

8 Conclusiones

El alud de nieve es un fenómeno natural que genera señal sísmica. Las señales sísmicas generadas por aludes de nieve (SSA) pueden ser utilizadas para la detección del alud y para su estudio. Con el fin de utilizar las SSA como método de detección, éstas deben ser caracterizadas. Una buena caracterización debe basarse en un buen catálogo de datos experimentales y esto requiere una selección. La selección de datos experimentales debe basarse en un estudio del ruido de fondo del emplazamiento, donde se registra cada señal, con el fin de discriminar las SSA de señales generadas por otras posibles fuentes sísmicas. El estudio del ruido de fondo del emplazamiento es también imprescindible a la hora de evitar atribuir falsas características a las SSA. Los resultados de esta tesis están basados en un catálogo de datos formado por 92 registros digitales, de tres componentes, de velocidad del suelo, generados por 52 aludes. En el análisis de resultados se han relacionado las características de las SSA con características de los aludes de nieve, ello ha implicado una verificación de los datos de los aludes mediante observaciones de campo e imágenes de vídeo. Se ha realizado el análisis de las señales en el dominio temporal, el dominio frecuencial y el dominio tiempo-frecuencia, éstos tres tipos de análisis han aportado información complementaria. Los resultados de esta tesis dirigidos a la caracterización de las SSA pueden ser resumidos en los siguientes puntos:

Las SSA dependen del lugar en el que son registradas, de la dimensión del alud, del tipo de flujo y del canal por el que se desarrollan. A pesar de esta variabilidad se observa una reproducibilidad, es decir se observan envolventes similares en aludes del mismo tipo de flujo, dimensión, con trayectorias similares y registrados en el mismo emplazamiento.

SSA generadas por un mismo alud varían significativamente en el dominio temporal según donde se registren dependiendo de: la posición relativa entre el sensor y el alud, la distancia entre sensor y alud y las características sísmicas del emplazamiento. Las envolventes de las señales de nuestra colección se caracterizan por presentar un inicio en el que las amplitudes aumentan progresivamente debido a que los aludes se aproximan al sensor, al menos durante la primera fase de su evolución. Cuando la distancia entre el alud y el sensor aumenta las amplitudes de las SSA disminuyen.

Las SSA están condicionadas por la dimensión y el tipo de flujo del alud. Las máximas amplitudes y la duración temporal de las SSA son proporcionales a las dimensiones del alud. Considerando aludes registrados a las mismas distancias y de similares dimensiones, los aludes de flujo y nieve húmeda generan mayores amplitudes que los aludes mixtos. Los aludes aerosol son los que generan SSA de menor amplitud. Las SSA de mayor duración son generadas por aludes de flujo y nieve húmeda. Se observa una característica común en los registros de aludes de flujo y aludes mixtos que no se observa en los registros de aludes aerosol, ésta consiste en el aumento repentino de amplitudes en la parte final de las SSA, que se asocia a la fase de detención del alud en la que los depósitos chocan entre sí y se acumulan progresivamente hasta detenerse.

El estudio del contenido frecuencial total corrobora la dependencia de las SSA con el emplazamiento en el que se registran ya que las frecuencias de las señales dependen significativamente de la distancia a las que son registradas. Sin embargo, en nuestros registros la dependencia del contenido frecuencial total con el tipo de flujo del alud y con su dimensión no es significativa. Las SSA son señales de banda limitada en el dominio frecuencial. Las

señales registradas por sensores situados dentro de la trayectoria del alud contienen frecuencias hasta 45 Hz. Las SSA registradas por sensores situados fuera de la trayectoria del alud contienen frecuencias hasta 20 Hz. La mayoría de SSA tienen espectros de Fourier cuyas amplitudes decrecen significativamente en frecuencias inferiores a 2 Hz.

Las SSA no presentan las típicas fases diferenciadas en las señales de sismos (P, S y coda). La imposibilidad de diferenciar estas fases en las SSA se atribuye al hecho de que el sensor recibe simultáneamente las múltiples fases generadas por todo el conjunto de fuentes móviles que forma un alud. No obstante hay que tener en cuenta que estas observaciones se basan en señales registradas a distancias relativamente cortas del alud (inferiores a 2 km en todos los casos).

A lo largo de esta tesis hemos interpretado el alud como un conjunto de múltiples fuentes sísmicas en movimiento. La variación de la distancia fuentes-sensor a lo largo del registro genera una señal cuyo contenido frecuencial no es constante si no que tiene una evolución característica. A medida que el alud se aproxima al sensor el contenido en altas frecuencias aumenta y se hace máximo a su paso sobre el emplazamiento del sensor. Esta evolución es debida a que la atenuación espacial de las señales sísmicas es proporcional a su frecuencia. La evolución del contenido frecuencial se ha estudiado a partir de los espectros corridos (EC).

En el caso de SSA de pequeña amplitud los espectros corridos (EC) son una herramienta útil a la hora de la detección de aludes. No obstante, la aplicación de los EC para la detección de purgas (aludes *pequeños*) en Vall de Núria muestra la imposibilidad de detectarlas a más de 300 m. Estos resultados indican una clara limitación del método sísmico a la hora de ser utilizado para la detección de purgas. A la hora de interpretar este resultado debe considerarse el alto nivel de ruido de fondo que tienen todos los registros de Vall de Núria lo cual supone un problema significativo para la detección de SSA de baja amplitud.

Los EC reflejan características relacionadas con la dimensión del alud, el tipo de flujo y la distancia a la que son registrados. Los aludes de flujo y aludes mixtos registrados en sensores situados dentro del recorrido del alud presentan una forma triangular en su inicio debida al aumento del contenido en altas frecuencias a medida que el alud se aproxima al sensor. Posteriormente presentan una banda con máximas amplitudes en todas las frecuencias al paso del alud sobre el emplazamiento del sensor. Los EC de aludes de aerosol presentan en el inicio un suave incremento de las frecuencias hasta 15 Hz y posteriormente decrecen.

Se obtienen resultados muy positivos derivados del cruce de información entre la sísmica y las grabaciones de los aludes en vídeo. A partir de la correlación entre SSA e imágenes de vídeo se observa que las máximas amplitudes de la SSA corresponden a instantes en los que el frente del alud pasa por cambios en la pendiente; también aparecen máximas amplitudes en la SSA cuando el alud choca con obstáculos.

Existe una correlación temporal entre la respuesta sísmica en altas frecuencias (30-50) Hz y la señal del radar FMCW. Estas correlaciones muestran un frente del alud de baja reflectividad en la señal radar que produce fracturas en las capas de nieve del suelo y genera altas respuestas sísmicas del suelo. En las partes posteriores de las señales se observa un flujo de mayor reflectividad en la señal radar y con una dinámica generadora de bajas amplitudes sísmicas.

La discriminación entre señales sísmicas generadas por aludes de nieve (SSA) y señales sísmicas generadas por otros fenómenos es imprescindible para la implementación de la sísmica como método de detección de aludes. Los EC son una buena herramienta a la hora de discriminar entre SSA y señales de otras fuentes. Las comparaciones de las SSA con señales de sismos, de helicóptero y de explosiones mostraron los siguientes resultados:

Los resultados revelan diferencias entre SSA y señales de terremotos: en el dominio temporal las envolventes de los sismos presentan unas fases típicas (P,S, coda) que no se observan en las envolventes de las SSA. En el dominio tiempo-frecuencia, los espectros corridos (EC) de los sismos presentan una fase inicial de la señal en la que llegan todas las frecuencias y progresivamente todas las frecuencias se atenúan. Esta evolución es claramente diferente de la de las SSA en las que el contenido en altas frecuencias aumenta al tiempo que el alud se aproxima al sensor. Las frecuencias predominantes de los sismos son menores que las de las SSA. No obstante, la discriminación entre sismos y SSA registradas a distancia a partir del contenido frecuencial total puede generar problemas debido a que las bandas frecuenciales se solapan.

Las señales de explosiones se diferencian de las SSA por ser señales de muy corta duración y gran amplitud. En el dominio tiempo-frecuencia, las señales de las explosiones presentan una primera llegada de la onda sísmica que viaja por el suelo con frecuencias entre [1-10] Hz y una segunda llegada de la onda sonora acoplada con frecuencias en [1-40] Hz. Estas características permiten diferenciarlas de las SSA.

Las señales generadas por un helicóptero son señales de baja amplitud que pueden confundirse con SSA de aludes de *pequeña* o *mediana* dimensión registrados a distancias de ~ 1 km. En los EC sin embargo, se observa que la señal generada por un helicóptero tiene dos bandas, una a [15-20] Hz y otra a [35-40] Hz lo que la diferencia con claridad de la SSA de este tipo de aludes registrados a ~ 1 km, cuyo contenido frecuencial se concentra en [2-10] Hz.

9 Propuestas de líneas futuras de trabajo

Los primeros resultados derivados de estudios de señales sísmicas generadas por aludes de nieve son relativamente recientes (Bonnet, 1980). La comunidad científica lleva 23 años estudiando este tema, durante este tiempo los resultados hallados indican la posibilidad de utilizar la sísmica como método de detección de aludes y también su utilidad como método para ampliar el conocimiento de este fenómeno. No obstante, todavía queda mucho trabajo por hacer y muchas preguntas por responder. A continuación se proponen algunas vías futuras de trabajo:

El fin último de la detección implica el diseño y realización de un sistema automático. Sería interesante estudiar la implementación de las características de las SSA halladas en un sistema automático. Un buen sistema de detección automático puede contribuir en los análisis de previsiones de peligro de aludes al proporcionar información en tiempo casi-real de la actividad de avalanchas. Otra posible contribución de la sísmica como sistema de detección sería su posible uso como método de protección pasiva temporal. Una tercera idea de aplicación es la mejora de los sistemas de detección en las zonas experimentales donde la sísmica funciona como disparador de todos los otros instrumentos de medida. Por último se propone la idea de implementar este sistema en la monitorización de volcanes con el fin de discernir los eventos sísmicos propios de la actividad volcánica con los de posibles aludes de nieve.

La completitud y calidad del catálogo de datos experimentales es imprescindible para deducir buenos resultados. A lo largo de la tesis se ha comentado la carencia de registros de aludes a más de 2 km de distancia. Los registros de aludes aerosol son también escasos. Otra carencia comentada anteriormente es la de registros de buena calidad de aludes de dimensiones equivalentes a las purgas que se provocan en las estaciones de esquí, ya que los registros realizados en las estaciones de Boí Taüll y Núria tienen un alto nivel de ruido de fondo.

Con el fin de estudiar la detección de SSA a larga distancia se propone utilizar las redes sísmicas permanentes situadas en las proximidades de las zonas experimentales con el fin de comprobar si se registra señal. Esta propuesta sería para el caso de los aludes provocados artificialmente, de los cuales se conoce la fecha y la hora en la que se producen.

La localización de aludes a partir de su SSA es un tema de gran interés. Trabajando con este objetivo podría realizarse un estudio de la polarización de las SSA con el fin de averiguar los tipos de ondas que las componen y a partir de ello ver si sería posible la localización del alud. Tanto en el caso de que se confirmase la imposibilidad de diferenciar las fases como en el caso contrario, sería interesante estudiar la posibilidad de localizar aludes mediante el uso de antenas sísmicas.

Los datos de velocidades de aludes con los que se ha trabajado en esta tesis son escasos. Sin embargo los resultados que se han encontrado indican una línea interesante de trabajo en el futuro siempre que se consigan más datos experimentales de velocidades.

Con el fin de poder discernir dentro de la SSA el contenido de origen sísmico propiamente y el de origen sonoro del alud serían necesarios más estudios comparativos entre señales sísmicas y acústicas.

Los buenos resultados obtenidos en las correlaciones entre FMCW y sísmica justifican la propuesta de continuar trabajando en esta línea en el futuro.

El proceso de tratamiento de datos utilizado en esta tesis no es un proceso adecuado para un gran volumen de datos debido a que se utilizan diversos programas instalados en diferentes entornos operativos. Se recomienda estudiar, mejorar y automatizar este proceso, en la medida de lo posible, para agilizarlo.