

VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE NIEVE Y SUELO A LO LARGO DE UN TRANSECTO LONGITUDINAL EN EL PIRINEO

C. CALVO¹
J. L. VILLARROEL^{2,3,4}
J. A. CUCHÍ^{2,4}

RESUMEN.— Dentro de un estudio sobre la modelización del campo magnético creado por un aparato de rescate de víctima de avalanchas (ARVA), se presentan datos de la conductividad eléctrica de suelo y nieve medidos durante la travesía invernal Transpirenaica 2005. Se relaciona este parámetro con otras propiedades del manto nival.

ABSTRACT.— As part of one study on the modelization of the magnetic field created by rescue snowfall beacons, some data of electrical conductivities of snow and soil, talked during the winter course Transpirenaica 2005 are presented. That parameter is related with other properties of the snowpack.

KEY WORDS.— Snow, electrical conductivity, radiolocation, Pyrenees.

INTRODUCCIÓN

Un factor fundamental en la supervivencia de personas sepultadas por avalanchas de nieve es el tiempo que transcurre desde que sufren el acci-

¹ Escuela Militar de Montaña y Operaciones Especiales. E-22709 JACA. ccalfue@et.mde.es

² Instituto de Investigación en Ingeniería en Aragón I3A. C/ María de Luna, 1. E-50018 ZARAGOZA. jlvilla@unizar.es, cuchi@unizar.es

³ Laboratorios Avanzados de la Universidad de Zaragoza. Parque Tecnológico WALQA. Ctra. de Zaragoza N-330a. km 566. E-22197 CUARTE (Huesca).

⁴ Grupo de Tecnología en Entornos Hostiles (GTE). Universidad de Zaragoza. gte@listas.unizar.es

dente hasta su rescate. Salvo traumatologías graves, numerosos estudios señalan que las posibilidades de encontrar a una persona con vida disminuyen rápidamente con el tiempo, desde un 93% transcurridos los 15 primeros minutos, a solo el 25% si la víctima está sepultada más de 45 minutos. Por ello, durante los últimos años se asiste a un creciente interés por el uso de radiobalizas portátiles en este tipo de rescates. Conocidos como ARVA, por sus siglas en francés (*Appareil de Recherche de Victimes en Avalanche*), estos equipos tienen que cumplir la norma ETS 300718 que establece la frecuencia (457 kHz) y forma de la señal emitida.

Los ARVA han evolucionado profundamente en la última década, desde indicadores analógicos por sonido, a indicadores direccionales e información digital. Una reciente comparativa de los equipos disponibles en el mercado y de las técnicas de búsqueda se encuentra en AYORA y col. (2005). De forma resumida se puede indicar que el método más utilizado de búsqueda sigue las líneas del campo magnético cercano creadas por la antena emisora. La forma e intensidad del campo magnético creado por el ARVA emisor depende de diversos factores, entre ellos las características del medio. En general, se supone que este es isótropo y homogéneo simplificando una realidad más compleja. De hecho existen al menos tres capas diferenciadas: el aire, el manto nival y el suelo subyacente. El manto nival es un medio complejo, poligénico, en muchos momentos claramente anisótropo y que, además, experimenta fuertes y rápidos cambios en tiempos cortos, en función de la climatología.

La conductividad eléctrica del medio interviene decisivamente en el uso de los ARVA. Determina el alcance y forma del campo magnético cercano creado por la baliza emisora, condicionando la precisión y rapidez de la búsqueda. En general, a nivel teórico, para la modelización del problema se pueden utilizar datos de parámetros físicos correspondientes al vacío, despreciando la influencia de la nieve, el suelo y sus interfaces. Sin embargo, en un análisis profundo del funcionamiento de un ARVA y de cara a mejorar sus posibilidades, parece interesante tener en cuenta tanto la diversidad de capas como los valores reales de conductividad eléctrica del manto nival y del suelo, con el objetivo de investigar las deformaciones que sufre la señal emitida y, por lo tanto, la magnitud de los errores cometidos en la búsqueda. La señal emitida por un ARVA y utilizada para la búsqueda es campo magnético cercano cuya propagación se ve condicionada principalmen-

te por la conductividad eléctrica del medio. Este parámetro depende de numerosos factores del manto nival como temperatura, estratificación, estructura de los cristales, densidad, contenido de agua líquida y conductividad del agua de fusión. La bibliografía presenta, sin embargo, pocos datos de este parámetro y no se conoce información sobre datos reales de la conductividad eléctrica de la nieve en la cadena pirenaica.

Por ello, aprovechando la Transpirenaica 2005, se han realizado una serie de estudios del manto nival que han incluido mediciones de conductividad eléctrica de nieve y suelo, realizados por la colaboración entre el Grupo Militar de Alta Montaña (GMAM), el Instituto Nacional de Meteorología (INM) y la Universidad de Zaragoza. La travesía se realizó entre el 29 de enero y el 18 de marzo del 2005, por seis componentes del GMAM, de la Escuela Militar de Alta Montaña; se realizó la travesía entre los cabos de Higuier y Creus. Se usaron básicamente esquís de travesía y se ascendieron varios picos culminantes de la cordillera. Detalles meteorológicos de esta interesante actividad deportiva, realizada en duras condiciones ambientales, se reflejan en FERRAZ y PALOMO (en prensa). El presente trabajo presenta los resultados de los estudios sobre la conductividad eléctrica de manto nival y suelo.

MATERIAL Y MÉTODOS

Durante la travesía se midió la resistencia eléctrica (inversa de la conductividad eléctrica) de manto nival y suelo en seis puntos del Pirineo meridional, todos en laderas. Ubicación y detalles topográficos y meteorológicos se muestran en las tablas I y II. La resistencia eléctrica se ha determinado mediante un equipo construido al efecto.

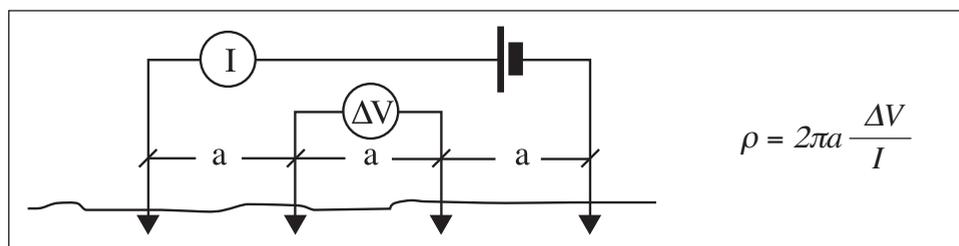


Fig. 1. Conductímetro de cuatro electrodos en configuración Wenner.

El referido equipo es un conductímetro de corriente continua y cuatro electrodos o picas. La separación entre las picas era de 1 metro entre las picas interiores (medición) y 3 metros en las exteriores, de inyección de corriente, en una configuración de tipo Wenner, con equidistancia entre electrodos (Figs. 1, 2 y 3) (ORELLANA, 1982). En condiciones ideales, se asume que la corriente eléctrica se propaga por una o varias capas situadas en una profundidad igual a la semidistancia de las picas de inyección de corriente, en una superficie de forma semicircular.

Tabla I. Puntos de medición de resistencia eléctrica de nieve y suelo en Transpirenaica 2005.

<i>Localidad</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>Datum</i>	<i>Huso</i>	<i>Fecha</i>
Belagua	0675493	4756920	1362	Europeo 1950	30T	04/02/2005
Loma Verde	0699600	4738248	2254	Europeo 1950	30T	07/02/2005
Hospital de Benasque	0304317	4729071	1812	WGS 84	31T	21/02/2005
Soldeu Tarter	0388308	4712721	2308	WGS 84	31T	03/03/2005
La Molina	0409614	4686386	2415	WGS 84	31T	07/03/2005
Nuria	0430353	4694658	1969	WGS 84	31T	09/03/2005
Vall Ter 2000	0438016	4697700	2020	WGS 84	31T	10/03/2005
Astún (*)	0705288	4743575	2140	Europeo 1950	30T	14/03/2005
Aísa (*)	0699000	4736220	1850	Europeo 1950	30T	16/05/2004

(*) Muestras adicionales, al margen de la travesía.

Tabla II. Datos de condiciones topográficas y atmosféricas en puntos de medición de conductividad eléctrica de manto nival en Transpirenaica 2005.

<i>Localidad</i>	<i>Orientación</i>	<i>Pendiente</i>	<i>Temp. aire °C</i>	<i>Nubosidad</i>	<i>Observaciones</i>
Belagua	Sur	5-10	-2 °C	Menos 25%	
Loma Verde	Noreste	10-15	-5 °C	25-75%	Viento
Hospital de Benasque	Sur	10-15	-6,1 °C	Más 75%	Nieva
Soldeu Tarter	Este	35-40	-8,5 °C	Más 75%	Nieva
La Molina	Sureste	5-10	-15,9 °C	Menos 25%	
Nuria	Sureste	10-15	5 °C	Menos 25%	
Vall Ter 2000	Sureste	20-25	-0,4 °C	Menos 25%	
Astún	Sur	10-15	6,7 °C	25-50%	
Aísa	Llano	0	10 °C	0%	Soleado

Durante la Transpirenaica 2005, además se tomaron seis muestras de nieve en botes nuevos de polietileno. Fueron transportados, con la mayor premura posible, a los laboratorios de la Escuela Politécnica Superior (EPS) de Huesca, donde se determinaron pH y conductividad en el agua de fusión. Se añadieron otras dos muestras de nieve, una tomada en la EPS de Huesca y otra del valle de Espelunciacha (Sallent de Gállego), de las mismas fechas. El primer parámetro se determinó mediante un pHmetro Orion250, con un electrodo nuevo Themo Orion, pH triode. La conductividad eléctrica de las muestras se determinó mediante un conductivímetro WTW COND 315i/SET.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La actividad se realizó durante la última parte del invierno del 2004/2005. Se caracterizó, como se refleja en FERRAZ y PALOMO (en pren-



Fig. 2. Media de conductividad eléctrica de nieve.



Fig. 3. Determinación de la conductividad eléctrica del suelo.

sa), en unas duras condiciones invernales. Esta etapa del invierno se distinguió por muy bajas temperaturas, fuertes vientos y ventiscas. En estas condiciones, especialmente en la zona central, el manto se encuentra en claras condiciones invernales, con temperaturas por debajo de cero grados centígrados. Son situaciones adecuadas para la formación de cornisas y placas de hielo acompañadas de transformaciones favorables a la formación de capas interiores inestables, propicias al desencadenamiento de avalanchas. Los perfiles tomados durante estas fechas muestran la presencia de granos de hielo en forma de «cubiletes» propios de un metamorfismo con un fuerte gradiente de temperatura. El perfil de Astún, estudiado dos semanas más tarde en condiciones de tiempo atmosférico más cálido, presenta ya una clara transformación hacia una situación de mayor estabilidad. De hecho, una fuerte y continua elevación de temperaturas llevó a una rápida desaparición de gran parte del manto nival, durante el mes de abril del 2005. Los datos de Aísa corresponden a una clara situación de nieve primavera, en mayo del 2004.

En la tabla IV se presentan los datos de espesor, densidad media de la nieve, agua equivalente y datos de conductividad eléctrica de manto

nival y suelo. La conductividad es el inverso de la resistencia eléctrica. Esta se ha calculado, a partir de los datos de campo, mediante la fórmula (Fig. 1):

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

$$\sigma = \frac{I}{\rho}$$

Tabla III. Algunas características del manto nival en sondeos realizados durante Transpirenaica 2005.

<i>Localidad</i>	<i>Tipo manto</i>	<i>Espesor metros</i>	<i>Rango tem. °C (*)</i>	<i>Observaciones</i>
Belagua	Placa viento	0,80		
Loma Verde	Placa viento	1,30	-5,0 a -0,6 Mín. -6,1 (1,1 m).	Caras planas de 0 a 0,6 m. Cubiletes de 30 a 50 cm. Costras de hielo a 0,8 y 1,0 m.
Hospital de Benasque	Placa viento	1,55	-5,8 a 0,0 0 °C de 0 a 0,5 m	Granos finos redondos en todo el perfil. Gruesos en base. Costra a 0,8 m.
Soldeu Tarter	Normal	1,35	-5,4 a 0,0	Cubiletes en la base y a 0,5 m. Granos redondos de 0,1 a 0,5. Costras a 110 cm.
La Molina	Normal	1,20	-12,5 a -2,6	Cubiletes en base. Costra en superficie y a 0,65 m.
Nuria	Normal	1,20		
Vall Ter 2000	Normal	1,45	-1,0 a -1,0 Mín. -7,9 (1,5 m)	Granos redondos grandes y finos. Costras múltiples.
Astún	Normal	2,60	0,0 a 0,0 Mín. -3,5 (0,6 m)	Granos finos en casi todo el perfil. Caras planas a 0,5 m. Costra a 1,05 m.
Astún	Avalancha	2,70	No determinado	Zona de acumulación de una avalancha procedente de la cresta fronteriza.
Aísa	Normal	0,80	0,0 a 0,0	Nieve primavera. Húmeda. Gránulos gruesos. Costra superficial.

(**) Temperaturas en superficie y suelo.

En principio, el manto de nieve se puede considerar como una mezcla de cristales de aire y hielo. Valores típicos de la conductividad atmosférica se presentan en el rango de 5 a 100 fS/m. (APLIN, 2003). Para el hielo, MILLER (1982)

Tabla IV. Datos físicos de las mediciones de nieve en Transpirenaica 2005.

Localidad	Espesor (m)	Densidad media (*) Kg/m ³	mm agua equivalente	Conductividad eléctrica μ Siemens/m	
				nieve	suelo
Belagua	0,8			6,52	nd
Loma Verde	1,3	158	205	4,23	nd
Hospital de Benasque	1,55	197	305	15,91	≤ 350
Soldeu Tarter	1,35	175	236	2,20	1.101,35
La Molina	1,2	193	232	3,07	1.072,70
Nuria	1,2			5,19 (**)	120,95
Vall Ter 2000	1,95 (3*)	185	407	3,30	12,51
Astun	2,6	396	1.030	3,63	nd
Astún avalancha	nd	nd		2,63	nd
Aísa	0,8	nd		0,42	1.241,41

(*) Densidad media. Se obtiene mediante una ponderación de cada dato de densidad con el intervalo de profundidad a la que se le asigna.

(**) Durante la excavación del perfil de nieve se realizó una medición a una profundidad de 0,6 m con un valor de 13,67 μ S/m.

(3*) Fondo irregular de 1,95 a 2,45 m.

presenta una recopilación de mediciones de conductividad en este material: en hielo de laboratorio, los valores de conductividad oscilan entre 10^{-7} y 10^{-8} S/m para cristales singulares, y 10^{-2} S/m para hielo policristalino. En hielo glaciar, los valores son del orden de 10^{-3} a 10^{-4} S/m, medidos con configuraciones de 4 electrodos. En testigos de hielo glaciar se utilizan dos métodos diferentes, con corriente continua (ECM) o alterna (DEP) usando dos electrodos. Valores típicos con el DEP para hielo puro son del orden de 10 μ S/m. PATERSON (1994), BARNES y col. (2002).

Los valores de conductividad del manto nival medidos en el presente trabajo se encuentran entre 1 y 15 μ S/m, que entran dentro del rango de los datos de la bibliografía para el hielo. Los valores superan en un orden de magnitud que los que presentan FARZANEH y col. (2004), en un estudio realizado con nieve, en condiciones de laboratorio y con un equipo de medición diferente. Las variaciones en densidad y la forma de los gránulos de nieve en el manto nival afectan a las propiedades físicas de la nieve (BARBER y col., 1995), pero no hay suficientes datos para deducir ninguna conclusión en el presente trabajo.

En general, los resultados muestran una diferencia de tres órdenes de magnitud entre las conductividades eléctricas de manto nival y suelo. Los valores que se han determinado entran dentro de los rangos que ORELLANA (1982) presenta para materiales comunes de suelos como arcillas, calizas y areniscas.

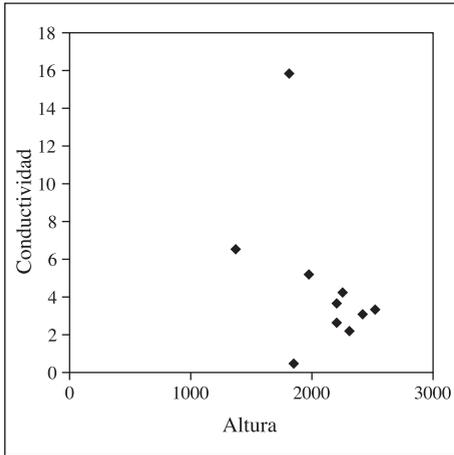


Fig. 4. Relación entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S/m}$) del manto nival y la altura geográfica (m).

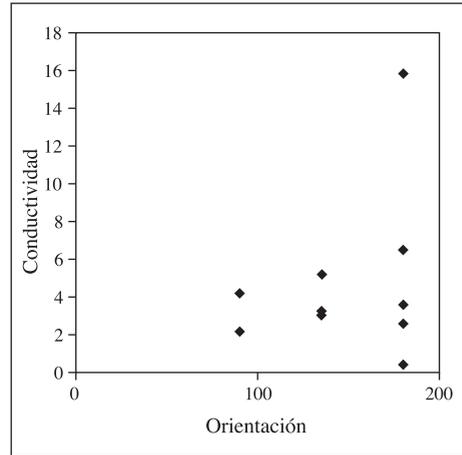


Fig. 5. Relación entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S/m}$) del manto nival y la orientación de ladera (grados con respecto al norte).

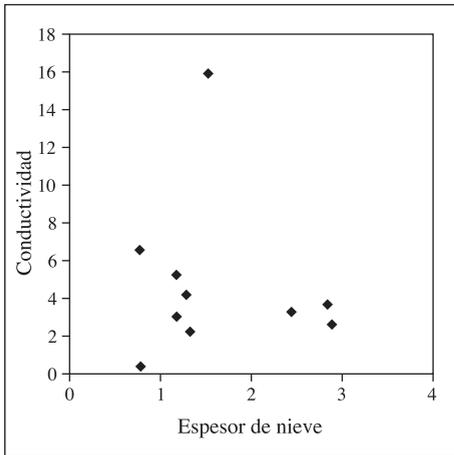


Fig. 6. Relación entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S/m}$) del manto nival y el espesor de nieve (m).

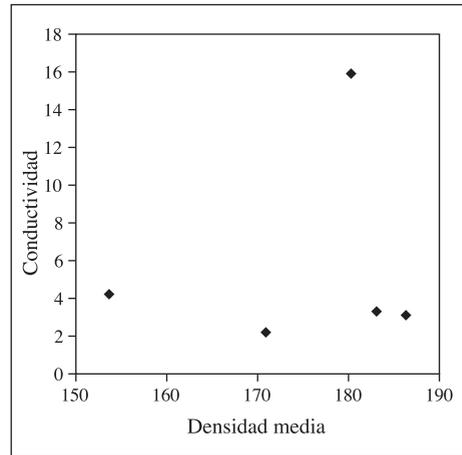


Fig. 7. Relación entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S/m}$) del manto nival y la densidad media (kg/m^3).

A partir de los datos obtenidos, se observa que no hay relación entre la conductividad eléctrica de la nieve con la altura topográfica del punto de muestreo y la orientación (Figs. 4 y 5). Aparentemente, tampoco la hay entre la conductividad y la profundidad del manto nival (Fig. 6). Sin embargo, este factor tiene su importancia y debiera ser estudiado con cierto detalle. Teóricamente, con un espaciado entre picas exteriores de 3 metros ($a = 1$ m, Fig. 1), la zona explorada por la corriente eléctrica debiera alcanzar hasta 1,5 metros de profundidad. En caso de menores espesores, una parte de la corriente circularía por el suelo alterando la medida de conductividad aparente de la nieve. Así, en Vall Ter se observa un incremento de conductividad eléctrica de la nieve al eliminar una parte del manto nival. Sin embargo, en Aísa, con nieve primavera y poca profundidad, no parece observarse el efecto suelo.

A priori, parece lógico que la conductividad sea función de la densidad de la nieve, esto es, de su contenido en aire. FARZANEH y col. (2004) presentan datos de laboratorio donde la conductividad varía con la densidad. Las medidas obtenidas de densidad media de la nieve, en campo, no permiten concluir tal relación (Fig. 7). Sin embargo, el parámetro densidad media considera el manto nival como si fuera homogéneo. La realidad es que es un medio altamente estratificado con variaciones grandes de densidad entre capas. En este sentido, la corriente eléctrica tiende a circular por aquellas capas más conductoras. Queda pendiente el estudio de cómo influyen las distintas capas del manto nival en su conductividad aparente. La baja conductividad medida en la nieve primavera, en Aísa podría estar relacionada con las observaciones de FARZANEH (2004) y TAKEI y MAENO (2001) que observan una reducción de la conductividad eléctrica de la nieve entre -2 y 0 °C.

Un aspecto de cierto interés es la posible relación entre la conductividad eléctrica del manto nival y el mismo parámetro en el agua de fusión, que sugiere FARZANEH (2004). En el presente trabajo no hay prácticamente correlación entre estos parámetros. Es posible que en nieves húmedas, habituales en la primavera pirenaica, la presencia de sales pudiera tener algún efecto y que este sea menor en nieves frías. Los datos del cuadro 5 muestran, por otro lado, la presencia de un dato de agua de fusión de nieve, con un pH por debajo de 5,6. Este valor corresponde al equilibrio anhídrido carbónico disuelto/ion bicarbonato. Un valor menor, observado ya en otras muestras

Tabla V. Datos químicos de diversas muestras de nieve, en febrero y marzo del 2005.

<i>Localidad</i>	<i>Fecha</i>	<i>pH</i>	<i>Conductividad eléctrica μS/cm 25 °C</i>
Belagua	04/02/2005	5,81	7,2
Loma Verde	07/02/2005	5,21	31,8
Gavarnie	16/02/2005	5,72	10,1
Huesca	22/02/2005	6,02	7,4
Hospital de Benasque	21/02/2005	5,14	8,7
Espelunciacha	27/02/2005	4,73	8,7
Tavascán	27/02/2005	5,74	11,5
Andorra	03/03/2005	5,86	9,4
La Molina	07/07/2005	5,63	9,9
Astún	14/03/2005	5,76	4,0
Aísa	16/05/2004	5,68	5,1

(datos no publicados), indica la presencia de episodios de nieve «ácida», producidas por precipitaciones relacionadas con viento norte. La causa de esta acidez es desconocida por el momento.

CONCLUSIONES

En la realización del presente trabajo, especialmente en la Transpirenaica 2005, se han obtenido diversos datos de conductividad eléctrica de nieve y suelo que pueden ser utilizados para el estudio, en condiciones reales, de las distorsiones que sufre el campo magnético creado por un emisor tipo ARVA. Estos datos se han relacionado con diversas características del manto nival. Dado el carácter preliminar del presente trabajo, es evidente que estos resultados tienen que ser contrastados con un mayor trabajo de campo en próximos inviernos así como en neveros y glaciares de altura.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo de campo se ha realizado durante la travesía invernal Transpirenaica 2005 realizada en febrero y marzo del 2005 por parte del Grupo Militar de Alta Montaña integrado por Juan Luis San Juan de Castro, Javier Trevín

González, Tomás Rodríguez López, Carlos Calvo Fuente, José Luis Herrero Esteban y Rafael Soba García. El grupo de apoyo y coordinación estaba formado por Benito Molina Moreno, Esteban López Sánchez, Alberto Ayora Hirsch, Jorge Palop Asunción, Ricardo Bueno Laborda y Pedro Expósito Lahoz. El trabajo del equipo investigador de la Universidad de Zaragoza se enmarca en el proyecto de investigación «Técnicas de exploración automatizada en aplicaciones de rescate» (EXPRES), DPI-2003-079, del Ministerio de Ciencia y Tecnología y en el convenio entre el Gobierno de Aragón y la Universidad de Zaragoza sobre los Laboratorios Avanzados de investigación en el parque tecnológico WALQA. Agradecemos también las facilidades de acceso por parte de la Estación de Esquí de Astún a la zona de ibón de Truchas. Antonio Muñoz, de los Laboratorios Avanzados, y Elena Escar, de la Escuela Politécnica Superior, ayudaron en la búsqueda bibliográfica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APLIN, K. (2002). Atmospheric ion spectra and the rate of voltage decay of an aspirated cylindrical capacitor. *Inst. Phys. Conf. Ser.* n° 178, Section 4: 155-160.
- AYORA, A.; CASALS, C.; VILLARROEL, J. L., y TARDÓS, J. D. (2005). Rescate de víctimas en avalanchas. Problemática del uso de ARVA. *Desnivel*, 221: 72-78.
- BARBER, D. G.; REDDAN, S. P., y LEDREW, E. F. (1995). Statistical characterization of the geophysical and electrical properties of snow on landfast first year sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 100(C2): 2.673-2.686.
- BARNES, P. R.; WOLFF, E. W.; MULVANEY, R.; UDISTI, R.; CASTELLANO, E.; RÖTHLISBERGER, R., y STEFFENSEN, J. P. (2002). Effect of sensity on electrical conductivity of chemically laden polar ice. *Journal of Geophysical Research*. 107(B2): 2.029, doi: 10.1029/2000JB000080.
- FARZANEH, M.; FOFANA, I., y HEMMATJOU, H. (2004). Electrical properties of the snow. *4 Annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena*, 611-614.
- FERRAZ, J., y PALOMO, M. (en prensa). Transpirenaica 2005, en *Actividades nivometeorológicas 2004-2005*. Instituto Nacional de Meteorología (en prensa).
- MILLER, H. (1982). Physical properties of ice. Group V Geophysics. Volume 1/Subvolume B: in G. Angenheister (dir). *Landolt-Börnstein, neue serie*, Springer: 482-506.
- ORELLANA, E. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua*. Paraninfo. Madrid. 578 pp.
- PATERSON, W. S. B. (1994). *The physics of glaciers*. Pergamon. 480 pp.
- TAKEI, I., y MAENO, N. (2001). The low frequency conductivity of snow near the melting temperature. *Annals of glaciology*, 32: 14-18.