

Los aludes. Actuaciones para la reducción de su peligrosidad

Conferencia Invitada. V Congreso Geológico de España. 10-14 de julio 2000. Alicante ESP

Emma Suriñach

Grupo de investigación sobre nieve y avalanchas. Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona. C/ Martí i Franquès s/n, 08028 Barcelona. Spain.
emma@natura.geo.ub.es

Abstract

Snow avalanches are a natural hazard whose negative consequences have multiplied in recent times owing to demographic expansion and increased infrastructures in mountain areas. Therefore, the minimisation of the negative consequences of avalanches is essential. The steps to be taken are as follows: make a snow avalanche cartography, know the avalanche return period, obtain some knowledge of the triggering mechanism in relation to the snow properties and determine the values of the physical parameters of the avalanche evolution in order to minimise the impact.

The complexity of this natural phenomenon calls for a multidisciplinary collaboration on a global scale in order to pool our efforts and lines of research. A number of strategies to improve the understanding of formation, evolution and effect of avalanches are presented.

Introducción

Los aludes de nieve son un fenómeno natural cuyo riesgo asociado ha aumentado recientemente (recordemos los aludes ocurridos en el invierno de 1996 en los Pirineos y en los Alpes en el invierno de 1999). La causa es el crecimiento del uso de las zonas montañosas debido al aumento de la ocupación del territorio por expansión de la población, vías de comunicación o las actividades relacionadas con el esquí y actividades de montaña en general. Se impone, por tanto, una mitigación de las consecuencias negativas de este peligro natural mediante su detección, prevención y reducción del impacto que provocan.

En zonas montañosas pobladas (con población establecida, véase, por ejemplo, en Europa, los países nórdicos, Islandia o zonas alpinas (Austria, Francia, Italia, Suiza, ...)) este riesgo natural ha estado siempre presente. En ellas, las investigaciones sobre las avalanchas tienen una larga historia y existen instituciones específicas dedicadas a su estudio. Así, en Suiza los estudios se iniciaron en la segunda mitad de los años 1930 si bien es a partir de los 1950 que se empezó a progresar. En Austria, fue a raíz de un periodo de grandes avalanchas en 1951 y 1954 que se iniciaron los estudios. En Noruega en el año 1998 se celebró el 25 aniversario del inicio de las investigaciones sobre avalanchas de nieve. En Francia se iniciaron en 1977. En España, en concreto en Cataluña, en la temporada invernal 1986-1987 el Servei Geològic de Catalunya y la Universidad de Barcelona iniciaron los primeros estudios dentro del proyecto "Estudi del risc d'allaus al Pirineu" con carácter marcadamente de predicción espacial (cartografía de aludes) y de predicción temporal, con realización y emisión de boletines de peligro de avalanchas (Vilaplana y Martínez, 1996).

La actual creciente demanda de mapas de peligrosidad de aludes, precisos y fiables, ha potenciado el estudio de las avalanchas. Básicamente, las cuestiones que se plantean

son: conocimiento del lugar de ocurrencia (cartografía de aludes), periodo de retorno de las avalanchas de un determinado tamaño, condiciones nivo-meteorológicas y causas físicas “favorables” para su desencadenamiento, y medidas a aplicar para reducir el impacto negativo sobre vidas humanas y propiedades. Estas cuestiones que, así planteadas, son de carácter general, deben particularizarse para cada una de las regiones afectadas dadas las características peculiares del territorio y de la nivo-meteorología. La complejidad del problema ha hecho necesario tener en cuenta el mayor número de casos conocidos de tal manera que se puedan considerar los distintos parámetros que controlan el fenómeno natural en todo su rango. Ello ha llevado a una colaboración a escala mundial entre los distintos colectivos que estudian esta temática. A continuación se presentan algunas de las actuaciones sobre el estudio de las avalanchas. Aunque no es el único, es un buen ejemplo para ilustrar la coordinación entre diferentes esfuerzos y líneas de investigación paralelas con el fin de solucionar un problema concreto. El método para conocer y para incrementar los conocimientos sobre este fenómeno natural, como en otros campos, es la comparación de los datos observados del fenómeno natural con los resultados obtenidos mediante modelización análogica y numérica, bajo determinadas hipótesis. El papel de la experimentación se hace imprescindible y complementario para validar las teorías propuestas.

Características

Un alud se puede definir como un flujo de nieve descendiendo a lo largo de una pendiente. No obstante, este fenómeno natural es complejo, y no es fácil describir sus características en vistas a una clasificación. Dado que generalmente las avalanchas se inician a temperaturas para la nieve próximas a su punto de fusión, pequeñas variaciones en la temperatura de la nieve del flujo pueden producir diferencias en las propiedades físicas de la nieve y, por tanto, diferencias en el comportamiento del flujo. Por esta razón, existe una gran variedad de tipos de aludes y su clasificación no es fácil. Los criterios de clasificación son diversos. Se consideran el tipo y forma de la zona de partida (puntual, lineal...), la calidad de la nieve en el flujo dependiendo del contenido en agua, cohesión y tipo de nieve (húmeda, seca...), el tipo de flujo (fluido, con o sin aerosol, con incorporación o no de nieve...), etc. Las velocidades de avance del flujo varían según la cantidad de masa involucrada, tipo de nieve y de flujo, y características de la pendiente. Pueden alcanzar valores de 60 m/s (\cong 200 km/h), aunque 20-30 m/s (\cong 90 km/h) son valores normales. Las presiones de impacto dependen de las velocidades y de las características de la nieve y pueden llegar a los 300-600 kPa. Estos valores proceden de medidas reales.

Estudio

Al igual que para otros fenómenos naturales que ocasionan riesgo son varias las líneas de actuación para su predicción, prevención y detección, todas ellas relacionadas con la reducción de su impacto. Estas líneas están dirigidas al conocimiento de su formación, evolución y efectos, éstos dos últimos, directamente vinculados.

Formación

La formación o desencadenamiento de las avalanchas es un tema directamente relacionado con su predicción. En el desencadenamiento de un alud interviene la estabilidad de la nieve ante la presencia de cargas externas, ya sean naturales (por exceso de nieve) como antrópicas, en relación con sus propiedades físico-químicas. En este sentido, las propiedades mecánicas y termodinámicas de la nieve y su

metamorfismo, dependiente de la evolución nivo-metereológica, son motivo de estudio en relación con el inicio de la fractura que, al propagarse, desencadena el alud. Estudios secundados por medidas en terreno y en laboratorio obtienen las condiciones de la nieve previamente al inicio de la fractura apuntando hacia un comportamiento dúctil de la nieve (Narita, 1983; H. Gubler, 1995). El conocimiento de la dependencia de la estabilidad de la nieve con los perfiles de variación en profundidad del gradiente de temperatura, resistencia y densidad de la nieve, ayuda a la predicción de aludes en zonas con características topográficas susceptibles de avalanchas.

Evolución

Los efectos de un alud están relacionados con la presión de impacto en estructuras a su paso. Por ello, para poder prevenir los daños de un alud es interesante conocer las zonas de máxima llegada (máximo alcance) de éste, así como la altura y las velocidades del flujo. Tanto el máximo alcance como las presiones de impacto (que dependen de la velocidad) están directamente relacionadas con la dinámica del alud y ésta depende del tipo de alud. Una manera de conocer estos valores es modelar los flujos ya sea mediante modelos analógicos, numéricos o estadísticos. Dependiendo del tipo de alud, existen diversos modelos para simular su avance. Para un mismo tipo de alud hay diferentes modelos de la dinámica del alud en función de las hipótesis de comportamiento: modelos en que se considera que la masa de nieve en el flujo se comporta como sólido o como fluido con diferentes reologías. Hay modelos que consideran el comportamiento del flujo en 1D y otros en 2D. En todos los casos interesa obtener los parámetros anteriormente citados (velocidades, altura del flujo, máximo alcance) y también confirmar las hipótesis sobre la dinámica del flujo.

Los modelos analógicos simulan a escala los aludes de nieve. Las imágenes de la evolución del alud y los valores de los parámetros se obtienen mediante sensores localizados a lo largo y al final del recorrido del alud. Algunos ejemplos: los aludes que generan aerosol se modelan en tanques de agua simulando el alud con una emulsión salina con partículas como marcadores (Naim y Pellarin, 1998) o con partículas de diferente material y tamaño (Keller, 1995) en ambos casos utilizando pendientes similares a las reales. Los aludes de nieve seca, se modelan experimentando con nieve real en pendientes a escala, utilizando sensores ópticos y capacitivos para medir la densidad, la fricción dinámica y la velocidad del alud (Dent et al, 1998). También se han realizado simulaciones del comportamiento de un alud considerando la hipótesis de que el flujo es granular. En este caso se está utilizando pelotas de ping-pong (350.000!) descendiendo por un trampolín de esquí. En este experimento se midieron las velocidades del frente y las fluctuaciones de las partículas (pelotas) (Keller et al, 1998). Los resultados de los modelos analógicos siempre se comparan con los obtenidos a partir de modelización numérica con modelos más o menos simples. Los modelos analógicos, además, aportan ideas sobre la evolución del alud ya que, en general, hay una falta de información sobre ésta debido a que, al ser espontáneos, únicamente se conocen sus “resultados” finales.

En la modelización numérica se pretende conocer las velocidades tanto del frente de alud como de las partículas en el flujo, su altura y el máximo alcance. Los algoritmos de cálculo de estos parámetros son distintos dependiendo del tipo de alud (polvo, nieve densa, mixta) y de las hipótesis de su comportamiento dinámico. En los modelos numéricos se incorpora el modelo digital del terreno para simular aludes a lo largo de topografías reales. Dependiendo de este modelo de terreno (condiciones de contorno) y de las condiciones iniciales (cantidad y tipo de masa de nieve en el inicio del alud) los valores deseados varían. Así mismo, estos valores dependen fuertemente de las

variables fricción dinámica y densidad de la nieve en el flujo que son difíciles de conocer.

Los modelos estadísticos permiten obtener el máximo alcance en función de parámetros topográficos. Utilizando una base de datos confeccionada con los parámetros topográficos de diferentes aludes con características similares y mediante modelos regresivos es posible predecir las zonas de máximo alcance probable para una determinada avalancha (p. ej. Furdada y Vilaplana, 1998).

En la actualidad se dispone de diversos modelos físico-numéricos, muy sofisticados, para simular la evolución de un alud. No obstante, existen muchos parámetros libres en el estudio de los aludes. Esta indeterminación está relacionada tanto con las diversas hipótesis sobre la dinámica del alud como con la falta de información sobre las variables físicas del flujo, además de las ventajas, inconvenientes y limitaciones de cada método (Harbitz, 1998). Quizás, la única manera de validar y restringir los modelos es comparar los resultados teóricos con los valores obtenidos en la realidad. En esta dirección, y para algunos casos reales (cinco), se han reproducido las avalanchas numéricamente utilizando diversos modelos. Los resultados obtenidos teóricamente se han comparado entre sí y éstos se han comparado con los datos reales (Barbolini et al, 1999). No obstante, dado que las condiciones iniciales no eran conocidas con exactitud, ya que los aludes eran espontáneos, y los resultados son fuertemente dependientes de estas condiciones iniciales, la validación es relativa. A partir de la geometría de la zona de partida, los rasgos en terreno y las descripciones cualitativas de la evolución, así como a partir del alcance y daños producidos, y de las características de los depósitos, es posible tener información sobre el alud. No obstante, ésta no es suficiente para la validación de modelos.

Experimentación a escala real

Para poder restringir y validar los modelos actualmente en vigor se ha visto la necesidad de disponer de valores reales de las variables físicas del alud. Los correspondientes a las condiciones iniciales se introducirán como datos de partida en los modelos numéricos y los relativos a la evolución se compararán con los obtenidos teóricamente. Con esta finalidad se han construido y equipado canales experimentales de avalancha utilizando zonas en donde los aludes se repiten en el tiempo (Issler, 1999). Se han dispuesto sensores, tanto de implantación permanente como transitoria, a lo largo del recorrido y al final de éste. Éstos permiten obtener valores de las condiciones iniciales y finales (propiedades de la nieve, masa de partida, masa involucrada, trayectoria), valores promedio de las variables del flujo (velocidad del frente y su evolución a lo largo del descenso, altura del flujo, señales acústicas y sísmicas), variables internas (perfiles de velocidad y de densidad del flujo, perfiles de presión) y de la interacción con obstáculos (presiones de impacto). Se utilizan, dependiendo del tipo de alud, radar Doppler (con pulsaciones y en continuo), radar de frecuencia modulada en continuo (FMWC). Además, se utiliza fotogrametría, fotografía estereográfica, goniómetros acústicos, geófonos y estaciones meteorológicas. Las imágenes de vídeo son muy importantes para relacionar la variación temporal de los parámetros medidos con la evolución del alud (Sabot et al, 1998). En aludes que desarrollan aerosol, no obstante, la utilización de la imagen vídeo para ese fin no es aplicable, ya que el aerosol no permite ver el avance de la parte densa. En este sentido, los sensores sísmicos dan información sobre el comportamiento de la nieve densa en el descenso (Suriñach y Sabot, 1999). En algunos casos, aún cuando los sensores están instalados permanentemente, éstos se ponen en funcionamiento de manera manual, previamente al desencadenamiento artificial de la avalancha. En otros casos, éstos se activan de manera automática. Ésta es la situación

para el estudio de aludes espontáneos. Finalmente, también se instalan sensores temporalmente para seguir la evolución de las avalanchas desencadenadas artificialmente en estaciones de esquí. (p. ej. Núria y Boi- Taüll en el Pirineo catalán (Sabot et al, 1998)).

Cartografía y periodos de recurrencia

Paralelamente al estudio del comportamiento dinámico de las avalanchas y en relación con la determinación de su peligrosidad, se elaboran mapas de peligrosidad de avalanchas. Ello comporta conocer las zonas potenciales de avalanchas, tanto a partir del rastro de avalanchas ya ocurridas, como considerando condiciones favorables en el terreno. También es necesario tener una estimación de las zonas de alcance máximo y de la amplitud de la zona afectada. Al igual que en otros fenómenos naturales que comportan riesgo (terremotos, aguas torrenciales...), es necesario conocer los valores máximos de los parámetros de los aludes y sus periodos de recurrencia con el fin de conocer realmente la peligrosidad de un área. De manera similar a otros riesgos, el catastro (censo) se puede ampliar utilizando la investigación histórica (en colaboración con historiadores, p.ej. Furdada et al, 1998). En áreas donde no hay memoria histórica, ya sea por falta de testimonios o debido a un periodo de recurrencia muy largo, los estudios geomorfológicos y geobotánicos, así como las técnicas dendrológicas, permiten detectar y clasificar avalanchas (p. ej. Sapunov y Sapunova, 1998). La vegetación existente, tanto su tipo como la extensión ocupada, permite determinar zonas y delimitar el tiempo de ocurrencia de una avalancha en una determinada área. Los estudios sedimentológicos y estratigráficos, junto con datación de radiocarbono, también se utilizan para detectar secuencias de avalanchas, ya que el tipo y la geometría de los depósitos son característicos de las avalanchas (p. ej. Blikra y Saemundson, 1998). Una herramienta indispensable para realizar y gestionar las cartografías de aludes son los sistemas de información geográfica (GIS).

Detección

Paralelamente a la realización de cartografía de aludes y al estudio de éstos, la detección de aludes es necesaria para reducir riesgos. Actualmente existen diferentes métodos de reconocimiento y detección de avalanchas (cartografía, semáforos, observadores humanos...) que se aplican tanto en tiempo real como *a posteriori*. No obstante, la detección de avalanchas por un observador en tiempo real o casi-real es problemática en aquellas áreas de difícil acceso o en situaciones de baja o nula visibilidad. En estas situaciones la detección sísmica de avalanchas de nieve en tiempo real o casi-real puede ser un elemento que permita la disminución del riesgo de avalanchas. En esta línea, en 1993 se inició en la Universidad de Barcelona y en colaboración con el Institut Cartogràfic de Catalunya el estudio de las señales sísmicas producidas por avalanchas. Posteriormente, con tal de desarrollar un sistema de detección eficiente para el futuro, se creyó necesario tener información sobre la relación entre las avalanchas y la señal sísmica producida por éstas. Con este motivo a partir de 1994 se inició una nueva etapa experimental de obtención de señales de avalanchas desencadenadas artificialmente encaminada a conocer esta relación. El estudio de las señales obtenidas, actualmente en curso, se realiza bajo la óptica de la Sismología (Suriñach et al, 1999).

Comentarios finales

Las líneas de actuación presentadas no son todas las existentes en el estudio de las avalanchas. Sólo nos han servido como ejemplo para ilustrar la multiplicidad de líneas de investigación sobre este fenómeno natural. Los colectivos implicados son físicos,

ingenieros, geofísicos, geólogos y geógrafos actuando con los conocimientos y procedimientos propios de su especialidad para resolver un problema común: la evaluación de la peligrosidad asociada a los aludes. Existen otros colectivos que están implicados en la reducción del riesgo asociado (gestores territoriales).

El proyecto SAME (Snow Avalanche Modelling and Warning in Europe) en el cual participaron la mayoría de los países comunitarios que investigan sobre el tema, así como Islandia, Noruega y Suiza ha sido un impulsor de la colaboración ya existente.

Actualmente el grupo de nieve y aludes de la UB (3130-UB-0) está llevando a cabo, en el marco del Grup de Recerca Consolidat de la Generalitat de Catalunya (SGR99-65), estudios que se encuadran en las líneas de investigación anteriormente presentadas. Así, se está llevando a cabo el estudio de la relación nieve-viento en conexión con el peligro de aludes, el estudio de la dinámica de aludes mediante utilización de señales sísmicas en vistas a su detección en tiempo real, el estudio del flujo de fluidos viscosos mediante el análisis de imágenes de vídeo y la realización de la cartografía de avalanchas y recopilación de la documentación asociada en el territorio andorrano mediante utilización de sistemas GIS. El Servei d'allaus del Institut Cartogràfic de Catalunya emite diariamente durante el periodo diciembre- mayo los boletines de peligro de aludes. Además ya se han editado dos hojas del mapa de zonas de aludes del Pirineo a escala 1/25.000 (Val d'Aran Nord (ICC, 1997); Val d' Aran Sud (ICC, 1998)).

Para finalizar, únicamente remarcar que a pesar del esfuerzo de los diferentes colectivos y el grado de conocimiento sobre el fenómeno que se tiene hasta el momento, dada la complejidad del proceso de un alud, aún queda un largo camino que recorrer para la reducción de su peligrosidad.

REFERENCIAS

- Barbolini, M., Savi, F., Gruber, U., Keylock, C. y Naaim, M., 1998. Application and evaluation of different avalanche models at five real sites in Europe. Deliverable 3. Fourth European Framework Programme, Environment and Climate SAME project, 50 pp.
- Blikra, L.H. y Saemundson, T., 1998. The potential of sedimentology and stratigraphy in avalanche-hazard research. En: Hestnes, E. Editor, 25 years of snow Avalanche Research, Voss, Norway; Pub. 203 N-0806 Oslo Norwegian Geotechnical Institute, 60-63.
- Dent, J.D., Burrell, K.J., Schmidt, D.S., Louge, M.Y., Adams y E.E. Jazbutis, T.G., 1998. Density, velocity and friction measurements in dry-snow avalanche. *Ann. of Glaciol.*, 26, 247-252.
- Furdada, G. y Vilaplana, J.M., 1998. Statistical prediction of maximum avalanche run-out distances from topographic data in the western Catalan Pyrenees (northeast Spain). *Ann. of Glaciol.*, 26, 285-288.
- Furdada, G., Vilaplana, J.M., Tomás, E., Mas, D., 1998. The avalanche of la tartera de la Pica (Andorra) In: Hestnes, E. Editor, 25 years of snow Avalanche Research, Voss, Norway; Pub. 203 N-0806 Oslo Norwegian Geotechnical Institute, 104-107.
- Gubler, H., 1995. Measurement and modelling to improve our understanding of avalanche formation. En: Brugnot, G. (ed.). *Actes de l'Université européenne d'été sur les risques naturels. Neige et avalanches*. Chamonix, Cemagref éditions ISBN 2-85362-397-1, 89-98.
- Harbitz, C. B., Issler, D., Keylock, C. J., 1998. Conclusions from a recent survey of avalanche computational models. In: Hestnes, E. Editor, 25 years of snow Avalanche research, Voss, Norway; Pub. 203 N-0806 Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, 128-139.
- Issler, D. (Editor), 1999. European Avalanche Test Sites. Overview and Analysis in View of Co-ordinated Experiments. ed. Mitteilung Nr. 59, Swiss Federal Institute of Snow and Avalanche Research, Davos. ISSN 0415-0759, 70-75.
- Keller, S., 1995. Measurements of powder snow avalanches- laboratory. *Surveys Geophys.*, 16, 661-670.
- Keller, S., Ito, Y., Nishimura, K., 1998. Measurements of the velocity distribution in Ping-Pong- ball avalanches. *Ann. Glacio.*, 26, 259-264.
- Naaim, M. y Pellarin, T., 1998. Physical and numerical analysis of the front of a gravity current on a horizontal bottom. *Ann. Glaciol.*, 26, 289-295.
- Narita, H., 1983. An experimental study on tensile fracture of snow. In: Contributions series A25, Inst. of low temperature Science. Hokkaido University, Japan, 1-37
- Sabot, F., Naaim, M., Granada, F., Suriñach, E., Planet-Ladret, P. y Furdada, G., 1998. Study of the Avalanche Dynamics by means of Seismic Methods, Image Processing Techniques and Numerical Models. *Ann. of Glaciol.*, 26, 319-323.
- Sapunov V. y Sapunova, G., 1998. Geomorphologic and geobotanical features of Slushflows (Khibiny mountains for instance) 221-223. In: Hestnes, E. Editor, 25 years of snow Avalanche Research, Voss, Norway; Pub. 203 N-0806 Oslo Norwegian Geotechnical Institute, 128-139.
- Suriñach, E., Sabot, F., Furdada, G., and Vilaplana, J.M., 1999. Seismology as a tool for the detection of snow avalanches. Implications for the mitigation of this natural risk. [cdrom]. In: J.M. García and M.D. Romacho, ed. *International Symposium: Assessment and reduction of natural risk. I Ass. Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Almería, I.G.N., Madrid, ISBN 84-95172-01-0, file SIM1_06.doc.

Vilaplana, J.M. y Martínez, P. ,1996. El riesgo de aludes en el Pirineo de Cataluña. En : Chacón, J. y Irigaray, C. (Ed). Sexto Congreso Nacional y Conferencia Internacional de Geología ambiental y ordenación del territorio. Riesgos naturales, ordenación del territorio y medio ambiente. Vol I., 595-603.