

IV Simposio Nacional sobre Taludes y laderas inestables. Granada (1997), Alonso, E. et al (Ed.). Vol 2, 719 -728.

Estudio de la Dinámica de Aludes de Nieve Mediante Métodos Sísmicos, Técnicas de Tratamiento de la imagen y modelos numéricos

Sabot Françoise (1), Naaim Mohamed (2), Granada SALES Francesc(3), Suriñach CORNET Emma (1), Planet Patricia (3) y Furdada BELLAVISTA Glòria (1)

(1) Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia. Universitat de Barcelona. Martí i Franqués s/n. 08028 Barcelona. Spain.

(2) ETNA/Cemagref. B.P. 76 38402 Saint Martin d'Hères - France.

(3) Laboratoire d'Instrumentation de Micro-informatique et d'Electronique. LIME-U.J.F.G. B.P. 53 X, 38041 Grenoble Cedex. France.

Resumen

Se han comparado señales sísmicas de aludes de nieve, imágenes de vídeo y modelos numéricos con el fin de mejorar la caracterización del fenómeno de las avalanchas. Se analizaron las señales sísmicas y las imágenes de vídeo correspondientes a dos aludes desencadenados artificialmente para obtener más información sobre el origen de las señales. Se han utilizado técnicas de tratamiento de imágenes para comparar la evolución del frente del alud de nieve y su señal sísmica. También se utilizó un modelo numérico para realizar una simulación de un alud con el fin de obtener los perfiles de velocidades medias y máximas del flujo de nieve. Los resultados de este estudio sugieren que las particularidades de las señales sísmicas registradas corresponden a cambios en el tipo de alud y en la pendiente durante el recorrido, a las interacciones con obstáculos y a los procesos asociados a la fase de detención del alud.

Introducción

El estudio de las señales sísmicas producidas por aludes podrá permitir caracterizar con el fin de controlar la actividad de los aludes en zonas remotas o en situaciones meteorológicas en que la observación de éstos es imposible. Éste es el primer paso para la elaboración de un sensor remoto que detecte y reconozca los aludes en tiempo real. Para alcanzar este objetivo, durante la última década se han instalado sistemas

experimentales de adquisición automática de señales sísmicas (Sabot et al., 1995; Leprettre et al., 1996). El análisis "a posteriori" de las señales obtenidas automáticamente por el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) desde 1988 en una amplia zona de estudio de los Pirineos, atribuidas a aludes, indica que sólo una parte del alud se registra (Sabot et al, 1995). Estas señales sísmicas duran entre 2 y 20 segundos cuando la duración debería exceder los 40 segundos, ya que el recorrido de los aludes es de alrededor de 2 km. Para explicar este fenómeno y profundizar en el conocimiento de las señales sísmicas, se registraron simultáneamente los datos sísmicos y las imágenes de aludes desencadenados artificialmente. Esto nos permite controlar parte de la información (duración del alud, perfil de la velocidad media, evolución temporal del alud) que es imposible obtener cuando se registran automáticamente aludes que se desencadenan de forma natural. En este artículo se comparan los datos sísmicos y imágenes de vídeo correspondientes a dos avalanchas desencadenadas artificialmente. Además, se verifica el alud simulado obtenido por modelización numérica utilizando las imágenes de vídeo y se analiza la señal sísmica a partir de los resultados de la modelización.

Emplazamiento y Medidas

La zona de experimentación está situada en la estación de esquí de Boí Taüll (Pirineos Catalanes) (Fig. 1), en la que se desencadenan aludes artificialmente para proteger las pistas de esquí. Las dos avalanchas estudiadas fueron desencadenadas artificialmente utilizando explosivos durante la temporada 1995-96. El primer alud (Raspes Roies) se desencadenó a un altitud de 2725 metros, recorrió unos 840 metros sobre una pendiente regular y abierta, con un perfil convexo orientado al oeste; el desnivel fue de 500 m (Fig. 2.a.). La nieve involucrada tenía una densidad superior a 200 kg/m³. El alud fue de nieve densa y formó un aerosol que se depositó poco más allá de la parte densa; el depósito presentaba un aspecto rugoso e incluía bolas. La estación sísmica que registró la señal de avalancha estaba situada en frente y a cota más baja que la zona de alud, a 1500 metros de distancia del punto de explosión.

Con el fin de conseguir datos en buenas condiciones, utilizando una estación sísmica estándar, se han puesto en marcha dos sistemas de adquisición: uno automático y el otro que registra las señales producidas durante un desencadenamiento artificial de avalancha.



Figura 1. Localización de la estación de esquí de Boí Taüll

El segundo alud (Cerví) se desencadenó a un altitud de 2600 metros, recorrió unos 800 metros (con un desnivel de 375 m) (Fig. 3.a.). La nieve involucrada tenía una densidad inferior a 200 kg/m³. cerca del depósito del alud. El alud se precipitó por encima de una ruptura de pendiente brusca y convexa, incorporó aire y formó una nube de nieve polvo. El depósito era rugoso e incluía alguna bola de nieve y fragmentos de placa de hasta 1 m³. La estación sísmica estaba situada a 900 m del punto de explosión.

Se registraron las señales sísmicas y el vídeo correspondiente con la misma base de tiempo para los dos aludes. El registro sísmico de aludes se realizó con un equipo sísmico estándar con una respuesta plana entre 2 y 40 Hz, con un geófono de tres componentes. Las señales sísmicas se obtuvieron con una frecuencia de muestreo de 100 muestras por segundo.

Los datos son adquiridos con una estación PDR1 de Kinometrics del S.G.C. instalada en Varrados desde 1988 (Fig. 1). Varrados es un valle encajonado del Val d'Aran entre 1000 y 2300 metros de altitud. Así, la estación se encuentra aislada desde las primeras nevadas. Este sistema de adquisición nos ha permitido registrar las señales sísmicas de avalanchas de una componente entre 1988 y 1991 y de tres componentes entre 1992 y 1994. Esto representa un total de 200 señales.

Estudio de las señales sísmicas

Velocidad de las ondas del suelo

En los registros sísmicos obtenidos en el experimento coexisten la señal producida por la explosión y la señal debida al alud. El registro, a su vez, se compone de tres partes diferentes que se identifican bien y que corresponden a las ondas que se propagan por el suelo (debidas a la explosión), las ondas sonoras, y las ondas de eco. La situación del punto de explosión, bien conocida, se corrobora determinando su azimut a partir del estudio del movimiento de la partícula en el plano horizontal del primer tren de ondas. Las velocidades de propagación de las ondas sísmicas en el suelo se estiman utilizando la distancia entre la estación y el punto de explosión y la diferencia entre los tiempos de

llegada de los trenes de ondas que viajan por el aire y por el suelo correspondientes a la explosión. Estas velocidades son de alrededor de 2250 ms⁻¹ para el alud de "Raspes Roies" y de 2750 ms⁻¹ para el alud de "Cerví". Por consiguiente, una buena aproximación de la velocidad de propagación por el suelo para la zona de Boí Taüll es la de 2500 ms⁻¹. Estos bajos valores de las velocidades están en acuerdo con las velocidades de propagación características de las capas más superficiales de la corteza, que son las involucradas en este estudio.

Comparación con las imágenes de vídeo

La comparación de la señales sísmicas registradas y de las imágenes de vídeo correspondientes nos permite determinar el origen de cada tren de ondas. Para esto es necesario decalar en el tiempo la señal sísmica teniendo en cuenta la velocidad media de las ondas por el suelo.

Las ondas sísmicas generadas por el alud de "Raspes Roies" se muestran en la figura 2.b. Durante los primeros 20 segundos después de la explosión no se observa ningún incremento en la amplitud de las ondas que sea suficiente como para atribuirlo al alud. El tren de ondas a 12 s corresponde a las imágenes donde el alud empieza a formar un aerosol al alcanzar el cambio de pendiente de la topografía (1 en la figura 2). En esta parte el alud alcanza su velocidad máxima, como se ve en la simulación. Los trenes de ondas de la última parte de la señal corresponden a las imágenes de la fase de detención del alud (2 en la figura 2), hecho que sugiere que se puede asociar la energía a esta fase.

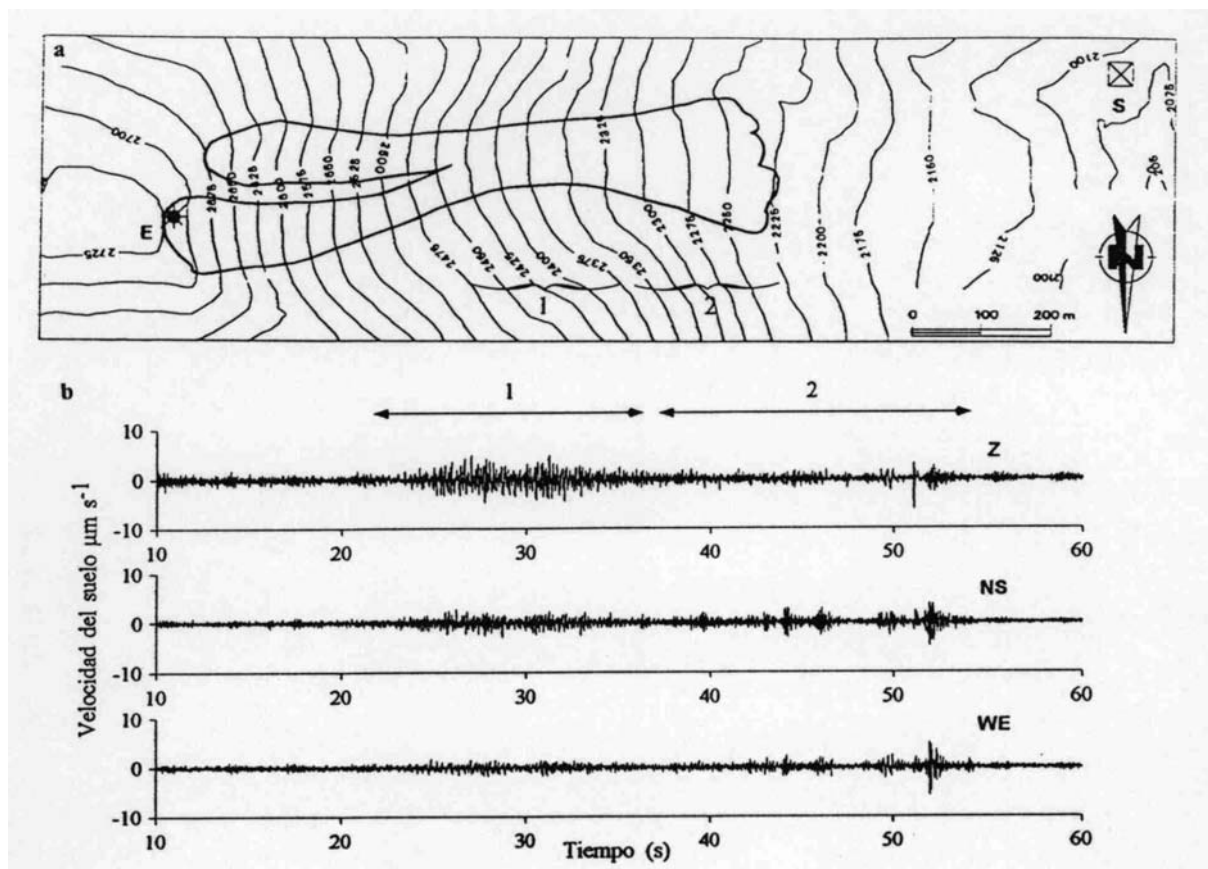


Figura 2. a) Cartografía del alud desencadenado en "Raspes Roies" sobre el mapa del ICC. E: punto de impacto de la explosión, S: posición de la estación sísmica. b) Señal

sísmica. Componentes vertical, norte - sur y este - oeste: 1) Cambios de pendiente en la zona del alud, 2) fenómeno asociado a la detención del alud.

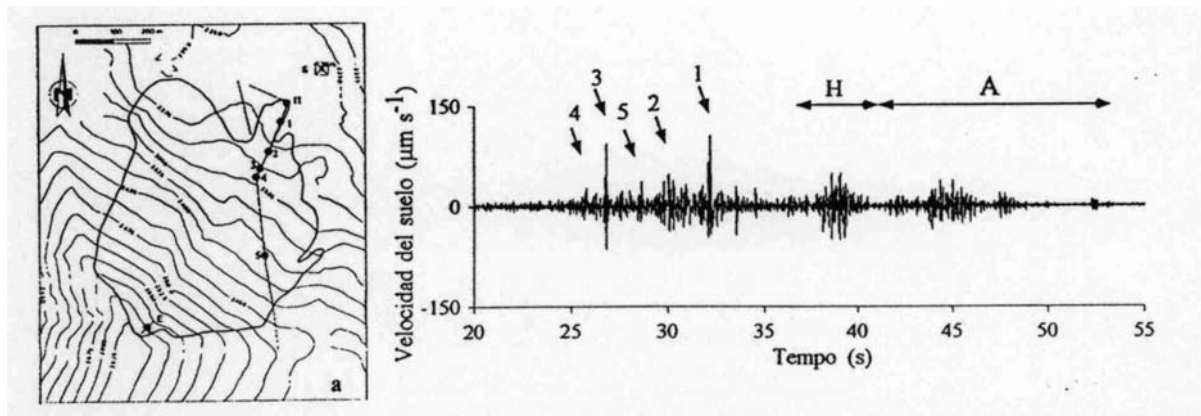


Figura 3. a) Sismograma de la componente vertical del alud de "Cerví". A: fenómeno asociado a la detención del alud. 1-5 y H: impactos con el arrastre (pilonas o postes) y las casetas de mantenimiento. b) Cartografía del alud de "Cerví" sobre el mapa del ICC. 1 a 5: postes del arrastre. E: punto de impacto de la explosión; S: posición de la estación sísmica.

La componente vertical de la ondas sísmicas generadas por el alud del "Cerví" se muestra en la figura 3.a. En este caso, se puede discriminar la señal sísmica del alud del ruido ambiental solamente 25 s después del inicio de la avalancha. Se registró un primer grupo de trenes de ondas que corresponden a los diferentes impactos con los postes del arrastre que fue afectado por el alud (1-5 en las figuras 3.a. y 3.b.). El último tren de ondas de este grupo (H en la figura 3) corresponde al impacto del flujo con la casetas de mantenimiento del arrastre. Como en el caso del alud de Raspes Roies, la última parte de la señal (A en la figura 3.a.) corresponde a las imágenes de la detención del alud.

Modelización numérica utilizando las imágenes de vídeo

Estudiando las imágenes de vídeo de la zona de salida del alud de Raspes Roies se observa que la parte que constituye el aerosol del alud no llega a depositarse mucho más lejos que la parte densa, hecho coherente con la densidad de la nieve involucrada ($\rho > 200 \text{ kg m}^{-3}$, según datos del perfil estratigráfico realizado "in situ"). Por lo tanto, se considera que el aerosol del alud se puede despreciar y se asume que la avalancha puede ser modelizada como una avalancha densa.

Modelo Numérico

La simulación numérica se utiliza para modelizar la dinámica de los aludes. Con este propósito, diferentes autores (Gubler, 1989; Marco, 1995) han utilizado distintos modelos (considerando el alud desde cuerpo rígido hasta fluido) para modelizar diferentes tipos de aludes.

En esta línea, se probaron una serie de modelos 2 D que consideraban el alud como un flujo fluido o como un flujo parcialmente fluido, comparando las características de diferentes aludes como las velocidades máximas del flujo y las distancias máximas de alcance. Los valores obtenidos a partir del cálculo de los modelos se compararon con

los medidos en aludes desencadenados artificialmente y con aludes producidos en laboratorio a escala reducida (Gubler, 1987; Nishimura y Maeno, 1987).

En este estudio, el alud de Raspes Roies se modelizó en 3D suponiendo que era un cuerpo de Bingham. Las ecuaciones que describen el flujo se obtuvieron con una integración vertical de las ecuaciones de Navier-Stokes, suponiendo que la presión es hidrostática y que el modelo reológico es el de Bingham (Naaïm y Ancy, 1995). Las ecuaciones obtenidas constituyen un modelo de sistema no lineal hiperbólico. El sistema de ecuaciones que gobierna el movimiento del alud es:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} hu^2 + \frac{1}{2} g \cos(\varphi) h^2 \\ hu \\ huv \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} hv \\ uv \\ hv^2 + \frac{1}{2} g \cos(\varphi) h^2 \end{pmatrix} = -gh \begin{pmatrix} 0 \\ \sin(\varphi_x) \\ \sin(\varphi_y) \end{pmatrix} - \left(\frac{\tau_c}{\rho} + \mu \frac{\partial \|\bar{u}\|}{\partial z} \right) \frac{\bar{u}}{\|\bar{u}\|}$$

Donde $\frac{\partial \|\bar{u}\|}{\partial z} = f(h, \mu, \tau_c)$, h es la altura del flujo en un punto, z es el eje ortogonal al terreno, la velocidad media es $\bar{u}(u, v, 0)$, φ_x y φ_y son las pendientes en la direcciones x e y respectivamente, y τ_c es la tensión crítica definida en el modelo de Bingham.

La corta duración de la señal en relación con la duración del fenómeno parece indicar que el registro corresponde únicamente a la parte de la avalancha con máxima energía.

Aplicación al alud de "Raspes Roies"

La aplicación del modelo se basa en las observaciones de campo. El mapa topográfico de la zona se digitalizó según una malla regular. Teniendo en cuenta la zona de salida definida utilizando las imágenes de vídeo y el perfil estratigráfico (características del manto nivoso) se obtiene la evolución de la velocidad media y la de las velocidades máximas (calculada para cada intervalo de tiempo, sobre la totalidad del alud) (Fig. 4). La comparación entre el alud simulado y las imágenes de vídeo muestra que el alud modelizado dura menos tiempo que la avalancha observada pero que la zona de alcance es la misma. Los buenos resultados obtenidos simulando (duración y alcance del alud) nos permiten utilizar esta simulación para interpretar la señal sísmica del alud. A partir de la comparación entre el perfil de velocidad del alud simulado (Fig. 4) y la señal sísmica (Fig. 2.b.), se observa que la primera parte de la señal (1 en la figura 2.b.) corresponde a la parte donde el alud alcanza su velocidad máxima. El estudio de la señal sísmica mostró que esta parte corresponde también a un cambio en la pendiente de la zona de recorrido (de 30 a 25 grados), así como a un cambio en el alud. La simulación nos permite también concluir que la segunda parte de la señal sísmica (2 en la figura 2.b.) corresponde a la fase de detención del alud.

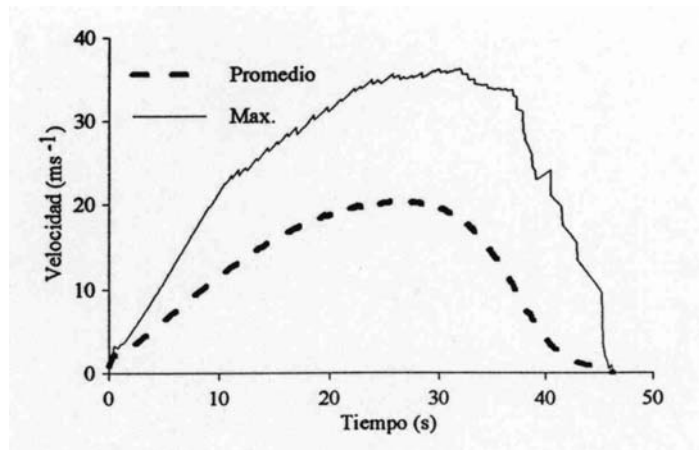


Figura 4. Velocidades media y máxima del flujo de nieve para cada intervalo de tiempo calculadas para la totalidad del alud.

Los espectros de las señales de avalancha pueden ser agrupados en dos clases: los espectros que tienen una frecuencia principal (Fig. 4 b) y los que tienen una amplitud que crece en función de la frecuencia (Fig. 4 a). La falta de observaciones (imagen vídeo y señal sísmica de la avalancha simultáneas) no nos permite todavía decir si estos dos grupos son significativos de la morfología de la avalancha o de la morfología del terreno.

Procesado de Imágenes

Cada día se utiliza más el procesado de imágenes para el estudio de la dinámica de los aludes de nieve. Por otro lado, se han propuesto muchos modelos numéricos para estudiar la dinámica de los aludes. La validación de los modelos numéricos no se ha podido realizar hasta la actualidad ya que es muy difícil medir los diferentes parámetros a introducir indispensablemente en estos modelos. El procesado de imágenes puede aportar informaciones para realizar esta validación: Un algoritmo original de seguimiento de contornos activos ha sido aplicado para obtener las imágenes de la evolución del frente del alud de "Raspes Roies" para compararlas con los resultados de la simulación y la señal sísmica. Después de digitalizar las imágenes, se realizó un pre-tratamiento para corregir el movimiento. A continuación, se aplicó un algoritmo original y sencillo de seguimiento que utiliza un algoritmo de extracción de contorno (Latombe et al., 1997) para segmentar el alud de "Raspes Roies".

Algoritmo de extracción de contorno

Este algoritmo utiliza el hecho que la frontera entre un alud y el resto de la imagen es la parte más energética de la imagen. El cálculo de la energía de la imagen y la determinación de sus máximas variaciones permite ajustar un contorno inicial al contorno real.

El algoritmo puede resumirse de la manera siguiente: se selecciona un primer contorno muy cerca del contorno real; después se aplica el algoritmo de segmentación. Este último consiste en: a) cálculo de la energía, b) procesado de cada punto del contorno en función del incremento de energía, c) incorporación o supresión de puntos dependiendo de la distancia entre éstos y finalmente d) supresión de puntos duplicados.

Algoritmo de seguimiento de contornos

El algoritmo de seguimiento está directamente ligado al algoritmo de extracción de contornos. Un diagrama en la figura 5 muestra el proceso que utiliza el algoritmo. Para cada imagen se utiliza un contorno dilatado del obtenido con la imagen anterior para inicializar el algoritmo de extracción de contorno. Para este tipo de imágenes donde la energía máxima se alcanza para el cuerpo a seguir, estamos obligados a dilatar el contorno precedente antes de extraer el contorno con el algoritmo. En términos de procesado de imágenes, el algoritmo introduce una idea de suavización temporal en el término energético.

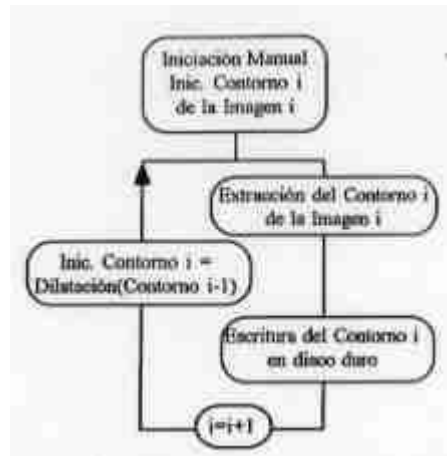


Figura 5: sistemas de coordenadas de la descomposición

Aplicación al alud de "Raspes Roies"

Se aplicó el algoritmo a una secuencia de 125 imágenes del vídeo del alud de "Raspes Roies" y se siguió la variación de la forma del alud durante el recorrido de la avalancha. En la figura 6 se presentan tres imágenes. En cada una de ellas el contorno obtenido está dibujado con una línea blanca. La primera imagen (figura 6.a.) proviene del principio de la secuencia, cerca del contorno inicial y el contorno del alud esta perfectamente definido. La segunda imagen (imagen número 125 de la secuencia) corresponde a la máxima amplitud del alud. Este contorno sigue siendo trazado con una buena precisión (figura 6.b.). Finalmente, la tercera imagen muestra diferentes contornos entre la primera y la última imagen de la secuencia (figura 6.c.). Los resultados obtenidos indican que el algoritmo desarrollado está bien adaptado a nuestras imágenes, consiguiendo resultados prometedores y que podría constituir una herramienta de validación para los modelos numéricos de aludes de nieve. Sin embargo, para mejorar el método, es necesario reconstruir en 3D la secuencia de contornos. Esto implica que se deben identificar un número de puntos suficientes sobre la imagen y la estructura del modelo digital del terreno.

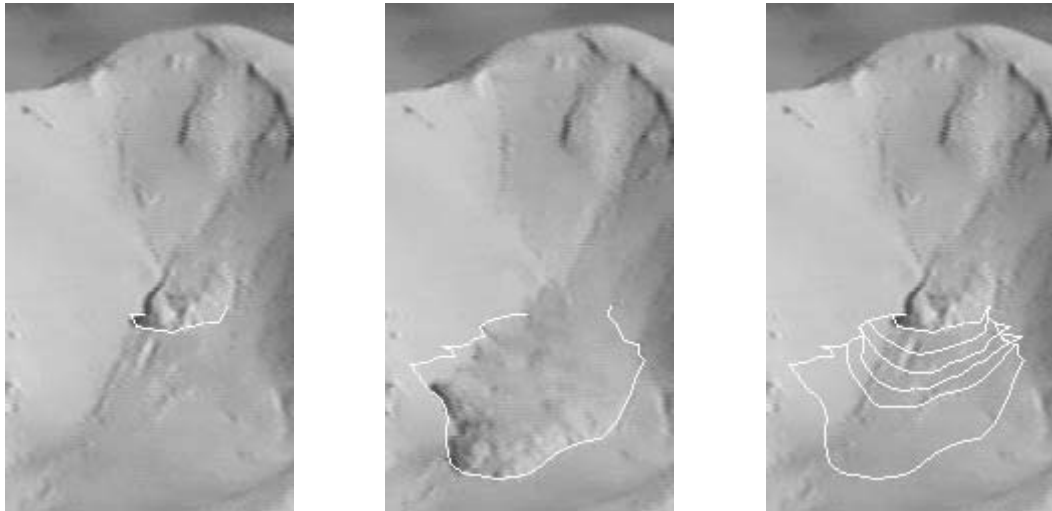


Figura 6. Contornos del frente del alud de Raspes Roies: a) Principio de la secuencia. b) Fin de secuencia. c) Algunos de los contornos entre la primera y la última imagen de la secuencia.

La similitud entre los contornos de la simulación del alud y los obtenidos a partir de las imágenes vídeo, aún cuando no se haya hecho el cambio de 2D a 3D, confirma nuestras conclusiones sobre el origen de la primera parte de la señal sísmica del alud. Como el método de tratamiento de imágenes sólo considera los contornos, no se puede utilizar para explicar la señal sísmica generada durante la detención del alud.

Conclusiones

Se aplicaron conjuntamente tres métodos de análisis de aludes sobre una misma avalancha en "Raspes Roies": medidas sísmicas, análisis de imágenes de vídeo y modelización numérica. Este estudio nos ha permitido explicar las diferencias de duración entre el alud y su señal sísmica. Solamente unas partes del alud generan señales sísmicas. Las señales sísmicas registradas corresponden a cambios en el tipo de alud o en la pendiente de la zona de recorrido, a interacciones con obstáculos y a fenómenos asociados a la detención del alud. Estos resultados confirman otros estudios sobre señales sísmicas adquiridas automáticamente. Por otro lado, la simulación numérica de aludes de nieve densa puede ser una herramienta muy útil cuando las imágenes de vídeo no estén disponibles. Sin embargo, es necesario realizar la transformación de los contornos en 2D a una representación 3D para completar la comparación entre el resultado de la modelización numérica y los resultados del procesado de la imagen.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el proyecto de la CICYT n° AMB93 - 0837, el programa Capital Humano y Movilidad contrato n° CHRX-CT93-0307 DG 12 COMA) y el programa SAME ENV4-CT96-0258. Los experimentos en Boí Taüll se realizaron

con la colaboración de la estación de esquí de Boí Taüll. Queremos agradecer a J.M. Vilaplana sus ánimos constantes y al grupo de aludes del ICC su apoyo humano en el campo y su asistencia técnica.

Referencias

Gubler, H. (1987). "Measurements and modelling of snow avalanche speeds". In: Salm, B. and Gubler, H., ed. *Avalanche Formation, Movements and Effects*. IAHS Pub. n° 162, 405-420.

Gubler, H. (1989). "Comparison of three models of avalanche dynamics". *A. Glaciol.*, 13, 82-89.

Latombe, B., P.Ladret, F.Granada y P.Villemain. (1997). *An original Active Contour Algorithm Applied to Snow Avalanches*. Sixth International Conference on Image Processing and its Applications, Trinity College, Dublin, Conference and Exhibition Services IEE.

Leprettre, B., J. P. Navarre y A. Taillefer. (1996). "First Results from a pre-operational system for automatic detection and recognition of seismic signals associates with avalanches". *J. Glaciol.*, 42 (141), 352-363.

Marco, O., (1995). "Instrumentation d'un site avalancheux". *Etudes-Equipements pour l'eau et l'environnement* n° 16. Cemagref ed. (Ph.D. thesis, Université Joseph Fourier - Grenoble I).

Naaim, M. and C. Ancey. (1995). "Modelisation of dense avalanches". In: Brugnot, G. ed. *European Summer University on Natural Hazards: snow and avalanches*, Cemagref Ed., 173-181.

Nishimura, K. and N. Maeno, N. (1987). "Experiments on snow avalanche dynamics". In: Salm, B. and Gubler, H., ed. *Avalanche Formation, Movements and Effects*. IAHS Pub. n° 162, 395-404.

Sabot, F., P. Martinez , E. Suriñach, C. Olivera and J. Gavaldà. (1995). "Détection sismique appliquée à la caractérisation des avalanches". ANENA-CEMAGREF (Eds.): *Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanches*. Actes du colloque. Chamonix, 19-24.