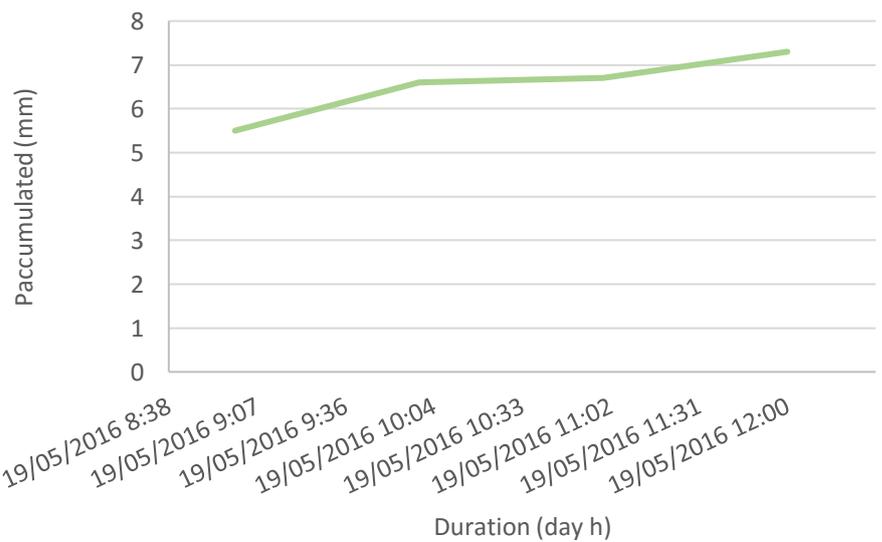
Duración: 4h

Intensidad media: 1,825

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 19/05/2016 9:00 | 5,5 |
| 19/05/2016 10:00 | 1,1 |
| 19/05/2016 11:00 | 0,1 |
| 19/05/2016 12:00 | 0,6 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 19/05/2016 9:00 | 5,5 |
| 19/05/2016 10:00 | 6,6 |
| 19/05/2016 11:00 | 6,7 |
| 19/05/2016 12:00 | 7,3 |

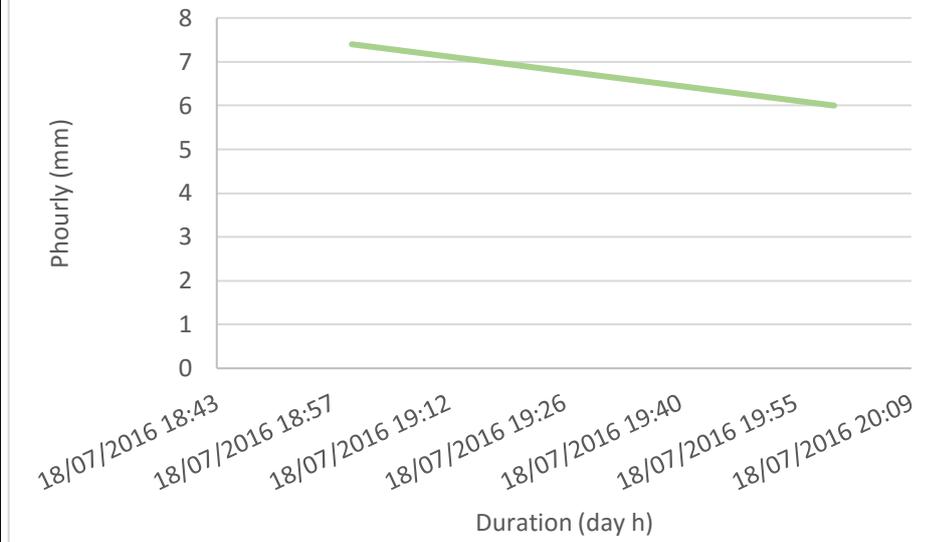


EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 5

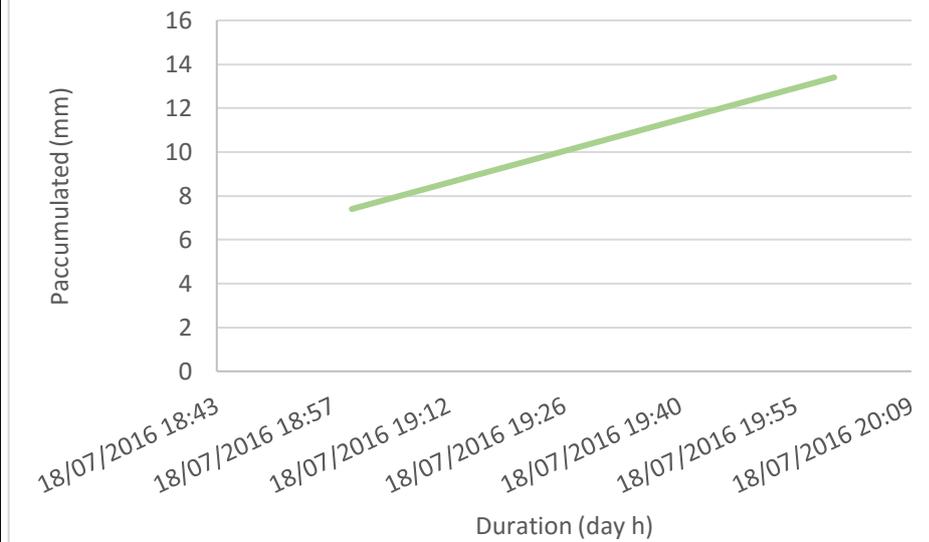
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 13,4 mm Duración: 2h Intensidad media: 6,7

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 18/07/2016 19:00 | 7,4 |
| 18/07/2016 20:00 | 6 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 18/07/2016 19:00 | 7,4 |
| 18/07/2016 20:00 | 13,4 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 6

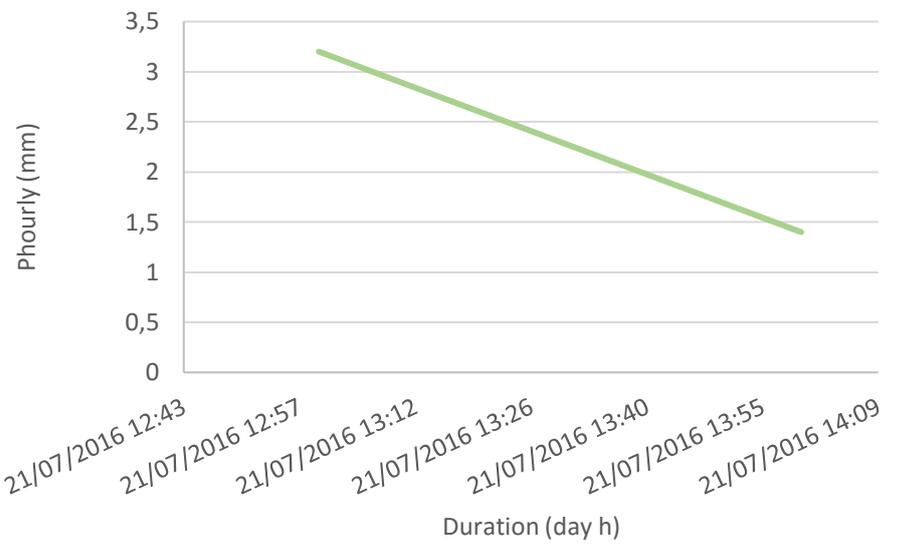
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 4,6 mm

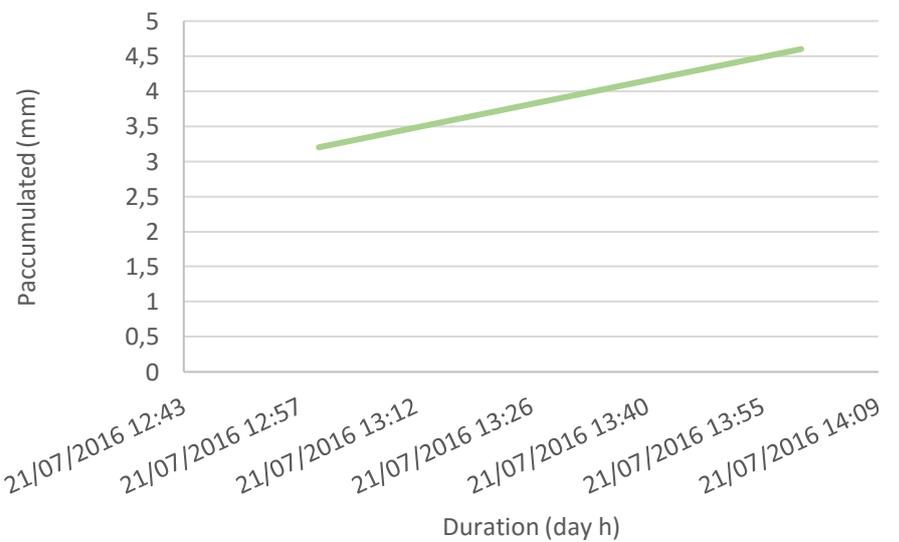
Duración: 2h

Intensidad media: 2,3

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 21/07/2016 13:00 | 3,2 |
| 21/07/2016 14:00 | 1,4 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 21/07/2016 13:00 | 3,2 |
| 21/07/2016 14:00 | 4,6 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 7

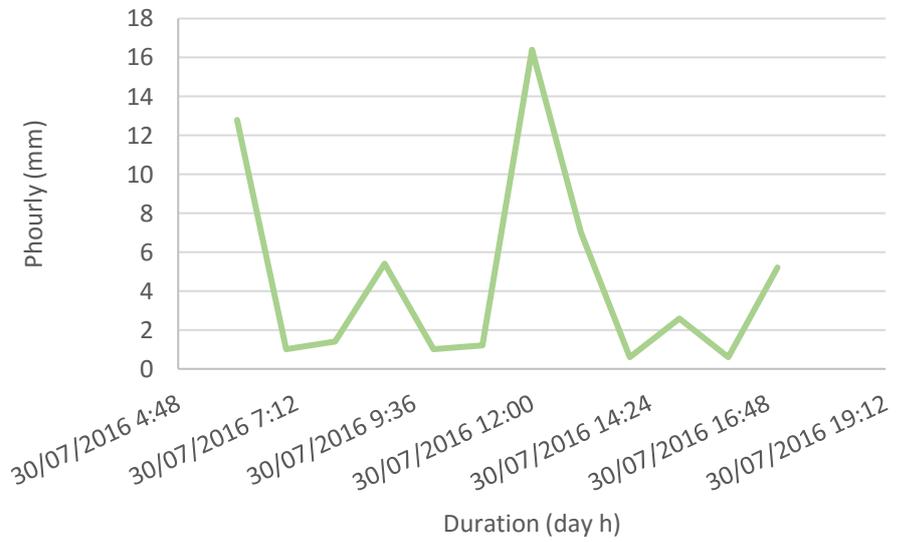
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 55,2 mm

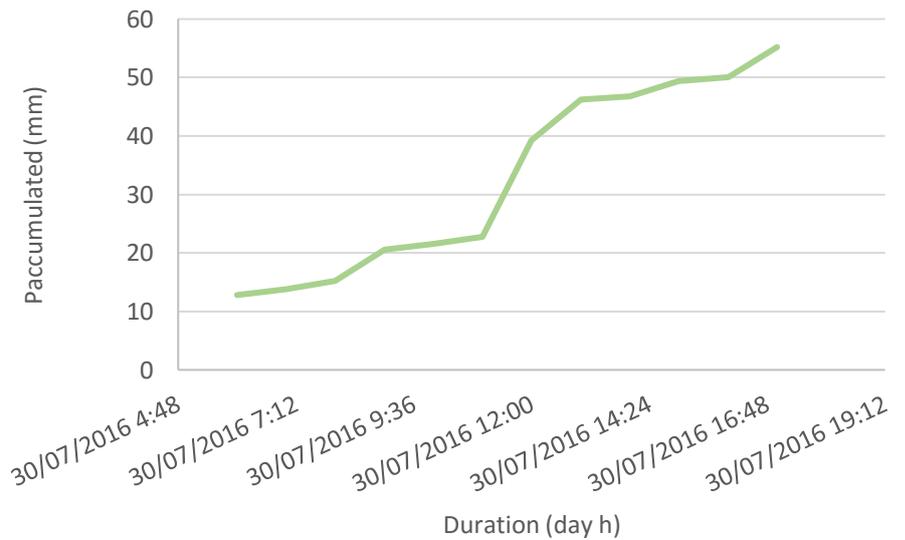
Duración: 12h

Intensidad media: 4,6

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 30/07/2016 6:00 | 12,8 |
| 30/07/2016 7:00 | 1 |
| 30/07/2016 8:00 | 1,4 |
| 30/07/2016 9:00 | 5,4 |
| 30/07/2016 10:00 | 1 |
| 30/07/2016 11:00 | 1,2 |
| 30/07/2016 12:00 | 16,4 |
| 30/07/2016 13:00 | 7 |
| 30/07/2016 14:00 | 0,6 |
| 30/07/2016 15:00 | 2,6 |
| 30/07/2016 16:00 | 0,6 |
| 30/07/2016 17:00 | 5,2 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 30/07/2016 6:00 | 12,8 |
| 30/07/2016 7:00 | 13,8 |
| 30/07/2016 8:00 | 15,2 |
| 30/07/2016 9:00 | 20,6 |
| 30/07/2016 10:00 | 21,6 |
| 30/07/2016 11:00 | 22,8 |
| 30/07/2016 12:00 | 39,2 |
| 30/07/2016 13:00 | 46,2 |
| 30/07/2016 14:00 | 46,8 |
| 30/07/2016 15:00 | 49,4 |
| 30/07/2016 16:00 | 50 |
| 30/07/2016 17:00 | 55,2 |

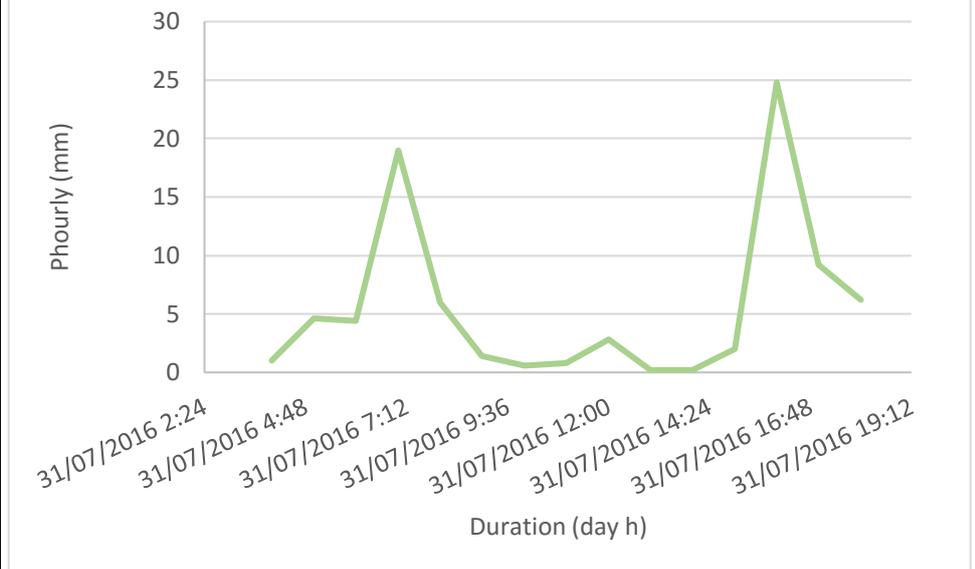


EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 8

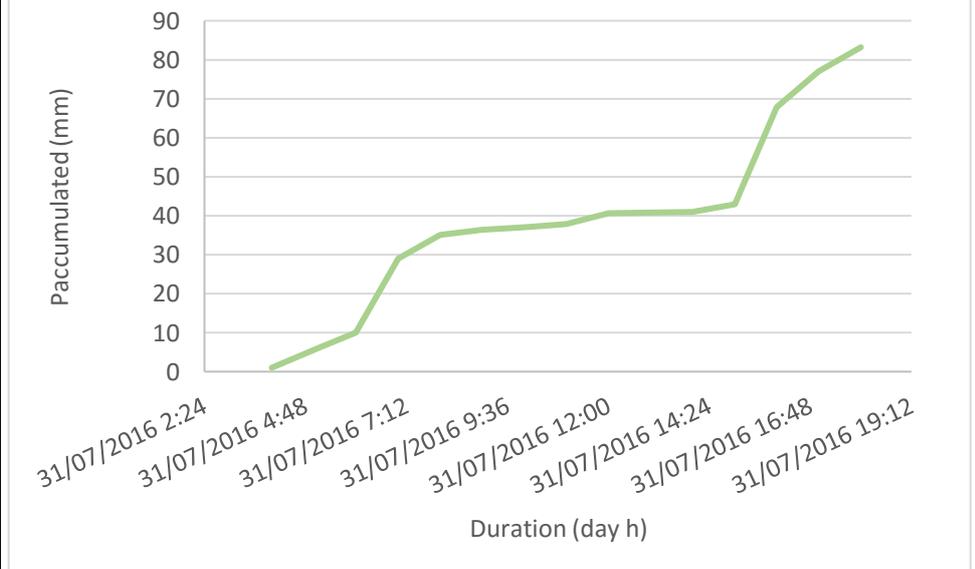
FECHA DEL EVENTO:

Datos principales: Lluvia total: 83,2 Duración: 15h Intensidad media: 5,546

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 31/07/2016 4:00 | 1 |
| 31/07/2016 5:00 | 4,6 |
| 31/07/2016 6:00 | 4,4 |
| 31/07/2016 7:00 | 19 |
| 31/07/2016 8:00 | 6 |
| 31/07/2016 9:00 | 1,4 |
| 31/07/2016 10:00 | 0,6 |
| 31/07/2016 11:00 | 0,8 |
| 31/07/2016 12:00 | 2,8 |
| 31/07/2016 13:00 | 0,2 |
| 31/07/2016 14:00 | 0,2 |
| 31/07/2016 15:00 | 2 |
| 31/07/2016 16:00 | 24,8 |
| 31/07/2016 17:00 | 9,2 |
| 31/07/2016 18:00 | 6,2 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 31/07/2016 4:00 | 1 |
| 31/07/2016 5:00 | 5,6 |
| 31/07/2016 6:00 | 10 |
| 31/07/2016 7:00 | 29 |
| 31/07/2016 8:00 | 35 |
| 31/07/2016 9:00 | 36,4 |
| 31/07/2016 10:00 | 37 |
| 31/07/2016 11:00 | 37,8 |
| 31/07/2016 12:00 | 40,6 |
| 31/07/2016 13:00 | 40,8 |
| 31/07/2016 14:00 | 41 |
| 31/07/2016 15:00 | 43 |
| 31/07/2016 16:00 | 67,8 |
| 31/07/2016 17:00 | 77 |
| 31/07/2016 18:00 | 83,2 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 9

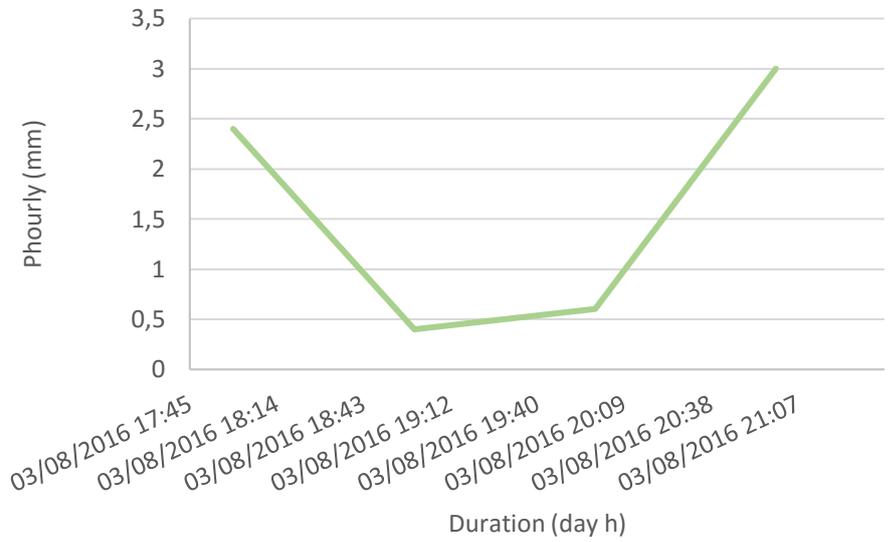
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total:6,4 mm

Duración: 4h

Intensidad media:1,6

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 03/08/2016 18:00 | 2,4 |
| 03/08/2016 19:00 | 0,4 |
| 03/08/2016 20:00 | 0,6 |
| 03/08/2016 21:00 | 3 |



| Duration (day h) | Pacumulated (mm) |
|------------------|------------------|
| 03/08/2016 18:00 | 2,4 |
| 03/08/2016 19:00 | 2,8 |
| 03/08/2016 20:00 | 3,4 |
| 03/08/2016 21:00 | 6,4 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 10

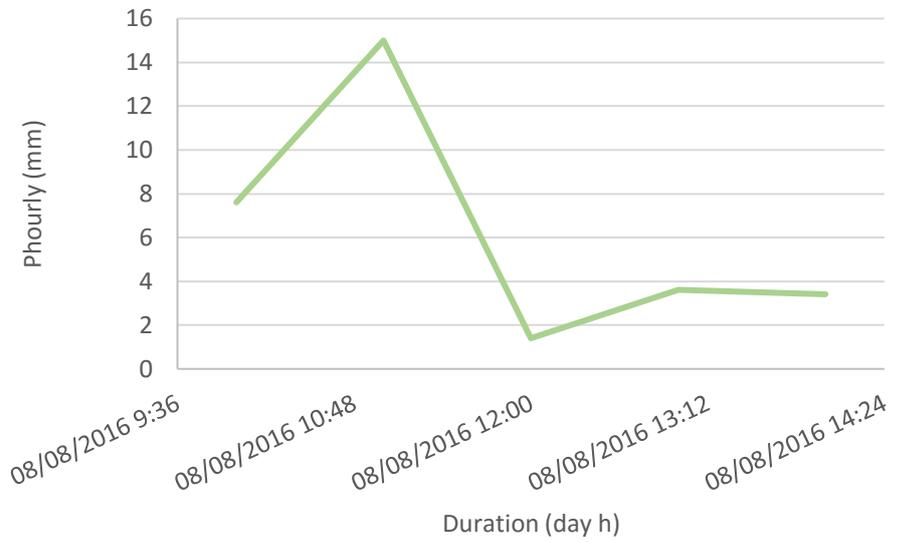
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 31 mm

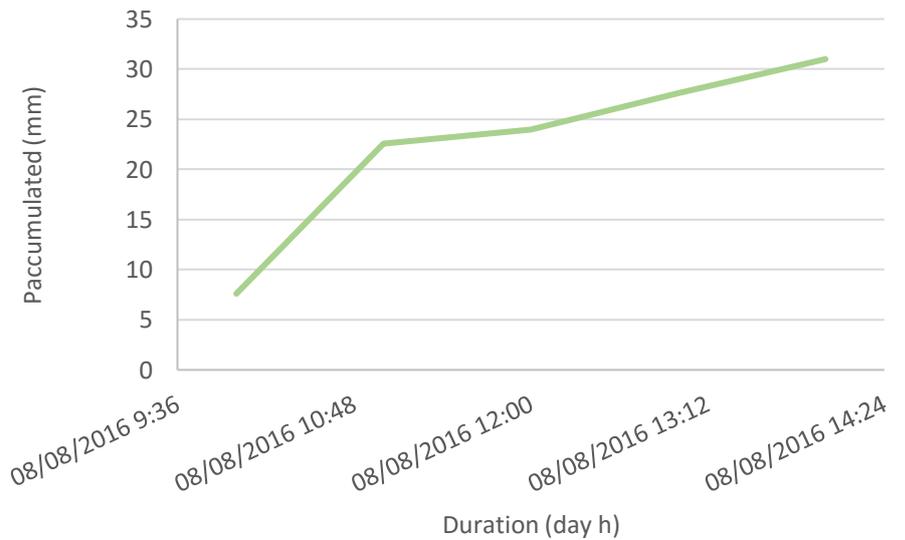
Duración: 5h

Intensidad media: 6,2

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 08/08/2016 10:00 | 7,6 |
| 08/08/2016 11:00 | 15 |
| 08/08/2016 12:00 | 1,4 |
| 08/08/2016 13:00 | 3,6 |
| 08/08/2016 14:00 | 3,4 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 08/08/2016 10:00 | 7,6 |
| 08/08/2016 11:00 | 22,6 |
| 08/08/2016 12:00 | 24 |
| 08/08/2016 13:00 | 27,6 |
| 08/08/2016 14:00 | 31 |

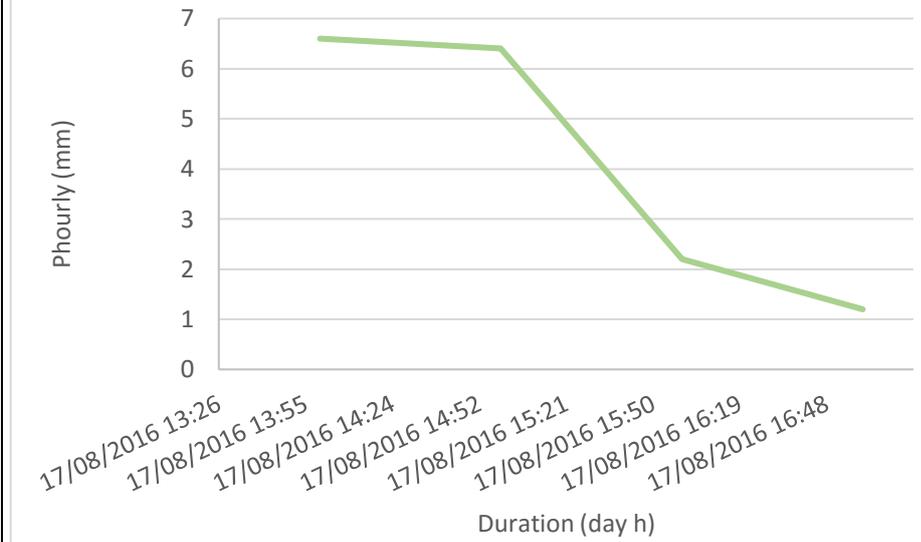


EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 11

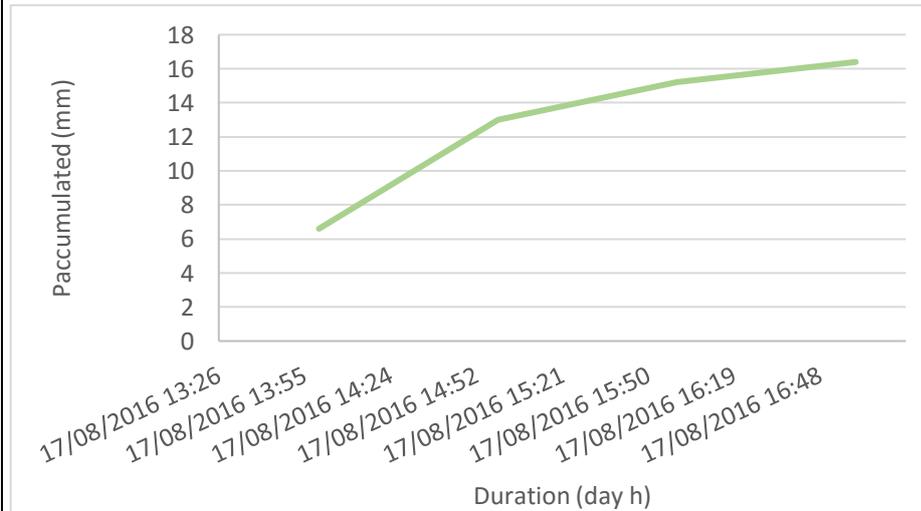
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 16,4 mm Duración: 4h Intensidad media: 4,1

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 17/08/2016 14:00 | 6,6 |
| 17/08/2016 15:00 | 6,4 |
| 17/08/2016 16:00 | 2,2 |
| 17/08/2016 17:00 | 1,2 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 17/08/2016 14:00 | 6,6 |
| 17/08/2016 15:00 | 13 |
| 17/08/2016 16:00 | 15,2 |
| 17/08/2016 17:00 | 16,4 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 12

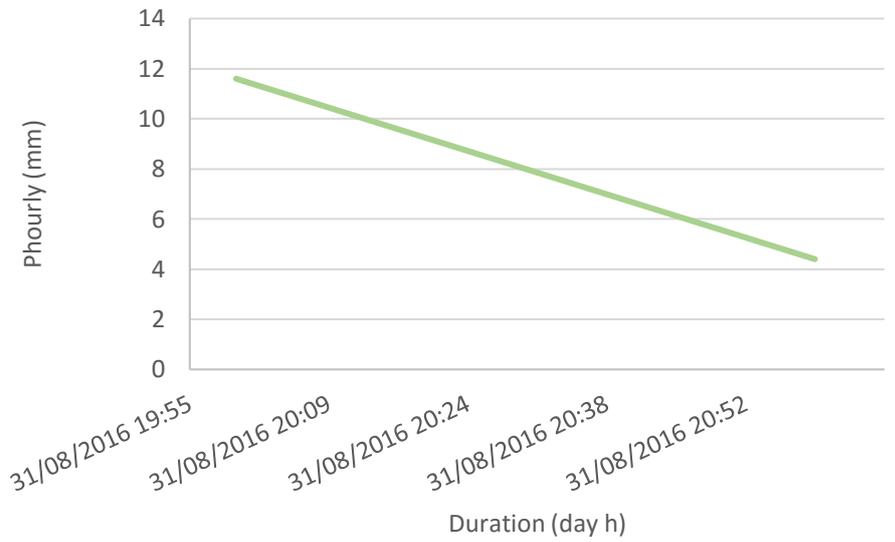
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 16 mm

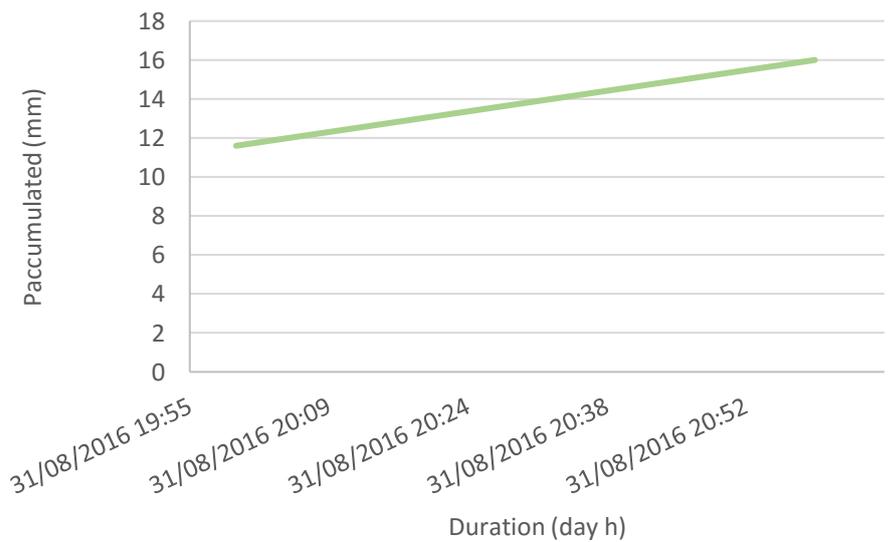
Duración: 2h

Intensidad media: 8

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 31/08/2016 20:00 | 11,6 |
| 31/08/2016 21:00 | 4,4 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 31/08/2016 20:00 | 11,6 |
| 31/08/2016 21:00 | 16 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 13

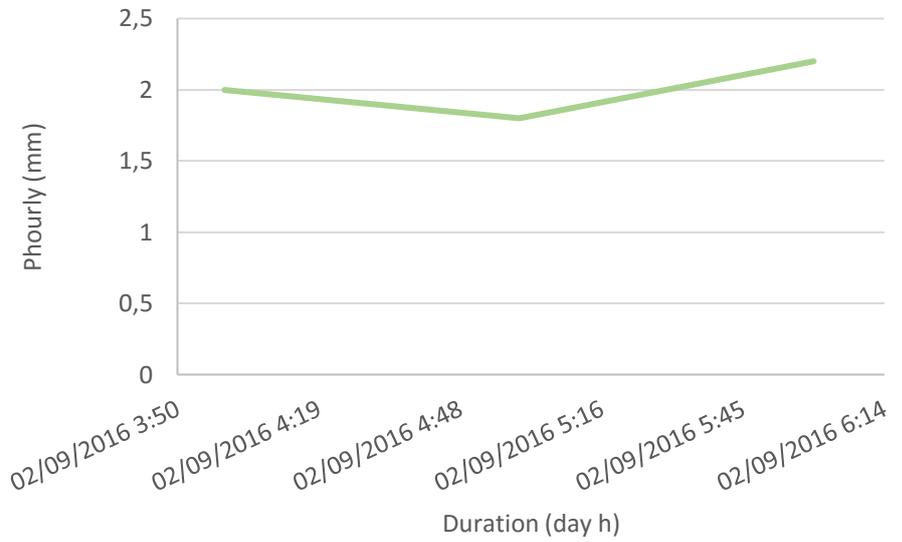
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 6 mm

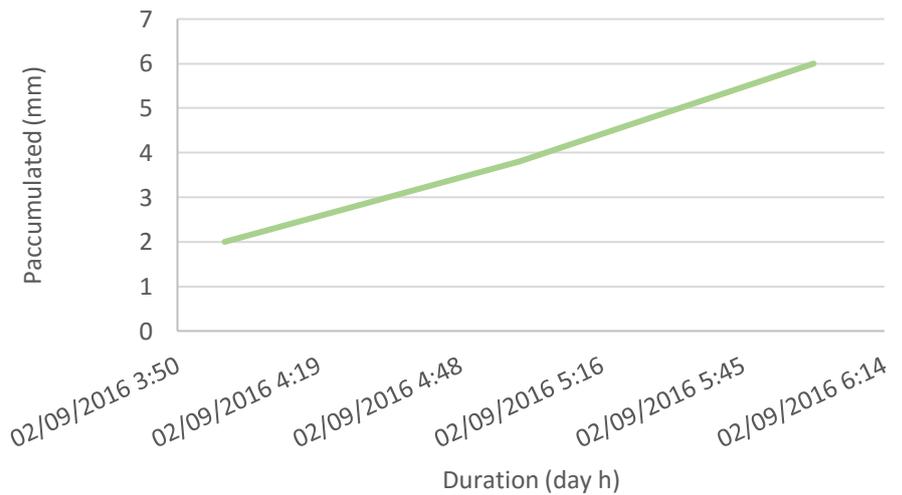
Duración: 3h

Intensidad media: 2

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 02/09/2016 4:00 | 2 |
| 02/09/2016 5:00 | 1,8 |
| 02/09/2016 6:00 | 2,2 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 02/09/2016 4:00 | 2 |
| 02/09/2016 5:00 | 3,8 |
| 02/09/2016 6:00 | 6 |

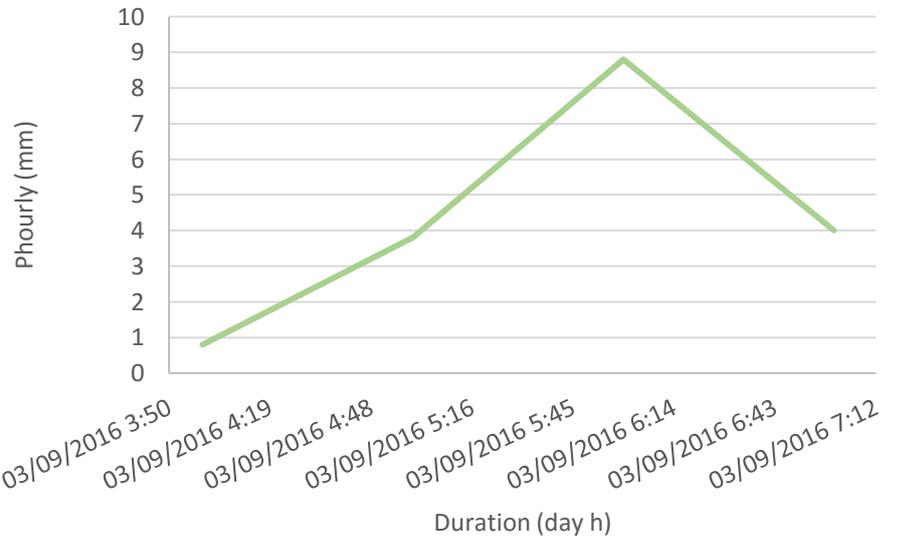


EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 14

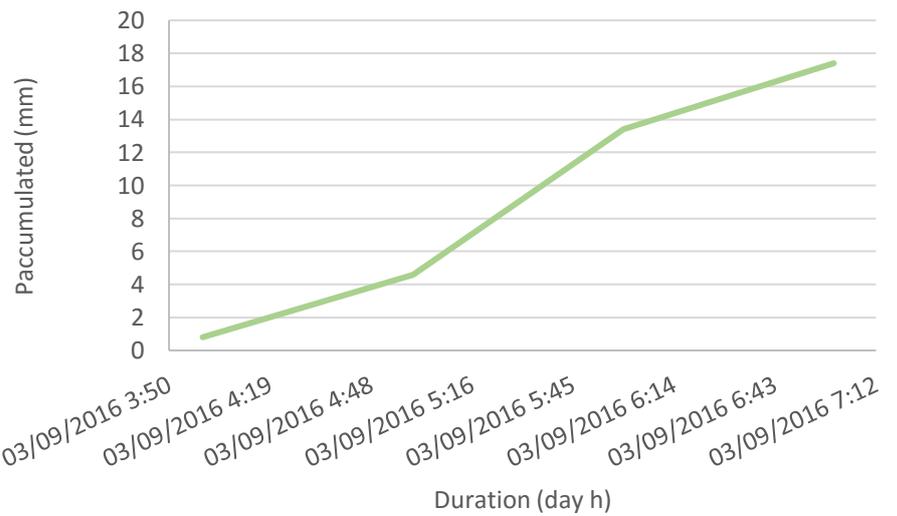
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 17,4 mm Duración: 4h Intensidad media: 4,35

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 03/09/2016 4:00 | 0,8 |
| 03/09/2016 5:00 | 3,8 |
| 03/09/2016 6:00 | 8,8 |
| 03/09/2016 7:00 | 4 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 03/09/2016 4:00 | 0,8 |
| 03/09/2016 5:00 | 4,6 |
| 03/09/2016 6:00 | 13,4 |
| 03/09/2016 7:00 | 17,4 |

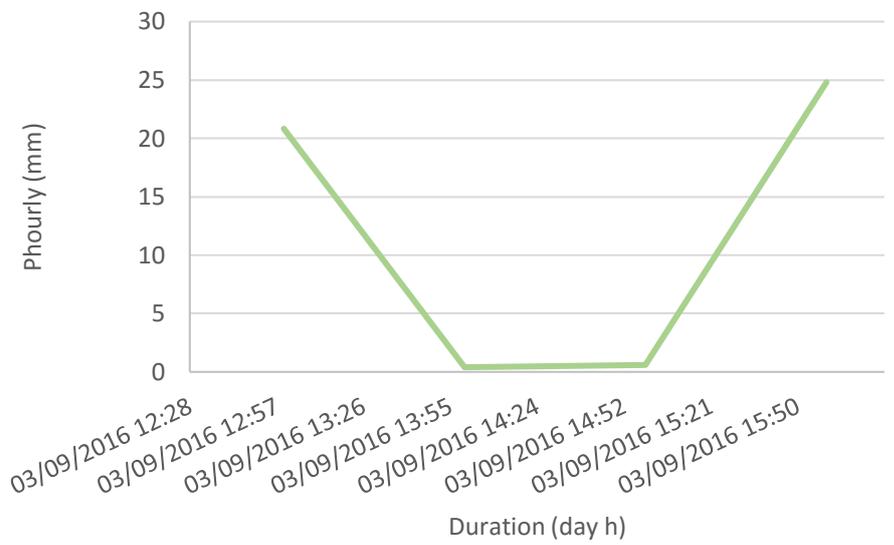


EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 15

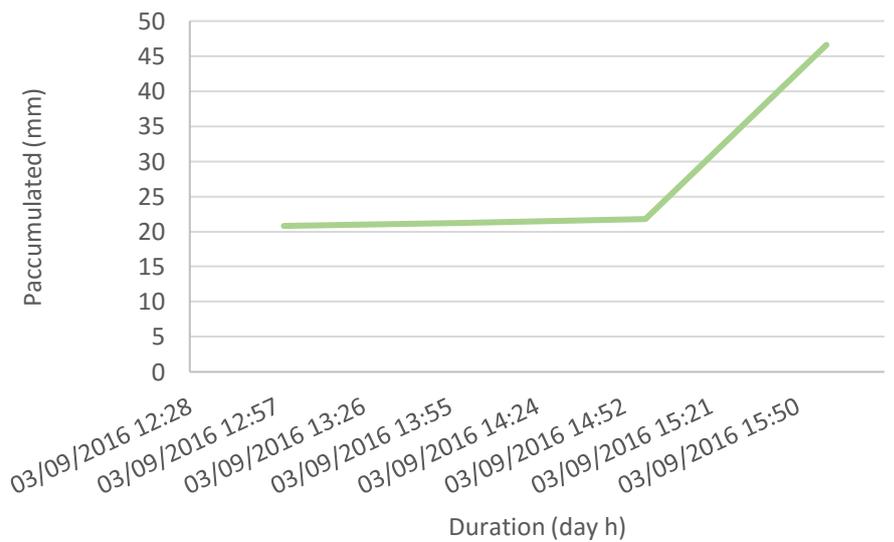
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 46,6 mm Duración: 4h Intensidad media: 11,65

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 03/09/2016 13:00 | 20,8 |
| 03/09/2016 14:00 | 0,4 |
| 03/09/2016 15:00 | 0,6 |
| 03/09/2016 16:00 | 24,8 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 03/09/2016 13:00 | 20,8 |
| 03/09/2016 14:00 | 21,2 |
| 03/09/2016 15:00 | 21,8 |
| 03/09/2016 16:00 | 46,6 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 16

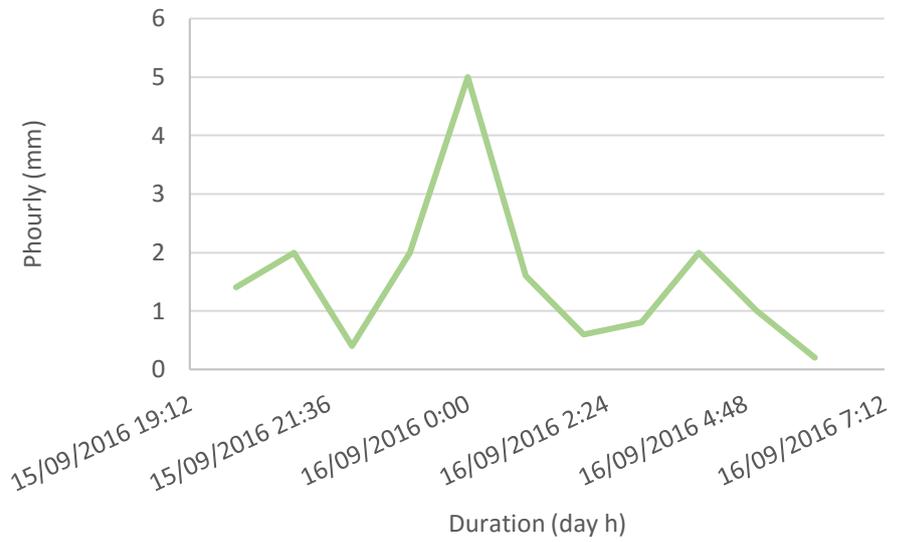
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 17 mm

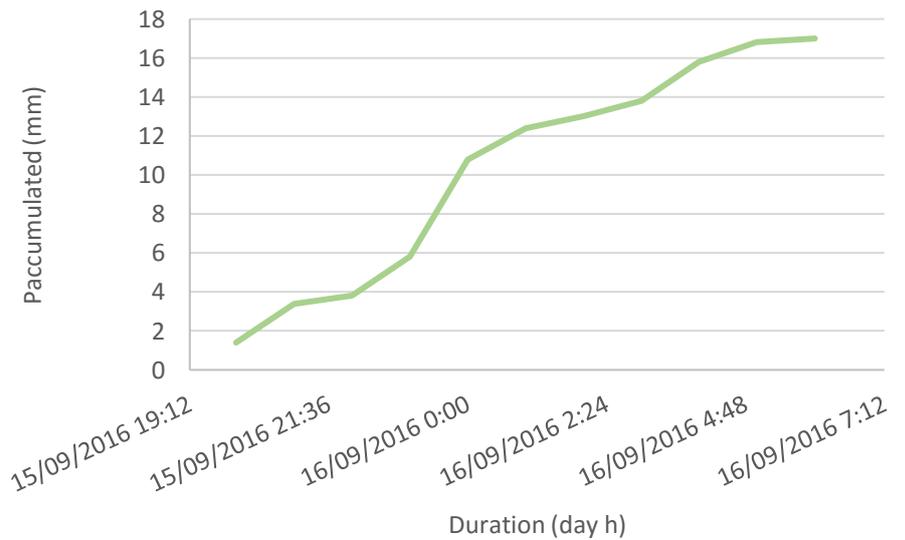
Duración: 11h

Intensidad media: 1,545

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 15/09/2016 20:00 | 1,4 |
| 15/09/2016 21:00 | 2 |
| 15/09/2016 22:00 | 0,4 |
| 15/09/2016 23:00 | 2 |
| 16/09/2016 0:00 | 5 |
| 16/09/2016 1:00 | 1,6 |
| 16/09/2016 2:00 | 0,6 |
| 16/09/2016 3:00 | 0,8 |
| 16/09/2016 4:00 | 2 |
| 16/09/2016 5:00 | 1 |
| 16/09/2016 6:00 | 0,2 |



| Duration (day h) | Pacumulated (mm) |
|------------------|------------------|
| 15/09/2016 20:00 | 1,4 |
| 15/09/2016 21:00 | 3,4 |
| 15/09/2016 22:00 | 3,8 |
| 15/09/2016 23:00 | 5,8 |
| 16/09/2016 0:00 | 10,8 |
| 16/09/2016 1:00 | 12,4 |
| 16/09/2016 2:00 | 13 |
| 16/09/2016 3:00 | 13,8 |
| 16/09/2016 4:00 | 15,8 |
| 16/09/2016 5:00 | 16,8 |
| 16/09/2016 6:00 | 17 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 17

FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 31,4 mm

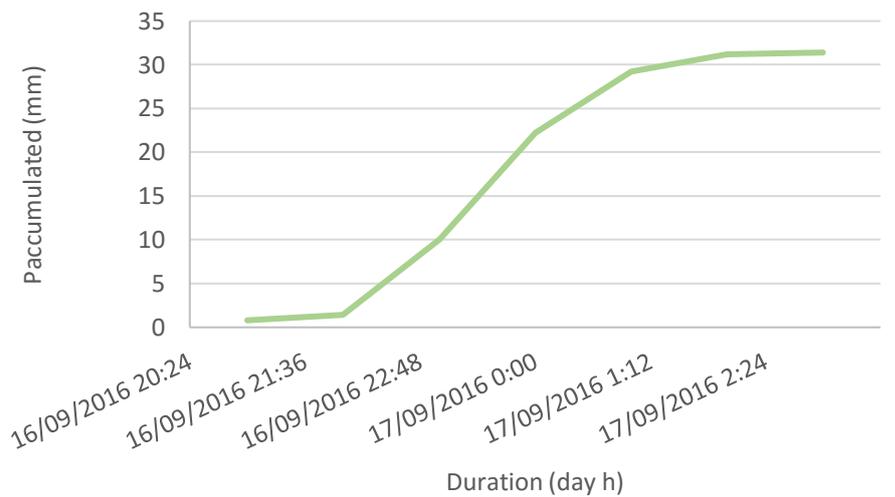
Duración: 7h

Intensidad media: 4,485

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 16/09/2016 21:00 | 0,8 |
| 16/09/2016 22:00 | 0,6 |
| 16/09/2016 23:00 | 8,6 |
| 17/09/2016 0:00 | 12,2 |
| 17/09/2016 1:00 | 7 |
| 17/09/2016 2:00 | 2 |
| 17/09/2016 3:00 | 0,2 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 16/09/2016 21:00 | 0,8 |
| 16/09/2016 22:00 | 1,4 |
| 16/09/2016 23:00 | 10 |
| 17/09/2016 0:00 | 22,2 |
| 17/09/2016 1:00 | 29,2 |
| 17/09/2016 2:00 | 31,2 |
| 17/09/2016 3:00 | 31,4 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 18

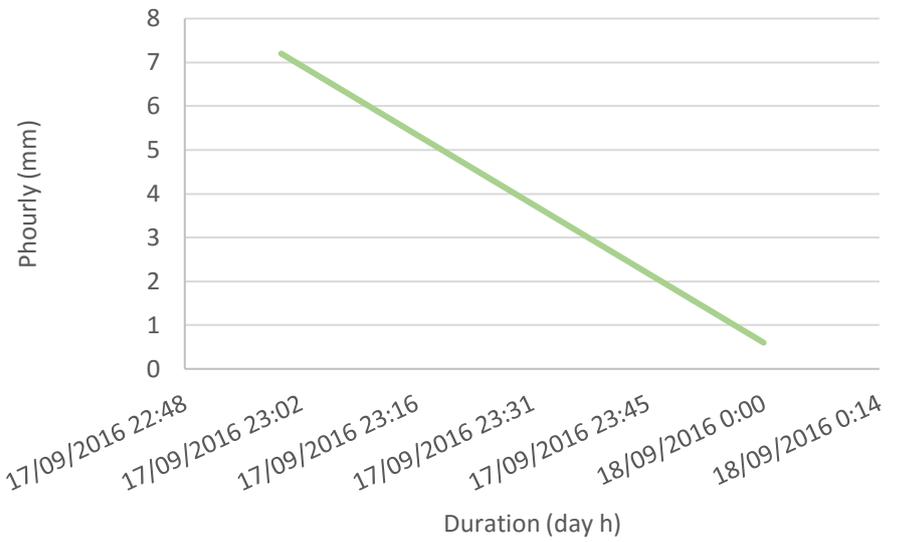
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 7,8 mm

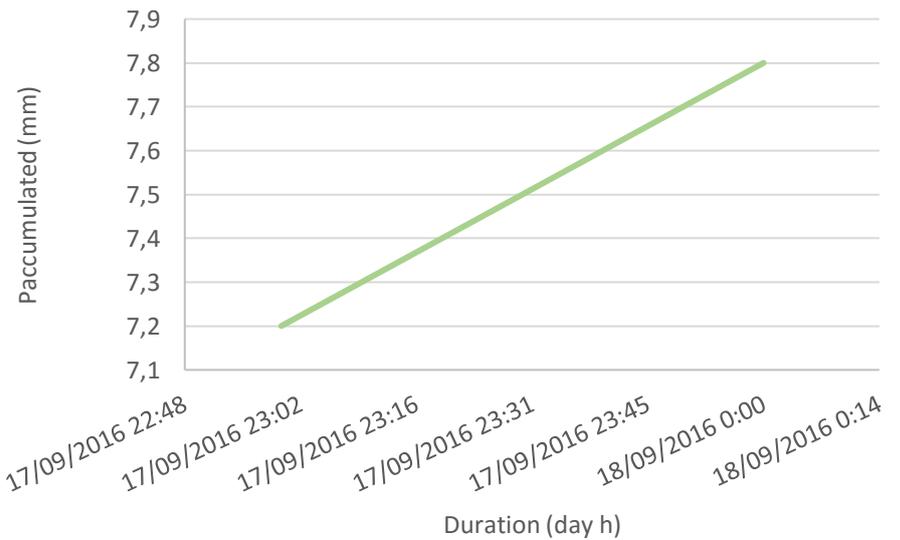
Duración: 2h

Intensidad media: 3,9

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 17/09/2016 23:00 | 7,2 |
| 18/09/2016 0:00 | 0,6 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 17/09/2016 23:00 | 7,2 |
| 18/09/2016 0:00 | 7,8 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 19

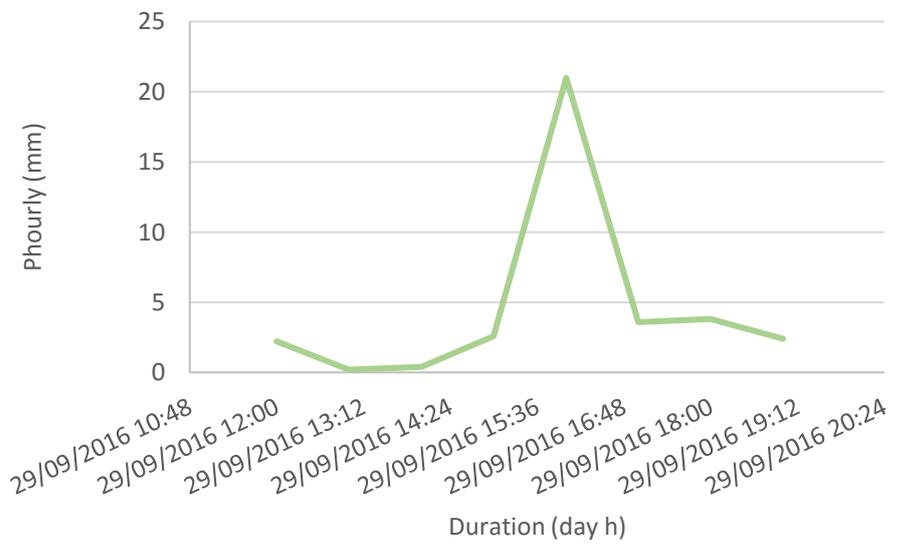
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 36,2 mm

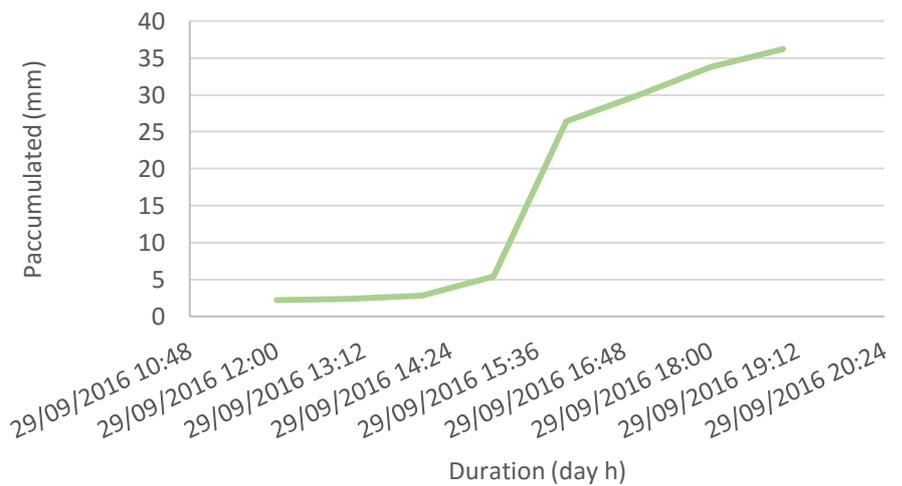
Duración: 8h

Intensidad media: 4,525

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 29/09/2016 12:00 | 2,2 |
| 29/09/2016 13:00 | 0,2 |
| 29/09/2016 14:00 | 0,4 |
| 29/09/2016 15:00 | 2,6 |
| 29/09/2016 16:00 | 21 |
| 29/09/2016 17:00 | 3,6 |
| 29/09/2016 18:00 | 3,8 |
| 29/09/2016 19:00 | 2,4 |



| Duration (day h) | Pacumulated (mm) |
|------------------|------------------|
| 29/09/2016 12:00 | 2,2 |
| 29/09/2016 13:00 | 2,4 |
| 29/09/2016 14:00 | 2,8 |
| 29/09/2016 15:00 | 5,4 |
| 29/09/2016 16:00 | 26,4 |
| 29/09/2016 17:00 | 30 |
| 29/09/2016 18:00 | 33,8 |
| 29/09/2016 19:00 | 36,2 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 20

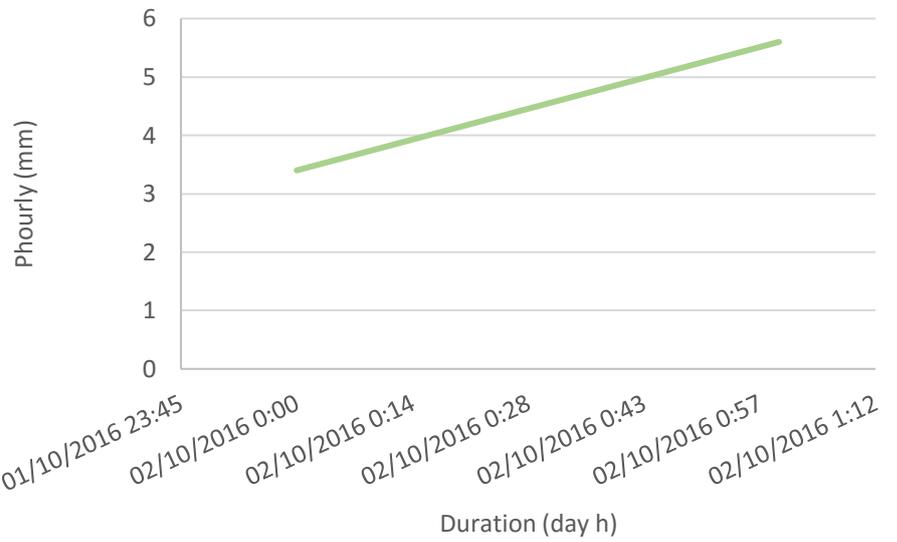
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 9 mm

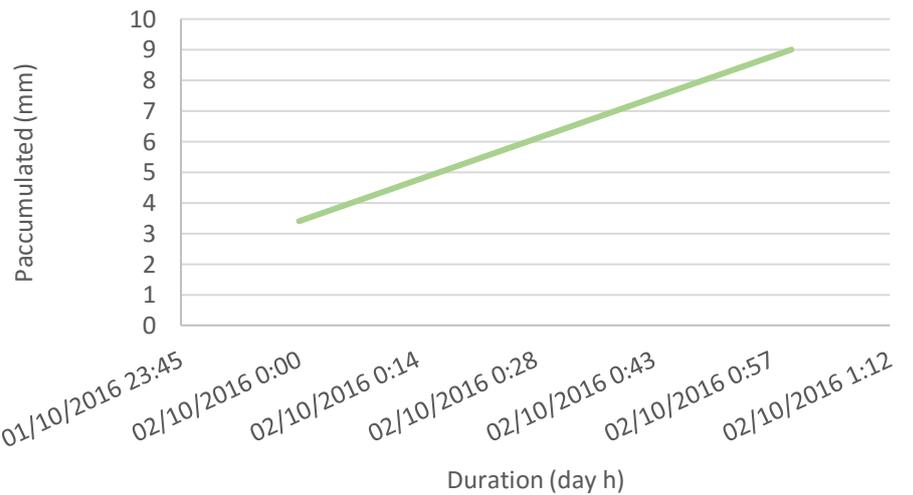
Duración: 2h

Intensidad media: 4,5

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 02/10/2016 0:00 | 3,4 |
| 02/10/2016 1:00 | 5,6 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 02/10/2016 0:00 | 3,4 |
| 02/10/2016 1:00 | 9 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 21

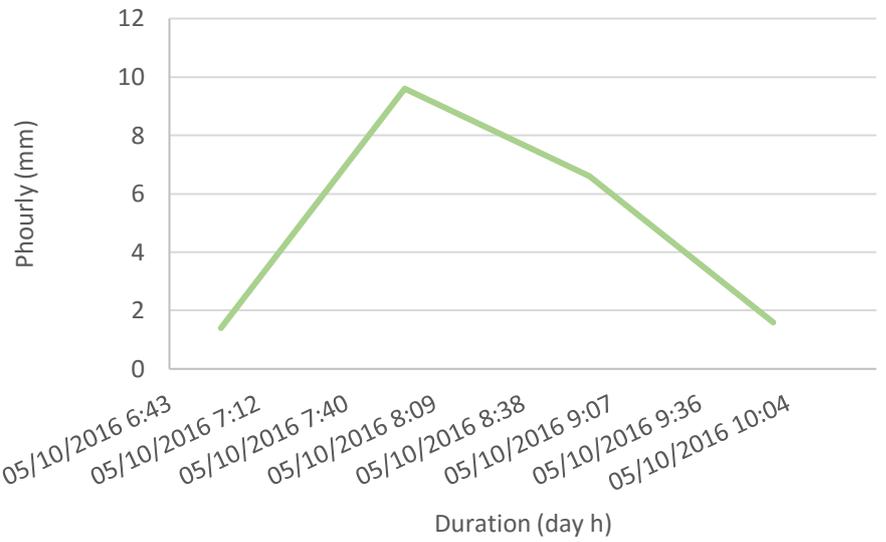
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 19,2 mm

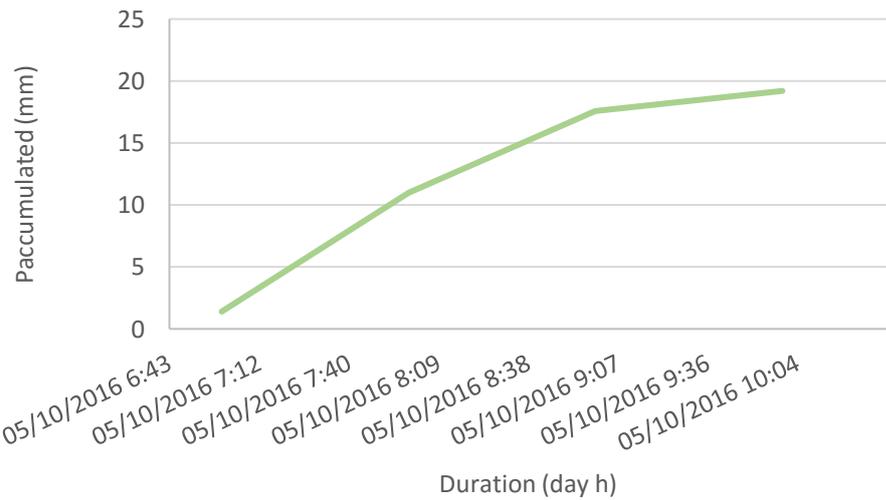
Duración: 4h

Intensidad media: 4,8

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 05/10/2016 7:00 | 1,4 |
| 05/10/2016 8:00 | 9,6 |
| 05/10/2016 9:00 | 6,6 |
| 05/10/2016 10:00 | 1,6 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 05/10/2016 7:00 | 1,4 |
| 05/10/2016 8:00 | 11 |
| 05/10/2016 9:00 | 17,6 |
| 05/10/2016 10:00 | 19,2 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 22

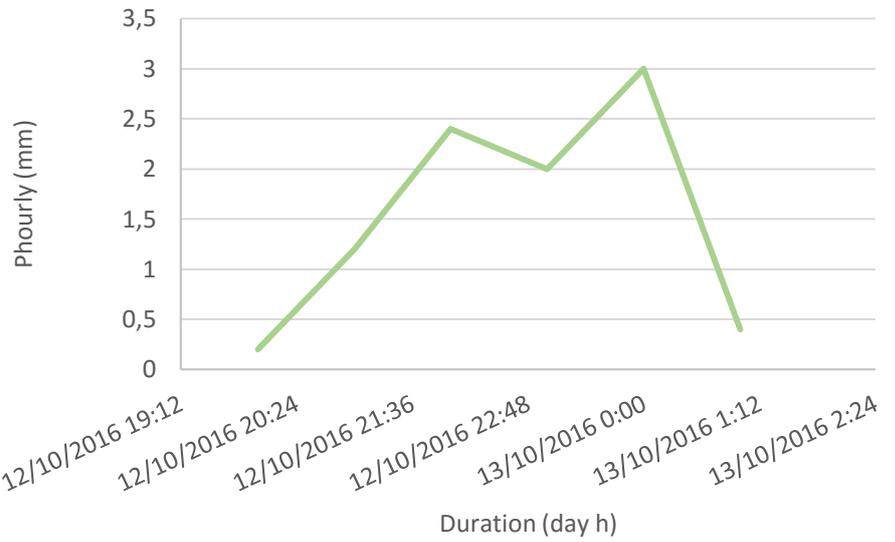
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 9,2 mm

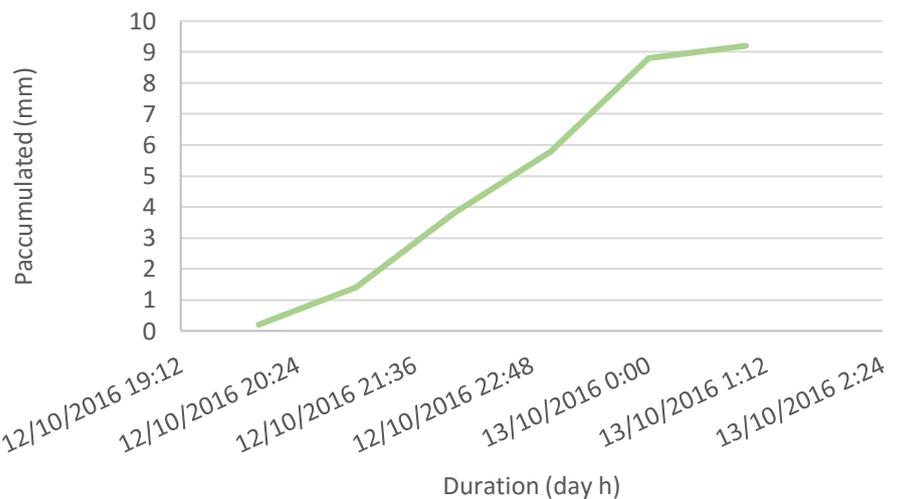
Duración: 6h

Intensidad media: 1,533

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 12/10/2016 20:00 | 0,2 |
| 12/10/2016 21:00 | 1,2 |
| 12/10/2016 22:00 | 2,4 |
| 12/10/2016 23:00 | 2 |
| 13/10/2016 0:00 | 3 |
| 13/10/2016 1:00 | 0,4 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 12/10/2016 20:00 | 0,2 |
| 12/10/2016 21:00 | 1,4 |
| 12/10/2016 22:00 | 3,8 |
| 12/10/2016 23:00 | 5,8 |
| 13/10/2016 0:00 | 8,8 |
| 13/10/2016 1:00 | 9,2 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 23

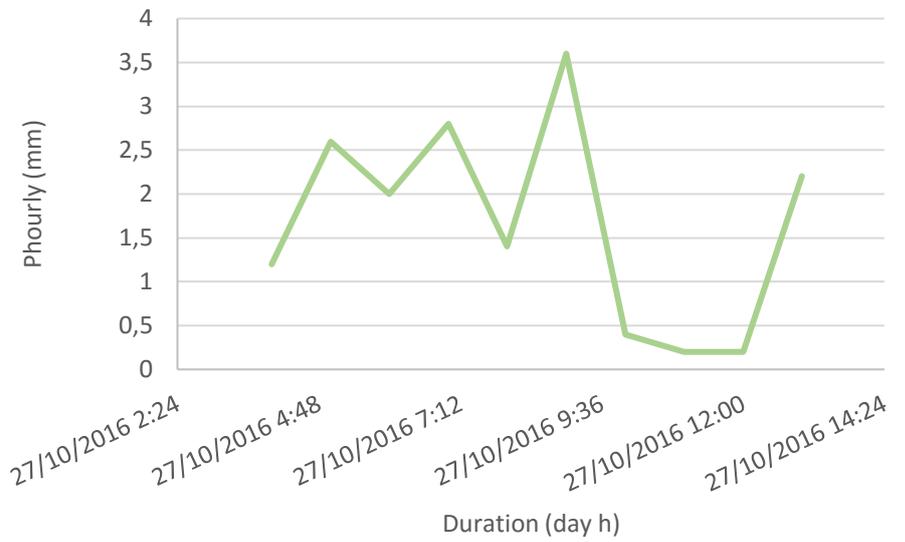
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 16.6 mm

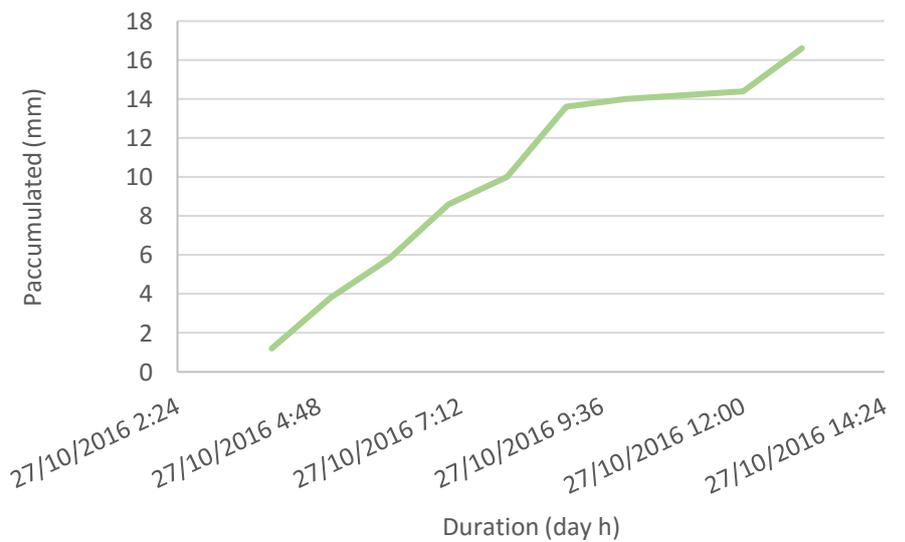
Duración: 10h

Intensidad media: 2,766

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 27/10/2016 4:00 | 1,2 |
| 27/10/2016 5:00 | 2,6 |
| 27/10/2016 6:00 | 2 |
| 27/10/2016 7:00 | 2,8 |
| 27/10/2016 8:00 | 1,4 |
| 27/10/2016 9:00 | 3,6 |
| 27/10/2016 10:00 | 0,4 |
| 27/10/2016 11:00 | 0,2 |
| 27/10/2016 12:00 | 0,2 |
| 27/10/2016 13:00 | 2,2 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 27/10/2016 4:00 | 1,2 |
| 27/10/2016 5:00 | 3,8 |
| 27/10/2016 6:00 | 5,8 |
| 27/10/2016 7:00 | 8,6 |
| 27/10/2016 8:00 | 10 |
| 27/10/2016 9:00 | 13,6 |
| 27/10/2016 10:00 | 14 |
| 27/10/2016 11:00 | 14,2 |
| 27/10/2016 12:00 | 14,4 |
| 27/10/2016 13:00 | 16,6 |

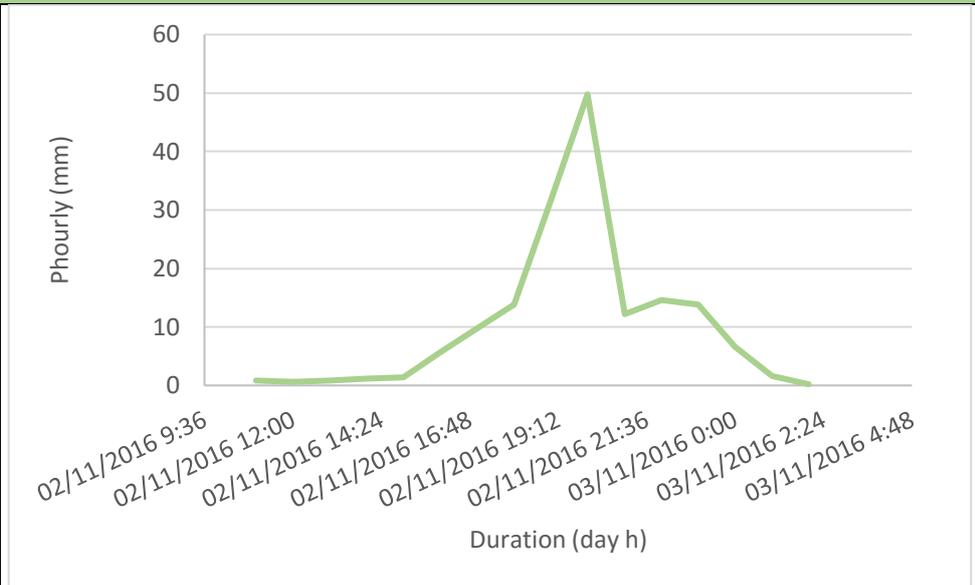


EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 24

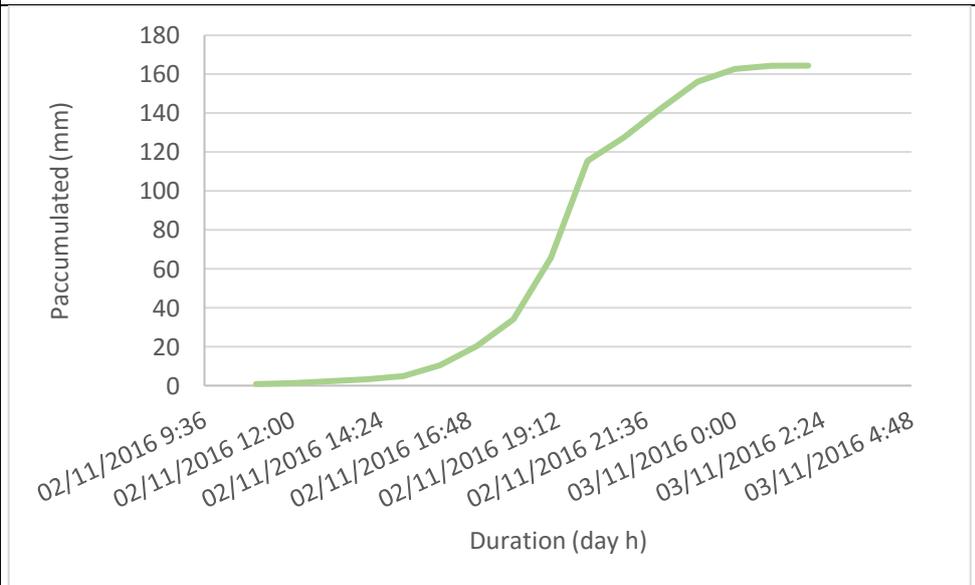
FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 164,4 mm Duración: 16h Intensidad media: 10,275

| Duration (day h) | Hourly (mm) |
|------------------|-------------|
| 02/11/2016 11:00 | 0,8 |
| 02/11/2016 12:00 | 0,6 |
| 02/11/2016 13:00 | 0,8 |
| 02/11/2016 14:00 | 1,2 |
| 02/11/2016 15:00 | 1,4 |
| 02/11/2016 16:00 | 5,6 |
| 02/11/2016 17:00 | 9,8 |
| 02/11/2016 18:00 | 13,8 |
| 02/11/2016 19:00 | 31,6 |
| 02/11/2016 20:00 | 49,8 |
| 02/11/2016 21:00 | 12,2 |
| 02/11/2016 22:00 | 14,6 |
| 02/11/2016 23:00 | 13,8 |
| 03/11/2016 0:00 | 6,6 |
| 03/11/2016 1:00 | 1,6 |
| 03/11/2016 2:00 | 0,2 |



| Duration (day h) | Paccumulated (mm) |
|------------------|-------------------|
| 02/11/2016 11:00 | 0,8 |
| 02/11/2016 12:00 | 1,4 |
| 02/11/2016 13:00 | 2,2 |
| 02/11/2016 14:00 | 3,4 |
| 02/11/2016 15:00 | 4,8 |
| 02/11/2016 16:00 | 10,4 |
| 02/11/2016 17:00 | 20,2 |
| 02/11/2016 18:00 | 34 |
| 02/11/2016 19:00 | 65,6 |
| 02/11/2016 20:00 | 115,4 |
| 02/11/2016 21:00 | 127,6 |
| 02/11/2016 22:00 | 142,2 |
| 02/11/2016 23:00 | 156 |
| 03/11/2016 0:00 | 162,6 |
| 03/11/2016 1:00 | 164,2 |
| 03/11/2016 2:00 | 164,4 |



EVENTO DE LLUVIA NÚMERO 25

FECHA DEL EVENTO: 25/02 y 26/02

Datos principales: Lluvia total: 120,8 mm Duración: 37h Intensidad media: 3,264

| Duration (day h) | Hourly (mm) | Pacumul ated (mm) |
|------------------|-------------|-------------------|
| 25/11/2016 2:00 | 0,6 | 0,6 |
| 25/11/2016 3:00 | 0,4 | 1 |
| 25/11/2016 4:00 | 1 | 2 |
| 25/11/2016 5:00 | 1,6 | 3,6 |
| 25/11/2016 6:00 | 1,2 | 4,8 |
| 25/11/2016 7:00 | 1,2 | 6 |
| 25/11/2016 8:00 | 0,6 | 6,6 |
| 25/11/2016 9:00 | 0,6 | 7,2 |
| 25/11/2016 10:00 | 1,6 | 8,8 |
| 25/11/2016 11:00 | 1,8 | 10,6 |
| 25/11/2016 12:00 | 2 | 12,6 |
| 25/11/2016 13:00 | 2,6 | 15,2 |
| 25/11/2016 14:00 | 2,8 | 18 |
| 25/11/2016 15:00 | 2,4 | 20,4 |
| 25/11/2016 16:00 | 5,4 | 25,8 |
| 25/11/2016 17:00 | 7,2 | 33 |
| 25/11/2016 18:00 | 8,6 | 41,6 |
| 25/11/2016 19:00 | 8,2 | 49,8 |
| 25/11/2016 20:00 | 9 | 58,8 |
| 25/11/2016 21:00 | 7,2 | 66 |
| 25/11/2016 22:00 | 8,6 | 74,6 |
| 25/11/2016 23:00 | 9 | 83,6 |
| 26/11/2016 0:00 | 5,2 | 88,8 |
| 26/11/2016 1:00 | 5,2 | 94 |
| 26/11/2016 2:00 | 3,4 | 97,4 |
| 26/11/2016 3:00 | 1,8 | 99,2 |
| 26/11/2016 4:00 | 2,4 | 101,6 |
| 26/11/2016 5:00 | 2,8 | 104,4 |
| 26/11/2016 6:00 | 2,8 | 107,2 |
| 26/11/2016 7:00 | 2,6 | 109,8 |
| 26/11/2016 8:00 | 2,6 | 112,4 |
| 26/11/2016 9:00 | 2,2 | 114,6 |
| 26/11/2016 10:00 | 2 | 116,6 |
| 26/11/2016 11:00 | 1,2 | 117,8 |
| 26/11/2016 12:00 | 1 | 118,8 |
| 26/11/2016 13:00 | 1,8 | 120,6 |
| 26/11/2016 14:00 | 0,2 | 120,8 |

