

Reconstrucción del alud de febrero de 2018 en la carretera BV-4024, Coll de Pal, y definición y caracterización del correspondiente escenario de referencia de T100.

Carlos Alberto Andrade Fuentes
Tutores: Pere Oller Figueras & Glòria Furdada Bellavista

Máster en Recursos Minerales y Riesgos Geológicos
Especialidad: Riesgos Geológicos

Junio 2019



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

UAB
Universitat Autònoma
de Barcelona

Tabla de contenidos

1.0	Introducción.....	3
2.0	Objetivos.....	3
3.0	Contextualización	4
3.1	Geología y geomorfología	4
3.2	Clima y nivometeorología.....	5
4.0	Metodología	5
4.1	Caracterización del alud feb de 2018.	5
4.2	Identificación de posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018.	6
4.3	Determinación de Periodo de Retorno del alud de feb de 2018.....	6
4.4	Simulación 2-D del alud de feb de 2018.	7
4.5	Simulación 2-D del alud de referencia para T100.....	9
5.0	Resultados	10
5.1	Caracterización del alud de feb de 2018	10
5.1.1	Nivometeorología.....	10
5.1.2	Condiciones físicas del terreno y cartografía del alud.....	11
5.1.3	Trabajo de campo.....	11
5.2	Identificación de posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018	13
5.3	Determinación de Periodo de Retorno del alud de feb de 2018.....	14
5.4	Simulación 2-D del alud de feb de 2018.	15
5.4.1	Cálculo de espesor medio	15
5.4.2	Simulación inicial	15
5.4.3	Calibración.....	16
5.4.4	Simulación final	18
5.5	Simulación 2-D del alud de referencia para T100.....	20
5.6	Comentarios sobre la simulación del módulo de aludes en IBER.....	20
6.0	Discusión.....	22
7.0	Conclusión.....	23
8.0	Agradecimientos.....	24
9.0	Referencias	24

ABSTRACT

In mountain areas, natural phenomena such as avalanches generate risk when they affect infrastructures. On February 10, 2018, a wind slab avalanche triggered from an unknown release area, occurred within the “Zona de Alud RIT051”, which caused the temporary closure of the BV-4024 local road, on Coll de Pal, Catalonia, and therefore avoiding damage to vehicles in transit and their passengers. In order to facilitate a future risk management associated to the RIT051 avalanche, a 2-D simulation of the February 2018 snow avalanche and its T100 reference scenario was carried out. The snow avalanche module of free software IBER 2.5, still in development, was used. The February 2018 snow avalanche simulation was based on the analysis of the Allaus Control field data, the interpretation of 13 possible release zones and a nivological and meteorological analysis to determinate the return period (T). Despite of the simulation of the February 2018 avalanche was not completely successful on reconstructing the snow avalanche path and run-out zone, the results were considered consistent with recent damage to vegetation and representative of the event. The February 2018 snow avalanche was classified by a Size 2 (Canadian Snow Avalanche Size-Classification System) and would have a T among 15 and 20 years. The T100 snow avalanche simulation, designed and calibrated based on the February 2018 snow avalanche, set up a snow avalanche that, in its dense phase, would reach a maximum width and run-out distance of 115 and 594 m; respectively. The T100 snow avalanche would carry to 8140 m³ and reach a maximum speed of 25 m/s, just as the head reaches the BV-4024 local road, impacting with a dynamic pressure among 93.75 to 187.50 kPa. The T100 snow avalanche was classified by a Size 3, could be able to bury a car, destroy a small building or break trees. Measures such as snowpack-stabilizing and snowdrift control structures or avalanche guiding and deflecting structures can be considered, based on the present work, for future risk management. The simulation of both snow avalanches did not incorporate the existence of a less cohesive phase (powder component).

Key words: wind slab avalanche, T100 reference avalanche, IBER 2-D simulation, Coll de Pal.

RESUMEN

En áreas de montaña, los fenómenos naturales como los aludes generan riesgo cuando afectan infraestructuras. El pasado 10 de febrero de 2018 se produjo un alud de placa de viento, de zona de salida desconocida, dentro de la Zona de Alud RIT051; el cual no causó daños gracias al cierre temporal preventivo de la carretera BV-4024, en su paso por Coll de Pal, Cataluña. Con tal de posibilitar una futura gestión del riesgo asociada a la activación de la RIT051, se generó la simulación 2-D del alud de febrero de 2018 y de su escenario de referencia de T100, mediante el uso del módulo de aludes, en desarrollo, del *free software* IBER 2.5. La simulación consideró información levantada en terreno por *Allaus Control*, la interpretación de 13 posibles zonas de salida y un análisis nivometeorológico para determinar su periodo de retorno (T). Si bien la simulación del alud de febrero de 2018 no logró reconstruir fielmente el recorrido y depósito del alud, los resultados fueron considerados consistentes y representativos del evento, destacando su coherencia con daños recientes en la vegetación. Este alud fue clasificado con un Tamaño 2 (*Canadian Snow Avalanche Size-Classification System*), y tendría un T de entre 15 a 20 años. La simulación del alud T100, diseñada y calibrada en base al alud de feb de 2018, muestra un alud de nieve que, en su fase densa, lograría un ancho y alcance máximo de 115 y 594 m; respectivamente. El alud T100 movilizaría hasta 8140 m³ y podría alcanzar una velocidad máxima de 25 m/s, justo cuando la cabecera llega a la carretera BV-4024, impactando con una presión dinámica de entre 93.75 a 187.50 kPa. El alud T100 fue clasificado con un Tamaño 3, pudiendo enterrar un auto, destruir un pequeño edificio o romper árboles. Medidas como la retención del manto nivoso o el desvío, freno o parada del alud, pueden ser consideradas, a partir de este estudio, para una futura gestión del riesgo. La simulación de ambos aludes no consideró la existencia de una fase menos cohesiva (aerosol).

Palabras clave: alud de placa de viento, escenario de referencia T100, simulación IBER 2-D, Coll de Pal.

1.0 INTRODUCCIÓN

La carretera BV-4024 es una de las dos vías de comunicación de Coll de Pal con el resto de Cataluña y sirve como paso para la estación de esquí La Molina. La carretera BV-4024 permite acceder a Coll de Pal por el sur y desde Bagá.

El trazado de la carretera hasta Coll de Pal sufre durante la temporada invernal cortes frecuentes al ser afectada por aludes que se producen en las vertientes contiguas. Los aludes, según Bosch y Vilaplana (1988), en Furdada (1996), conceptualmente corresponden a una porción del manto nivoso que se desplaza pendiente abajo por la ruptura del equilibrio entre la resistencia de las capas del manto nivoso y los esfuerzos a los que están sometidos.

En particular, el pasado 10 de febrero de 2018, en la vertiente de Rocs de la Bòfia y entre el km17 y 18 de la BV-4024, se generó un alud de placa de viento (en adelante, “alud de feb de 2018”), el cual no causó daños a vehículos en tránsito y sus ocupantes, debido al cierre temporal preventivo de la carretera, regido por el protocolo de seguridad por aludes y ventisca establecido por la Diputación de Barcelona, institución gestora de la misma. Este alud es un evento generado dentro de la zona de alud RIT051 (en adelante, “zona de estudio”), la cual corresponde a una zona expuesta al descenso de aludes inventariada dentro de la Base de Datos de Aludes de Cataluña (BDAC) del *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICGC); ver Oller et al. (2005).

El equipo de la empresa *Allaus Control (GeoNeu Risk y Gebre i Neu)* identificó dos días posteriores al desencadenamiento del alud, el 12 de febrero de 2018, la geometría del recorrido y del depósito generado; y el espesor vertical de este último dejado sobre la carretera. Si bien se cuenta con esta información, la Zona de Salida del alud y su espesor es desconocida, ya que esta información no fue posible de identificar en terreno.

La disminución del riesgo que afecta la carretera BV-4024 frente a los aludes generados dentro de la zona de alud RIT051 pasa necesariamente, en primera instancia, por el entendimiento del origen y de la dinámica de sus aludes. Así pues, la identificación de las condiciones existentes en la genética (factores intrínsecos y extrínsecos) y la posterior simulación del alud de feb de 2018 permitirá el diseño del escenario de referencia de T100. Ambos escenarios de simulación, sumado al conocimiento adquirido de la actividad de aludes de la zona de estudio, sustentaran, en parte, las estrategias y bases técnicas para el diseño de futuras medidas de defensa frente a un evento ordinario, extraordinario o extremo, según se requiera.

Vale la pena mencionar la utilización del *free software* IBER 2.5 para la simulación del evento de feb de 2018 y del escenario de referencia de T100. IBER corresponde a un *software* de simulación hidráulica bidimensional de flujos de aguas someras, el cual comúnmente ha sido aplicado en el estudio de Flujos Newtonianos (incompresibles, como el agua clara). Su uso para Flujos No Newtonianos, y en particular para aludes, se encuentra actualmente en desarrollo; y su aplicación en el presente TFM es la primera simulación generada por la versión en prueba del módulo de aludes como tal.

El siguiente documento presenta los principales resultados del TFM. Para su realización se ha contado con Pere Oller Figueras (empresa consultora *GeoNeu Risk*) que ha aportado datos imprescindibles, además de codirigir el Trabajo junto con la Dra. Glòria Furdada Bellavista (UB).

2.0 OBJETIVOS

En consideración a lo expuesto, el objetivo del siguiente Trabajo Final de Máster (TFM) es la **caracterización de la dinámica del alud de febrero de 2018 en la carretera BV-4024 de Coll de Pal: elaboración del escenario de referencia T100**. Con tal de cumplir este objetivo, se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el alud de feb 2018 con los datos existentes: escenario nivometeorológico; y morfología de la zona de recorrido y llegada del alud.
- Identificar posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018.
- Evaluar del periodo de retorno del alud de feb de 2018.
- Simular la dinámica del alud de feb de 2018.
- Estimar y simular el alud de referencia T100.

- Evaluar el uso de IBER cómo módulo de modelación de aludes (Flujos No Newtonianos).

3.0 CONTEXTUALIZACIÓN

El Coll de Pal es un puerto de montaña ubicado a alrededor de los 2000 m s.n.m., entre las sierras del Moixeiró y del Mongrony, limitado por las cimas de Puigllançada (2409 m) y la Tosa d'Alp (2537 m). Coll de Pal se encuentra dentro del municipio de Bagà, en la comarca de Berguedà, Comunidad Autónoma de Cataluña, España (ver Figura 1).

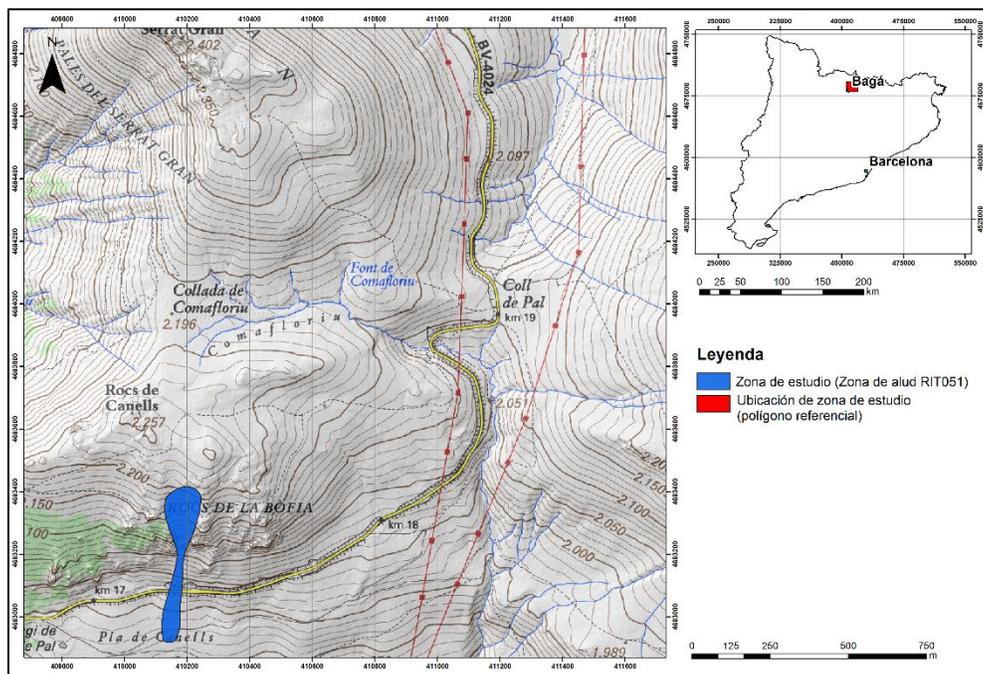


Figura 1: Ubicación de Coll de Pal. En rojo se señala además el polígono de la zona de estudio (Zona de Alud RIT051).

3.1 Geología y geomorfología

La unidad fisiográfica del Prepirineo catalán está compuesta por una serie de unidades estructurales y mantos de corrimiento desplazados hacia el sur durante la orogenia alpina, de manera simultánea al levantamiento del Pirineo axial. En particular, en la zona de estudio afloran netamente rocas paleozoicas, las que corresponden a areniscas, micro conglomerados y lutitas carboníferas de la Formación Bellver y a calizas nodulosas y lutitas devónicas-carboníferas de la Formación Comte. En menor medida

y de forma puntual se presentan algunas alternancias de calizas, lutitas y calizas nodulosas devónicas y conglomerados carboníferos. Materiales cuaternarios de origen aluvial y coluvial se disponen sobre estas formaciones rocosas, los que se componen por proporciones variadas de clastos angulosos, arenas y limos.

En cuanto a la geomorfología, Coll de Pal presenta, en general, un relieve alto y pendientes pronunciadas. Las características de la zona de estudio son consecuentes con la geomorfología de Coll de Pal. En concreto, la

zona de estudio se encuentra entre los 2252 y los 1900 m s.n.m. En la parte somital, el relieve es suave y se corresponde con una antigua superficie de erosión. La vertiente se caracteriza por presentar en su parte superior, sobre la carretera BV-4024, pendientes moderadamente fuertes (25° a 35°) a muy fuertes (<45°), y por una orientación predominantemente sur. Bajo la carretera BV-4024, la zona de estudio mantiene su orientación sur y su pendiente cambia a suave (10° a 18°) y moderada (18° a 25°).

3.2 Clima y nivometeorología

Coll de Pal se ubica dentro de la región nivológica del Prepirineo (PR), la que según García (2007) en Oller et al. (2015), se caracteriza por presentar precipitaciones irregulares y vinculadas a la ciclogénesis mediterránea invernal. Los vientos dominantes provienen del norte y las ráfagas más altas a menudo superan los 200 km/h a los 2000 m s.n.m. La cantidad total de nieve reciente caída a los 2200 m s.n.m es de unos 350–450 cm y la temperatura promedio en invierno es de -0.8 ° C.

De manera puntual, según Mazon (2005) en *Institut d'Estudis Andorrans* (IEA, 2005) y en consideración a lo registrado en La Molina, los meses de enero y febrero son los que representan un porcentaje de días con temperaturas medias mensuales más bajas, las que pueden alcanzar los -12°C. Los valores negativos de las temperaturas mínimas se prolongan desde noviembre y hasta el mes de abril, con periodos intermedios de aumento de temperatura.

En lo referente a las precipitaciones, IEA (2005) además plantea que al igual que la temperatura, la precipitación también presenta una gran irregularidad durante los meses de invierno. El número de días con nevada entre enero y abril son de aproximadamente un 30%, en los que se pueden dar periodos de lluvia, con una probabilidad del 15% durante los meses de noviembre y abril, y del 5% en enero y febrero. El mínimo pluviométrico se da los meses de febrero y marzo (40 - 60 mm). La precipitación solida tiene dos máximos, uno a la primavera en el mes de abril, y la otra en otoño en

el mes de noviembre, ambos con una media de 90 mm al año.

La acumulación de nieve en la zona de estudio puede alcanzar 1.5 m de espesor (IEA, 2005). En cuanto a su permanencia, a pesar de tratarse de una zona de alta montaña, no es muy alta. De esta manera, un 70% de los días de enero y febrero tienen nieve sobre el suelo, en diciembre y marzo estos valores son del 50% y en el mes de abril baja hasta el 35%.

Finalmente, Mases (1997) en IEA (2005), señala que los vientos medidos en La Molina (cota 1800) provienen mayoritariamente del W y NE; en cambio en la Tossa d'Alp (cota 2537) las direcciones predominantes del viento son W y NW, con algunos episodios de levante SE. En particular, para la Tossa d'Alp durante el mes de enero, febrero y marzo existe un predominio de vientos de dirección SE, NW-W y NW, respectivamente.

4.0 METODOLOGÍA

La caracterización de la dinámica del alud de feb de 2018 en la carretera BV-4024 de Coll de Pal y la elaboración del escenario de referencia T100, corresponde al resultado de la siguiente secuencia metodológica:

- Caracterización del evento del alud feb de 2018.
- Identificación de posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018.
- Determinación de periodo de retorno (T) del alud de feb de 2018.
- Simulación 2-D del alud de feb de 2018.
- Simulación 2-D del alud de referencia para T100.

A continuación, se describe detalladamente la metodología empleada:

4.1 Caracterización del alud feb de 2018.

Se generó una caracterización del evento del alud de feb de 2018 en relación con las condiciones físicas del terreno y cartografía del alud y el escenario nivometeorológico. En la caracterización se consideraron antecedentes públicos y privados, dentro

de los que destacan los siguientes documentos facilitados por el equipo de *Allaus Control*:

- Geometría del recorrido y depósito del alud de feb de 2018 (*polígono.shp*)
- Espesor vertical medido del depósito del alud de feb de 2018 sobre la carretera BV-4024 (*puntos.shp*).
- Condiciones nivometeorológicas registradas en Coll de Pal (*data.xls*) para el mes de febrero 2018.
- Ficha técnica de perfiles de nieve ejecutados en los alrededores (*snowprofile.jpg*) los días previos al alud de feb de 2018.

La caracterización del evento del alud de feb de 2018 incluyó la visita a terreno de la zona de estudio el pasado 28 de mayo de 2019. La visita a terreno complementó la información antes revisada, especialmente en la Zona de Salida del alud, mediante la identificación de evidencias de actividad de aludes en la zona de estudio y la verificación de pendientes, principalmente.

4.2 Identificación de posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018.

La identificación de posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018 se llevó a cabo mediante un análisis de susceptibilidad al desencadenamiento de aludes en la zona de estudio, el que se complementó con datos de campo. La susceptibilidad se define como la potencialidad de las condiciones del terreno para producir la fractura y deslizamiento del manto nivoso (modificado de Trabal, 2013).

El análisis se basó en la relación existente entre la pendiente y orientación de la vertiente.

Pendiente: se consideró necesaria una pendiente de entre 28° y 45° para que se presente una inclinación favorable al desencadenamiento de aludes (Ronald & Martinelli, 1976; Furdada, 1996; Schweizer et al., 2003; Trabal, 2013). Inclinaciones menores a 28° favorecen la estabilidad del manto. Mientras que pendientes superiores a los 45° no presentarán una condición suficiente para poder desencadenar un alud ya que la cantidad de nieve que se pudiese llegar a acumular no

sería suficiente como para que se generen un alud debido a la purga natural que se presentaría.

Orientación: la incidencia de la orientación de las vertientes fue incluida dentro del análisis de susceptibilidad a generar aludes debido a las características de alud de placa de viento del episodio de feb de 2018. Los aludes de placa se generan por la existencia de una capa dura pero frágil dentro del manto nivoso formada por la acumulación de nieve transportada por el viento desde zonas de barlovento, hacia una zona de sotavento (Ronald & Martinelli, 1976; Furdada, 1996). En consecuencia, vertientes de sotavento tendrán una mayor preponderancia a desencadenar aludes de este tipo. El análisis de esta variable tuvo en cuenta la dirección del viento predominante tanto el día 10 de febrero de 2018 cómo en los días previos, los que generaron la acumulación de nieve.

La delimitación de los polígonos identificados como posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018 fue contrastada con la caracterización del evento descrita en la sección 4.1, y con un especial énfasis en los daños recientes producidos en la vegetación, los que indican actividad del alud de feb de 2018.

4.3 Determinación de Periodo de Retorno del alud de feb de 2018.

Para todo el Pirineo catalán, en el documento ICGC (2012) se han establecido valores de referencia del espesor de manto de nieve para distintas estaciones meteorológicas con el objetivo de sustentar los estudios de zonificación del peligro por aludes. En ICGC (2012) se informan valores de incremento máximo del manto de nieve en 72 h (DDH3dd). Este valor es considerado internacionalmente como el espesor de manto susceptible a deslizar generando aludes extraordinarios o extremos (Burkard & Salm, 1992). Este parámetro es definido en ICGC (2012) para tres periodos de retorno diferentes: 30, 100 y 300 años.

La estación más representativa para la situación nivometeorológica de Coll de Pal es la estación automática Cadí Nord, perteneciente al *Servei Meteorològic de Catalunya*. Cadí Nord se encuentra a

unos 15 kilómetros al oeste de Coll de Pal, a 2143 m s.n.m y sobre una vertiente norte, en el Sector nivoclimático de la Vertiente Norte del Cadí-Moixeró. Cadí Nord cuenta con registros desde el 01 de noviembre de 2003. La Tabla 1 muestra el valor de DDH3dd de referencia para la estación Cadí Nord.

Tabla 1: Valores de DDH3dd para un T30, T100 y T300 en la estación Cadí Nord.

T	DDH3dd (cm)
30	99
100	120
300	139

La información descrita en ICGC (2012) y expuesta en la Tabla 1 contempló información registrada hasta el año 2012. Debido a esto, fue necesaria una actualización de los valores informados, incorporando lo registrado hasta febrero de 2019.

DDH3dd se define cómo la diferencia entre el espesor medido en el día (D) menos el espesor medido tres días anteriores (D-3). Para obtener DDH3dd fue necesaria la definición de un espesor vertical diario, el que fue representado en base a dos muestreos: (a) el espesor medido a las 23:00 hora local y (b) el espesor máximo diario. El tipo de muestreo fue recomendado por Carles García- Sellés (vía comunicación personal), especialista en nivología y aludes del ICGC y revisor del documento ICGC (2012).

Por consiguiente, se generaron dos distribuciones de DDH3dd para la temporada 2003 -2019, resultantes de la diferencia entre valores de espesor de cada muestreo. Posteriormente, para cada muestreo se generó una serie de datos compuesta por el valor máximo de DDH3dd por temporada invernal (16 temporadas).

A partir de cada serie de datos obtenida se realizó una prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y de Shapiro Wilk con tal de verificar la distribución normal de cada una, condición necesaria para su uso en el cálculo de periodos de retorno de manto de nieve.

Posteriormente, mediante un ajuste de distribución de Gumbel (Ecuación 1), se obtuvieron los valores de DDH3dd para diferentes periodos de retorno, donde \bar{X} es el promedio aritmético de la serie de datos, S es su desviación estándar típica, F(x) función de probabilidad y T periodo de retorno.

Ecuación 1: Ecuación de Gumbel.

$$X_{Gumbell Max} = u - \frac{\ln[-\ln(F(x))]}{d}$$

$$u = \bar{X} - 0.450047 * S$$

$$\frac{1}{d} = 0.779696 * S$$

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T}$$

Finalmente, el periodo de retorno del alud de feb de 2018 se caracterizó en base a la información registrada de DDH3dd en Cadí Nord, entre el día 6 y 10 de febrero de 2018. El valor de Periodo de Retorno del alud de feb de 2018 fue contrastado con (I) los testimonios históricos recabados por *Allaus Control* y su fecha de ocurrencia; y (II) con la recurrencia de aludes de la zona de estudio inferida por medio de un análisis temporal, entre 1993 y 2017, de daños en los árboles situados en la zona de llegada, sobre imágenes de fotografía aérea. Para estos fines sólo fueron considerados eventos históricos de aludes dentro de la zona de estudio y que (I) hayan afectado o suspendido el tránsito en la carretera BV-4024 o (II) modificado la cobertura de los árboles, respectivamente.

4.4 Simulación 2-D del alud de feb de 2018.

La simulación 2-D del evento del alud feb de 2018 se desarrolló mediante el uso del módulo experimental para aludes de IBER 2.5, el que considera la simulación de alud denso y se basa en las ecuaciones de Voellmy.

Voellmy propone una ecuación para el esfuerzo de cizalla (S) compuesto por dos parámetros friccionales correspondientes a μ y ξ , como se muestra en la ecuación (Ecuación 2):

Ecuación 2: Ecuación de Ley de Voellmy

$$S = \mu\rho Hg \cos\phi + \frac{\rho g U^2}{\xi}$$

Donde ρ es la densidad del flujo, g es la aceleración de gravedad, ϕ es el ángulo de la pendiente, H es la altura del flujo y U es la velocidad del flujo. Según Riba Porrás et al., (2018), por un lado, el parámetro μ define el comportamiento de coulomb seco, que está relacionado con el coeficiente de fricción sólida del flujo; idealmente representa las características de la nieve involucrada en el alud. En cambio, ξ corresponde a un parámetro viscoso turbulento, que representa la fase líquida del flujo que se está modelando, e idealmente se corresponde con las características de rugosidad del terreno. Es importante agregar que IBER además incorpora a la simulación el parámetro de cohesión, el cual fue fijado en 100 Pa, valor sugerido en WSL (2019) para aludes de nieve seca.

De forma general, la simulación 2-D del alud de febrero de 2018 tomó en cuenta la serie de acciones que se muestran en la Figura 2.

El **cálculo de espesor medio** corresponde a una parametrización del espesor normal a la superficie, en base a una medida de espesor vertical, que se puso en movimiento en el alud para cada Zona de Salida. La metodología para su cálculo consistió en la siguiente secuencia de trabajo, la que es expuesta en Salm et al., (1990).

1. Obtener el espesor de nieve reciente caído en 3 días consecutivos (H). Si el resultado es la suma de 3 mediciones diarias de nieve reciente, aplicar un factor de asentamiento (se suele aplicar del orden de 0.75).
2. Aplicar el factor de altitud: sumar 5 cm cada 100 m de desnivel entre el punto donde se ha medido el espesor y la cota media de la Zona de Salida del alud.
3. Multiplicar por $\cos 28^\circ$. Corrección geométrica por un ángulo base de 28° para transformar de un espesor vertical (H) a uno perpendicular al terreno (d_0).

4. Al tratarse de una zona con carga por viento, se debe sumar hasta 0.5 m al espesor. Se consideraron aportes de nieve venteadada de 10, 20 y 30 cm.
5. Aplicar factor de ángulo $F(\psi)$. Se multiplicaron los valores de espesor obtenido en (4) por $F(\psi)$, en donde ψ corresponde a la inclinación media de la Zona de Salida. $F(\psi)$ es obtenido desde la siguiente ecuación:

Ecuación 3: Ecuación de Factor de ángulo $F(\psi)$

$$F(\psi) = \frac{0.291}{\sin \psi - 0.202 \cos \psi}$$

Así, para cada Zona de Salida se parametrizó un espesor de nieve Em_{10} , Em_{20} y Em_{30} según 10, 20 o 30 cm de aporte de nieve por viento.

En cuanto a la **simulación inicial**, en la Tabla 2 se presenta el resumen con sus datos de entrada. Los coeficientes μ y ξ fueron tomados desde las tablas expuestas en WSL (2017) para aludes de nieve generados sobre los 1500 m s.n.m. Se definieron unas hipótesis, hip_a y hip_b , en donde la primera son parámetros de fricción recomendados en WSL (2017) para un alud “canalizado” y la segunda para uno “no canalizado”.

El resultado principal de la simulación inicial, lo constituye la elección de las tres Zonas de Salida (Z_a , Z_b y Z_c) mejor ajustadas.

La **calibración** permitió la identificación de los coeficientes μ y ξ mejor ajustados (hip_x), mediante la combinatoria y simulación de las tres Zonas de Salida (Z_a , Z_b y Z_c) resultantes de simulación inicial con las cuatro hipótesis de parámetros de fricción (hip_1 , hip_2 , hip_3 y hip_4), definidas en base a modelos de prueba reiterativos y a lo identificado en la etapa de simulación inicial. El valor de densidad, cohesión y mallado utilizado en los modelos de calibración corresponden a los informados en Tabla 2. Un mayor detalle de la calibración es dado en Resultados (véase subsección 5.4.3).

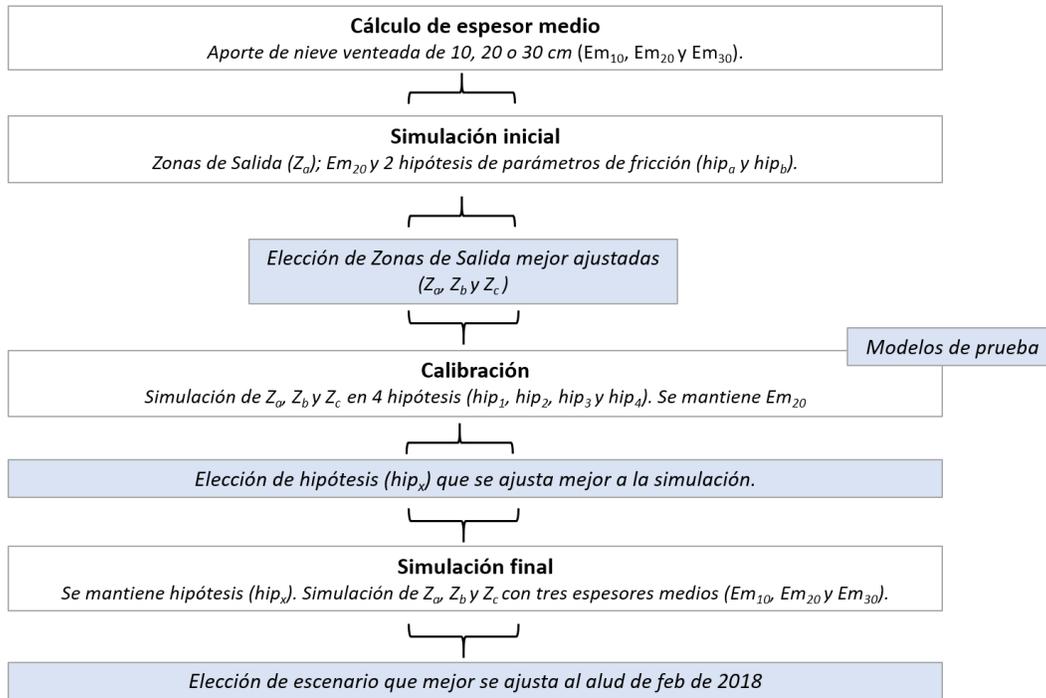


Figura 2: Metodología de simulación 2-D del alud de febrero de 2018.

Tabla 2: Datos de entrada de Simulación Inicial

Mallado (m):	2x2	
Cohesión nieve (Pa):	100	
Densidad (Kg/m3):	300	
Parámetros de fricción	μ	ξ
Hip _a :	0.29	1500
Hip _b :	0.34	1250

Finalmente, la **simulación final** consideró la combinatoria de las tres Zonas de Salida (Z_a , Z_b y Z_c) mejor ajustadas con los tres espesores medios (Em_{10} , Em_{20} y Em_{30}) definidos en un inicio. La hip_x se mantuvo invariable en todos los modelos de la simulación final. Como resultado de la Simulación final, se escogió el escenario (dado por una Zona de Salida y un espesor medio) que mejor se ajustara a lo identificado en la caracterización del alud de feb de 2018. El valor de densidad, cohesión y mallado utilizado en los modelos de simulación final corresponden a los informados en Tabla 2.

De manera general, todas las simulaciones incluyeron el uso de un MDT de 2x2 generado por la interpolación de datos LiDAR provenientes del ICGC. Vuelo 2009.

4.5 Simulación 2-D del alud de referencia para T100.

La simulación del escenario T100 consideró la (1) Zona de Salida mejor ajustada para el alud de feb de 2018 y (2) una Zona de Salida de mayor extensión, la que inscribe a la Zona de Salida mejor ajustada, y que se ha interpretado como una extensión de esta frente a un escenario extraordinario. El espesor medio y los coeficientes de fricción corresponden a los de un escenario de T100. Se mantuvo el MDT 2x2.

Por otra parte, si bien fueron utilizados los parámetros de fricción de hip_x el μ fue levemente modificado, en base a lo expuesto en WSL (2017), debido al cambio en las características de la nieve involucrada en un alud de T100. La Tabla 3 presenta un resumen con los datos de entrada de la simulación.

Tabla 3: Datos de entrada de Simulación T100

Mallado (m):	2x2	
Cohesión nieve (Pa):	100	
Densidad (Kg/m3):	300	
Parámetros de fricción	μ	ξ
Hip _a :	0.32	1250

5.0 RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales resultados de la metodología descrita:

5.1 Caracterización del alud de feb de 2018

5.1.1 Nivometeorología

El último episodio importante de precipitación de nieve previo al desencadenamiento del alud de feb de 2018 tuvo su declive el día 6 de febrero de 2018. El episodio acumuló 90 cm de nieve reciente de muy baja cohesión (a los 1900 m s.n.m). Complementario a esto, el perfil de nieve SP 06 de 80 cm de profundidad, desarrollado a los 2000 m s.n.m y sobre una vertiente orientada al este, muestra un perfil de granos de nieve reciente y fragmentados, con dos capas débiles situadas a los 15 y 45 cm de profundidad. El paquete de nieve reciente en este perfil es de unos 75 cm de espesor, depositado sobre una costra dura de rehielo.

El día 7 de febrero de 2018 no se registraron nuevas precipitaciones, pero si ocurrió transporte de nieve por viento, en donde vientos provenientes desde el sureste y este generaron sobreacumulaciones en las vertientes norte y noroeste. El perfil de nieve SP07, de 150 cm de profundidad, situado sobre una vertiente de orientación este y a los 2000 m s.n.m. muestra un tramo superior de alrededor de 90 cm, formado por granos fragmentados y en menor medida granos finos y con facetas. Este paquete presenta, en general, una baja dureza y exhibe dos capas débiles a alrededor de 30 y 60 cm de profundidad. Ambas características lo hacen correlacionable al manto de nieve reciente de 90 cm descrito en SP06. El bloque superior es limitado en

su base por un nivel duro de rehielo correlacionable a la base del perfil SP06.

En el siguiente día no se registraron precipitaciones de nieve, el espesor de manto de nieve informado es de 80 cm a los 1.900 m s.n.m., y las condiciones de dirección del viento cambiaron a vientos moderados provenientes desde el sureste primero y el de norte después, los que redistribuyeron la nieve, dejando las lomas y crestas deflactadas y, tanto vertientes orientadas a sur como laderas orientadas norte, con sobreacumulación. El perfil de nieve SP09, desarrollado en una vertiente de aspecto NE y de 85 cm de profundidad, muestra un bloque superior, más cohesivo, compuesto por granos fragmentados y finos, y delimitado en su base por una capa débil a los 30 cm de profundidad; y un bloque inferior de 50 cm, de menor dureza, compuesto por granos con facetas y de menor forma granos finos. Ambos bloques se disponen sobre una costra muy dura de hielo-deshielo a los 80 cm de profundidad. Si bien, la dureza de estos bloques es mayor, sus granos representarían el metamorfismo de la nieve de los bloques de baja dureza vistos en SP06 y SP07.

En cuanto al día 9 de febrero de 2018, se reporta un manto de nieve de espesor homogéneo de 80 cm, a los 1.900 m s.n.m. Sin embargo, a partir de los 2000 m s.n.m. el viento de sureste primero y el de norte después redistribuyeron la nieve, dejando tanto vertientes orientadas a sur como a norte, sobreacumuladas.

Finalmente, para el día 10 de febrero las condiciones de viento se caracterizaron por un temporal con ventisca **con dirección predominante de vientos desde el norte**, y de carácter fuerte y muy fuerte, los que dejaron las vertientes de orientación norte sin nieve, y formando grandes acumulaciones en las vertientes orientadas principalmente a sur. **El espesor promedio del manto de nieve a los a los 1.900 m s.n.m. es de unos 80 cm.** Se presume además que, al menos para las vertientes de cara al sur, correspondería a un bloque que en su mayoría se compondría por granos de nieve reciente

venteada. La información de los perfiles de nieve SP06, SP07 y SP08 se encuentra en el Anexo A.

5.1.2 Condiciones físicas del terreno y cartografía del alud

El alud de feb de 2018 corresponde a un alud de placa de viento dentro de la zona de alud RIT051. Si bien su Zona de Salida es desconocida, esta se encontraría entre los 2100 y 2200 m s.n.m. y se desarrollaría sobre una pendiente moderadamente fuerte (25° a 35°) a muy fuerte (<45°). La identificación de posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018 es explicada en detalle en la sección 5.2.

En cuanto a la zona de recorrido y llegada, estas fueron identificadas por *Allaus Control* (Figura 4) dos días posteriores al desencadenamiento del alud. **El alcance del alud se estima entre 300 a 400 m.** “Alcance” se entenderá cómo la distancia medida en planta entre la cota media de la salida del alud y hasta la más baja del depósito. La zona de recorrido se encuentra entre los 1970 Y 2100 m. s.n.m., sobre una vertiente orientada al sur y de fuerte pendiente, con un predominio de pendientes fuertes (35° a 45°) a muy fuertes (<45°), sobre las moderadamente fuertes (25° a 35°). Su ancho fue de entre 10 y 36 m. En el recorrido destaca la existencia de una canalización (“Canal de Rocs de la Bofia”) entre los 2060 y 2120 m s.n.m., con un ancho de salida de 10 m y una altura en este punto de entre 10 a 15 m.

En cuanto a la zona de llegada, esta se sitúa sobre la explanada de la carretera BV-4024 y la ladera inmediatamente bajo esta. **La nieve depositada en las faldas de la ladera de Rocs de la Bòfia presentó un ancho de entre 40 a 52 m, un volumen de alrededor de 675 m³ y potencias de entre 2.4 y 1.35 m de altura.** La potencia decrece rápidamente al alejarse hacia el límite sur. Bajo la cota de la carretera BV-4024, el depósito fue del orden de 20 a 40 cm de espesor, y se situó sobre una vertiente orientada al sur y de pendiente suave (10° a 18°) a moderada (18° a 25°). A partir de los datos

puntuales tomado por *Allaus Control* se ha estimado un **volumen de depósito total de entre 1800 - 2500 m³.** **Tanto la geometría del recorrido cómo la del depósito exhiben una leve orientación SW.** Es importante además destacar que el depósito corresponde al alud denso. No fue reconocido un depósito asociado a una fase de menor cohesión (aerosol).

5.1.3 Trabajo de campo

El trabajo de campo fue efectuado durante un día de trabajo efectivo, el 20 de mayo de 2019. El principal resultado fue una interpretación del grado de actividad de aludes en la zona de estudio. En la Figura 4 se muestra el detalle del trabajo generado, en el que es posible identificar cuatro distintas acepciones de grado de actividad:

☑ **Evidencias de actividad reciente de alud.** Se identificaron evidencias recientes claras tales cómo secreciones de resina o fracturas frescas en ramas (Figura 3).



Figura 3: Evidencias de actividad reciente de alud: secreción de resina o fracturas frescas.

? **Evidencias de actividad reciente de alud (?).** Se identificaron algunas evidencias, aunque no suficientes para asociar su daño a una actividad reciente de alud; el daño identificado probablemente corresponde más a una actividad reciente que antigua.

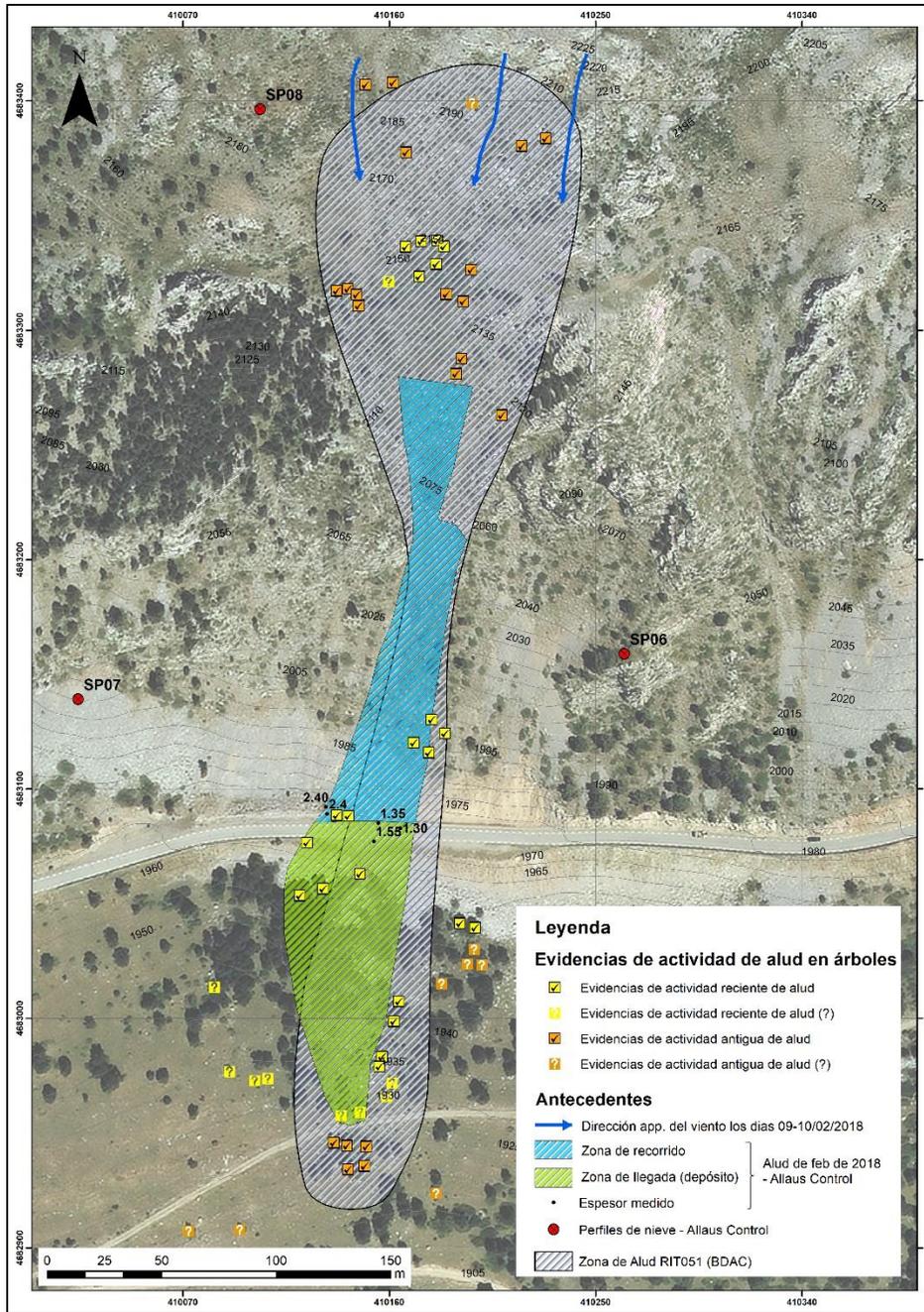


Figura 4 Mapa de inventario de información.

☑ **Evidencias de actividad antigua de alud.** Se identificaron sólo evidencias antiguas de actividad de alud, tales como ramas con fracturas cicatrizadas o con crecimientos desviados de su posición natural.

☐ **Evidencias de actividad antigua de alud (?).** Se identificaron sólo algunas evidencias antiguas de actividad de alud y de carácter dudoso

Sumado a lo anterior, vale la pena destacar la verificación de las siguientes variables:

- Predominio de pendientes moderadamente fuertes a muy fuertes en la porción superior de Rocas de la Bòfia, y pendientes más moderadas en la porción inferior, bajo la cota de la carretera BV-4024.
- Espesores de nieve máximos en cabecera típicos de 0.7 a 1.3 m, inferidos por la altura de las ramas bajas de los árboles.
- Dirección de viento desde el norte predominante, al menos entre los 2100 y 2200 m s.n.m, evidenciado por dirección de crecimiento de arbustos y ramas de árboles “en bandera”.

5.2 Identificación de posibles Zonas de Salida del alud de feb de 2018

La Figura 5 muestra los resultados obtenidos del análisis de susceptibilidad al desencadenamiento de aludes de la zona de estudio, en el que es posible identificar las **13 posibles Zonas de Salida propuestas**

para el alud de feb de 2018. En la definición de las Zonas de Salida prevaleció una delimitación dada por cambios de pendiente de moderadamente fuerte (25° a 35°) a fuertes (35° a 45°), y que se desarrollase sobre vertientes de orientación sur y sureste, debido a la sobreacumulación generada en estas vertientes los días previos al alud de feb de 2018 por los vientos del norte.

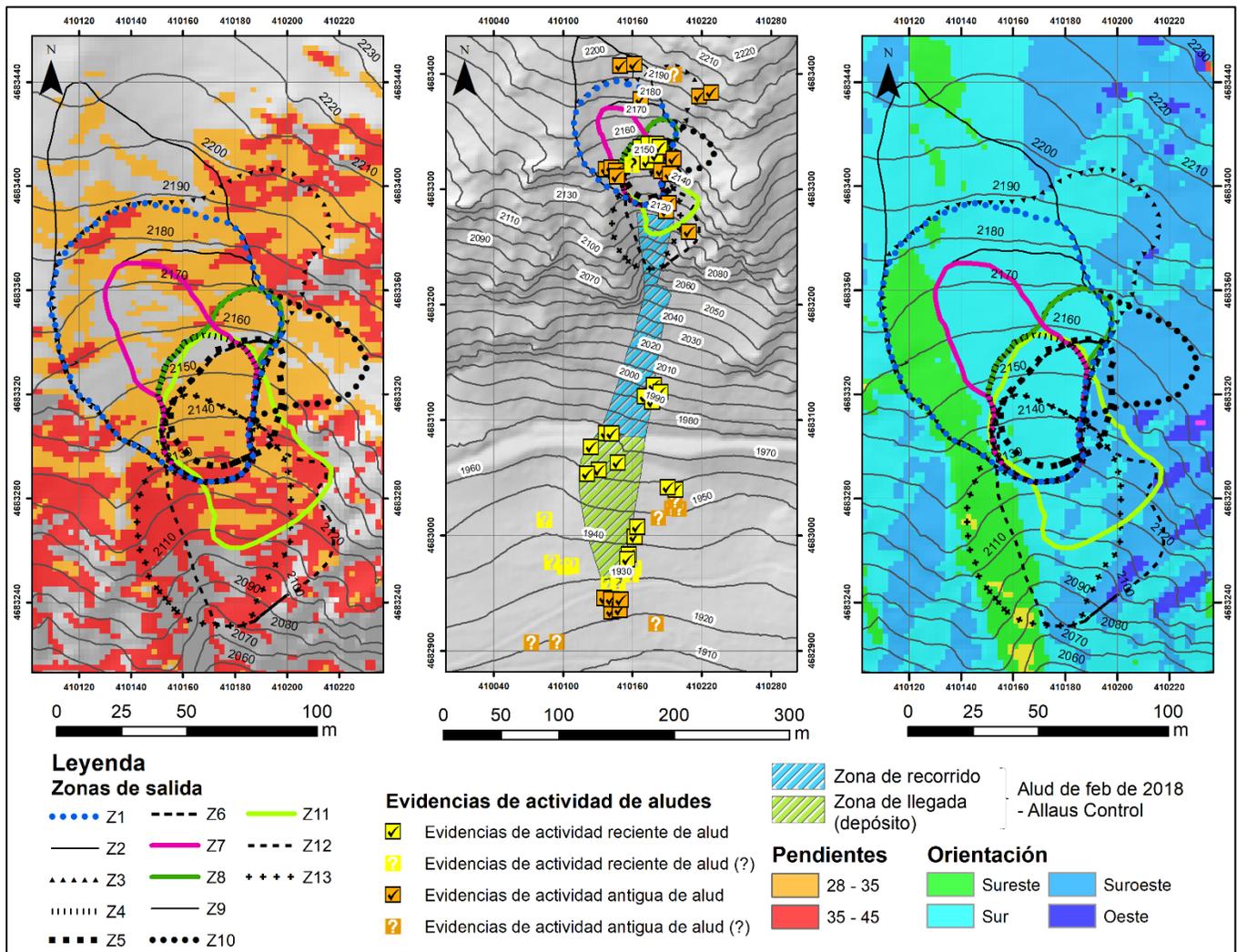


Figura 5: Mapa de Zonas de Salida de alud de feb de 2018. Se presentan el mapa de pendientes (izquierda), aspecto (derecha) y una vista general de las Zonas de Salida, el depósito generado y las evidencias de actividad vistas en terreno. En particular, además es identificada la Z1 (puntos azules), la cual fue incluida dentro de la simulación del alud T100; y Z7 (línea sólida violeta), Z8 (línea sólida verde oscuro) y Z11 (verde limón), las que fueron incluidas en la simulación del alud de feb de 2018.

Por otra parte, la Tabla 4 resume las principales características de cada Zona de Salida, en donde se identifica su pendiente promedio, cota media, orientación y superficie.

Tabla 4: Principales características de Zonas de Salida identificadas.

Zona de Salida	Pendiente promedio (°)	Cota media (m s.n.m.)	Orienta.	Superficie (m ²)
Z1	31	2158	S/SE	6804
Z2	27	2170	S/SE	9174
Z3	31	2164	S/SE	8369
Z4	32	2144	S	1739
Z5	32	2146	S	1576
Z6	33	2142	S	1482
Z7	29	2152	S	2981
Z8	31	2150	S	2254
Z9	31	2158	S	4064
Z10	31	2152	S/SW	3515
Z11	33	2136	S/SW	3174
Z12	34	2120	S/SW	3894
Z13	34	2120	S/SW	4820

5.3 Determinación de Periodo de Retorno del alud de feb de 2018.

La Figura 6 muestra el máximo DDH3dd por temporada según un espesor vertical representativo diario dado por: (I) el espesor medido cada 24 h (DDH3dd-24h), registrado a las 23:00 de cada día, y (II) el espesor máximo registrado (DDH3dd-máximo diario).

Es importante recalcar que se demostró la distribución normal de la serie de datos de cada muestreo y parámetro, en donde las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y de Shapiro Wilk arrojaron un valor de hipótesis de α por sobre el 5% para los cuatro casos.

Por consiguiente, los resultados obtenidos del cálculo de periodo de retorno para Cadí Nord, mediante el ajuste de distribución de Gumbel, son expuestos en la Tabla 5 según sea el caso.

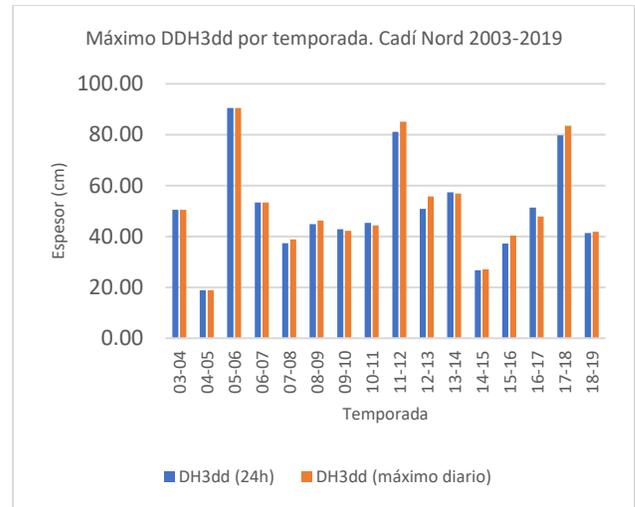


Figura 6: Distribución de máximos DDH3dd para la estación Cadí Nord entre 2003 y 2019.

Tabla 5: Periodos de retorno de estación Cadí Nord, periodo 2003-2019.

		DDH3dd (24h)	DDH3dd (Max)
T	2	47.39	48.18
	10	75.70	77.42
	30	92.75	95.02
	50	100.52	103.06
	100	111.02	113.90
	300	127.58	131.00
	1000	145.69	149.71
	Temporadas	16	16
Promedio		50.56	51.44
Desv. Típica		19.27	19.91
Alpha		0.07	0.06
Mu		41.88	42.49

Se observa que los valores obtenidos de DDH3dd son muy similares a los obtenidos en ICGC (2012), presentando diferencias que no superan el 10%.

Tomando el registro nivometeorológico de la estación Cadí Nord como representativo del alud de feb de 2018, el episodio tendría un periodo de retorno de 15 años

dado por un valor de DDH3dd de 83.5 cm (medido en estación Cadí Nord, el 6 de febrero de 2018).

En cuanto a los testimonios históricos, se logró identificar

- Un episodio ocurrido el año 2000, en el que se activó un alud dentro de la RIT051 y que afectó la carretera BV-4024. Fuente: IEA (2005).
- Un episodio ocurrido alrededor del año 2000 y otro en la década de 1980. Ambos episodios afectaron la carretera BV-4024. Fuente: comunicación personal de Pere Oller con el personal de administración y limpieza de la carretera.

Por otra parte, el análisis temporal de imágenes aéreas no identificó cambios evidentes en la posición de los árboles situados en la zona de llegada del alud entre el año 1993 y 2017 (no hubo destrucción evidente).

En consideración a los testimonios históricos y a la existencia de sólo otro episodio de alud afectante a la BV-4024 hasta la fecha (el de feb de 2018), **se ha estimado coherente para el alud de feb de 2018 un periodo de retorno de entre 15 y 20 años.**

5.4 Simulación 2-D del alud de feb de 2018.

5.4.1 Cálculo de espesor medio

En primer punto, la Tabla 6 muestra los valores de espesor medio según 10, 20 o 30 cm de aporte de nieve por viento para las 13 Zonas de Salida definidas en la sección 5.2. El cálculo de espesor medio consideró un espesor vertical de nieve reciente caída de 80 cm, medida que ya considera los efectos del asentamiento y corresponde a la medición de manto nivoso del día 10 de febrero de 2018. A este espesor le fueron sumados 10 cm por el desnivel existente entre el punto de medición del manto, 1900 m s.n.m, y la cota media representativa de las Zonas de Salida (todas alrededor de los 2100 m s.n.m). Tomando en cuenta estas acepciones, el manto nivoso disponible a deslizar se parametrizó en 90 cm de espesor vertical, y sobre este espesor fueron sumados los 10, 20 o 30 cm de aportes de nieve por viento, y las otras consideraciones

geométricas descritas en la metodología de cálculo de espesor medio.

Tabla 6: Valores de espesor medio según 10, 20 o 30 cm de aporte de nieve por viento para las 13 Zonas de Salida. También, se muestra el volumen de nieve que podría movilizar cada Zona de Salida para un espesor medio variable entre Em10 y Em30.

Zona de Salida	Espesor medio			Superf. (m ²)	Volumen (m ³)
	Em10	Em20	Em30		
Z1	0.76	0.85	0.93	6804	5181 a 6339
Z2	0.95	1.06	1.16	9174	8717 a 10665
Z3	0.76	0.85	0.93	8369	6373 a 7797
Z4	0.73	0.81	0.89	1740	1263 a 1545
Z5	0.73	0.81	0.89	1576	1144 a 1400
Z6	0.69	0.77	0.85	1482	1028 a 1258
Z7	0.84	0.94	1.03	2981	2519 a 3082
Z8	0.76	0.85	0.93	2254	1717 a 2100
Z9	0.76	0.85	0.93	4064	3095 a 3786
Z10	0.76	0.85	0.93	3515	2677 a 3275
Z11	0.69	0.77	0.85	3174	2202 a 2695
Z12	0.66	0.74	0.81	3894	2588 a 3167
Z13	0.66	0.74	0.81	4820	3203 a 3920

5.4.2 Simulación inicial

La simulación inicial tomó en cuenta la ejecución de 26 modelos, en donde fue simulado un alud partiendo de cada una de las 13 Zonas de Salida, con un espesor medio Em₂₀, y con dos hipótesis de coeficientes de fricción: hip_a ($\mu= 0.29$ y $\xi=1500$) e hip_b ($\mu= 0.34$ y $\xi=1250$).

El resultado de cada simulación inicial es presentado en el Anexo B. Cada modelo resultante fue evaluado y contrastado con el volumen del depósito, de entre 1800 - 2500 m³, los valores de espesor de nieve sobre la carretera BV-4024, de 1.35 y 2.4 m de altura, y la geometría del alcance y depósito conocido del alud de feb de 2018; con tal de evaluar el ajuste de cada modelo con la realidad. La medida de "alcance" se entenderá cómo la distancia en planta entre la cota media de la salida del alud y hasta la más baja del depósito.

De forma general, la simulación de las 13 Zonas de Salida modela un alud de elongación NS, formado por 10^3 a 10^4 m³ de nieve, con un alcance variable entre 280 a más 480 m, y un espesor de nieve máximo dejado sobre la carretera BV-4024 de entre 1.3 a 4.0 m.

En el caso particular de la simulación de las Zonas de Salida Z1, Z2 y Z3 (6 modelos), sus resultados muestran volúmenes de nieve removida de entre 5000 a 10000 m³, los que sobrestiman el volumen del depósito del alud de feb de 2018. Además, si bien el ancho del recorrido y depósito es coherente con el conocido, sus alcances rebasan en por lo menos 80 m al alcance conocido del alud de feb de 2018. Con respecto a los valores de espesor de nieve sobre la carretera, las simulaciones muestran un espesor máximo de entre 2.5 a 3.0 m, valores no concordantes con lo identificado por *Allaus Control*, los alcanzaron máximos de entre 1.35 y 2.4 m de altura.

Por otra parte, la simulación de un alud proveniente de las Zonas de Salida Z4, Z5 y Z6 (6 modelos) genera un volumen de nieve removida menor a 1500 m³, lo que subestima el volumen del depósito del alud de feb de 2018. Si bien los espesores de nieve sobre la carretera son de entre 1.3 y 2.88 m, cercanos a lo conocido; de manera general el alcance y ancho de cada alud no logra ajustarse a la geometría conocida.

A su vez, para la simulación de las Zonas de Salida Z9, Z10, Z12 y Z13, a pesar de que los volúmenes generados por estas simulaciones (8 modelos) son coherentes con el volumen del depósito; el alcance y el ancho de los aludes simulados no son los que mejor se ajustan, presentando diferencias de entre +20 y +80, y -10 y +7 m; respectivamente, con la geometría conocida. En relación con el espesor de nieve sobre la carretera, sus simulaciones señalan un espesor máximo de entre 1.2 a 4.0 m.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, las Zonas de Salida Z7, Z8 y Z11, en orden de prioridad, fueron elegidas cómo las mejor ajustadas, ya que su alcance y ancho muestra una buena correlación con la geometría conocida, presentando diferencias de entre -10 y +22, y +7 y +9 m; respectivamente; y su volumen

y espesor de nieve en la carretera, son coherentes con lo calculado para el depósito del alud de feb de 2018 (Tabla 6). Es importante destacar que esta elección se hizo en base a los resultados de los modelos de hip_b ($\mu=0.34$ y $\xi=1250$), los que mostraron de forma general una buena relación entre el depósito generado en la simulación con la geometría conocida de este. La Figura 7 presenta el resultado de la simulación inicial de la Z7, Z8 y Z11, para la hipótesis hip_b ($\mu=0.34$ y $\xi=1250$).

5.4.3 Calibración

Debido principalmente a la falta de coherencia entre la dirección del recorrido y depósito de las simulaciones (de orientación NS) con la realidad (orientación SW) se generaron modelos de prueba reiterativos con leves cambios en el MDT y los parámetros de fricción, con el objetivo de obtener el mejor ajuste posible entre los resultados de la modelización inicial y las observaciones reales. Sus resultados sirvieron de retroalimentación en la etapa de calibración y apuntaron básicamente a:

Dependencia del tamaño de malla: se generaron modelos (4 modelos) comparativos de Z7 y Z11, entre un modelo con malla de 5x5 m y otro de 2x2. El tamaño de malla se relaciona directamente con los nodos de cálculo de IBER, concediendo una mayor o menor resolución de la simulación y refinamiento de los cálculos. Todos los demás parámetros corresponden los mostrados en la Tabla 2, y usando hip_b ($\mu=0.34$ y $\xi=1250$). Finalmente se determinó que no afectan la orientación resultante del recorrido y depósito, causando sólo leves diferencias, menores a 0.3 m, en el depósito dejado sobre la carretera BV-4024. Se decidió utilizar el MDT de 2x2 para todas las simulaciones ya que al menos para la mejor simulación (Z7), el MDT de 2x2 ajustaba mejor el modelo, en comparación al MDT de 5x5.

Hipótesis complejas de parámetros de fricción descartadas: se generaron modelos de Z7 (2 modelos) con dos hipótesis complejas, hip_5 y hip_6 en Tabla 7. Ambas hipótesis incluyen el paso del recorrido del alud por el Canal de Rocs de la Bòfia, y en particular, hip_6 ocupa un $\xi=1050$, con tal de influir una mayor dependencia del modelo por las condiciones del terreno en este tramo.

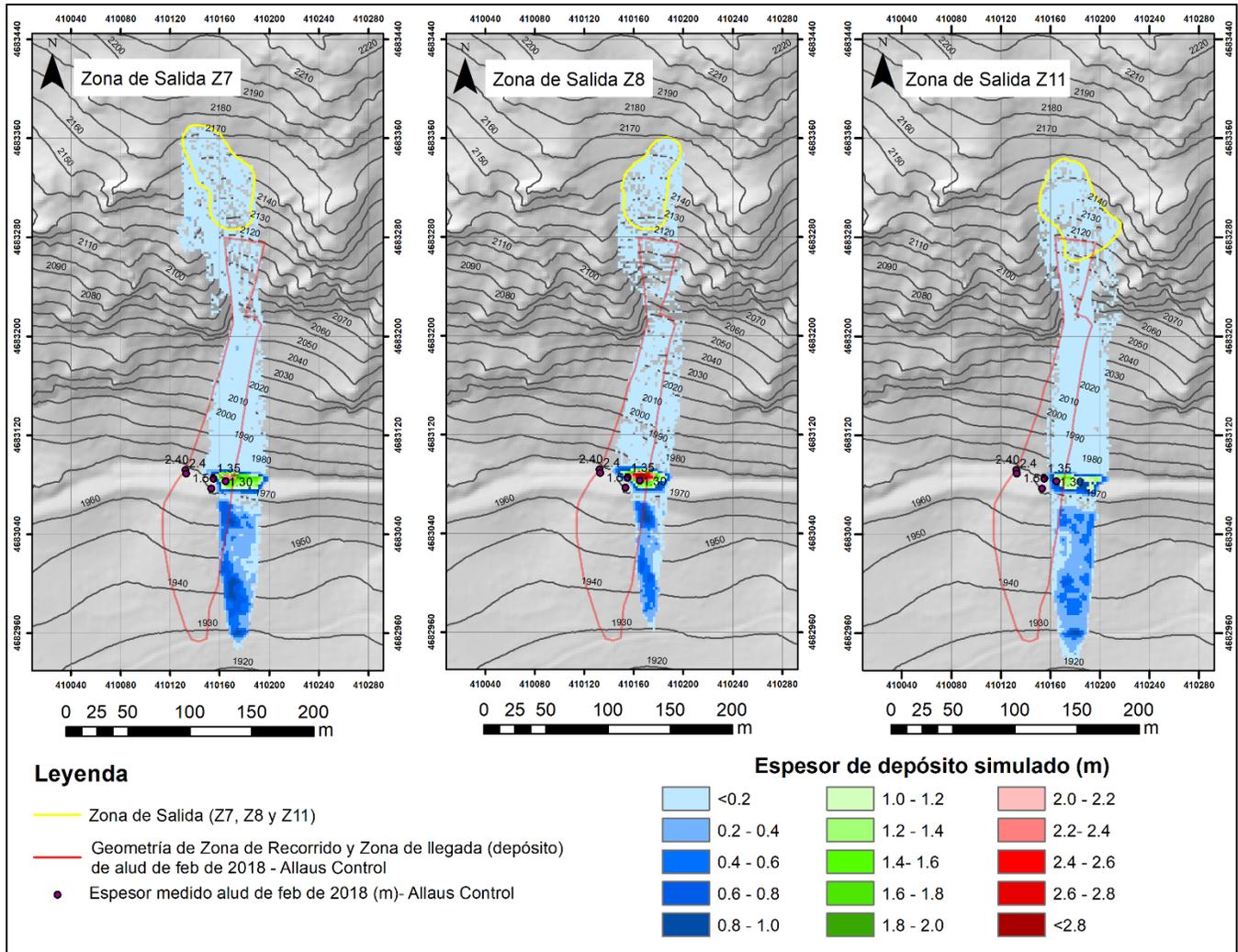


Figura 7: Simulación inicial de la Z7, Z8 y Z11, para la hipótesis hip_b ($\mu=0.34$ y $\xi=1250$).

Las simulaciones generadas con estas hipótesis no mostraron cambios significativos en sus resultados respecto a las planteadas en Tabla 8, a pesar de que el tiempo de simulación requerido para cada modelo aumentó. Se decidió ocupar sólo hipótesis complejas que a lo más incorporaran un cambio en las condiciones del terreno (véase Tabla 8), debido a la ausencia de mejores resultados.

Modificación del MDT: se generó una simulación inicial de Z7 (1 modelo) con un MDT modificado. Este MDT incluye una leve depresión identificada en terreno y no interpolada por el modelo de elevación, la que presenta unos 40 cm de profundidad y yace bajo el recorrido reconocido del alud, siendo coherente con la dirección

del depósito reconocido. La simulación resultante no arrojó resultados distintitos que la del MDT sin modificar.

Tabla 7: Hipótesis complejas de parámetros de fricción descartadas

hip	μ	ξ	Cota (m s.n.m)
hip_5	0.34	1500	<2060
		1250	2060-2120
		1500	>2120
hip_6	0.34	1500	<2060
		1050	2060-2120
		1500	>2120

Simulación de alud con dos Zonas de Salida simultaneas: se generó una simulación (1 modelo) de dos Zonas de Salida (Figura 8): Z7 y una Zona de Salida similar a Z11, pero de menor tamaño (Zp), pensando en que Zp podría incidir en la dirección del flujo. Se consideró la activación simultanea de estas dos Zonas de Salida. El alud simulado sólo mostró un aumento en el alcance y en el espesor del depósito dejado en la carretera BV-4024, pero no un cambio en la dirección del recorrido. Se decidió utilizar sólo una activación de Zona de Salida en los modelos debido a la ausencia de mejores resultados.

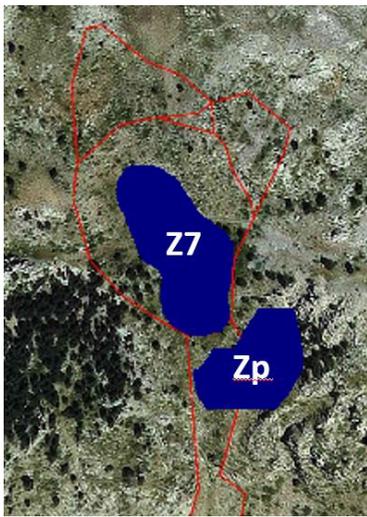


Figura 8: Zona de Salidas Z7 y Zp simultaneas.

Cambio en la densidad de flujo: se generó una simulación (1 modelo) de Z11, bajo las condiciones de simulación inicial y hip_b , cambiando solamente la densidad del flujo de 300 a 600 kg/m³. La simulación no logró generar un recorrido distinto al producido en simulación inicial.

En consideración a lo expuesto y a lo identificado en la etapa de simulación inicial, fueron definidas cuatro hipótesis de parámetros de fricción (hip_1 , hip_2 , hip_3 y hip_4), nacientes de la combinatoria de hip_a y hip_b , para calibrar las condiciones del terreno. En su definición se fijó el parámetro $\mu=0.34$ debido a la buena correlación vista en simulación inicial y mencionada anteriormente. La Tabla 8 muestra las 4 hipótesis. En ella se muestran dos hipótesis simples, hip_1 y hip_2 , en las que a lo largo de todo el recorrido del alud los parámetros de fricción

son constantes, y dos hipótesis complejas, hip_3 y hip_4 , en las que en la cota 2600 ocurre la salida del alud del Canal de Rocs de la Bòfia.

Tabla 8: Hipótesis de parámetros de fricción para calibración

hip	μ	ξ	Cota (m s.n.m)
hip_1	0.34	1500	
hip_2	0.34	1250	
hip_3	0.34	1250	0-2060
	0.34	1500	>2060
hip_4	0.34	1500	0-2060
	0.34	1250	>2060

Si bien no fue posible reconocer diferencias evidentes en el alcance del alud simulado y el espesor de nieve sobre la carretera, entre el uso de la hip_1 o hip_4 , y entre hip_2 o hip_3 , estas últimas lograron un mejor ajuste, destacando que el alud que parte de Z7 mostró un espesor máximo de nieve en carretera de 2.38 m. En consecuencia, se escogió a la hip_2 ($\mu=0.34$ y $\xi=1250$), para los parámetros de fricción a usar en la simulación final (hip_x). El detalle del resultado de cada combinatoria es presentado en el Anexo C.

5.4.4 Simulación final

La simulación final consideró la combinatoria de las tres Zonas de Salida Z7, Z8 y Z11 con los tres espesores medios (Em_{10} , Em_{20} y Em_{30}) definidos en un inicio. La Figura 9 muestra los resultados obtenidos, en donde se aplicó un $\mu=0.34$ y $\xi=1250$. **Cómo resultado de la simulación final, se escogió el escenario dado por la Zona de Salida Z7 y un espesor medio de 84.49 cm (Em_{10}) cómo el escenario que mejor se ajusta a lo identificado en la caracterización del alud de feb de 2018.**

En consideración a este escenario, el alud de feb de 2018 habría movilizado alrededor de 2520 m³ (756 ton), logrando un alcance de 240 m desde su Zona de Salida ubicada a los 2152 m s.n.m. El depósito sobre la carretera alcanzaría un volumen de 770 m³ y alturas de entre 2.44 y 1.66 m. Bajo esta, el espesor general sería menor a 40 cm.

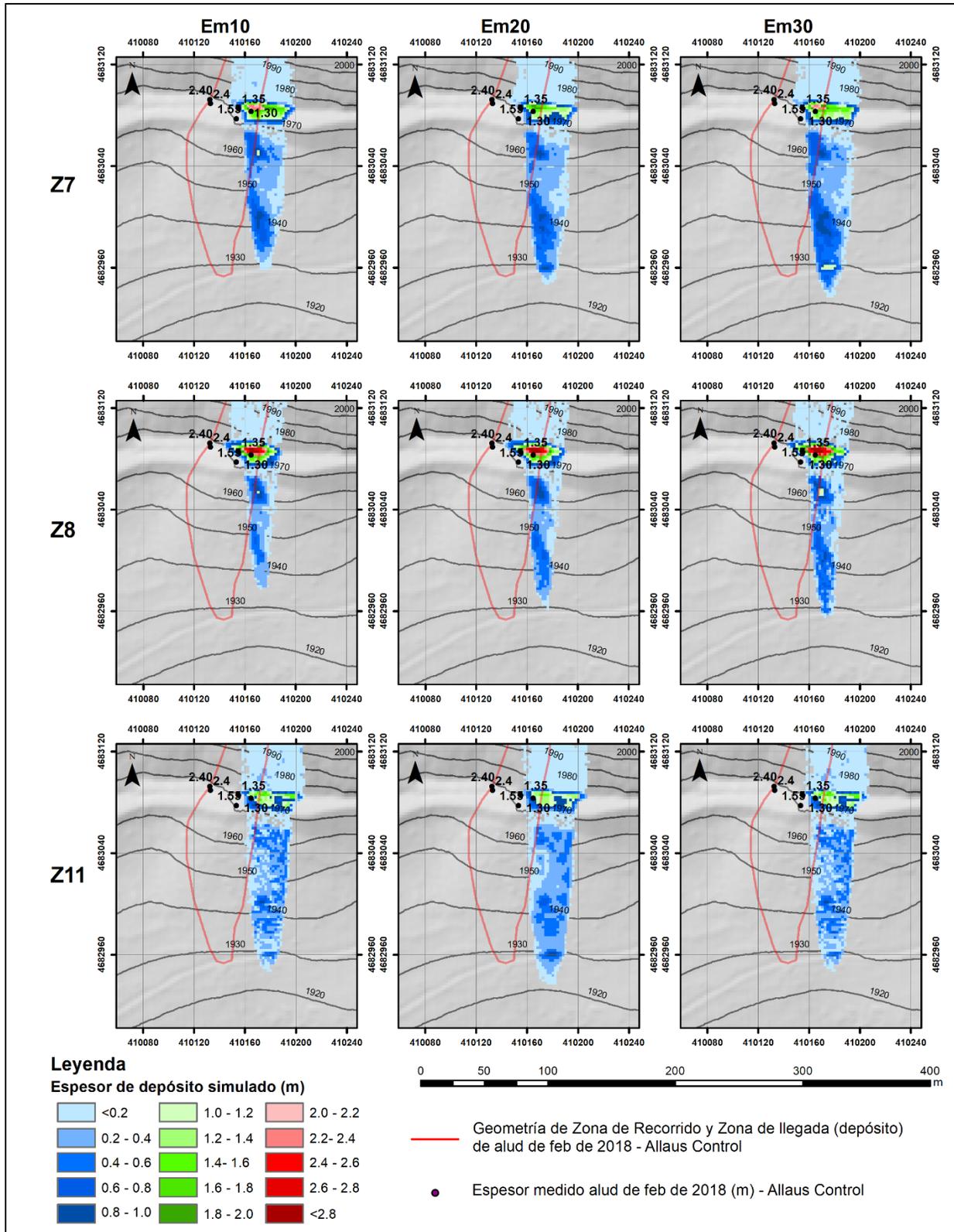


Figura 9: Simulación final: combinatoria de las tres Zonas de Salida Z7, Z8 y Z11 con los tres espesores medios (Em₁₀, Em₂₀ y Em₃₀).

La velocidad máxima del alud simulado fue de 22.30 m/s y ocurrió en la salida del Canal de Rocs de la Bòfia. En particular, al llegar a la carretera BV-4024 su cabecera alcanza un máximo de 16.10 m/s, de modo que el alud podría impactar con una presión de entre 38.88 a 77.76 kPa, de acuerdo con las ecuaciones de presión dinámica en Ancey (2006) o Rudolf-Miklau, et al. (2011); respectivamente. Se consideró para el cálculo una densidad del alud de 300 kg/m³ (WSL, 2017).

5.5 Simulación 2-D del alud de referencia para T100.

La simulación del escenario T100 consideró un alud que parte desde la Zona de Salida Z7 y de Z1, la que se ha interpretado como una extensión de Z1 frente a un escenario centenario, elección sustentada por los daños en la vegetación asociados a un evento antiguo.

El arreglo de coeficientes de fricción fue modificado levemente, cambiando a un $\mu=0.32$ y manteniendo el $\xi=1250$, con tal de sólo condicionar un cambio en las propiedades de la nieve (WSL, 2017). Se planteó un aporte de nieve por viento de 30 y 40 cm, Em_{30} y Em_{40} , respectivamente. El espesor medio tomó en cuenta un espesor vertical de 113,9 cm, el que considera asentamiento y corresponde al máximo DDH3dd para un T100, calculado en la sección 5.3 y mostrado en la Tabla 5. No se aplicó factor de altitud debido a la similitud de las cotas de las Zonas de Salida con la estación Cadí Nord. La Tabla 9 muestra el espesor medio para cada Zona de Salida en un escenario de T100.

Tabla 9: Espesor medio de Z1 y Z7 en simulación T100.

Zona de salida	Pendiente promedio (°)	Espesor medio	
		Em_{30}	Em_{40}
Z1	31	111.13	119.64
Z7	29	123.31	132.75

La Figura 10 muestra los resultados obtenidos de la simulación del alud T100. En primera instancia es importante notar que la simulación de Z1 muestra el desarrollo de dos flujos de alud, en donde uno tendría

similar dirección al simulado para el alud de feb de 2018, y el otro desbordaría por el borde oeste de Rocs de la Bòfia. En consideración a un escenario T100 derivado de la conjunción de los 4 modelos simulados, un alud centenario podría presentar un alcance de entre 330 a 594 m y movilizar entre 3676 a 8140 m³, de los cuales entre 600 y 1450 m³ se depositarían sobre la carretera. En consonancia con lo anterior, la nieve depositada en las faldas de la ladera de Rocs de la Bòfia presentaría máximos de entre 1.4 y 1.96 m de altura, potencia que va decreciendo paulatinamente hacia el límite sur de la carretera BV4024, en donde se observan máximos de unos 20 cm. El ancho de este depósito sería de entre 42 y 115 m. Bajo la carretera BV-4024, el espesor de nieve sería generalmente de entre 30 y 50 cm, con un aumento de la altura de nieve depositada hacia la cabecera, sobre todo para un alud que se inicie desde Z1, la que podría alcanzar entre 1.0 a 1.94 m.

La máxima velocidad del alud ocurre al llegar a la carretera BV-4024, en donde adquiere entre 21 y 25 m/s, valores coherentes con los informados para aludes de nieve seca en Rudolf-Miklau et al. (2011). Tomando en cuenta una velocidad de 25 m/s, **el alud T100 podría impactar con una presión dinámica de entre 93.75 a 187.50 kPa**, de acuerdo con las ecuaciones de presión dinámica en Ancey (2006) o Rudolf-Miklau et al. (2011) respectivamente. Se consideró para el cálculo una densidad del alud de 300 kg/m³ (WSL, 2017).

5.6 Comentarios sobre la simulación del módulo de aludes en IBER

La simulación del alud de feb de 2018 y del T100 corresponden a la primera simulación del módulo de aludes de IBER 2.5 (*free software*).

El módulo de aludes de IBER 2.5 dispone de un entorno de trabajo integrado, funciones de entrada de datos, control en el proceso de cálculo, resultados y herramientas de exportación. Su interfaz gráfica permite una visualización inmediata y dinámica de los resultados, mediante planos (*ráster*) y gráficos de puntos de interés o secciones, los que pueden ser exportados a programas afines como ArcGis o QGIS.

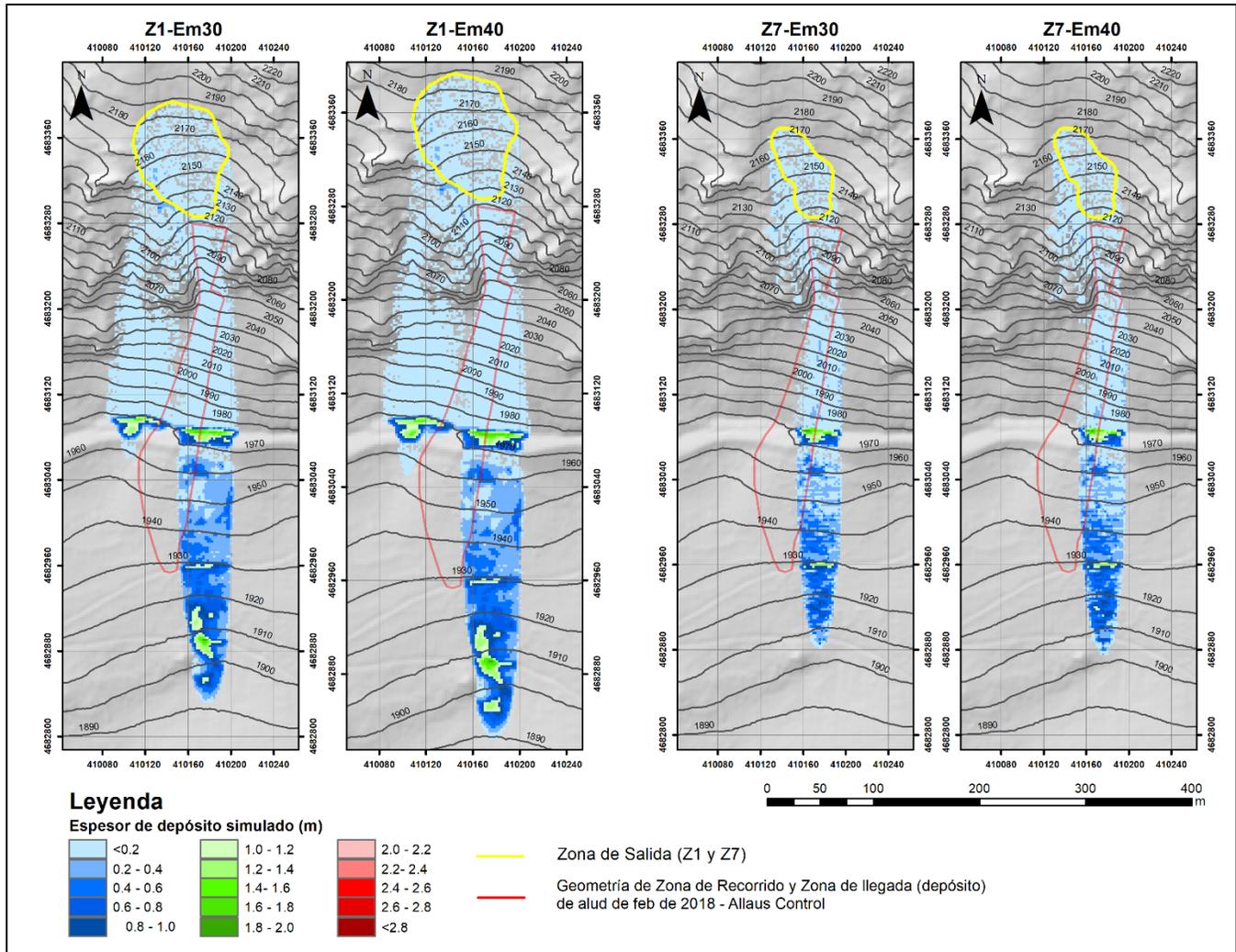


Figura 10: Simulación de alud centenario. Zona de Salida Z7 y Z1, con aporte de nieve por viento de 30 (Em₃₀) y 40 cm (Em₄₀), y parámetros de fricción de $\mu = 0.34$ y $\xi = 1250$.

A pesar de contar con un Manual Básico de Usuario, fue necesaria una introducción al uso del módulo de aludes por parte del equipo de IBER. El módulo es poco intuitivo en un inicio.

Finalmente, quiero destacar que dentro del proceso de simulación inicial y calibración de aludes con IBER 2.5 fue identificada una inconsistencia, en modelos de hipótesis complejas con más de dos arreglos, entre los parámetros de fricción ingresados y los resultados obtenidos. La disyuntiva fue conversada y analizada con el equipo de IBER, en donde se identificó una inconsistencia en el código asociado a la lectura de cotas y asignación de ésta a la malla de cálculo.

Posterior a la resolución de la problemática, se generó una simulación de prueba con tal de identificar posibilidades de mejora de los resultados frente al uso de hipótesis complejas que incluyeran tres cambios en las condiciones del terreno. La simulación se generó con *hip*₅ (ver Tabla 7), con un alud proveniente desde Z7 con 84.49 cm de espesor de manto de nieve (Em₂₀).

Esta simulación no arrojó resultados que presentaran una mejoría en el ajuste entre el modelo y la realidad (básicamente un ajuste en la dirección del recorrido del alud), lo cual, sumado al calendario de entrega del documento, determinó la no realización de nuevas simulaciones frente a nuevos escenarios complejos de

parámetros de fricción. Los cambios ejecutados en el código del *software* debido a esta observación serán incorporados en la próxima versión IBER 2.5.1.

6.0 DISCUSIÓN

El espesor representativo de 80 cm para el alud de feb de 2018 es discutible. Entre otros, pudo existir una potencia mayor condicionada por una mayor carga por viento; o menor, si el bloque deslizado fuese delimitado por capas débiles dentro del manto nivoso. Sin embargo, la consideración de los 80 cm genera coherencia entre el periodo de retorno calculado para este espesor (T de 15 años) y los testimonios históricos de aludes afectantes a la BV-4024 (T de ~20 años), por lo que este valor parametrizado de manto nivoso movilizado es aceptable. En cuanto a la Zona de Salida escogida (Z7), su delimitación es consistente con los parámetros de susceptibilidad establecidos en la metodología; sin embargo, no se deben descartar otras Zonas de Salida de aludes cómo Z11 o Z8.

Con respecto a las simulaciones, en primera instancia es necesario aclarar que los parámetros de fricción de aludes son calibrados para su uso en zonificación de peligro, por lo que consideran eventos con T30 a T300, y desniveles mayores a los 400 m (Barbolini et al. 2000; Naaim & Drand, 2012). Hecho el punto, la simulación mostró un buen ajuste del comportamiento de coulomb seco, en donde teóricamente era de esperar que para un $\mu=0.34$ ocurra la deposición del flujo al pasar por pendientes iguales y menores a 19° (Salm et al., 1990), tal como son las que se presentan bajo la carretera BV-4024.

Por otra parte, el parámetro ξ , evaluado entre 1050 y 1500, no logró generar una mayor adaptación del flujo a las condiciones del terreno, pese a haber generado un variado plan de pruebas dentro de la calibración. La razón podría deberse a la inercia del recorrido de la nieve que circula por el Canal de Rocs de la Bòfia.

El Canal de Rocs de la Bòfia presenta una elongación y orientación de pendiente prácticamente NS, y un estrechamiento del orden de 10 m en su salida. Posterior a la salida, a los 2060 m s.n.m, las condiciones del terreno cambian; la vertiente se abre (se genera una

pérdida del confinamiento) y presenta un leve cambio en la orientación de la vertiente hacia el SW. Entonces, es posible que la inercia traída por el alud a su paso por el canal predomine, frente al cambio en la orientación de la vertiente una vez perdido el confinamiento. Cómo ejemplo, la Figura 11 muestra la dirección de flujo del alud de feb de 2018 desde Z11, los segundos previos después de perder su confinamiento, en donde inclusive se nota la adaptación de los vectores de velocidad a la topografía lateral del MDT, pero aun así la simulación no logra un cambio en la dirección del flujo.

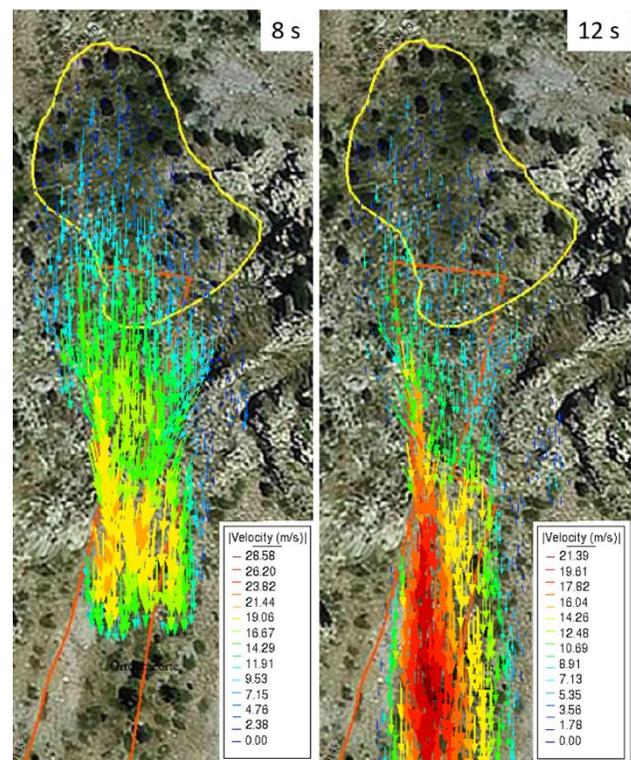


Figura 11: Vectores de velocidad y dirección de flujo del alud de feb de 2018 desde Z11.

Así mismo, la información LiDAR utilizada en la interpolación del MDT de los modelos fue generada en 2009, por lo que posibles cambios topográficos posteriores (y actuales) no estarían considerados en la simulación. Bajo la misma línea, una hipótesis barajada es que el alud reconocido el 12 de feb de 2018, dos días después del desencadenamiento, sea realmente el resultado de una doble activación de la RIT051 desde dos Zonas de Salida independientes o interconectadas,

en donde el depósito del primer alud condicionó el recorrido y la deposición del segundo. Actualmente IBER no ofrece simular la activación de dos zonas de salida para un intervalo de tiempo entre ellas.

Si bien la simulación de la Z7, escogida como la mejor ajustada, no logró reconstruir fielmente la dirección del recorrido y depósito de las simulaciones con el identificado en la realidad, los resultados en cuanto a ancho y alcance del alud, daños recientes producidos en la vegetación, volumen generado y potencias de nieve dejada sobre la carretera BV-4024 lo hacen representativo del alud de feb de 2018. Teniendo en cuenta su tonelaje, alcance y velocidad, el alud de feb de 2018 sería clasificado por un Tamaño 2, pudiendo enterrar, dañar o matar a una persona (*Canadian Snow Avalanche Size-Classification System* en Rudolf-Miklau et al., 2011). Es importante notar que durante el Trabajo de campo se reconocieron evidencias de daño en la vegetación interpretadas como consecuencias de aludes recientes, y en particular, a causa del alud de feb de 2018. Las evidencias se alejan lateralmente entre 5 a 75 m del recorrido simulado del alud denso, por lo que (I) podría existir una extensión lateral y longitudinal de la fase densa (poco probable al no reconocerse depósito de nieve), o (II) que ocurrió una extensión del daño por medio de una fase menos cohesiva (aerosol).

Dicho lo anterior, la simulación del alud T100, diseñada y calibrada en base a los resultados del alud de feb de 2018, mostró que es esperable que un alud T100 logre un alcance máximo de 594 m, y movilizar entre 3676 a 8140 m³ (entre 1103 y 2242 ton) de los cuales entre 600 y 1450 m³ se depositarían sobre la carretera BV-4024. Es importante notar que, al igual que con el alud de feb de 2018, el Trabajo de campo mostró evidencias de daño en vegetación por aludes antiguos que se alejan entre 5 a 80 m lateralmente del recorrido simulado del alud denso, por lo que nuevamente (I) podría existir una extensión, al menos, lateral del alcance de la fase densa del alud, o (II) podrían ocurrir una extensión del daño del alud por medio de una fase menos cohesiva (aerosol). Estudios en detalle y que abarquen una zona de trabajo de campo mayor, son necesarios y recomendados para una futura rectificación del alcance del daño del alud T100.

Ahora bien, teniendo en cuenta el tonelaje, alcance y una presión de impacto de entre 93.75 a 187.50 kPa, el alud T100, sería clasificado por un Tamaño 3, pudiendo enterrar un auto, destruir un pequeño edificio o romper árboles (*Canadian Snow Avalanche Size-Classification System* en Rudolf-Miklau et al., 2011). Acorde con esta clasificación del alud de T100 y su interacción con una vía de comunicación local, PLANAT (2008) sugiere medidas de protección temporales activas/pasivas, como el desencadenamiento artificial del alud o la instalación de señaléticas, avisos en ruta o la suspensión del tránsito; o medidas permanentes activas/pasivas, como la retención del manto nivoso en cabecera o el desvío, freno o parada del alud una vez activo. El diseño de medidas de protección estructural requiere de un cálculo de la presión de impacto de modo más preciso, en donde se consideren las estructuras, sus dimensiones y su orientación respecto a la dirección del alud (vease, Salm et al., 1990; Rudolf-Miklau et al., 2011), pudiéndose triplicar los valores obtenidos en este TFM para el alud T100.

Finalmente, es necesario recalcar la interacción desarrollada en este TFM con los diseñadores del *software* IBER y el trabajo colaborativo y pluridisciplinar llevado a cabo, el que favoreció el avance de las herramientas y conocimientos por ambas partes.

7.0 CONCLUSIÓN

El trazado de la carretera hasta Coll de Pal sufre durante la temporada invernal cortes frecuentes al ser afectada por aludes que se producen en las vertientes contiguas.

En particular, el pasado 10 de febrero de 2018, se habría activado un alud de placa de viento dentro de la Zona de Alud RIT051. El bloque deslizado habría tenido un espesor ortogonal a la superficie de 84 a 94 cm, y correspondería a un bloque, que, en su mayoría, se compuso por granos de nieve reciente venteadada transportada por los vientos del norte, predominantes los días previos. Este evento afectante a la carretera tendría un periodo de retorno de entre 15 a 20 años, y correspondería a un alud de Tamaño 2, pudiendo enterrar, dañar o matar a una persona.

La simulación del alud de feb de 2018 sirvió de referencia y calibración en el diseño de la simulación para un alud T100, recomendada para fines de prevención de riesgo. La fase densa del alud T100 lograría un alcance máximo de 594 m y un ancho de entre 42 y 115 m, sin embargo, daños reconocidos en la vegetación sugieren una extensión mayor de la fase densa del alud, o un daño no simulado en este TFM, generado por una fase de menor cohesión (aerosol).

El alud T100 movilizaría entre 3676 a 8140 m³ (entre 1103 y 2242 ton) y alcanzaría una velocidad máxima de entre 21 y 25 m/s justo cuando la cabecera llega a la carretera BV-4024, impactando de forma ortogonal con una presión dinámica de entre 93.75 a 187.50 kPa. Sus características lo clasifican en un alud de Tamaño 3, pudiendo enterrar un auto, destruir un pequeño edificio o romper árboles. Medidas como el desencadenamiento artificial del alud, instalación de señaléticas, avisos en ruta, suspensión del tránsito, retención del manto nivoso o el desvío, freno o parada del alud una vez activo, son sugeridas para una futura gestión del riesgo.

Con el fin de mejorar la precisión de los resultados del presente TFM, es recomendable (1) generar una campaña de reconocimiento de daños en la vegetación, clasificando daños recientes o antiguos, con tal de precisar la extensión de aludes ordinarios, extraordinarios o extremos. Técnicas dendrocronológicas son recomendables para una datación más precisa; (2) simular el alud de feb de 2018 y el T100 mediante el uso de otros modelos numéricos de Fluidos No Newtonianos, con tal de comparar los resultados obtenidos en este TFM frente a otras idealizaciones de la dinámica de un alud denso (y que tal vez ajusten mejor la dinámica de un alud de baja magnitud como el de feb de 2018). Es crucial generar estos dos nuevos alcances, para así disipar la incertidumbre de las características del alud de referencia logradas en este TFM, en especial la dirección del recorrido y depósito; y relacionar correctamente su simulación con evidencias de daño en la vegetación.

8.0 AGRADECIMIENTOS

Quisiera dar un especial agradecimiento a Pere Oller Figueras, gerente de la empresa consultora *GeoNeu Risk*, quien además de codirigir el Trabajo junto con la Dra. Glòria Furdada Bellavista (UB), entregó datos imprescindibles que permitieron la correcta finalización de este desafío. También a Ernest Blade Castellet y Marcos Sanz Ramos, director y doctorando, respectivamente, de Flumen *Institute* (UPC) y diseñadores del módulo de aludes del *software* IBER 2.5, por su confianza y disposición en entregar los consejos y directrices técnicas necesarias para la simulación inédita de aludes desarrollada. Finalmente, también agradecer a Carles García-Sellés, especialista en nivología y aludes del ICGC, por su recomendación y contribución sustancial en la actualización de los periodos de retorno elaborada.

9.0 REFERENCIAS

Ancey, C. (2006). *Dynamique des avalanches*. Lausanne : Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (Lausanne, Suisse) & Cemagref (Antony, France). 338 pp.

Barbolini, M., Gruber, U., Keylock, C., Naaim, M., & Savi, F. (2000). Application of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites. *Cold Regions Science and Technology* 31 (2000): 133–149.

Bosch, X., & Vilaplana, J.M. (1988). Evolución del manto nival y riesgo de aludes en el Pirineo Catalán. *II Simposio sobre Taludes y Laderas Inestables. Andorra la Vella. Volumen de comunicaciones*. pp. 13-24. E. Alonso, J. Corominas (eds.).

Burkard, A., & Salm, B. (1992). Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit d° zur Berechnung von Fliesslawinen, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 1992, (*Estimation de l'épaisseur moyenne de déclenchement pour le calcul des avalanches coulantes*) traducción por C. Ancey, 1994.

Furdada, G. (1996). *Estudi de les allaus al Pirineu occidental de Catalunya: predicció espacial i aplicacions de la cartografia* (Tesis Doctoral U. Barcelona). Geoforma ediciones, Logroño. 315 pp.

García, C., Martí, G., García, A., Muntán, E., Oller, P., Esteban, P., (2007). Weather and snowpack conditions of major avalanches in the Eastern Pyrenees. *Proceedings of the Alpine&Snow Workshop: Forschungsbericht 53*, pp. 49–56.

ICGC (2012). Projecte de regionalització nivoclimàtica: modelització espacial de valors màxims de nevada al Pirineu. 40 pp. Código de document: ALL-014/12.

IEA (2005). Estudi per a la ubicació i accessos d'un aparcament a Coll de Pal en funció de la innivació. *Institut D'Estudis Andorrans*.

Mases, M. (1997). Analyse et modélisation de la répartition spatiale de la neige transportée par le vent sur des sites d'avalanches et sur domaines skiables. Application aux sites du Stillberg (Alpes suisses) et de La Molina (Pyrénées catalanes). (Tesis doctoral U. Joseph Fourier). En IEA (2005).

Naaim, M., & Drand, Y. (2012). Dense avalanche friction coefficients. influence of nivological parameters. *Proceedings, 2012 International Snow Science Workshop*, Anchorage, Alaska.

Oller, P., Marturiá, J., Gonzalez, J., Escriu, J., & Martinez, P. (2005). El servidor de datos de aludes de Cataluña, una herramienta de ayuda a la planificación territorial. *VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. p 905-916. Alonso, J. Corominas, L. Jordà, M. Romana, J.B. Serón (Eds.).

Oller, P., Muntán, E., García-Sellés, C., Furdada, G., Baeza, C., & Angulo, C. (2015). Characterizing major avalanche episodes in space and time in the twentieth and early twenty-first centuries in the Catalan Pyrenees. *Cold Regions Science and Technology*., Volume 110, Pages 129-148.

PLANAT. (2008). Strategie Naturgefahren Schweiz-Umsetzung des Aktionsplans PLANAT 2005-2008, Project B 2,2: Schutzziele. Schlussbericht, Federal office for the Environment FOEN Bern.

Riba Porras, S., García-Sellés, C., Bartelt, P., & Stoffel, L. (2018). Analysis of one avalanche zone in the Eastern Pyrenees (Val d'Aran) using historical analysis, snow-

climate data and mixed flowing/powder avalanche modelling. *International snow science workshop proceedings 2018*. pp. 561-565

Ronald, I., & Martinelli, M. (1976). *Avalanche Handbook*. U.S. Department of agriculture. Forest Service. 248 pp.

Rudolf-Miklau, F., Sauermoser, S., & Mears, A. (2011). *The Technical Avalanche Protection Handbook*. Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin, Germany. 422 pp.

Salm, B., Burkard, A., & Gubler, H. (1990). Berechnung von Fließlawinen: eine Anleitung fuer Praktiker mit Beispielen. Traducido por G. Furdada. 30 pp.

Schweizer, J., Jamieson, J. B., & Schneebeili, M. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4), 1016.

Trabal, L. (2013). Anàlisi quantitatiu de la susceptibilitat del terreny al desencadenament d'allaus a la carretera de la Bonaigua (Pallars Sobirà). TFM del Máster UB-UAB (inédito). 19 pp.

WSL. (2017). WSL-Institut für Schnee-und Lawinenforschung SLF. RAMMS: AVALANCHE User Manual. A numerical model for snow avalanches in research and practice. User Manual v1.7.0. Recuperado el 2019.

WSL. (10 de 06 de 2019). WSL-Institut für Schnee-und Lawinenforschung SLF. Obtenido de: http://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com_content&view=article&id=57&Itemid=7.