

Universitat de Barcelona
Grup d'Allaus UB
Departament de Geodinàmica i Geofísica

Aplicación de la sismología al estudio y detección de aludes de nieve

Memoria presentada por la licenciada en Ciencias Físicas

Berta Biescas Górriz

Para optar al grado de Doctora en Ciencias Físicas

Esta tesis se ha realizado dentro del programa de doctorado de Ciències de la Terra, bienio 1999/01, de la Universitat de Barcelona. El trabajo experimental y la redacción de la presente memoria han sido realizados por Berta Biescas Górriz bajo la dirección de la Dra. Emma Suriñach Cornet en el Departament de Geodinàmica i Geofísica.

Barcelona, junio de 2003.

Dra. Emma Suriñach Cornet

*A Isa, Joserra y Erli,
por estar siempre tan cerca*

***La última cosa que se descubre es por dónde empezar
Blais Pascal (1623,1662)***

***No hay caminos para la paz, la paz es el camino
Mohandas Karamchand Gandhi (1869,1948)***

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi directora de tesis, la Dra. Emma Suriñach Cornet todo su apoyo a lo largo de estos años. Esta tesis no hubiera sido posible sin su ayuda. Quiero agradecerle muy especialmente la confianza que depositó en mi al inicio y el esfuerzo que ha realizado para que esta tesis haya podido llegar a su fin. Gracias Emma por todas las horas de charlas y por toda las cosas que he aprendido en ellas.

También quiero dar las gracias a otra de las personas que ha estado en el grupo de trabajo en el que ha ido creciendo esta tesis, la Dra. Glòria Furdada Bellavista. *Gràcies Glòria per tot el que m'has ensenyat sobre la neu i les allaus i per les excursions a Sionne i Núria.*

Los cimientos de este trabajo son una colección de datos experimentales conseguidos gracias al esfuerzo de muchas personas, todas ellas han contribuido en esta tesis. Quiero agradecer toda la infraestructura cedida por el Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research y especialmente a François Dufour su infinita ayuda en La Sionne y los buenos momentos que pasamos todos juntos, después de los días de trabajo, comiendo en la improvisada terraza a los pies de Crêta Besse, con esas maravillosas vistas y ese buen vino. También quiero agradecer a Vall de Núria su interés y la colaboración que ha ofrecido siempre a la Universitat de Barcelona. Me gustaría dar las gracias a Quim Sabata por su ayuda en todo momento y su paciencia. Por último agradecer las personas que han ido participando en las campañas a lo largo de todos estos años, la estación de Boí Taüll, el grupo de aludes del ICC, Nué Vilaplana, Françoise Sabot, Pau Ferrer, Gia Khazaradze e Ignasi Vilajosana.

Las personas que me introdujeron en la sismología fueron la Dra. Carme Olivera i la Dra. Sara Figueres, ellas son culpables, en parte, de que haya llegado hasta aquí. *Gràcies Carme i Sara.*

A lo largo de estos años de trabajo en el Departament de Geodinàmica i Geofísica he recibido el apoyo de otros compañeros. Quiero agradecer a Francesc Sàbat haberme ayudado siempre que se lo he pedido. A Pilar Queralt sus buenos consejos y a Josep Maria Casas su ayuda con los mapas. También agradecer a Aida Espiritusanto sus inventos e ingenios varios.

Acabar la tesis tiene sus cosas buenas y sus cosas malas. Lo malo es sin duda que tendré que despedirme de todos mis compis de cafés y fiambreras, Héctor (*moltes gràcies per poder comptar amb tu*), Óscar G., las Annas, Claudia, Gerard, los Orioles, Ylènia, Bea (gracias por ayudarme con la sísmica), Juanjo, Pau y Eduard. Espero que la vida nos vuelva a reunir en algún sitio. Quiero agradecer especialmente a mis compis de despacho, a Eva y Albeiro, su ayuda en este último tramo, aguantarme con mi música y mis manías, las risas y las horas que hemos pasado juntos. Ojalá les pudiera meter en la maleta y llevármelos al próximo despacho. Os echaré de menos.

La parte buena de acabar la tesis es poder frenar unos instantes, mirar hacia atrás y ver cuanta gente me ha acompañado en estos años. Quiero darles las gracias a mis padres y a mi hermana por sus ánimos incondicionales. A mi abuela Berta por sus abrazos. A Óscar y Bet por su grandísima amistad y por ser los mejores compañeros de viaje...preparaos que nos quedan muchas aventuras pusviles todavía. Gracias a Sandriki y a Albertiño por su cariño y por no dejarme volver loca del todo y sacarme a pasear de vez en cuando. A Álex por aguantarme en este año difícil. Y a Yúnier por hacerme perder la cabeza, que siempre hace falta.

Índice

1	Introducción: objetivos y contenido de la tesis	13
----------	--	-----------

Primera parte

2	Introducción al fenómeno del alud de nieve	15
----------	---	-----------

2.1	Características de los aludes de nieve	15
------------	---	-----------

2.2	Modelización del alud de nieve	17
------------	---------------------------------------	-----------

2.1.1	Modelos dinámicos	19
-------	-------------------	----

2.1.2	Modelos empíricos	22
-------	-------------------	----

2.3	El alud como fuente sísmica	23
------------	------------------------------------	-----------

3	Aportación de la sísmica a la prevención y mitigación del riesgo de aludes de nieve	25
----------	--	-----------

3.1	Aplicación de la sísmica a la detección de aludes de nieve	26
------------	---	-----------

3.2	Aplicación de la sísmica al estudio del fenómeno del alud	27
------------	--	-----------

3.3	Antecedentes	28
------------	---------------------	-----------

3.3.1	Bonneval-sur-Arc, Savoya, Francia	28
-------	-----------------------------------	----

3.3.2	La Plagne, Francia	28
-------	--------------------	----

3.3.3	Vall de Varradòs, Vall d'Aran, España	29
-------	---------------------------------------	----

3.3.4	Monte Cheget, Rusia	29
-------	---------------------	----

3.3.5	Valle de Shiai-Dani, Cañón de Kurobe, Japón	30
-------	---	----

3.3.6	Monte St. Helens y Monte Adams, Washington, USA	30
-------	---	----

3.3.7	La Lavey y Saint-Christofe, Francia	30
-------	-------------------------------------	----

3.3.8	Boí Taüll y Vall de Núria, Pirineos catalanes, España	31
-------	---	----

3.3.9	Vallée de La Sionne, Alpes suizos, Suiza	32
-------	--	----

Segunda parte

4	Zonas experimentales	33
----------	-----------------------------	-----------

4.1	Boí Taüll	33
------------	------------------	-----------

4.2	Vall de Núria	36
------------	----------------------	-----------

4.3	Vallée de La Sionne	40
------------	----------------------------	-----------

5	Instrumentación	47
----------	------------------------	-----------

5.1	Estación de registro Lennartz con sismómetro Mark L4-3D	47
------------	--	-----------

5.1.1	Sistema de adquisición analógico Lennartz	47
-------	---	----

5.1.2	Sismómetro Mark L4-3D	48
-------	-----------------------	----

5.2	Estación de registro Pdas (Teledyne-Geotech) con sensor Lennartz LE-3D/5s	49
------------	--	-----------

5.2.1	Sistema de adquisición digital Pdas (Teledyne-Geotech)	49
-------	--	----

5.2.2	Sismómetro Lennartz LE-3D/5s	50
-------	------------------------------	----

5.3	Estación de registro Orion (Nanometrics) con sensor Mark L-4C-3D	51
------------	---	-----------

5.3.1	Sistema de adquisición digital Orion (Nanometrics)	51
5.3.2	Sensor Mark L-4C-3D	53
5.4	Equipos Syscom	54
5.5	Mantenimiento de los equipos	55
5.6	Instrumentación utilizada durante las campañas experimentales	55
6	<i>Tratamiento de los datos</i>	57
6.1	Obtención de los datos	58
6.1.1	Equipo Lennartz+Mark	58
6.1.2	Equipo Pdas+Lennartz	58
6.1.3	Equipo Orion+Lennart	58
6.2	Uniformización de los datos	61
6.2.1	Conversión al movimiento del suelo	61
6.2.2	Filtrado de las señales	63
6.3	Conversión al dominio de las frecuencias	65

Tercera parte

7	<i>Resultados</i>	71
7.1	Características de las señales sísmicas generadas por aludes de nieve	72
7.1.1	Características en el dominio temporal	74
7.1.2	Características en el dominio frecuencial	81
7.1.3	Características en el dominio tiempo-frecuencia	82
7.2	Comparación entre señales sísmicas generadas por aludes de nieve y señales sísmicas generadas por otras fuentes	93
7.2.1	Comparación entre SSA y señales de terremotos	93
7.2.2	Comparación entre SSA y señal de una explosión y un helicóptero	97
7.3	Correlación entre señales sísmicas e imágenes de aludes	99
7.4	Correlación entre señales sísmicas y señales de radar FMCW	103
8	<i>Conclusiones</i>	111
9	<i>Propuestas de líneas futuras de trabajo</i>	115
	<i>Índice de figuras</i>	117
	<i>Índice de Tablas</i>	123
	<i>Bibliografía</i>	125

1 Introducción: objetivos y contenido de la tesis

El aumento de población y la mejora de la tecnología en algunos países montañosos ha dado lugar a un aumento en la construcción de viviendas e infraestructuras en las zonas de alta montaña. Esta evolución social ha tenido como consecuencia que el peligro natural de los aludes de nieve se haya convertido en un riesgo natural cada vez más importante. El aumento de la vulnerabilidad ante los aludes de nieve provoca un interés social creciente en la prevención y mitigación de este riesgo natural.

El estudio de señales sísmicas generadas por aludes de nieve se inició en la Universitat de Barcelona (UB) y en colaboración con el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) en 1993. Los primeros estudios estuvieron basados en una larga colección de señales de origen desconocido que habían sido obtenidas por el ICC desde 1988 en una estación sísmica instalada en los Pirineos catalanes (Vall de Varradòs). A partir de 1994 se inició una nueva etapa experimental de obtención de señales de aludes, con el fin de desarrollar un sistema de detección y de estudiar la dinámica de los aludes a partir de las señales generadas. La autora de esta tesis se incorporó al equipo de aludes de la UB en el año 1999, por lo que no participó en las campañas experimentales anteriores a ese año. Todos los datos recogidos en las campañas anteriores, fruto del trabajo de las personas que entonces componían el equipo de aludes, fueron esenciales para las siguientes campañas y para la realización de esta tesis.

Los objetivos de esta tesis son dos, por una parte se pretenden determinar las características de las señales sísmicas generadas por aludes de nieve con el fin de diseñar un sistema de detección. Una mejora en los sistemas de detección de aludes implicaría una mejora en los sistemas de predicción y alarma de este peligro natural. Por otra parte se pretende obtener más información sobre el fenómeno del alud mediante el estudio de las señales sísmicas que genera. La investigación sobre la dinámica del fenómeno es fundamental para una posterior mejora de los modelos que permitan afinar en la zonificación del territorio y en el diseño de obras de defensa.

La tesis se estructura en tres partes principales y un Anexo. En la primera parte se introducen los conceptos básicos sobre los aludes de nieve. Se explica la posible aportación del método sísmico a los métodos de prevención y mitigación del peligro de aludes y se incluyen los antecedentes sobre la temática de este estudio.

La segunda parte contiene información sobre las zonas experimentales, explicaciones técnicas sobre los instrumentos utilizados y el tratamiento numérico que se ha dado a los datos.

En la tercera parte se presentan los resultados obtenidos. Los resultados contienen la caracterización de las señales sísmicas generadas por aludes en el dominio temporal, el dominio frecuencial y el dominio tiempo-frecuencia. Junto a la caracterización de las señales se presenta una comparación de éstas con las señales generadas por sismos locales, sismos regionales, telesismos, la señal de una explosión y la señal generada por un helicóptero. Los resultados también incluyen la correlación de señales sísmicas con imágenes de vídeo y con datos de radar. Esta tercera parte se termina con la presentación de las conclusiones de la tesis y las propuestas futuras de estudio.

Los resultados de este trabajo se basan en una colección de datos experimentales adquiridos desde el año 1996 hasta el presente, 2003. Estos datos se presentan en el Anexo de la tesis. Actualmente el número de registros sísmicos generados por aludes de nieve publicados y por tanto, disponibles para la comunidad científica, es escaso. Por esta razón se creyó interesante adjuntar todos los datos experimentales obtenidos hasta el momento por el equipo de aludes, con el fin de ofrecer una colección de registros que pueda servir en un futuro a la comunidad científica. Nuestra colección consta de registros de aludes de diferentes

tipos de flujo, diferentes dimensiones y diferentes posiciones y distancias relativas entre alud y sensor. Los registros se han realizado en los valles de Boí Taüll y Núria (Pirineos catalanes) y en Vallée de La Sionne (Alpes suizos). Las explicaciones de las campañas adjuntan todos los datos de campo de los aludes. Para cada registro se comenta la duración temporal del mismo, el orden de magnitud de las máximas amplitudes y el contenido frecuencial de la señal asociada al alud. Junto a los registros se muestra el contenido frecuencial del ruido de fondo con el fin de descartar señales generadas por fuentes ajenas al alud y no atribuir falsas características a los registros generados por los aludes de nieve. Todos los datos presentados en el Anexo fueron tratados partiendo de los datos originales de cada equipo para asegurar un tratamiento homogéneo.

2 Introducción al fenómeno del alud de nieve

2.1 Características de los aludes de nieve

Existen diversas definiciones del fenómeno del alud de nieve, a continuación se citarán tres definiciones utilizadas por entidades relevantes en este campo:

- Un alud es una masa de nieve que se desprende y desciende por la ladera de una montaña (Association national pour l'étude de la neige et des avalanches - ANENA, 2002).
- Se entiende por alud el desprendimiento de una masa de nieve, de dimensiones y recorrido variables, en una ladera (Institut Cartogràfic de Catalunya - ICC, 2002).
- Un alud es un desplazamiento rápido, por gravedad, superior a 1 m/s de una masa de nieve sobre un terreno inclinado (Snow avalanche modelling and mapping in Europe – SAME, 2000).

El concepto de alud utilizado en esta tesis se ajusta a las definiciones de ANENA y ICC. La definición proporcionada por SAME implica el conocimiento de la velocidad del alud y este dato es desconocido para la mayoría de aludes estudiados en este trabajo. Estas definiciones generales comprenden una gran variedad de aludes de diferentes características. La descripción de los aludes estudiados en esta tesis seguirá el criterio de la nomenclatura (*Tabla 2-1*) elaborada por el Cemagref y por el Centre d'Etudes de la Neige (CEN) en el año 2000 y que fue elaborada sobre la base de la nomenclatura internacional y el trabajo realizado por ANENA. Previamente se distinguen las tres zonas principales del recorrido del alud (*Figura 2-1*):

- **Zona de salida:** es la zona donde la nieve inestable empieza a moverse. En esta zona hay una aceleración significativa de la masa de nieve.
- **Zona de trayecto:** es la pendiente bajo la zona de salida que conecta la zona de salida con la zona de depósito. La velocidad del alud alcanza su máximo valor y las aceleraciones y desaceleraciones en esta zona no son significativas desde el punto de vista de la modelización actual. En esta zona se producen las incorporaciones y/o pérdidas de nieve.
- **Zona de depósito:** es el área donde la desaceleración es rápida, el flujo se deposita y el alud se detiene.

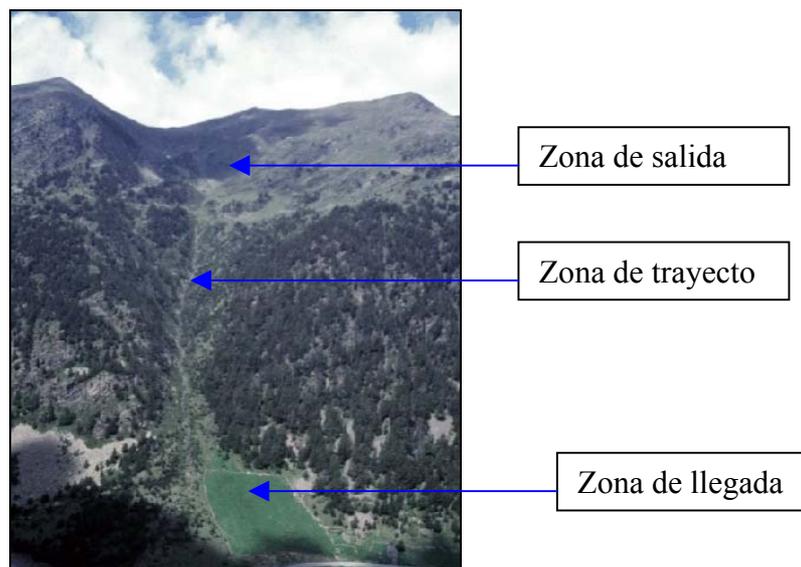


Figura 2-1 Zonas principales del desarrollo de un alud de nieve. Fotografía realizada por Pau Ferrer Roura.

ZONAS	CRITERIOS		CARACTERÍSTICAS DISTINTAS
Zona de salida	Tipo de salida		<ul style="list-style-type: none"> Salida espontánea: causas internas del manto nivoso (alud espontáneo). Salida provocada: causas externas al manto nivoso (alud provocado). Las causas pueden ser antrópicas o no antrópicas. Las causas antrópicas incluyen las involuntarias (alud accidental) y las voluntarias (alud artificial).
	Forma de salida		<ul style="list-style-type: none"> Salida puntual: alud que parte de un punto. La salida tiene forma de pera o de cono (alud de salida puntual). Salida lineal: alud que parte de una línea (alud de placa).
	Calidad de la nieve	Contenido en agua líquida	<ul style="list-style-type: none"> Contenido nulo (alud de nieve seca). Contenido débil (alud de nieve húmeda). Contenido fuerte (alud de nieve mojada).
		Cohesión	<ul style="list-style-type: none"> Débil (alud de nieve pulverulenta). De débil a moderada (alud de placa friable). Fuerte (alud de nieve de placa dura).
		Tipo de nieve	<ul style="list-style-type: none"> Reciente (alud de nieve reciente). Evolucionada (alud de nieve transformada).
Posición del plano de deslizamiento		<ul style="list-style-type: none"> Dentro del espesor del manto nivoso (alud de superficie). Sobre el suelo (alud de fondo). 	
Zona de trayecto	Forma del terreno		<ul style="list-style-type: none"> Pendiente abierta (alud de vertiente). Canal o garganta (alud confinado).
	Dinámica o tipo de flujo		<ul style="list-style-type: none"> Con 'nube' (aerosol) de partículas de nieve (alud mixto*): <ul style="list-style-type: none"> En el frente (alud de aerosol). Detrás del frente (alud con estela). Sin 'nube' (alud de flujo). Alud formado sólo por la nube (alud de aerosol puro*).
	Nieve incorporada		<ul style="list-style-type: none"> Con incorporación (alud con nieve incorporada). Sin incorporación (alud sin nieve incorporada).
	Presencia de bloques y/u otros elementos		<ul style="list-style-type: none"> Con bloques y/u otros elementos (bloques de nieve, rocas, árboles, etc.) (alud con bloques). Sin bloques (alud sin bloques).
Zona de depósito	Rugosidad superficial		<ul style="list-style-type: none"> Débil (alud con depósito fino). Fuerte (alud con depósito rugoso): bloques, bolas.
	Calidad de la nieve		<ul style="list-style-type: none"> Húmeda (alud con depósito húmedo). Seca (alud con depósito seco).
	Suciedad visible		<ul style="list-style-type: none"> Con suciedad visible (alud contaminado): tierra, rocas, árboles. Sin suciedad visible (alud limpio).

Tabla 2-1. Nomenclatura de los aludes elaborada por Cemagref y por el Centre d'Etudes de la Neige (CEN) en el año 2000. (*) Clasificación ligeramente modificada de la fuente original.

2.2 Modelización del alud de nieve

Dado que el objeto de estudio de esta tesis son las señales sísmicas generadas por aludes de nieve, el conocimiento sobre este fenómeno sismogénico es un paso imprescindible a la hora de comprender las señales que puede generar. En esta sección se da una visión del conocimiento de este fenómeno a partir de los trabajos de modelización llevados a cabo hasta la actualidad. La gran variedad de modelos teóricos (*Tabla 2-2*) refleja la complejidad de la dinámica del alud de nieve.

Los modelos numéricos de aludes de nieve calculan parámetros del alud (presión de impacto, máximo recorrido, velocidad, etc.) a partir de modelos físicos y matemáticos que simulan este fenómeno. En la *Figura 2-2* se muestra un fotograma de la grabación en vídeo de un alud mixto provocado en el valle experimental de La Sionne. La observación visual de este fenómeno solo permite ver la capa externa formada por la nube del aerosol, los procesos que ocurren bajo esa nube siguen presentando muchas incógnitas para los modelizadores. En los valles experimentales se obtiene información que se incorpora a los modelos. Por ejemplo se obtienen datos sobre densidades de flujo, presiones de impacto y velocidades, depósitos y efectos de erosión y destrucción producidos por los aludes. También son importantes los datos experimentales obtenidos en los laboratorios, que permiten estudiar algunos de los parámetros que caracterizan los materiales involucrados en los aludes. El estado actual de desarrollo permite disponer de modelos matemáticos razonables y técnicas numéricas eficientes. Los problemas principales son la falta de modelos de incorporación y deposición de nieve y la selección de las condiciones iniciales y de contorno para cada aplicación del modelo. A pesar de estas dificultades los modelos recientes son capaces de hacer simulaciones razonables para las zonas de máxima llegada y en las distribuciones de presiones de impacto.



Figura 2-2. Fotografía de un alud mixto provocado artificialmente en el valle experimental de La Sionne el 30 de enero de 1999. Fotograma cedido por el Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research (SLF).

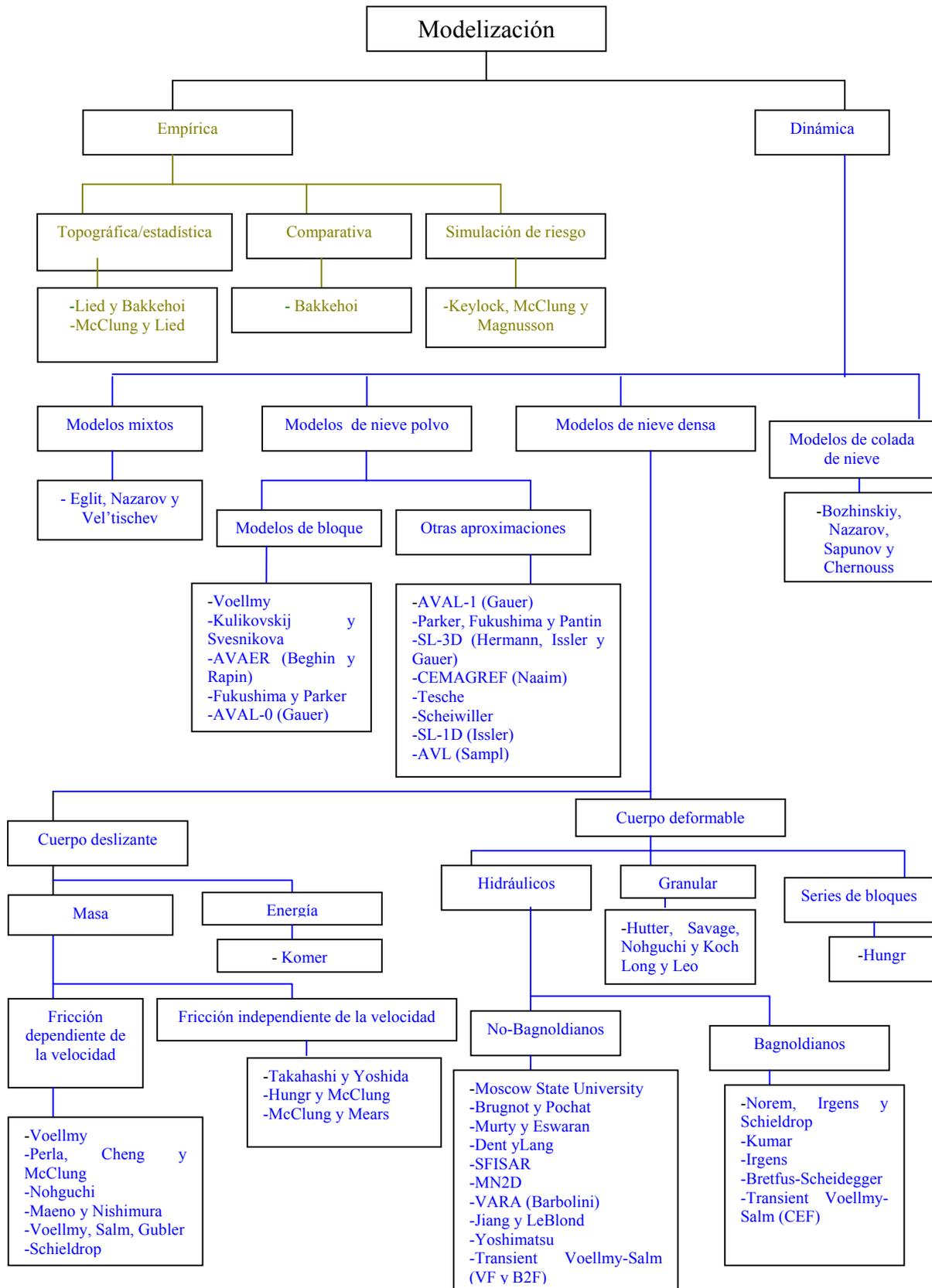


Tabla 2-2. Esquema general del estado actual de la modelización de aludes de nieve (Harbitz y otros, 1998). En el esquema se presentan los diferentes tipos de modelización, los nombres de los modelos y sus autores.

En la *Tabla 2-2* se presentan los tipos principales de modelos teóricos desarrollados hasta la actualidad y sus autores. La comunidad científica dedicada a la modelización de aludes de nieve ha trabajado en dos líneas principales (Harbitz y otros, 1998): los modelos dinámicos y los modelos empíricos. Los modelos dinámicos calculan parámetros del alud simulando la dinámica del alud mediante modelos de centros de masa o teoría de fluidos. En cambio, los modelos empíricos calculan parámetros del alud a partir de estudios estadísticos y comparativos basados en datos históricos. A continuación se comentarán estas dos líneas de trabajo haciendo referencia a algunos de los modelos presentados en la *Tabla 2-2* y por último se resumirán las consideraciones que se deben de tener al tratar el alud como una fuente sísmica.

2.1.1 Modelos dinámicos

La línea de investigación de los modelos dinámicos incluye diferentes teorías según el tipo de alud que se estudia. A continuación comentaremos algunos de los ejemplos de la modelización utilizada para los tres tipos de aludes estudiados en esta tesis: los aludes de flujo, los aludes de aerosol puro y los aludes mixtos.

- Modelos de aludes de flujo

Los aludes de flujo son aquellos que no presentan componente aerosol durante su desarrollo. Los modelos desarrollados para este tipo de aludes se dividen en modelos de cuerpo rígido y modelos de cuerpo deformable.

i) Los modelos de cuerpo rígido son modelos de centro de masa. Este tipo de modelos tienen las ventajas de la simplicidad y la facilidad a la hora de la computación pero presentan el problema de ser modelos sobresimplificados. Siguiendo a Bartelt (2000) el trabajo de Voellmy en 1955 fue el primer intento de descripción matemática del movimiento del alud. Este estudio consideraba una masa deslizante como un fluido infinito sobre el que actúan dos tipos de fricción, una fricción turbulenta (ξ) y un término de fricción de Coulomb (μ). A partir de este modelo se desarrollaron otros modelos unidimensionales de centro de masa. Un ejemplo relevante es el modelo modificado Voellmy-Salm-Gubler que fue utilizado para determinar los mapas de peligrosidad actuales de Suiza. En este modelo se refleja que hay tres partes de la trayectoria del alud que presentan dinámicas diferentes (*Figura 2-3*): una zona de salida, una zona de trayecto donde se consigue la máxima velocidad y una zona de llegada donde se produce la desaceleración. Para su resolución se debe determinar el punto P. Este punto divide físicamente el curso del alud en la zona de aceleración, donde $\tan\psi > \lambda$, y la zona de desaceleración, en la que se cumple $\tan\psi < \lambda$, donde λ es el coeficiente de rozamiento interno y ψ el ángulo medio de inclinación de la pendiente. En este modelo se resuelve analíticamente la ecuación del movimiento para el centro de masas (*Ec. 2-1*) para cada zona suponiendo un flujo constante para toda la trayectoria. El resultado del modelo son las velocidades y las alturas del flujo para cada trayectoria.

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g \sin\psi - \mu \rho g \cos\psi - \frac{\rho g}{\xi h}$$

Ec. 2-1

Este tipo de modelos está siendo abandonado por su excesiva simplificación. Con ellos no se pueden calcular parámetros necesarios a la hora del cálculo de peligrosidad como puede ser la presión de impacto y tampoco pueden incorporarse características del alud que los aproxime más a la realidad, como por ejemplo la incorporación de nieve a lo largo del recorrido. Además, los parámetros de estos modelos carecen de sentido físico, son en definitiva parámetros calibradores del modelo, determinados con criterio de experto.

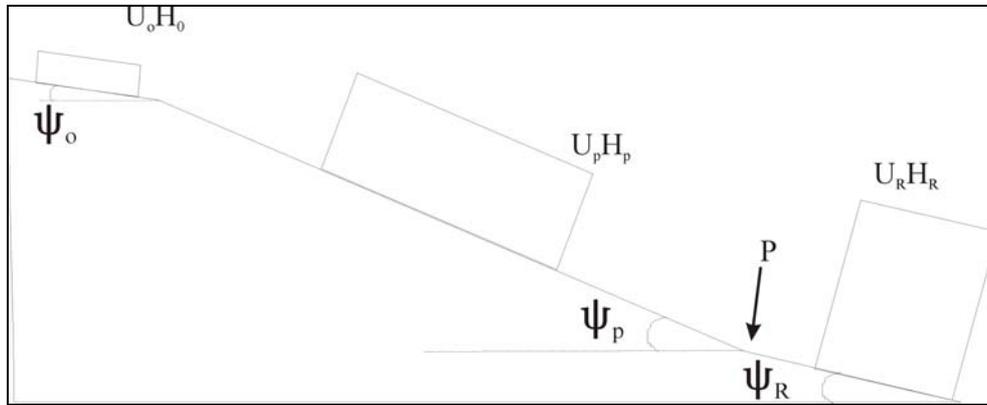


Figura 2-3. Esquema del modelo de Voellmy-Salm-Gubler. La trayectoria está dividida en tres segmentos, a cada segmento se le asocia una pendiente media ψ . Se modeliza el alud como un bloque deslizante de altura H y velocidad U , diferentes para cada zona de trayecto.

ii) Actualmente se está haciendo un esfuerzo para desarrollar modelos que tengan un mayor realismo, son los llamados modelos dinámicos de cuerpo deformable. Los modelos dinámicos de cuerpo deformable se describen como modelos hidráulicos de medio continuo y utilizan las ecuaciones de conservación de la masa y el momento. Estos modelos son similares a los modelos utilizados para fluidos en canal abierto. La aproximación de medio continuo hidráulico es capaz de modelar la dispersión del alud cuando baja y es capaz de reproducir características realistas de los depósitos. Los problemas principales en este tipo de modelos están relacionados con la compresión y la descripción de las propiedades de materiales que difieren considerablemente entre el flujo y el depósito. Para la resolución de este tipo de modelos se aplican los principios de conservación de masa y el equilibrio entre fuerzas para un flujo continuo de nieve. La base por tanto de estos modelos son las ecuaciones de conservación de masa y movimiento (Ec. 2-2). Se supone flujo no estacionario y no uniforme y se modela como un fluido Voellmy. Algunos ejemplos relevantes son el modelo bidimensional MN2D, implementado por Naaim y Ancey (Naaim y Ancey, 1995) y el modelo cuasi-bidimensional SFISAR explicado en Barbolini (Barbolini y otros, 2000). Estos modelos se resuelven numéricamente utilizando esquemas de diferencias finitas.

$$\left. \begin{aligned} W \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(WUH)}{\partial s} &= 0 \\ \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial s} &= g \sin \psi - \mu g \cos \psi - \frac{gU^2}{\xi R} - \lambda g \frac{\partial H}{\partial s} \cos \psi \end{aligned} \right\} \text{(ej. modelo bidimensional)}$$

Ec. 2-2

Donde, H : altura media del fluido; W : anchura media del fluido; U : velocidad media; ψ : pendiente media; μ, ξ y λ : parámetros de fricción de Voellmy-Salm

- Modelos de aludes de aerosol puro

Los modelos matemáticos para aludes de aerosol puro describen el flujo de partículas como un fluido turbulento de dos componentes, aire y nieve. Estos modelos de densidad de corriente están basados en balances locales de masa y momento lineal. Las ecuaciones básicas son las ecuaciones para turbulencias de Reynolds. Las consideraciones de los parámetros y los tratamientos de la incorporación de aire dependen de cada escuela. Como ejemplos importantes encontramos los modelos tratados en la Universidad de Moscú (Eglit, 1998), el modelo francés AVAER (Rapin, 1995) y el modelo suizo SL-1D (Issler, 1998) que describe los aludes aerosol en términos de capas separadas de saltación y suspensión para analizar la incorporación de nieve en términos de los procesos físicos elementales que son responsables de los detalles de las simulaciones numéricas.

- Modelos de aludes mixtos

Los modelos mixtos intentan describir la componente densa y la componente aerosol del alud y también la parte mixta entre ambas. En principio, el alud mixto puede ser descrito por un modelo universal de dos fases: una para aire y otra para partículas de nieve. Desafortunadamente los modelos de dos fases son muy complejos y tienen muchas incertidumbres, especialmente para las fases de alta densidad de partículas. En la práctica los modelos mixtos están formados por un submodelo para el flujo denso, otro para el aerosol y un tercer submodelo que describe el intercambio de masa y de momento entre las dos capas. La capa de intercambio se conoce como capa de transición o saltación (*Figura 2-4*), a través de ella la concentración de partículas disminuye desde la capa densa hasta la capa de suspensión. La gravitación, la interacción aire-partícula y la interacción partícula-partícula son las fuerzas que controlan la incorporación de nieve en la capa aerosol. Hasta el momento se han formulado pocos modelos mixtos, un ejemplo es el reciente modelo de Turnbull y Bartelt (2002). Este es un modelo 1D para aludes mixtos compuesto por cuatro componentes básicas (*Figura 2-4*): la capa de nieve, el núcleo de flujo denso, la nube de aerosol y la estela turbulenta. La capa de nieve se incorpora en el núcleo de flujo denso y en la nube aerosol. El movimiento de la nube de aerosol viene descrito por el balance de momento entre las partes fluidas y las partes de aerosol y la incorporación de aire.

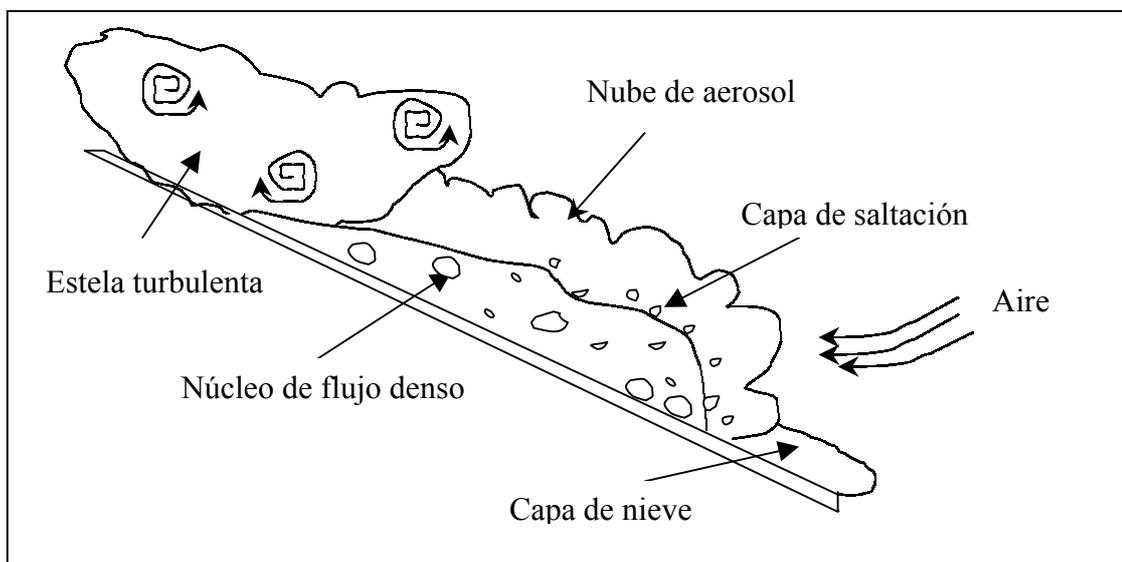


Figura 2-4. Esquema de las partes del alud que intervienen en el modelo mixto de Turnbull y Bartelt (2002).

2.1.2 Modelos empíricos

Los modelos empíricos no estudian la dinámica de los aludes si no que son modelos estadísticos o comparativos basados en datos históricos. A pesar de no aportar nueva información sobre la dinámica del fenómeno se citarán aquí para que la visión de la modelización de los aludes quede completa.

Los modelos empíricos incluyen dos tipos de modelización: los modelos topográficos o estadísticos de zona de máxima llegada y los modelos comparativos. Los modelos topográficos o estadísticos establecen relaciones estadísticas entre parámetros del terreno y la zona de máxima llegada de aludes históricos. Los datos de aludes históricos son deducidos a partir de observaciones de campo (i.e. Furdada y otros, 1998 y i.e. estudios de dendrología en Molina y otros, en prensa). Los modelos comparativos están basados en métodos que evalúan la similitud entre diferentes zonas de trayecto de aludes y después establecen comparaciones entre ellos. Un ejemplo de modelo estadístico implementado en los Pirineos fue elaborado por Furdada (1996).

Este tipo de modelos tienen dos ventajas importantes: su simplicidad y su derivación directa de datos históricos. No obstante estos modelos no dan información sobre la velocidad del alud, el impacto potencial y otros parámetros importantes a la hora de cartografiar peligrosidades.

2.3 El alud como fuente sísmica

A pesar de las limitaciones e incertidumbres que existen actualmente sobre el fenómeno del alud podemos suponer una serie de características que influirán a la hora de tratar el alud como una fuente sísmica:

- i) Consideraremos el alud como un conjunto de múltiples fuentes sísmicas asociadas a la interacción de las componentes del alud con el suelo, los obstáculos que encuentra en su trayectoria y el aire.
- ii) El número de fuentes sísmicas que forman el alud varía a lo largo de su desarrollo.
- iii) Las fuentes son móviles, es decir las distancias entre fuentes y sensor variarán a lo largo del desarrollo del alud.
- iv) Las velocidades de las fuentes variarán durante el desarrollo del alud.
- v) La masa y dimensión de las fuentes variará durante el desarrollo del alud, considerando que hay incorporación de nieve y otros elementos (tierra, rocas, árboles, etc.).
- vi) La dinámica de estas fuentes será variada (fuentes con dinámicas turbulentas, fuentes con dinámicas deslizantes, etc.).

En la interpretación de las señales sísmicas producidas por aludes de nieve se tendrán en cuenta estas características.

3 Aportación de la sísmica a la prevención y mitigación del riesgo de aludes de nieve

El aumento de la vulnerabilidad ante los aludes de nieve provoca un interés social creciente en la prevención y mitigación de este riesgo natural. Uno de los métodos que intervienen actualmente en la gestión de este riesgo natural son los mapas de zonificación de peligrosidad. Estos mapas están basados en cartografías realizadas por expertos, basadas en datos de campo, datos proporcionados por observadores y datos proporcionados por modelos teóricos. El buen uso de los mapas de peligrosidad ayuda a la prevención de posibles daños causados por los aludes.

Otro método de prevención son los modelos de predicción de peligro de aludes. Estos modelos de predicción están basados en datos nivometeorológicos y generan como resultado la zonificación del territorio según el grado de peligrosidad. Estos mapas son presentados en forma de boletines de peligro de aludes (García y otros, 2003), generalmente por organismos públicos y pueden ser consultados por la población interesada (montañeros, esquiadores, etc.). Además de los métodos de prevención existen métodos de protección que mitigan el riesgo existente en viviendas e infraestructuras que ya están construidas pero se encuentran en zonas de peligro significativo. Estos métodos se pueden clasificar en cuatro tipos (Rapin, 1992):

- Protección activa permanente: métodos que impiden o dificultan la formación del alud permanentemente durante toda la temporada de peligro. Por ejemplo paravientos que previenen la sobreacumulación, reforestación, cambio de uso del suelo y vallas de soporte a la capa de nieve.
- Protección activa temporal: métodos que impiden o dificultan la formación del alud únicamente en momentos de peligro. Por ejemplo lanzamiento de explosivos (Meffre, 2003) para purgar las laderas e impedir la formación de grandes aludes.
- Protección pasiva permanente: métodos de protección ante un alud que se instalan de forma permanente. Por ejemplo muros de protección, diques de desvío, muros de frenado y refuerzos adicionales en las construcciones.
- Protección pasiva temporal: métodos de protección ante un alud que se utilizan únicamente en momentos de peligro. Por ejemplo planes de evacuación o cortes de carreteras y vías de tren.

Las posibles aportaciones de la sísmica en la gestión del riesgo de aludes son básicamente dos: la sísmica como sistema de detección y la sísmica como método de estudio del fenómeno del alud de nieve.

Es importante aclarar que en esta tesis no se considera la sísmica como método de predicción por las siguientes razones: el uso de la sísmica como método de predicción implicaría la existencia de un evento sismogénico que precediera al alud en un tiempo suficiente como para poder generar una alarma. El fenómeno que se produce previo al alud es la acumulación de nieve sobre la vertiente y su inestabilidad es la que lo provoca. Ni la acumulación, ni el proceso de inestabilidad podría considerarse generadores de una señal sísmica detectable, al menos, hasta el momento. Es cierto que el sensor sísmico puede registrar la primera fase de desarrollo del alud pero las altas velocidades de los aludes y la limitación de distancia a la que pueden ser registrados dejan un tiempo muy pequeño (en ningún caso más de 10 minutos) para la detección del fenómeno y la generación de una alarma y por tanto esta técnica no podría servir para realizar predicciones.

3.1 Aplicación de la sismica a la detección de aludes de nieve

Como hemos justificado anteriormente, por el momento, la sismica no puede servir como técnica de predicción directamente pero sí podría mejorar otras técnicas de predicción de forma indirecta. Los sistemas de predicción utilizados actualmente para elaborar los boletines de peligro de aludes (programa DAISY, programa NIVOLOG, etc.) necesitan introducir constantemente datos nivometeorológicos para controlar la evolución del manto nival lo más precisamente posible. Un sistema automático de detección de aludes de nieve podría aportar información en tiempo casi-real sobre los aludes producidos y las laderas que se hubieran purgado. El hecho es que la observación automática presenta ventajas importantes frente a la observación humana que se ve sometida a limitaciones de accesibilidad, mala visibilidad en el caso de condiciones meteorológicas desfavorables, imposibilidad de observar durante la noche, problemas de subjetividad a la hora de proporcionar datos y problemas de detectar aludes que no dejan depósito. Frente a estos problemas la detección automática es una buena solución. Un sistema de detección automático puede contribuir de forma muy positiva en los análisis de previsiones al proporcionar información en tiempo casi-real de la actividad de avalanchas.

Otra posible contribución de la sismica como sistema de detección sería su posible uso como método de protección pasiva temporal. Es decir, utilizar la sismica para detectar aludes e integrarla en planes de emergencia como podría ser el corte de una carretera o una vía de tren por ejemplo. Actualmente existen varios métodos de detección automática y alarma además de la sismica, algunos ejemplos son: sensores puestos en la trayectoria del alud, sensores acústicos, sensores Doppler y cámaras de vídeo.

Los sensores sísmicos presentan algunas ventajas si los comparamos con los otros métodos que se utilizan actualmente en la detección y en los sistemas de alarma.

- Sensores ultrasónicos: estos instrumentos necesitan ser colgados en el canal del alud sobre estructuras de difícil instalación, sobretodo en vertientes inestables. Además los aludes pueden dañar estas estructuras a su paso.
- Alambres o cuerdas que se rompen al paso del alud: estos mecanismos no pueden detectar eventos continuos sin que haya un trabajo continuado de mantenimiento. Están sujetos a que sean rotos por animales u otros fenómenos y también presentan dificultad en su instalación.
- Velocímetros Doppler (Rammer, 2003): estos aparatos de alto coste requieren una buena visibilidad de la zona de trayecto y una estructura que los pueda sujetar y los mantenga a salvo del fenómeno.
- Cámaras de vídeo: este mecanismo necesita una buena visibilidad de la zona de trayecto así como una estructura que mantenga las cámaras y queden a salvo del alud. No es posible detectar eventos nocturnos.

Los sensores sísmicos, no obstante, también presentan una serie de desventajas frente a otros sistema:

- Limitación de la distancia a la que se puede detectar el fenómeno.
- Discriminación del alud y otras posibles fuentes sísmicas.
- Coste del equipo y lugar de instalación.

Para implementar la sismica como sistema de detección es imprescindible un estudio detallado de las características de las señales sísmicas generadas por los aludes de nieve y la posible discriminación frente a otros tipos de fuentes sísmicas.

La sismica también es utilizada actualmente para la detección de otros fenómenos naturales como los *debris flow* (Arattano, 1999 y Arattano y Moia, 1999), los movimientos de masa

(Weichert y otros, 1994) o el monitoreo de volcanes (Almendros, 2002). Por lo tanto algunos de los resultados de esta tesis podrían ser útiles en los estudios sobre detección de otro tipo de fenómenos naturales.

3.2 Aplicación de la sísmica al estudio del fenómeno del alud

Los datos aportados por los sensores sísmicos sobre los aludes son complementarios a los obtenidos por otros tipos de sensores. Es obvio que cuanto más información se tenga de este fenómeno mejor serán los modelos teóricos y por lo tanto mejor será la aportación de estos modelos en los mapas de zonificación del peligro.

Para el diseño y construcción de los métodos de protección pasiva permanente es necesario hacer previsiones de las presiones de impacto en diferentes puntos de la trayectoria del alud. Es decir, se debe conocer la velocidad y la masa del flujo del alud a lo largo de su trayectoria, de aquí la importancia de conocer mejor este fenómeno. La información adicional que proporciona la sísmica podría tener una implicación directa en la mejora de la construcción de los métodos de protección.

En esta tesis se explicará como el estudio de la señal sísmica generada por el alud está relacionada con la velocidad del alud, el tipo de flujo involucrado y la masa implicada en el alud.

3.3 Antecedentes

En esta sección se citan los estudios más relevantes sobre sismica de aludes de nieve antecedentes a la realización de esta tesis. A continuación se presentan los resultados seleccionados por su interés con el fin de contrastarlos con los nuestros en el capítulo de resultados de esta tesis. Los apartados siguientes siguen un orden cronológico según las fechas de las publicaciones de los resultados.

3.3.1 Bonneval-sur-Arc, Savoya, Francia

Entre 1977 y 1979 se llevaron a cabo múltiples registros de aludes en Vallée de Bonneval-sur-Arc, en los Alpes franceses (Bonnet, 1980). Se registraron 369 aludes de nieve con un sismómetro con sensor de desplazamiento vertical de período corto. Los registros fueron analógicos. Los resultados destacables de estos estudios son los siguientes:

- La forma de las señales sísmicas de los aludes de nieve se caracterizan por un aumento progresivo de la amplitud seguido de un decrecimiento rápido.
- Para un alud que dura 40-60 s la señal dura 60-90 s debido a la parada progresiva del alud.
- Los aludes de nieve seca tienen una frecuencia dominante de 1.5 Hz a 4 Hz.
- Se pueden detectar aludes de nieve húmeda a 5 km de distancia.
- Las señales están influenciadas por la forma del canal del alud.

3.3.2 La Plagne, Francia

En 1983 el Centre d'Etudes de la Neige (CEN) inició su primera campaña de registros sísmicos de aludes de nieve en la estación de esquí de La Plagne, en Francia (Lafeuille, 1985). El objetivo de esta campaña era medir la actividad de avalanchas para incorporar esta información en los servicios de previsión de riesgos de aludes y mejorar la seguridad. Se destacó la necesidad de un sistema de observación automático, instalado en la alta montaña que salvara los problemas que implica la observación humana (limitación de accesibilidad a las zonas de aludes, limitaciones en la visibilidad debidas al clima, subjetividad del observador, etc.). En la primera campaña invernal se detectaron más de 100 aludes en un sismógrafo vertical de período corto con registros. Los registros fueron analógicos. Aplicaron un filtro pasa altas de 1 Hz para evitar los telesismos y la microsismicidad de fondo y un filtro pasa bajas de 10 Hz, para evitar el ruido producido por los remontadores mecánicos de la estación de esquí. Los resultados a destacar en estos estudios son los siguientes:

- Las señales generadas por aludes se sitúan en la banda frecuencial de 2-9 Hz.
- Es posible discriminar los aludes por su envolvente ya que la envolvente de la señal del alud presenta un aumento progresivo y las otras señales presentan un principio brusco.
- Las señales de aludes tienen variaciones de amplitud brusca cuando el alud pasa por una barrera rocosa.
- La señal del alud no presenta la coherencia de fases de los sismos ya que las fases aparentes de la señal del alud son debidas a la dinámica del alud.
- La frecuencia de la señal del sismo es constante pero la del alud no, porque tiende a aumentar.
- Se detectaron aludes en un radio de 6 a 10 km.
- La frecuencia de la señal de los aludes disminuye al pasar de aludes detectados a distancias de 1 km (5 a 10 Hz) a aludes detectados a distancias de 10 km (3 a 7 Hz).

- Los aludes de fondo (aludes que erosionan a su paso toda la capa de nieve) generan señales de frecuencia y amplitud superiores a los aludes superficiales (aludes que no erosionan la capa de nieve) ya que estos últimos están filtrados por el manto de nieve.
- Ciertos canales de alud presentan envolventes característicos.
- La señal sísmica puede contribuir en la información de la dinámica del alud. Los aludes de nieve densa se caracterizan por un aumento brusco de la amplitud después de la detención del alud. En cambio en los aludes de aerosol se observa el aumento progresivo y también la disminución regular.
- A partir del catálogo de registros conseguido en la estación de La Plagne, el CEN empezó unos estudios (Navarre, 1987) dirigidos al diseño de una estación automática de detección de aludes a partir de registros sísmicos.

3.3.3 Vall de Varradòs, Vall d'Aran, España

En 1988 se instaló un sismógrafo digital en Vall de Varradòs, en los Pirineos catalanes (Furdada y otros, 1991). Desde 1988 hasta 1992 se utilizó un sensor vertical, modelo Ranger SS-1 de Kinematics, con período propio de 1 segundo. Durante el período de 1992 a 1993 se utilizaron tres sensores, uno en posición vertical y dos en posición horizontal, también del modelo Ranger SS-1. Finalmente durante 1993 hasta 1994 se utilizó un sensor de tres componentes, L4-3D Mark con período propio de 1 segundo. Junto a estos sensores funcionó una estación de registro modelo PDR-1 de Kinematics, con una frecuencia de muestreo de 100 m.p.s. y un sistema de *triggering* de STA=0.5 y LTA=20. La estación registró un total de 168 aludes. Las señales fueron estudiadas por investigadores del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) y por el equipo de aludes de la Universitat de Barcelona (UB). Los resultados de los análisis temporales y frecuenciales fueron los siguientes (Olivera y otros, 1995) (Sabot y otros, 1995):

- Las componentes horizontales son más energéticas que la vertical.
- Las señales sísmicas de los aludes presentan amplitudes máximas en [15-45] Hz.
- Se observaron dos tipos de señales, unas señales cuyo espectro presentaba una frecuencia principal y otras cuyo espectro presentaba unas amplitudes crecientes en función de la frecuencia.

3.3.4 Monte Cheget, Rusia

En 1988, un equipo de investigadores rusos llevó a cabo experimentos sobre aludes de nieve donde registraban el fenómeno con una estación sísmica analógica y una acústica (Firstov y otros, 1991). Registraron un total de 5 aludes en la ladera norte del Monte Cheget, en Rusia. Los aludes fueron provocados artificialmente. Se obtuvieron datos de los aludes mediante observaciones de campo y grabaciones fotográficas (2 imágenes por segundo). Los resultados destacables de estos estudios son los siguientes:

- Comparando los registros sísmicos con los acústicos se dedujeron velocidades de las ondas sísmicas de 1,2 km/s.
- A partir de la baja velocidad de las ondas sísmicas se deduce que la señal contiene mayoritariamente ondas superficiales.
- La señal sísmica es generada por la parte densa del alud al descender. La energía cinética de la parte del alud en movimiento se convierte parcialmente en vibraciones elásticas cuando el frente del alud impacta en obstáculos.
- Los incrementos de amplitud de la señal sísmica coinciden con descensos de velocidad del frente del alud al encontrar obstáculos en su trayectoria.

3.3.5 Valle de Shiai-Dani, Cañón de Kurobe, Japón

En 1990 se empezaron a hacer registros sísmicos de aludes de nieve en el valle experimental de Shiai-Dani, en Japón (Nishimura y otros, 1993; Nishimura e Izumi, 1997). El objetivo de estas medidas directas era la investigación de la estructura de aludes naturales y su dinámica. Este valle experimental tiene una ladera equipada con una cámara de vídeo para medir la velocidad del frente del alud, sensores de presión de impacto, sensores para medir el viento producido por el flujo del alud y sismógrafos. Los instrumentos se encuentran en medio del canal de alud. El canal tiene un desnivel de 1000 m y 33° de inclinación media. Los resultados destacables de estos estudios son los siguientes:

- La señal sísmica es generada por la parte densa del flujo del alud.
- Es posible discriminar entre señales sísmicas de aludes y de terremotos.
- La señal del alud depende fuertemente de la topografía del trayecto del alud.
- Se calcularon espectros corridos de ventanas temporales de 2 s con el método de máxima entropía. En los espectros corridos se observa que la frecuencia dominante de la señal del alud aumenta con el tiempo a medida que el alud se acerca al sensor.

3.3.6 Monte St. Helens y Monte Adams, Washington, USA

En 1994 se publicaron los resultados sobre estudios de registros sísmicos de aludes de nieve ocurridos en los montes St. Helens y Adams, en USA (Norris, 1994). Estos montes se encontraban a 67 km y 64.5 km respectivamente de una estación de la red sísmica americana. Se disponía de un catálogo desde 1960 dentro del cual, además de registros de terremotos, había registros de grandes caídas de piedras, movimientos de glaciares, *debris flow* y aludes de nieve. Los registros analógicos eran de un sensor de desplazamiento de componente vertical de corto período. Se estudiaron aludes históricos de los que se disponía de fotos aéreas. Los resultados a destacar de estos estudios son los siguientes:

- Los movimientos de masa grandes y rápidos son sismogénicos.
- Se detectó a 67 km de distancia un alud de nieve con rocas involucradas de un volumen estimado de $5.2 \cdot 10^5 \text{ m}^3$, del cual $1 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ eran roca. La señal tenía una amplitud media de 2.3 mm.
- Se detectaron a 67 km de distancia aludes de nieve y hielo de volúmenes entre 10^5 y 10^6 m^3 . Las señales tenían una amplitud entre 2 y 4 mm.

3.3.7 La Lavey y Saint-Christofe, Francia

El Centre d'Etudes de la Neige instaló dos sismógrafos en 1992 en los emplazamientos de La Lavey y Saint-Christofe, en los Alpes franceses (Lepretre y otros, 1996). Estos sismógrafos consiguieron registrar 200 señales de aludes que sirvieron como base para el diseño de un sistema automático, a tiempo real, de análisis/decisión que distinguía los aludes de otras señales. Este sistema fue probado durante el invierno de 1995/96 con resultados satisfactorios (Lepretre, 1996). Los equipos instalados consistían en sensores de tres componentes con respuesta plana entre 2 y 40 Hz. El sistema de registro era digital y consistió en un sistema de *triggering* STA/LTA funcionando con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Este sistema de registro se diferenciaba del sistema utilizado en las redes sísmológicas en que almacenaba un preevento y un postevento más largos para el posterior análisis de las señales. El método de detección automática se basaba en tres tipos de análisis: un análisis

temporal, otro frecuencial y otro de polarización. Las características en las que se basaba el sistema eran las siguientes:

- En el dominio temporal se valora la duración de la señal, la media de la amplitud y el parecido de la envolvente con la de un terremoto o la de un alud. Las señales con incrementos suaves en las amplitudes tienen una probabilidad más alta de ser aludes que aquellas que presentan cambios bruscos en sus amplitudes (tiros, pisadas,...). La envolvente también se compara con la de un terremoto típico.
- En el dominio frecuencial se valora el contenido monofrecuencial de alta frecuencia, el contenido monofrecuencial de baja frecuencia, el componente frecuencial típico de un helicóptero, el contenido frecuencial en toda la banda y el aumento o disminución en el tiempo de la frecuencia dominante.
- Polarización de la señal: la señal se filtra con el método de Capon en las frecuencias dominantes y se buscan las ventanas temporales en las que haya polarización lineal con el fin de calcular el acimut.

Estas características eran ponderadas y el sistema finalmente daba un resultado porcentual de la posibilidad de que el evento fuera un alud o no. El tiempo estimado entre la detección del evento y la toma de decisión era de aproximadamente 2 horas. El rango de detección del sistema era de un radio de 6 km y de 11 km para aludes grandes pero el sistema no podía detectar aludes pequeños a 600 m del sensor por problemas del sistema de *triggering*. En los resultados se señala la importancia de la elección de un buen emplazamiento sísmico.

Durante los años 1997, 1998 y 1999 el sistema siguió funcionando y mejorándose (Navarre, 1999). El sistema identificó 12 aludes de un total de 283 señales. En el artículo de Leprettre (1998) se explican los métodos numéricos utilizados en este sistema con detalle. En Leprettre (1996) también se comenta la evolución temporal del contenido frecuencial de la señal sísmica generada por el alud de nieve. Sobre este respecto, se describe el aumento del contenido en altas frecuencias a medida que el alud se acerca al sensor. Actualmente se desconocen las causas por las cuales el CEN no utiliza este sistema de detección.

3.3.8 Boí Taüll y Vall de Núria, Pirineos catalanes, España

El grupo de aludes de la Universitat de Barcelona estudió aludes desencadenados artificialmente en las estaciones de esquí de Boí Taüll y Vall de Núria. Las descripciones de estas campañas (Boí Taüll 1995/96, Núria 1995/96, Núria 1996/97, Núria 1998/99, Núria 1999/2000) pueden consultarse en el Anexo de esta tesis. Se aplicaron conjuntamente tres métodos de análisis sobre una misma avalancha: medidas sísmicas, análisis de imágenes de vídeo y modelización numérica. Los resultados (Sabot y otros, 1995) destacables se resumen a continuación:

- 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 detección del alud.
- La simulación numérica de aludes de nieve densa puede ser una herramienta muy útil cuando las imágenes de vídeo no están disponibles.

En otros trabajos sobre estas señales destacan los siguientes resultados (Suriñach y otros, 2000 y Suriñach y otros, 2001):

- Existe una reproducibilidad en las señales sísmicas de aludes en relación con los aludes que las generan.
- Existe una diferencia de tiempo entre el inicio del alud y el inicio de la señal energética que debe tenerse en cuenta a la hora de la detección.

- Las componentes de las señales no tienen la misma energía. Esta característica depende del emplazamiento en el que son registradas. Esto debe tenerse en consideración a la hora de utilizar sismógrafos de una sola componente para detectar aludes de nieve.
- Existe una relación entre el tamaño del alud y la amplitud de la señal, este resultado ofrece la posibilidad de estimar el tamaño del alud a partir de la señal sísmica. Para esta estimación deben considerarse los efectos locales de sitio.
- La forma básica de la envolvente de la señal sísmica depende de la trayectoria del alud y del lugar en el que es registrada, pero no del tamaño del alud.
- El análisis de las señales sísmicas está enfocado a su uso como método de detección pero también pueden ser útiles para el estudio de la dinámica del alud.

3.3.9 Vallée de La Sionne, Alpes suizos, Suiza

El grupo de aludes de la Universitat de Barcelona estudió aludes desencadenados artificialmente en el Vallée de La Sionne. Las descripciones de estas campañas (Sionne 1995/96, Sionne 1996/97 y Sionne 1998/99) pueden consultarse en el Anexo de esta tesis. Los resultados del análisis de estas señales son comunes a los presentados en la sección anterior (3.3.8).