

Índice de figuras

Figura 2-1. Zonas principales del desarrollo de un alud de nieve. Fotografía realizada por Glòria Furdada Bellavista	15
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)	17
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. Se modeliza el alud como un bloque deslizante de altura H y velocidad U, diferentes para cada zona de trayecto	20
Figura 2-4. Esquema de las partes del alud que intervienen en el modelo mixto de Turnbull y Bartelt (2002)	21
Figura 4-1. Fotograma del alud de Cerví de Durro, grabado el 11 de enero de 1996 en la estación de esquí de Boí Taüll. Fotografía realizada por Joan Manuel Vilaplana Fernández	33
Figura 4-2. Mapa de peligrosidad de aludes (ICC-a,2001) que comprende la zona de Boí Taüll. Se presenta una traducción de la leyenda original	34
Figura 4-3. Mapa geológico (Geological Institute, 1968) de la zona de Boí Taüll. Se han situado sobre el mapa los emplazamientos que se utilizaron para registrar los aludes de esta zona. Se han añadido cotas sobre el mapa original	35
Figura 4-4. Mapa de peligrosidad de aludes (ICC-b, 2000) que comprende la zona de Vall de Núria. Se presenta una traducción de la leyenda original	37
Figura 4-5 Fotografía de la vertiente de Mulleres, Vall de Núria. Fotografía realizada por Glòria Furdada Bellavista	37
Figura 4-6. Mapa geológico (Instituto Tecnológico Geominero de España, 1994) de la zona de Vall de Núria. Sobre el mapa se han situado los emplazamientos donde se instalaron las estaciones. Se han añadido cotas sobre el mapa original	38
Figura 4-7. Fotografía de la caseta (izquierda) donde se dejó instalada la estación en las campañas del 1997-2003 y del sensor (derecha) instalado bajo la caseta de madera. Fotografías realizadas por Glòria Furdada Bellavista	39
Figura 4-8. Fotografía de la zona experimental de Vallée de La Sionne. Esta fotografía fue tomada desde el centro de control construido a 100 m del río de La Sionne. Fotografía realizada por Emma Suriñach Cornet	40
Figura 4-9. Cartografía de la zona experimental de Vallée de La Sionne (Office fédéral de topographie, 1992) y situación de los instrumentos instalados. CR1: Creta Bêsse 1. CR2: Creta Bêsse 2. A, B y C: emplazamientos con sensores sísmicos	41

Figura 4-10. Radar FMCW instalado en el suelo. Fotografía realizada por Glòria Furdada Bellavista	41
Figura 4-11. Caverna situada a 1900 m s.n.m, emplazamiento B de Vallée de La Sionne. En esta caverna se instalaron los sensores sísmicos y otros instrumentos de control. Fotografías realizadas por Glòria Furdada Bellavista	42
Figura 4-12. Instalación del sensor sísmico del emplazamiento C en Vallée de La Sionne. Fotografía realizada por Emma Suriñach Cornet	42
Figura 4-13. Sensores de presión, velocidad y densidad a diferentes alturas del flujo instalados a lo largo del canal de aludes. Fotografía realizada por Glòria Furdada Bellavista	43
Figura 4-14. Centro de control de los instrumentos. Fotografía realizada por Emma Suriñach Cornet	43
Figura 4-15. Mapa geológico (Atlas Geologique de la Suisse, 1942) de Vallée de La Sionne. Sobre el mapa se han situado los emplazamientos que se utilizaron en las campañas experimentales	45
Figura 5-1. Fotografía de la estación Lennartz instalada en el Vallée de La Sionne (Anzère) en 1996	48
Figura 5-2. Estación Pdas (Teledyne-Geotech) instalada en la caseta de ‘Les Camilles’ en Núria. A la izquierda de la estación se encuentran las baterías utilizadas para su funcionamiento. Fotografía realizada por Glòria Furdada Bellavista	50
Figura 5-3. Curva de respuesta (según datos de constructor) del sensor Lennartz LE-3D/5s (izquierda). Sensor Lennartz LE-3D/5s utilizado junto a la estación de registro Pdas (derecha)	50
Figura 5-4. Fotografía de la estación Orion de la casa Nanometrics instalada en el centro de control del Vallée de La Sionne. Sobre la estación de registro se puede ver la caja blanca en la que se colocaba el módem	52
Figura 5-5. Curva de respuesta del sensor Mark L-4C-3D (izquierda). Sensor Mark L-4C-3D utilizado junto a la estación de registro Orion (derecha)	53
Figura 5-6. Estación sísmica Syscom MS2003	54
Figura 6-1. Características del filtro Butterworth de orden 4 pasa altas de 1 Hz del programa Matlab	64
Figura 6-2. Características del filtro Butterworth de orden 4 pasa banda de [1-50] Hz del programa Matlab	65
Figura 6-3. Densidad de potencia espectral de registros efectuados con una estación típica situada en un asentamiento de roca dura, en un emplazamiento con alto nivel de ruido ambiental (Noisy) y otro emplazamiento con bajo nivel de ruido ambiental (Quiet), Aki y Richards (1980)	69

Figura 7-1. Organigrama del razonamiento seguido para seleccionar las SSA de nuestra colección de datos _____ 73

Figura 7-2. Parte inicial de dos SSA. Las flechas indican las tendencias de las amplitudes. (a) Registro (N-S) del alud del 30 de enero de 1999 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. (b) Registro (N-S) del alud del 22 de diciembre de 2002 en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. Consultar detalles de estas señales en el Anexo _____ 75

Figura 7-3. Dependencia de la forma de la envolvente de la SSA con la posición relativa entre el sensor y el alud. (a) Alud de flujo registrado el 2 de enero de 2003 en los emplazamientos B (izquierda) y C (derecha) de Vallée de La Sionne. (b) Alud mixto registrado el 31 de enero de 2003 en los emplazamientos B (izquierda) y C (derecha) de Vallée de La Sionne. Consultar detalles de estas señales en el Anexo _____ 76

Figura 7-4. SSA en las que se observa un aumento de las amplitudes en la fase de detención del alud. Las flechas indican el aumento de amplitudes. (a) Registro (N-S) del alud del 22 de febrero de 2002 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. (b) Registro (N-S) del alud del 2 de enero de 2003 en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. (c) Registro (E-W) del alud del 1º alud del 1 de febrero de 1996 en el emplazamiento UB3 de Vall de Núria. Consultar detalles de las señales en el Anexo _____ 77

Figura 7-5. Amplitudes máximas de las SSA según la distancia a la que fueron registradas, el tipo de flujo del alud y su dimensión _____ 79

Figura 7-6. Duración temporal de las SSA según la distancia a la que fueron registradas, el tipo de flujo del alud y su dimensión _____ 80

Figura 7-7. Espectros de Fourier de dos SSA obtenidas por equipos suizos en el emplazamiento A de Vallée de La Sionne. Registros sin filtrar. a) Espectro de Fourier de una SSA generada por un alud que pasó por encima del emplazamiento del sensor. b) Espectro de Fourier de una SSA generada por un alud que no pasó por encima del emplazamiento del sensor. Consultar detalles sobre los aludes en el Anexo _____ 82

Figura 7-8. Sismograma y EC del 2º alud provocado en Vallée de La Sionne el 20 de febrero de 2000. El registro fue obtenido en el emplazamiento C. Consultar detalles de estas señales en el Anexo _____ 84

Figura 7-9. Variación de la frecuencia recibida debida al aumento de velocidad de la fuente desde 1 m/s hasta 80 m/s (efecto Doppler) _____ 86

Figura 7-10. Verificación de aludes provocados por explosiones mediante EC en Vallée de La Sionne. (a) Sismograma y EC del 2º alud provocado artificialmente el 10 de febrero de 2000 en Vallée de La Sionne. (b) Sismograma y EC de la 3ª explosión provocada el 22 de enero de 2002 en Vallée de La Sionne, esta explosión no provocó ningún alud. Registros del emplazamiento C. Consultar detalles de estas señales en el Anexo _____ 88

Figura 7-11. Detección de SSA de baja amplitud mediante EC en Vall de Núria. (a) EC de la SSA del 2º alud provocado el día 1 de febrero de 1996 en Vall de Núria, emplazamiento UB1. (b) EC de la SSA del 3º alud provocado el día 1 de febrero de 1996 en Vall de Núria,

emplazamiento UB1. (c) EC del 1º alud provocado el día 24 de enero de 1996 en Vall de Núria, UB3. (d) EC de la SSA del 1º alud provocado el día 1 de febrero de 1996 en Vall de Núria, emplazamiento UB3.(e) EC del 2º alud provocado el día 1 de febrero de 1996 en Vall de Núria, emplazamiento UB3.(f) EC del 1º alud provocado el día 10 de enero de 1999 en Vall de Núria. Consultar detalles de estas señales en el Anexo _____ 89

Figura 7-12. Comparación de EC de aludes de diferente tipo de flujo registrados en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. a) EC del alud de flujo mixto registrado el 30 de enero de 1999. b) EC del alud de flujo registrado el 13 de febrero de 2002. c) EC del alud aerosol registrado el 29 de febrero de 2001. Consultar detalles de estas señales en el Anexo _____ 91

Figura 7-13. Comparación de EC de alude de diferente tipo de flujo registrados en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. a) EC del alud de flujo mixto registrado el 30 de enero de 1999, este registro presenta problemas de saturación. b) EC del alud de flujo denso registrado el 13 de febrero de 2002. c) EC del alud aerosol registrado el 29 de febrero de 2001. Consultar detalles de estas señales en el Anexo _____ 92

Figura 7-14. Comparación de EC de aludes de diferentes dimensiones registrados en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne. a) EC del 3º alud de flujo mixto registrado el 10 de febrero de 2000. b) EC del 2º alud de flujo mixto registrado el 10 de febrero de 2000. c) EC del 4º alud de flujo mixto registrado el 20 de febrero de 2000. Consultar detalles de estas señales en el Anexo _____ 93

Figura 7-15. Sismo local registrado en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne (a) Dominio del tiempo. (b) EC. (c) Espectro total de Fourier _____ 95

Figura 7-16. Sismo regional registrado en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne (a) Dominio del tiempo. (b) EC. (c) Espectro total de Fourier _____ 96

Figura 7-17. Telesismo registrado en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne (a) Dominio del tiempo. (b) EC. (c) Espectro total de Fourier _____ 97

Figura 7-18. Registro de la señal de una explosión y la de un helicóptero en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne (a) Dominio del tiempo. (b) EC. (c) Espectro total de Fourier de la explosión (izquierda) y de la señal de helicóptero (derecha) _____ 99

Figura 7-19. SSA y EC del alud registrado el 30 de enero de 1999 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas determinan los instantes (15 s y 40 s) en los que el frente del alud pasó por cambios de pendiente y cuando llegó al emplazamiento del sensor (45 s) _____ 101

Figura 7-20. Posición del frente del alud cartografiada en varios instantes de la evolución del alud del 13 de febrero de 2002 en Vallée de La Sionne. Cartografía cedida por François Dufour (SLF) _____ 103

Figura 7-21. Posición del frente del alud cartografiada en varios instantes de la evolución del alud del 13 de marzo de 2002 en Vallée de La Sionne. Cartografía cedida por François Dufour (SLF) _____ 103

Figura 7-22. Esquema del funcionamiento de un radar FMCW al paso de un alud _____ 104

Figura 7-23. Correlación entre la señal de radar FMCW y el módulo de la señal sísmica de frecuencias [30-50] Hz generadas por el alud del 25 de febrero de 1999 en el emplazamiento A de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas indican los instantes en los que se observan cambios en el flujo del alud _____ 107

Figura 7-24. Correlación entre la señal de radar FMCW y la señal sísmica de frecuencias [30-50] Hz generadas por el alud del 27 de diciembre de 1999 en el emplazamiento A de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas indican los instantes en los que se observan cambios en el flujo del alud _____ 108

Figura 7-25. Correlación entre la señal de radar FMCW y la señal sísmica de frecuencias [30-50] Hz generadas por el alud del 21 de febrero de 2000 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas indican los instantes en los que se observan cambios en el flujo del alud _____ 109

Figura 7-26. Correlación entre la señal de radar FMCW y la señal sísmica de frecuencias [30-50] Hz generadas por el alud del 29 de diciembre de 2001 en el emplazamiento B de Vallée de La Sionne. Las líneas rojas indican los instantes en los que se observan cambios en el flujo del alud _____ 110

Índice de tablas

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	16
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	18
Tabla 5-1. Características técnicas de los sensores Mark-4C-3D utilizados	53
Tabla 6-1. Funciones de transferencia para los equipos Orion+Mark L-4C-3D	63
Tabla 7-1 Comparación entre velocidades medias del frente del alud y duración de SSA registradas en el emplazamiento C de Vallée de La Sionne	102

