

RECONSTRUCCIÓN DE VALORES TÉRMICOS A PARTIR DEL ANÁLISIS ESPACIAL DE MORRENAS GLACIARES EN EL MACIZO DE LA MALADETA (PIRINEO CENTRAL ESPAÑOL): SIGLOS XVII-XX

Javier CHUECA CÍA y Asunción JULIÁN ANDRÉS

Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza una reconstrucción de los valores térmicos medios anuales existentes en el macizo de la Maladeta (Pirineo central español) para tres episodios significativos en la historia glaciaria de la zona que van desde el siglo XVII hasta comienzos del siglo XX. Para ello se ha analizado la distribución espacial de morrenas glaciares previamente datadas, comparando la altitud actual de ubicación de la línea de nieves permanentes en la región con la reconstruida para cada uno de esos episodios a partir de la aplicación del método de Kurowski.

Palabras clave: Temperaturas, morrenas glaciares, Pirineo español.

ABSTRACT

In this work, a reconstruction of the mean annual temperature values present in the Maladeta massif (Spanish central Pyrenees) is made considering three significative episodes in the glacial history of the zone going from XVIIth to XXth centuries. The spatial distribution of glacial moraines previously dated has been analyzed, comparing the altitudinal ubication of the present-day permanent snow line in the region with the reconstructed for each of those episodes by using the Kurowski method.

Key words: Temperatures, glacial moraines, Spanish Pyrenees.

1. INTRODUCCIÓN

En la cordillera pirenaica, la caracterización de paleotemperaturas y otros rasgos paleoambientales a partir del análisis de evidencias geomorfológicas conservadas en antiguas áreas glaciadas cuenta hasta la fecha con escasos precedentes (SERRAT, 1980; SERRANO, 1991, 1996; CHUECA, 1992; COPONS y BORDONAU, 1994; LAMPRE, 1994; JULIÁN y CHUECA, 1998; CHUECA *et al.*, 1998 b) pese a que, fuera de nuestras fronteras, los estudios de este tipo han sido numerosos. En la mayoría de las ocasiones, los espacios analizados se sitúan en zonas que, como la pirenaica, fueron deglaciadas en su práctica totalidad hace ya largo tiempo, o conservan tan sólo pequeños núcleos glaciares de carácter residual.

El sector analizado en este trabajo es un buen ejemplo de esta última situación: el macizo de la Maladeta (Aneto, 3.404 m), situado en pleno Pirineo central español, entre los valles de los ríos Ésera y Noguera Ribagorzana (Fig. 1), alberga hoy en día el foco glaciario de mayor importancia y extensión de toda la cadena pirenaica, en el que se conservan –en un precario equilibrio con las actuales condiciones ambientales y a alturas siempre por encima de los 2.800/2.900 m s.n.m.– los glaciares de circo de la Maladeta, Aneto, Barrancs, Tempestades y Coronas, además de varios heleros menores de exiguas dimensiones. Todos ellos son excelentes testigos del intenso proceso de deglaciación registrado en la zona desde el punto álgido de la Pequeña Edad del Hielo hasta la actualidad: en el momento presente, el conjunto total glaciado apenas supera las 200 Ha, aproximadamente la mitad de las que ocupaba el hielo en el máximo histórico del siglo XVII (CHUECA *et al.*, 1998 a).

En el presente trabajo realizamos una reconstrucción de los valores térmicos medios anuales existentes en el macizo para tres episodios significativos en su historia glaciaria más reciente, episodios que van desde el siglo XVII hasta comienzos del siglo XX. Para ello hemos analizado la distribución espacial de las morrenas glaciares identificadas en el sector, comparando la altitud actual de ubicación de la línea de nieves permanentes en la región con la reconstruida para cada uno de esos episodios a partir de la aplicación del método de Kurowski o de la variación de la distribución altitudinal de superficies glaciadas. El trabajo ofrece así una primera estimación de detalle de las oscilaciones térmicas históricas registradas en un espacio típico de la alta montaña peninsular, siendo un buen ejemplo de las posibilidades que puede aportar el estudio de las morfologías de origen glaciario en las reconstrucciones paleoclimáticas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

En el macizo de la Maladeta, al igual que en otros de alturas similares localizados en la cadena pirenaica, se fueron generando a lo largo de la Pequeña Edad del Hielo y con posterioridad depósitos glaciares que en ocasiones se han mantenido excelentemente conservados. La existencia de etapas puntuales de recrudescimiento climático dentro de ese período provocó la aparición ocasional, en distintas zonas del macizo, de una secuencia de cordones morrénicos muy bien marcada sobre el terreno. La cronología de esas morrenas fue establecida recientemente por CHUECA y JULIÁN (1996), a partir de la combinación de varios métodos de datación absoluta y relativa (liquenometría y estudio de la degradación de los depósitos) y un posterior análisis estadístico. La secuencia identificada abarca tres episodios históricos de génesis de morrenas y uno más reciente subactual o incluso funcional (Fig. 1): los dos primeros episodios son claramente adscribibles a pulsaciones enmarcadas dentro de la Pequeña Edad del Hielo (unidad U_1 : 1600-1620 d.C.; unidad U_2 : 1820-1830 d.C.), y el tercero, posterior en el tiempo, marca una estabilización momentánea en el retroceso de los aparatos glaciares del macizo (unidad U_3 : 1915-1925 d.C.). Debe recordarse que las fechas obtenidas por dataciones liquenométricas marcan siempre, como mínimo, edades de inicio de los episodios de retroceso de la masa glacial (o del final de los momentos de avance-estabilización previos al retroceso), y no de su comienzo. Por otro lado, adicionalmente, hay que apuntar que los aparatos glaciares siempre precisan un tiempo de ajuste o de respuesta ante un cambio cualquiera en las condiciones ambientales, previo a que éste se traduzca en avances o retrocesos de la masa de

hielo; este tiempo de ajuste se ha cifrado en el macizo de la Maladeta en torno a los 5-15 años de duración (CHUECA y JULIÁN, 1996)

Conocida la edad de los tres cordones morrénicos de edad histórica, nos planteamos como línea de trabajo complementaria la posibilidad de estimar las temperaturas existentes en la zona de estudio en el momento de la génesis de esos depósitos, utilizando para ello alguno de los procedimientos habitualmente citados en la literatura para reconstruir paleolíneas de equilibrio glaciar [la altitud de la línea de equilibrio glaciar (LEG) es la cota que, en un cuerpo glaciar, separa el área de acumulación de la de ablación; un concepto frecuentemente usado como sinónimo es el de línea de nieves permanentes (LNP), asimilable a la altitud de la isoterma media anual de 0°C (LOWE y WALKER, 1984; BRADLEY, 1985)]. En nuestro caso, basándonos en algunas experiencias previas que nos habían mostrado la bondad del procedimiento (JULIÁN y CHUECA, 1998; CHUECA *et al.*, 1998 b), optamos por la elección del método de Kurowski o de la variación de la distribución altitudinal de superficies glaciadas (desarrollado en CORNISH, 1981).

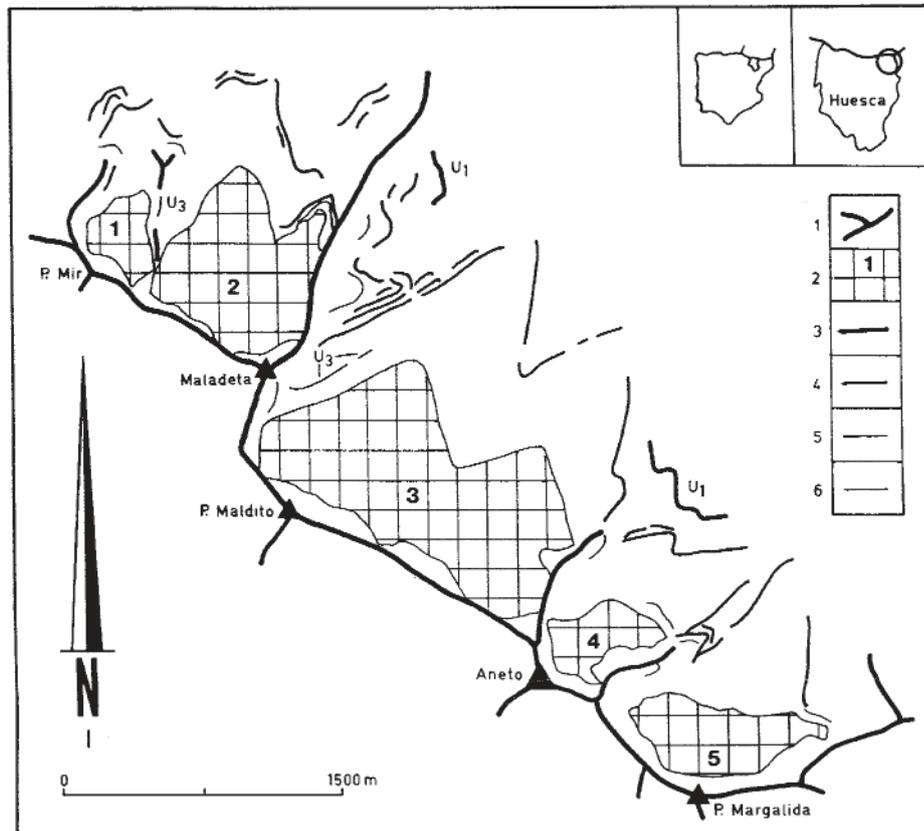


Figura 1. Macizo de la Maladeta: localización del área de estudio. Leyenda: 1) Cordales de divisoria entre circos; 2) Glaciares (1: Maladeta occidental; 2: Maladeta oriental; 3: Aneto; 4: Barrancs; 5: Tempestades); 3) Cordones morrénicos de la unidad U₁; 4) Cordones morrénicos de la unidad U₂; 5) Cordones morrénicos de la unidad U₃; 6) Cordones morrénicos de la unidad U₄.

El método asume dos premisas: a) que los glaciares reconstruidos se encontraban en una etapa de máxima expansión (en contacto con sus correspondientes morrenas) y, por tanto, en equilibrio estable, y que la línea de equilibrio al final de la estación de ablación marcaba el límite donde la acumulación total y la ablación estaban exactamente equilibradas; y b) que existía una relación lineal –similar a la hoy en día observable– entre el gradiente de ablación (la tasa de disminución en el grado de ablación con la altitud) y el de acumulación (la tasa de disminución de la acumulación con el descenso de altitud). De esta forma, la línea de equilibrio de cada uno de los cuerpos glaciales reconstruidos puede calcularse a partir de la aplicación de la siguiente ecuación:

$$x = \frac{\sum_{i=0}^n A_i h_i}{\sum_{i=0}^n A_i}$$

donde x es la altitud de la línea de equilibrio en metros; A_i el área de la superficie glaciada entre las curvas de nivel i en km^2 , y h_i la altitud del punto medio de las curvas de nivel i . En nuestro caso, una vez identificadas sobre el terreno las secuencias morrénicas procedimos a cartografiar, con ayuda de un pantógrafo, las superficies ocupadas por cada aparato glaciar durante los tres episodios analizados (trabajando con un soporte topográfico a escala 1:25.000). A partir de esa cartografía realizamos, utilizando un planímetro digital, las medidas del espacio total glaciado entre curvas de nivel y, posteriormente, la reconstrucción de las líneas de equilibrio.

3. RESULTADOS

En el Cuadro I se recogen los valores de ubicación altitudinal de las líneas de equilibrio obtenidos para los tres episodios considerados en los circos glaciares de la Maladeta, Aneto, Barrancs y Tempestades (resaltamos que no en todos los circos se conservan morrenas de las tres fases, y que en el caso de la unidad U_1 , la más externa, el arco morrénico se extendió abarcando con seguridad los circos del Aneto y de Barrancs, junto a, probablemente, el de Tempestades).

Líneas de equilibrio (m)					
	Maladeta	Aneto	Barrancs	Tempestades	<i>Valores medios</i>
Unidad U_1	S.D.	2.780	2.780	S.D.	<i>2.780 m</i>
Unidad U_2	2.870	2.850	2.905	2.815	<i>2.860 m</i>
Unidad U_3	2.905	2.920	S.D.	S.D.	<i>2.912,5 m</i>

Cuadro I. Localización altitudinal de las líneas de equilibrio glaciar para los tres episodios analizados en los circos de la Maladeta, Aneto, Barrancs y Tempestades, y valores medios para el macizo (S.D.: sin datos).

En la misma tabla aparecen los valores medios de localización de las tres líneas de equilibrio glaciar a escala de macizo, que son los que finalmente se utilizan de cara a elaborar la reconstrucción de paleotemperaturas (una de las premisas en este tipo de análisis es la necesidad de trabajar a una escala regional o de macizo, que ayude en lo posible a filtrar y eliminar cualquier posible tendencia anómala local; LOWE y WALKER, 1984).

De cara a reconstruir los valores térmicos existentes para cada uno de los tres episodios estudiados, los datos altitudinales medios que acabamos de mencionar han de compararse con un valor de referencia que marque la localización altitudinal de la línea de nieves permanentes o línea de equilibrio glaciar (equivalente a la isoterma media anual de 0°C) existente en el momento presente en la región analizada, partiendo de la utilización del correspondiente gradiente térmico vertical (la metodología de trabajo elegida asume como válido para las etapas en que se realizan las reconstrucciones el gradiente térmico vertical existente en la actualidad). Estos valores fueron obtenidos previamente por uno de nosotros al elaborar el capítulo de caracterización climática de la zona estudiada en su proyecto de Tesis Doctoral (la Alta Ribagorza aragonesa, en la que queda incluido en su totalidad el macizo de la Maladeta) (CHUECA, 1993). Los datos recogidos por este autor ubican altitudinalmente en la región la isoterma media anual de 0°C en torno a los 2.940 m s.n.m., con un gradiente térmico vertical negativo de 0,48°C/100 m (estadísticamente significativos al nivel 0,0001; test F de Snedecor).

La reconstrucción de temperaturas se ha realizado utilizando estos valores de referencia, comparando las tres líneas de equilibrio glaciar reconstruidas con la actual y usando el gradiente térmico vertical mencionado. Así, las temperaturas estimadas para cada uno de los tres episodios que hemos analizado aparecen plasmadas en el Cuadro II: 1) durante la génesis de las morrenas de la unidad U₁, el descenso reconstruido en la temperatura media anual del macizo se estima en -0,76°C; 2) durante la génesis de las morrenas de la unidad U₂, el descenso térmico que hemos reconstruido es de -0,38°C; 3), por último, durante la formación de los arcos morrénicos de la unidad U₃, el descenso térmico estimado es de -0,13°C. La significación estadística de los datos, asumiendo la existencia de un mismo gradiente térmico vertical a lo largo del período analizado, sería similar a la mencionada con anterioridad.

	LEG media (m)	LNP actual (m)	Diferencia (m)	<i>Descenso térmico estimado</i>
Unidad U ₁	2.780	2.940	160	<i>-0,76 °C</i>
Unidad U ₂	2.860	2.940	80	<i>-0,38 °C</i>
Unidad U ₃	2.912,5	2.940	27,5	<i>-0,13 °C</i>

Cuadro II. Estimación de temperaturas para los tres episodios analizados (LEG: línea de equilibrio glaciar; LNP: línea de nieves permanentes).

Los elementos de comparación con los que contamos en la cadena pirenaica son casi inexistentes para el período considerado: en los trabajos de JULIÁN y CHUECA (1998) y CHUECA *et al.* (1998 b), que abarcan un gran tramo del Pirineo central meridional (el comprendido entre las cuencas de los ríos Aragón y Noguera Pallaresa), y parten de la utilización del mismo método que aquí hemos expuesto, se estima un descenso general de las temperaturas medias anuales desde la Pequeña Edad del Hielo hasta la actualidad -a esa escala regional- de entre 0,90-0,95°C; a un nivel más detallado, LAMPRE (1994), en su análisis acerca de la evolución de la línea de equilibrio glaciar y los suelos helados en el propio macizo de la Maladeta, aporta unas primeras valoraciones sobre el aumento de las temperaturas medias en el macizo desde ese mismo período que cifra en torno a los 0,56-0,86°C (este autor no llega a establecer matizaciones entre las distintas pulsaciones que a lo largo de esta fase se identifican en la zona).

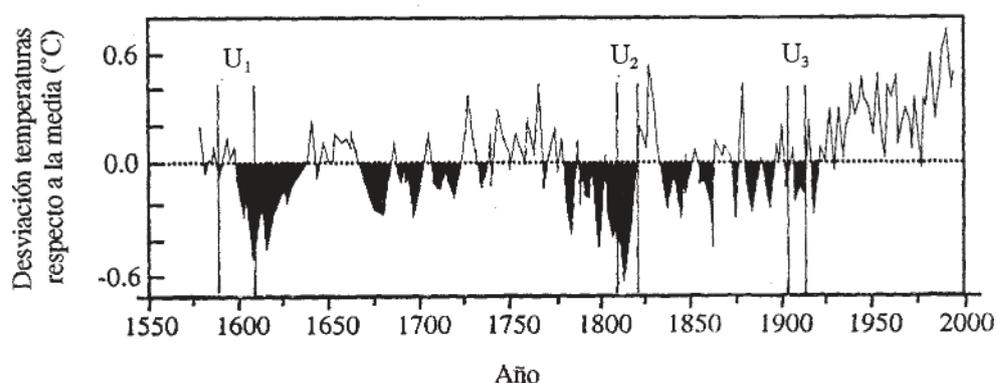


Figura 2. Evolución de las temperaturas medias en el hemisferio norte (1550-1990 d.C.) (modificado de BRYANT, 1997). Episodios detectados en el macizo de la Maladeta: U_1 (1590-1610 d.C.), U_2 (1810-1820 d.C.), U_3 (1905-1915 d.C.).

El rango de valores detectado en nuestro trabajo es similar al obtenido en los Alpes -también para la Pequeña Edad del Hielo- por HAEBERLI y PATZELT (1983) o HAEBERLI (1990); y en otros macizos montañosos del globo por PORTER (1986) o GROVE (1988), lo que parece avalar su fiabilidad. En la Figura 2 hemos insertado los tres episodios históricos identificados en el macizo dentro de una curva de temperaturas válida para el hemisferio norte desde 1550 d.C. hasta la actualidad (se ha tenido en cuenta un período de respuesta medio de los glaciares del macizo de diez años, que adelanta por tanto en ese lapso de tiempo las edades de la secuencia mencionada en el apartado anterior). Puede observarse en él una buena correspondencia entre los episodios mencionados en nuestro trabajo y los detectados a escala global: los dos momentos de desviaciones máximas de las temperaturas en sentido negativo respecto a los valores medios de la serie encuentran su plasmación en el avance de los hielos que generó en el macizo las morrenas de las unidades U_1 y U_2 ; también el período más reciente de estabilización en el retroceso durante el que se elaboraron las morrenas de la unidad U_3 puede identificarse en el gráfico. El que no se hayan conservado en la zona morrenas para los episodios fríos de menor entidad registrados entre 1660-1725 d.C., es un hecho que creemos está relacionado con la mayor expansión alcanzada por las pequeñas lenguas glaciares en los circos del macizo durante la fase posterior, de finales del siglo XVIII-comienzos del siglo XIX (la más

intensa), que dió lugar a los arcos morrénicos ya mencionados de la unidad U_2 : en ese avance probablemente quedaron arrasados los testimonios morrénicos que pudieran haberse formado en relación con esos episodios fríos intermedios. Más difícil de explicar es la ausencia de restos morrénicos ligados al retroceso generalizado del hielo que tuvo lugar desde el máximo secundario que marca la unidad U_2 hasta la actualidad, y en el que sólo se constatan –y en pocos puntos del macizo– las dispersas morrenas de la unidad U_3 : quizá lo continuado del proceso de deglaciación, sin apenas repuntes térmicos positivos de suficiente longitud (que no aparecen hasta precisamente el momento de la génesis de las morrenas U_3) pudiera haber influido; en cualquier caso, es este un hecho que necesitará de estudios adicionales en otros macizos glaciados próximos antes de ser solventado.

4. CONCLUSIONES

Con este trabajo hemos pretendido delimitar los rasgos térmicos generales existentes en el macizo de la Maladeta durante tres episodios de avance de las masas de hielo que se alojan en sus circos (siglos XVII-XX). Para ello hemos partido de la reconstrucción espacial de las relictas líneas de equilibrio glaciar y de su comparación con la hoy en día estimada en la región. Los resultados así obtenidos han permitido inferir una disminución en el valor de las temperaturas medias anuales en el macizo de $-0,76^{\circ}\text{C}$ (unidad morrénica U_1), $-0,38^{\circ}\text{C}$ (unidad morrénica U_2) y $-0,13^{\circ}\text{C}$ (unidad morrénica U_3), disminución ligada a un descenso neto en la altura de las líneas de equilibrio glaciar cercano a los 160 m (unidad morrénica U_1), 80 m (unidad morrénica U_2) y 27,5 m (unidad morrénica U_3). El método de trabajo adoptado, por otra parte, ofrece buenas posibilidades de aplicación en otros sectores glaciados de la cordillera pirenaica, ya que aunque los resultados obtenidos no permiten precisiones de detalle, sí que exhiben un excelente ajuste con los derivados a partir de otras metodologías.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRADLEY, R.S. (1985): *Quaternary paleoclimatology. Methods of paleoclimatic reconstruction*, London, Allen & Unwin, 472 pp.
- BRYANT, E. (1997): *Climate process & change*, Cambridge, Cambridge University Press, 209 pp.
- COPONS, R. y BORDONAU, J. (1994): “La Pequeña Edad del Hielo en el Macizo de la Maladeta (Alta cuenca del Ésera, Pirineos centrales)”, in MARTÍ BONO, C. y GARCÍA RUIZ, J.M. (Eds.): *El glaciario surpirenaico: nuevas aportaciones*, Logroño, Geoforma Ediciones, pp. 111-124.
- CORNISH, R. (1981): “Glaciers of the Loch Lomond Stadial in the Western Southern Uplands of Scotland”. *Proc. Geol. Assoc.*, **92**, 105-114.
- CHUECA, J. (1992): “Estimación de paleotemperaturas durante el Pleistoceno Final: Pirineo Central español”. *Estudios Geográficos*, LIII, **207**, 241-263.
- CHUECA, J. (1993): *Geomorfología de la Alta Ribagorza: análisis de la dinámica de procesos en el ámbito supraforestal*, Huesca, Asociación Guayente, Serie Estudios Geográficos, 1, 250 pp.

- CHUECA, J. y JULIÁN, A. (1996): "Datación de depósitos morrénicos de la Pequeña Edad del Hielo: macizo de la Maladeta", in PÉREZ ALBERTI, A. *et al.*, (Eds.): *Dinámica y evolución de medios cuaternarios*, Santiago de Compostela, Xunta de Galicia, pp. 171-182.
- CHUECA, J., PEÑA, J.L., LAMPRE, F., GARCÍA RUIZ, J.M. y MARTÍ BONO, C. (1998 a): *Los glaciares del Pirineo aragonés: estudio de su evolución y extensión actual*, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 104 pp.
- CHUECA, J., PEÑA, J.L., LAMPRE, F. y JULIÁN, A. (1998 b): "La Pequeña Edad del Hielo en el Pirineo central meridional: inferencias paleoambientales a partir de datos geomorfológicos", in GÓMEZ ORTIZ, A. y PÉREZ ALBERTI, A. (Eds.): *Las huellas glaciares de las montañas españolas*, Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, pp. 307-328.
- GROVE, J.M. (1988): *The Little Ice Age*, London, Methuen, 498 pp.
- HAEBERLI, W. (1990): "Glaciers and permafrost signals of 20th-century warming". *Annals of Glaciology*, **14**, 99-101.
- HAEBERLI, W. y PATZELT, G. (1983): "Permafrostkartierung im Gebiet der Hochebenkar-Blockgletscher, Obergurgl, Oetztaler Alpen". *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, **18**, 2, 127-150.
- JULIÁN, A. y CHUECA, J. (1998): "Le Petit Âge Glaciaire dans les Pyrénées centrales méridionales: estimation des paléotemperatures à partir d'inférences géomorphologiques". *Sud-Ouest Europeen*, **3**, 79-88.
- LAMPRE, F. (1994): "La línea de equilibrio glacial y los suelos helados en el macizo de la Maladeta (Pirineo aragonés): evolución desde la Pequeña Edad del Hielo y situación actual", in MARTÍ BONO, C. y GARCÍA RUIZ, J.M. (Eds.): *El glaciario surpirenaico: nuevas aportaciones*, Logroño, Geofoma Ediciones, pp. 125-142.
- LOWE, J.J. y WALKER, M.J.C. (1984): *Reconstructing Quaternary Environments*, Longman, Londres, 389 pp.
- PORTER, S.C. (1986): "Pattern and forcing of northern hemisphere glacier variations during the Last Millennium". *Quaternary Research*, **26**, 27-48.
- SERRANO, E. (1991): *Geomorfología glacial de las montañas y valles de Panticosa y de la ribera de Biescas (Pirineo aragonés)*, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, 957 pp.
- SERRANO, E. (1996), "Líneas de equilibrio glacial, glaciares rocosos y paleoambiente postglacial en la alta montaña pirenaica (macizo de Panticosa, Pirineo aragonés)", in PÉREZ ALBERTI, A. *et al.*, (Eds.): *Dinámica y evolución de medios cuaternarios*, Santiago de Compostela, Xunta de Galicia, pp. 157-170.
- SERRAT, D. (1980): "Estudio geomorfológico del Pirineo oriental (Puigmal, Costabona)". *Notes de Geografía Física*, **2**, 39-55.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en el Proyecto de Investigación "Estudio de la dinámica de los glaciares del Pirineo aragonés", financiado por el Consejo de Protección de los Glaciares Pirenaicos de la Diputación General de Aragón.

