

VALIDACIÓN DEL PROGRAMA DE MODELIZACIÓN NUMÉRICA AVAL-1D PARA EL CÁLCULO DE ALUDES EN LOS PIRINEOS ORIENTALES

P. Oller¹, M. Janeras², H. de Buén², G. Arnó², C. García¹; M. Christen³, P. Martínez¹.

¹ Institut Geològic de Catalunya

² GEOCAT Gestió de Projectes SA

³ WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF

RESUMEN

El programa de modelización numérica de dinámica de aludes AVAL-1D, desarrollado por el “WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF” (SLF), fue calibrado empíricamente con aludes reales en los Alpes suizos. En la formulación para aludes de flujo denso en este programa se aplican dos coeficientes de fricción, μ y ξ , cuyos valores se han obtenido experimentalmente. El SLF recomienda la aplicación de estos valores cuando se simulan aludes en los Alpes. La aplicación de estos parámetros en otros macizos con diferentes características puede llevar a imprecisiones si no se realiza una calibración previa. Pero a menudo no hay suficiente información para ello cuando se realiza una simulación en una determinada zona de avalancha. Por este motivo el IGC ha realizado un estudio para determinar las particularidades a tener en cuenta en el uso de tales parámetros en los Pirineos. Este estudio se basó en el retroanálisis de aludes bien documentados con el objetivo de determinar con qué patrón se obtienen mejores ajustes. Se seleccionaron doce aludes de flujo denso y mixto, de cerca de 2500 aludes almacenados en la base de datos de aludes de Cataluña (BDAC). La falta de disponibilidad de los datos morfométricos y dinámicos necesarios para tal objetivo, fue el factor crítico para no considerar numerosos casos. Aún así, fue necesaria la ayuda de fotografías del evento y algunas visitas de campo, para mejorar algunas de las cartografías, así como precisar algunos de los valores morfométricos. El resultado del estudio mostró que hay un buen ajuste entre los eventos registrados y los simulados usando los parámetros recomendados por el SLF, lo cual permitirá mejorar la aplicación

del programa al Pirineo. También se puso de manifiesto que, de todos los aludes almacenados en la BDAC, sólo se pudieron utilizar el 0,5% para tal fin. Es necesario insistir en la toma de datos exhaustiva de episodios de aludes mayores, especialmente por lo que se refiere a la extensión y espesor del volumen de partida de la avalancha.

1. INTRODUCCIÓN

Tanto en la realización de estudios detallados de la peligrosidad de aludes, como en el dimensionamiento de obras de defensa es necesario caracterizar con precisión su dinámica; son fundamentales los datos de alcance, altura de flujo, velocidad y presión. Para obtener esta información es preciso realizar un estudio exhaustivo de la zona de aludes, consistente en diferentes aproximaciones complementarias. Por un lado es necesario realizar un análisis detallado del terreno y de los daños producidos por los aludes en el bosque e infraestructuras, y por otro, realizar el análisis de los eventos mayores conocidos, tanto recientes como antiguos, a partir de la observación directa, de encuestas a la población, del registro histórico y de la dendrocronología. Todo ello debe ser complementado con la utilización de modelos de cálculo que nos permitan simular los eventos mayores y las variables dinámicas necesarias para tal fin.

Sin embargo, el marco ideal anteriormente descrito, es poco usual en la vertiente sur de los Pirineos. Lo más probable es disponer de escasos datos de observación, y poco precisos. La existencia de un inventario detallado de aludes es fundamental para realizar una buena simulación. Es preciso calibrar el modelo con aludes conocidos para posteriormente realizar las simulaciones con mayor precisión y poder contrastar los resultados. En ocasiones, se tiene que recurrir a aludes próximos, o incluso habiendo aludes registrados en la zona de estudio, no se dispone de los datos necesarios para una correcta calibración. Ello implica un mayor número de asunciones que limitan la solidez de los resultados.

En el 2004 el IGC se planteó la realización de un plan de zonificación del peligro de aludes en el Pirineo de Cataluña. Este plan incluye la simulación numérica de aludes como complemento del resto de la información que permitirá obtener la peligrosidad. Se decidió que AVAL-1D sería el programa recomendado por el IGC para la realización de las modelizaciones. El principal argumento para la selección de este programa fue su amplio y contrastado uso a nivel internacional (Jamieson et al., 2008), y que desde el año 2000, el IGC ya lo utiliza en sus estudios de peligrosidad. Ante la inminente utilización sistemática del programa, se decidió realizar un estudio previo de validación y calibración del mismo.

En la vertiente sur de los Pirineos, no existen muchos trabajos relacionados con la modelización de aludes. Uno de los primeros trabajos fue el de Furdada (1996), que aplicó el modelo estadístico noruego, ó método α - β (Lied y Bakkehoi, 1980), y obtuvo un algoritmo

aplicado a las características regionales de los Pirineos. Lopez et al. (1997), aplica, por primera vez, el programa suizo Lawsim, basado en el modelo dinámico de Voellmy-Salm (Salm et al., 1990), predecesor de AVAL-1D, para el dimensionamiento de las obras de protección de la boca sur del túnel de Somport (Canfranc, Pirineo Aragonés). Janeras y Furdada (2002) presentan los primeros resultados del uso de AVAL-1D en el Pirineo andorrano para determinar el riesgo generado por el alud de la Armiana de Canillo. Más recientemente, García et al. (2006), aplican el modelo estadístico α - β y dinámico de Voellmy-Salm en el alud del torrente de Epifanio para la evaluación de la peligrosidad en la Estación Internacional de Canfranc (Pirineo Aragonés).

Según Jamieson et al. (2008), existen dos formas básicas de aplicar modelos dinámicos en cartografía de peligrosidad: la calibración directa y la indirecta. En la calibración directa los parámetros de fricción se ajustan para que el modelo dinámico se pare en una zona de llegada extrema determinada a partir del inventario. A ello, a menudo se le llama *back-calculations* o retroanálisis de los coeficientes de fricción. La calibración indirecta consiste en usar los parámetros obtenidos en otras zonas de aludes y/o a partir de datos publicados, para estimar alcances extremos en la zona de aludes que va a ser cartografiada. Así pues, el principal objetivo del estudio fue la calibración directa a partir de aludes observados bien conocidos para, en el futuro, utilizar el modelo con mayor precisión y, en su caso, disponer de datos fiables para la calibración indirecta.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio corresponde al Pirineo catalán, sector suroriental de la cordillera de los Pirineos (Figura 1). Esta zona tiene una longitud de 146 km por 52 km de ancho en el sector occidental y 19 km de ancho en el sector oriental, constituyendo un área de 5214 km². Las cotas más altas alcanzan los 3000 m s.n.m., pero básicamente se encuentran entre los 2500 y los 3000 m s.n.m. La cota altitudinal del bosque se encuentra entre los 2100 y los 2300 m s.n.m. En ella se diferencian tres variedades climáticas (García et al., 2007). La parte noroeste presenta un clima oceánico húmedo, dónde la precipitación es abundante y las cantidades anuales no varían significativamente de año en año. El total de nieve reciente, a 2200 m s.n.m., se encuentra entre los 500-600 cm por invierno, distribuyéndose homogéneamente a lo largo de la temporada, siendo la temperatura media de -2,5°C. Hacia el sur de la parte occidental, el clima gana continentalidad y el régimen de precipitaciones disminuye. La precipitación en invierno se reduce, siendo esta estación más seca y se incrementa en las estaciones equinocciales. La cantidad total de nieve a 2200 m s.n.m. excede ligeramente los 250 cm por invierno y la temperatura media es de -1,3°C. En la parte más oriental del Pirineo catalán la influencia oceánica desaparece y la influencia mediterránea adopta un papel significativo. El invierno es especialmente seco respecto al resto de estaciones, siendo las precipitaciones poco frecuentes, pero a veces intensas. La cantidad total de nieve reciente, a 2200 m s.n.m., es de 350-450 cm por

invierno y la temperatura media es de $-0,8^{\circ}\text{C}$.

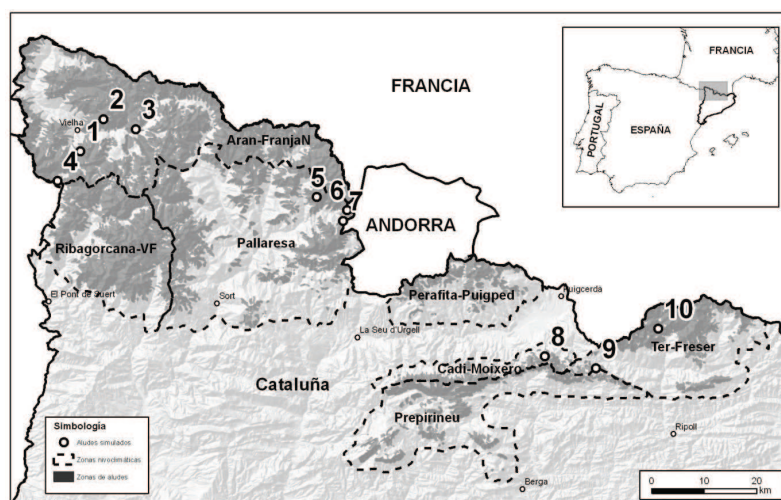


Figura 1. Mapa de situación de los aludes estudiados y regiones establecidas para la predicción de aludes, para el Pirineo catalán. *Aran-Franja nord de la Pallaresa*: clima oceánico; *Ribagorçana, Pallaresa, Perafita-Puigpedrós*: *Vessant nord del Cadi moixeró*: clima de influencia continental. *Prepirineu* y *Ter Freser*: clima de influencia mediterránea.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. AVAL-1D

El programa AVAL-1D (Christen et al., 2002) permite la simulación de aludes en una dimensión desde la zona de inicio de la avalancha hasta la de parada. AVAL-1D reproduce las distancias de parada, velocidades de flujo y presiones de impacto para aludes tipo flujo denso y para aludes de nieve polvo en cualquier punto de una trayectoria definida. AVAL-1D está formado por dos módulos: FL-1D, para aludes de flujo denso, y SL-1D, para aludes de nieve polvo. Estos módulos resuelven las ecuaciones de conservación de la masa, energía y cantidad de movimiento, usando un esquema de diferencias finitas *upwind*.

En este artículo presentamos los resultados obtenidos con la calibración del modelo FL-1D. Para esta finalidad es necesario disponer de una serie de parámetros *inputs*: perfil topográfico, anchura y morfología del terreno a lo largo de la trayectoria del alud, área de la zona de salida y espesor de nieve, y coeficientes de fricción (μ y ξ). El SLF recomienda el uso de los valores de fricción obtenidos experimentalmente en los Alpes y tabulados según condiciones del alud. Estos valores varían en función del volumen de nieve de

partida, de la altitud, de la morfología del terreno, del tipo de flujo y del período de retorno de la avalancha. La aplicación del modelo en otros macizos montañosos requiere una validación previa (Christen et al., 2002). Ejemplos de validaciones en otros macizos son los trabajos realizados por Casteller et al. (2008) en la Patagonia Argentina, donde se obtuvieron valores muy próximos a los recomendados por el SLF, y por Mears (2006) en Colorado (Estados Unidos), que presenta un caso típico de calibración directa del modelo con aludes de período de retorno de 30 años, para aplicar los valores equivalentes al alud de 300 años en una misma zona de alud.

3.2. Selección de los aludes en la BDAC

Para la calibración directa del modelo se trabajó con registros de aludes observados almacenados en la *Base de Dades d'Allaus de Catalunya* (BDAC; Oller et al., 2005). La BDAC contiene actualmente 2441 registros incorporados desde la temporada 1986/87. A pesar de ello, es difícil encontrar registros de aludes con todos los datos morfométricos y dinámicos de la avalancha, necesarios para su calibración. Otra limitación es la corta serie temporal, 22 años, que hace que sea poco probable disponer de registros extremos, de un período de retorno de 30 años como mínimo. Todo ello limitó notablemente la selección de aludes, reduciéndose al final a 12 casos. Algunas de las características de estos aludes se muestran en las figuras 2 y 3. Tal como se puede observar en la figura 1, los aludes seleccionados son representativos de las tres variedades climáticas definidas para el área de estudio. Para todas ellas se estimó un período de retorno aproximado de 30 años.

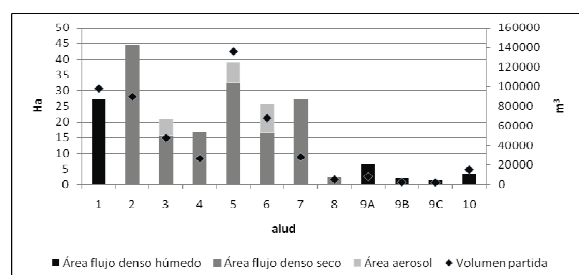


Figura 2. Extensión afectada por las diferentes fases del flujo y volúmenes calculados de partida de los 12 aludes analizados

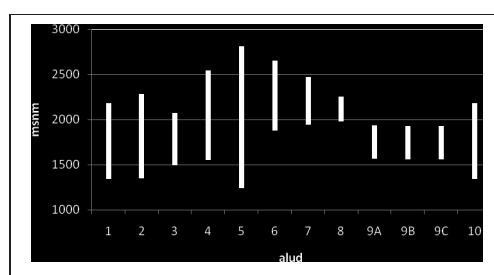


Figura 3. Rango de cotas de los 12 aludes analizados

Para la realización del estudio se disponía de la siguiente información previa:

- Cartografía del alud en formato digital: contorno del alud desencadenado, diferenciando el área afectada por la parte densa y el área afectada por el aerosol.
- Ficha descriptiva del alud, incluyendo la fecha de ocurrencia, las condiciones de desencadenamiento, datos dinámicos y morfométricos y los daños ocasionados.

- Información gráfica: fotografías del alud tomadas durante las campañas de cartografía.
- Información nivometeorológica previa al desencadenamiento: datos diarios nivometeorológicos y sondeos y perfiles estratigráficos de diversas estaciones de observación próximas a la zona donde ocurrió el alud.

3.3. Determinación de los valores de entrada

Para disponer de la máxima precisión se efectuó un proceso de revisión y actualización de los datos descargados de la BDAC.

3.3.1. Mejora de la cartografía

Para conseguir un mejor ajuste del modelo, se realizó un trabajo de mejora de la precisión de las cartografías de los aludes seleccionados, usando la información gráfica disponible (fotografías del alud desencadenado y ortofotoimágenes). Este análisis permitió delimitar con mayor precisión los contornos de alud, especialmente por lo que se refiere al límite inferior de la zona de salida y al alcance máximo en la zona de llegada.

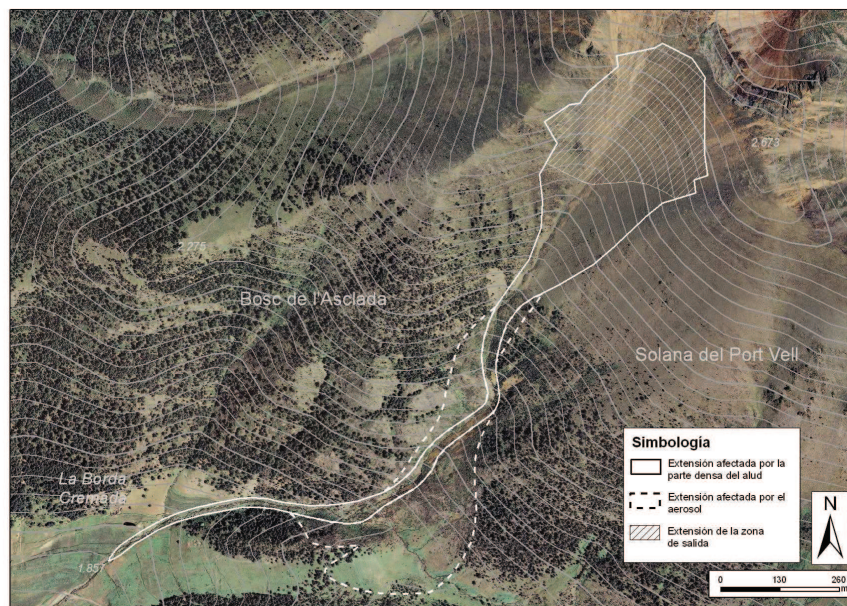


Figura 4. Cartografía del alud número 6 (*Barranc de Plaià*).

3.3.2. Generación de los perfiles topográficos

Para cada zona de alud se generó un perfil topográfico representativo. Se consideraron las trayectorias posibles, la anchura del flujo y, en caso de división del flujo, se generaron

dos perfiles para permitir que la modelización considerara la pérdida de masa en una de las ramas y que la zona máxima de llegada se calculara de forma independiente.

3.3.3. Estimación del espesor de nieve de partida

Uno de los parámetros críticos a la hora de calibrar el modelo es el espesor del manto que se pone en movimiento. El problema radica en la dificultad de obtener los datos. Los valores previos se obtuvieron a partir de la observación a distancia del espesor de la cicatriz. Ello supone un notable grado de imprecisión debido a la ausencia de elementos de referencia fiables para la medida. Además, normalmente el valor registrado no corresponde al valor medio sino al valor de espesor máximo. Con la revisión de los datos nivometeorológicos y los perfiles del manto nivoso de cada zona, se extrajeron los valores medios del espesor de nieve movilizada, que probablemente mejoran la estimación hecha previamente.

Se diferenciaron dos casos:

- Aludes de fusión de fondo: se consideró que el espesor vertical movilizado es igual al espesor del manto nivoso el día del desencadenamiento.
- Aludes de nieve reciente: se aplicó el procedimiento propuesto por Salm et al. (1990), que considera el espesor vertical de nieve reciente como la altura de nieve reciente caída durante las 72 horas previas al desencadenamiento, corregida según la altitud de salida del alud y un factor de asentamiento, considerando el incremento de nieve transportada por el viento y, todo ello corregido por el factor del ángulo, que da como resultado la altura del manto medida perpendicularmente a la superficie de deslizamiento. Estos datos se contrastaron con los perfiles del manto nivoso realizados en las zonas de avalancha.

3.3.4. Estimación del área de salida

Mientras que la cicatriz de coronación es fácilmente cartografiable a partir de las fotografías del alud, no pasa lo mismo con el límite inferior de la zona de salida o *stauchwall*, generalmente invisible después del desencadenamiento del alud.

En función del tipo de alud y del tipo de salida, se siguieron los siguientes criterios para su determinación:

- Placas duras: Se consideró como límite inferior de la zona de salida el punto donde la línea de la cicatriz desaparece lateralmente.
- Placas blandas: Se tomó como referencia la cota donde la anchura de la placa desprendida empieza a disminuir.

- Placas de fondo: Se consideró que el área de salida se corresponde con toda el área donde el alud dejó la superficie del terreno al descubierto, con características similares en cuanto a pendientes, rugosidad, morfología de la ladera, existencia de bosque, etc.

Los parámetros relacionados con la geometría y topografía de la avalancha requieren una buena cartografía del evento, especialmente de la anchura del flujo. Pero la determinación de las condiciones iniciales (espesor y área de partida) es el paso que puede introducir un mayor error en la modelización porque se basaron en asunciones.

3.3.5. Selección de los parámetros μ y ξ

En la formulación del modelo, μ es el coeficiente de fricción dinámica. Está relacionado con el tipo de nieve que forma el alud. Su magnitud depende de la densidad, la temperatura, el contenido en agua y la presión de la nieve perpendicularmente a la superficie del terreno. ξ es el coeficiente de fricción turbulenta. Su magnitud depende de la geometría y de la rugosidad del terreno. Ambos parámetros son empíricos, necesariamente calculados a partir de la calibración de una zona conocida, ya que no pueden ser calculados directamente sobre el terreno. En las simulaciones primero se usaron los valores recomendados por el SLF. En posteriores iteraciones se tantearon leves variaciones de los parámetros para obtener un mejor ajuste.

3.4. Calibración del modelo de flujo denso FL-1D

La calibración del modelo de flujo denso FL-1D para las 12 avalanchas siguió la siguiente metodología:

3.4.1. Selección de los parámetros de entrada

Para cada alud a modelar se requieren los parámetros especificados en el punto 3.3. Para disponer de la mayor precisión, se siguieron los criterios descritos en este punto.

3.4.2. Simulación de control

Una vez seleccionados los parámetros iniciales, se realizó una primera simulación de control con el objetivo de hacer un análisis preliminar de los puntos críticos de la modelización y aspectos a mejorar así como detectar posibles inestabilidades en el proceso de cálculo que serían eliminadas en futuras iteraciones.

3.4.3. Iteraciones de cálculo

En esta fase se realizó un proceso reiterativo de introducción de pequeños cambios, principalmente en las condiciones iniciales de salida y en los parámetros de fricción, dentro del margen de incertidumbre derivado de los datos observacionales, con el objetivo de obtener el mejor ajuste posible entre los resultados de la modelización y las observaciones reales.

3.4.4. Selección de la modelización que presenta mayor ajuste y valoración de los resultados.

Una vez que se consiguió una buena aproximación entre la modelización y las observaciones reales, se comprobó que tanto los parámetros iniciales introducidos en el modelo como los resultados en cuanto a velocidades, alturas de flujo y presiones, fueran coherentes.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La precisión de los resultados se evaluó a partir del ajuste obtenido en la distancia de llegada del alud. Dado que no se disponía de datos de velocidad y de altura de flujo, estos parámetros no fueron usados para la calibración, aunque se revisó su coherencia.

El punto de máximo alcance calculado se estableció donde los valores de presión descienden por debajo de los 0,3 kPa. El modelo generalmente simula, en la parte distal del depósito, un flujo remanente de poco espesor y baja velocidad debido a la difusión numérica del cálculo. Este hecho hace difícil determinar la distancia de llegada considerando la altura de flujo y puede llevar a resultados erróneos. Por lo tanto, este criterio de presión, usado por el SLF como el límite de las zonas azul-blanco en la cartografía de peligrosidad, fue el criterio utilizado para definir el punto máximo de parada. En algunas simulaciones, y debido a la difusión numérica, se observaron zonas con incremento de presión después este punto (figura 5). Estas zonas no fueron consideradas.

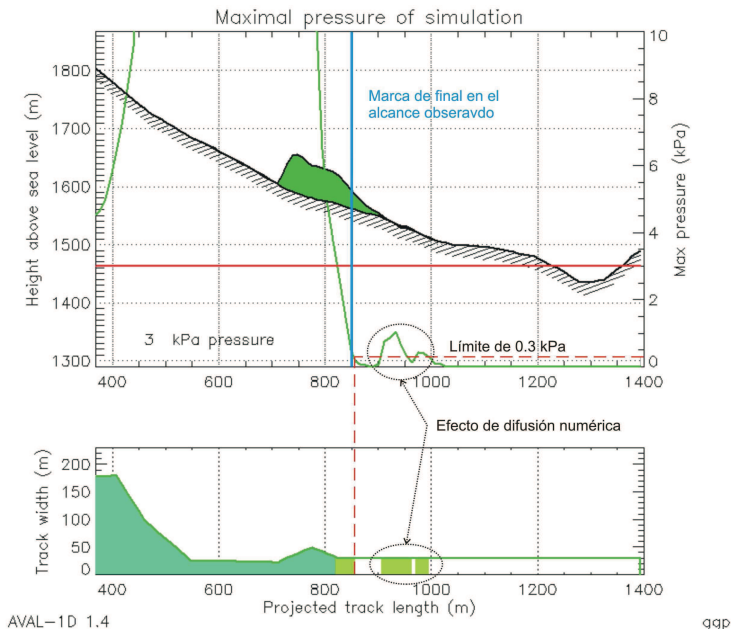


Figura 5. Detalle del perfil de presión en la zona del depósito de llegada simulado del alud 9a y determinación del punto de máximo alcance.

Considerando este criterio, para cada perfil de alud se obtuvieron valores simulados de distancia de llegada. Los valores calculados, comparados con los observados, se muestran en la tabla 1.

Alud	Longitud observada (X_o) (m)	Longitud simulada (X_s) (m)	Diferencia $X_o - X_s$ (P=0.3kPa) (m)	Valores relativos (P=0.3 kPa) (%)
1	1930	1888	-42	-2.18
2	2020	1984	-36	-1.78
3	1302	1302	0	0.00
4	1749	1759	10	0.57
5	3366	3333	-33	-0.98
6	1933	1960	27	1.40
7	1181	1149	-32	-2.71
8	491	491	-5	-1.02
9a	651	681	30	4.61
9b	579	599	-18	-3.11
9c	591	542	24	4.06
10	852	842	-16	-1.88
Media		1377.5	-7.6	-0.3
Media del valor absoluto		1377.5	22.8	2.0
Desviación estándar		845.14	25.92	2.52

Tabla 1. Distancias de llegada obtenidas para cada perfil y diferencias con los valores observados.

Los resultados muestran un ajuste medio del 2,0% considerando la longitud de todo el alud, desde la zona de salida hasta la distancia máxima de llegada, que representa un error medio, en valores absolutos, de 23 m, con una ligera tendencia a subestimar el resultado. El error máximo se obtuvo en el alud 1, con -42 m, mientras que en tres casos (aludes 3, 4 y 8), el ajuste fue de menos de 10 m.

Consideramos que los resultados obtenidos están dentro del margen de precisión que los parámetros de entrada permiten. Se probó de mejorarlos variando los valores recomendados por el SLF, pero se obtuvieron resultados menos realistas. Por ello se consideró el uso de los valores recomendados, como satisfactorios en los aludes analizados y, por extensión, en el Pirineo. Por otro lado, no se observó ninguna tendencia significativa debido a las posibles particularidades regionales de los Pirineos.

7. CONCLUSIONES

Con el modelo de nieve densa del programa AVAL-1D, FL-1D, obtuvimos resultados satisfactorios por lo que respecta a la distancia de llegada en aludes de período de retorno de 30 años, utilizando los valores recomendados por el SLF, y considerando el punto de máximo alcance en el límite de 0,3 kPa. Una posible desviación debida a las particularidades regionales de los Pirineos, objetivo del presente estudio, no fue observado en los resultados obtenidos con los 12 aludes simulados.

Por lo tanto, consideramos que los valores recomendados por el SLF pueden ser usados para la calibración indirecta en los Pirineos, siempre que no existan datos disponibles en la zona de estudio o adyacentes, en cuyo caso se debería realizar siempre previamente una calibración directa.

Este trabajo ha servido también para identificar aspectos a mejorar en el registro de aludes de la BDAC. Se debe hacer un esfuerzo en la captura de datos para que en su posterior análisis se obtenga resultados más precisos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte recibido de Stefan Margreth y Lukas Stoffel, del WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF, en la realización del trabajo.

REFERENCIAS

- Casteller, A.; Christen, M.; Villalba, R.; Martínez, H.; Stöckli, V.; Leiva, J.C., Bartelt, P. (2008). Validating numerical simulations using dendrochronology: the Cerro Ventana event in Northern Patagonia, Argentina. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 433-443.
- Christen, M.; Bartelt, P.; Gruber, U. (2002). AVAL-1D: an avalanche dynamics program for the practice. *Interpraevent 2002*. Matsumoto – Japan. Congress publication, vol. 2, pp. 715-725.
- Furdada, G. (1996): *Estudi de les allaus al Pirineu Occidental de Catalunya: predicció espacial i aplicacions a la cartografia*. Geofoma 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 Catalan Pyrenees. *Proceedings of the Alpine Snow Workshop*. Forschungsbericht 53. P. 49-56.
- García, JL; Cuchí, JA; Fábregas, S; Arrazola, JF (2006). La protección de poblaciones e infraestructuras contra aludes. El caso del torrente Epifanio en Canfranc (Huesca). *Actas del III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente*. Zaragoza, 25-27 de octubre de 2006.
- Jamieson, B.; Margreth, S.; Jones, A. (2008). Application and limitations of dynamic models for snow avalanche hazard mapping. *Proceedings of the ISSW 2008*. Wistler, Canada. P. 730-739.
- Janeras, M. & Furdada, G. (2002). Gestión del riesgo de aludes: metodología de análisis y planificación territorial y aplicación a L'Armiana de Canillo (Andorra). *En Estudios recientes (2000-2002) en Geomorfología. Patrimonio, montaña y dinámica territorial*. VII Reunión Nacional de Geomorfología (SEG), Valladolid. pp. 99–108.
- Lied, K.; Bakkehoi, S. (1980). Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. *Journal of Glaciology*, Vol.26, No. 94, 1980.
- Lopez, R.; Sarasa, A.; Oller, P. (1997): Caracterización, simulación y prevención de aludes en el Barranco de Secras, Tunel de Somport (Huesca). *IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables*. P. 703-717. Granada.
- Mears, A.I. (2006). Avalanche size increase resulting from forest removal and wind loading - a case study from Central Colorado using AVAL-1D. *Proceedings of the International Snow Science Workshop (ISSW)*. P. 775-777. Telluride, Colorado.
- Oller, P.; Marturià, J.; González, J.C.; Escriu, J.; Martínez, P (2005): El servidor de datos de aludes de Cataluña, una herramienta de ayuda a la planificación territorial. *In proceedings of: VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Valencia, 21-24 de Junio de 2005. E. P. 905-916. Alonso, J. Corominas, L. Jordà, M. Romana, J.B. Serón (Eds.).
- Salm, A.; Burkard, A.; Gubler, H.U. (1990). Berechnung von fließlawinen eine anleitung für praktiker mit beispielen. *Eigdenöischen Institut für Schnee und Lawinenforschung*. Nr. 47.