

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS GLACIARES DEL MACIZO DE LA MALADETA (PIRINEO ESPAÑOL): FACTORES CONDICIONANTES

Javier CHUECA CÍA*, Asunción JULIÁN ANDRÉS* y Juan Ignacio LÓPEZ MORENO**

*Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza

**Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC) y Department of Geosciences. University of Fribourg (Switzerland)

RESUMEN

El presente trabajo analiza las pérdidas de superficie y volumen, para el periodo 1981-2005, en los glaciares localizados en el macizo de la Maladeta (Pirineo central español), junto a los factores que las han condicionado. Para cuantificar esa evolución glaciaria se ha recurrido a distintos materiales y métodos (análisis de fotografías aéreas; comparación de Modelos Digitales de Elevaciones), insertados en el contexto de un Sistema de Información Geográfica. El deterioro observado en todos los aparatos glaciares se relaciona con las variaciones climáticas registradas en la zona durante la etapa analizada (sobre todo con la menor acumulación de nieve y el aumento en las temperaturas máximas), aunque existen diferencias apreciables en función de la orientación de cada glaciar, su emplazamiento altitudinal y su tamaño inicial.

Palabras clave: Evolución glaciaria reciente, Sistemas de Información Geográfica, evolución climática, macizo de la Maladeta, Pirineos.

ABSTRACT

This work analyzes the losses in extent and volume, during the period 1981-2005, in the glaciers located in the Maladeta massif (Spanish central Pyrenees), as well as their controlling factors. To quantify the glacial evolution, several materials and methods have been used, implemented in the context of a Geographical Information System (analysis of aerial photographs; comparison of Digital Elevation Models). The recession observed in all glaciers seems to be mainly related with the regional evolution of temperature and precipitation, but local factors such as aspect of glaciers, elevation or initial size, control as well their detailed dynamics.

Key words: Recent glacial evolution, Geographical Information Systems, climatic evolution, Maladeta massif, Pyrenees.

1. INTRODUCCIÓN

La evolución experimentada por los glaciares pirenaicos desde el último máximo de la Pequeña Edad del Hielo (PEH) ha sido claramente regresiva: pérdidas notables de extensión y volumen se han podido observar en gran parte de los aparatos (glaciares y heleros) de las

vertientes tanto española como francesa (CHUECA *et al.*, 2004). En este sentido, las últimas décadas del siglo XX y el comienzo del actual se han caracterizado por registrar tasas de retroceso en superficie muy altas, similares a las calculadas para la fase inmediatamente posterior al máximo de la PEH (CHUECA *et al.*, 2003, 2005). El presente trabajo analiza y cuantifica esas pautas de degradación para el periodo 1981-2005 en uno de los macizos montañosos donde el fenómeno glaciar, a escala pirenaica, todavía presenta una notable entidad: el macizo de la Maladeta (Fig. 1).

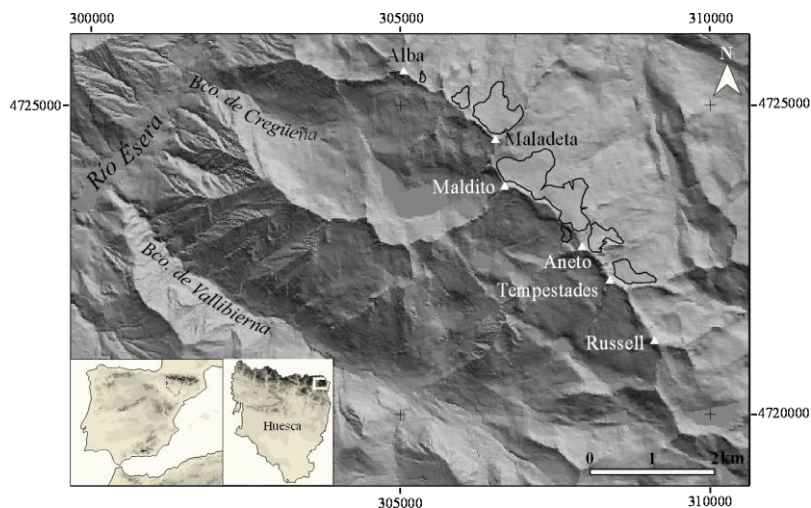


Fig. 1: Localización del área de estudio con la ubicación de los glaciares y heleros actuales del macizo de la Maladeta.

Los aparatos glaciares que se han incluido en el estudio incluyen la totalidad de cuerpos de hielo con rasgos de glaciar (o, como mínimo, glaciar-helero) existentes en el macizo en 1981: glaciar-helero de Alba y glaciares de la Maladeta, Aneto, Barrancs, Tempestades, Salenques occidental y Coronas. Los aparatos de muy reducida extensión, con categoría ya entonces de simple helero o helero-nevero no se han contemplado en el análisis (Salenques oriental, Cregüeña occidental y oriental y Llosás).

Para cuantificar las pérdidas de superficie y volumen se ha recurrido a distintos materiales y métodos, insertados en el contexto de un Sistema de Información Geográfica (SIG): i) análisis de fotografías aéreas del periodo 1981-2005; y ii) comparación de modelos digitales de elevaciones (MDE) de los años 1981 y 1999. Una vez calculadas (para el conjunto del macizo y a escala individual, por aparatos), estas pérdidas se han puesto en relación con distintos factores que controlan la evolución glaciar: i) de carácter climático general: estudiándose la evolución de las temperaturas (media, máxima y mínima) y de la precipitación en las últimas décadas en el entorno del macizo de la Maladeta; y ii) de índole más local, que influyen en la evolución de detalle de cada aparato: radiación solar, altitud, tamaño inicial, etc.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Fotografías aéreas: cálculo de pérdidas de extensión.

Las dos series de fotografías aéreas utilizadas para el cálculo de pérdidas de extensión son la del vuelo Pirineos-Sur (septiembre de 1981; escala aprox. 1:30.000; blanco y negro) y la del

vuelo Gobierno de Aragón (septiembre de 1999; escala aprox. 1:20.000; color). La cartografía de los perímetros glaciares se efectuó a partir de ellas, una vez corregidas geométricamente y georeferenciadas las correspondientes al año 1981 a partir de la utilización del módulo *Georeferencing* de ArcGIS, utilizando como base para los puntos de control las ortofotos y altimetría digital de 1999 (el vuelo de 1999 manejado ya estaba previamente ortorectificado; a partir de él se obtuvo la altimetría digital escala 1:5.000 que comercializa el Gobierno de Aragón y que se menciona más adelante). El Error Medio Cuadrático (EMC), medido para el conjunto de puntos de control a partir del análisis de los residuos, oscilaba según los fotogramas entre los 2,5 m y los 5,3 m, y fue considerado suficiente para nuestros propósitos. Los perímetros glaciares observados en el vuelo de 1999 se actualizaron a partir de los datos obtenidos en la campaña glaciológica del verano de 2005, que incluyó trabajo de campo y la realización de un vuelo aéreo con obtención de fotografías oblicuas de detalle.

2.2. Modelos digitales de elevaciones: cálculo de pérdidas de volumen.

La utilización de modelos digitales de elevaciones de diferentes fechas se está empezando a implantar como fuente para el cálculo de pérdidas de volumen y análisis del balance de masa en aparatos glaciares (COX y MARCH, 2004; RIVERA y CASASSA, 2004). El procedimiento se basa en la comparación, en el contexto de un SIG, de distintos MDE. En nuestro caso, los dos modelos digitales utilizados fueron los correspondientes a los años 1981 y 1999: i) MDE 1981: se generó a partir de la digitalización de curvas de nivel procedentes de la cartografía a escala 1:25.000 editada por el Instituto Geográfico Nacional (cuadrantes I y II correspondientes a la Hoja 180-Benasque, del Mapa Topográfico Nacional escala 1:50.000). La edición y publicación de estas hojas se llevó a cabo en 1991 y su restitución cartográfica está basada en un vuelo fotogramétrico llevado a cabo en 1981. Para evaluar la exactitud vertical del MDE generado, se utilizaron 30 puntos de control (distribuidos tanto por el interior como por los bordes del MDE) y se calculó el ECM asociado, que arrojó un valor de $\pm 2,3$ m; ii) MDE 1999: en este caso, se utilizó el comercializado por el Servicio de Cartografía del Gobierno de Aragón, escala 1:5.000, basado en la restitución fotogramétrica del vuelo correspondiente al año 1999 ya mencionado (vuelo Gobierno de Aragón). Su ECM estimado en la vertical es de $\pm 1,5$ m. El ECM vertical combinado de ambos modelos digitales se sitúa en $\pm 2,74$ m, y se estimó suficiente para los propósitos del trabajo a la vista de los resultados de pérdidas de espesor obtenidos (en general muy por encima de esa cifra). Tras la preparación de los modelos, el cálculo final de las pérdidas de espesor y la pérdida de volumen total se llevó a cabo en ArcGIS, comparando por procedimientos de *cut and fill* las diferencias de los valores altitudinales en los MDE de 1981 y 1999 correspondientes a cada aparato glaciar.

2.3. Datos climáticos (temperatura y precipitación).

Se obtuvo información de precipitación y temperatura de 45 y 16 estaciones climáticas, respectivamente, pertenecientes al Instituto Nacional de Meteorología (I.N.M.). El periodo estudiado abarca desde 1950 hasta 2002. Debido a la inexistencia de estaciones meteorológicas próximas a las áreas glaciadas, se utilizaron todos los registros existentes en los tramos altos de la cuenca del río Ésera y en valles cercanos con características climáticas similares (desde el Cinca hasta el Noguera Pallaresa). Estos debían cumplir el requisito de disponer de más de 20 años completos durante el periodo 1970-2002. Los valores mensuales ausentes se rellenaron mediante regresión lineal, utilizando como variables independientes las estaciones mejor correlacionadas con la serie a rellenar.

Para analizar el comportamiento general mostrado por las variables térmicas y pluviométricas en el conjunto de la zona de estudio se crearon series regionales mediante el siguiente

procedimiento: i) conversión de las series mensuales y anuales originales en series de unidades de desviación estándar respecto a la media; ii) promediado de las series normalizadas de todas las estaciones que mostraban una correlación significativa; para evitar la posibilidad de que un sector del área de estudio tuviera un mayor peso en la serie regional porque la densidad de los observatorios en él fuera mayor, cada observatorio se ponderó por el peso relativo del área que representa, obtenido en este caso mediante polígonos de Thiessen; iii) repetición de nuevo del proceso de normalización a la serie promedio.

La normalización de las series de precipitación y temperatura obtenidas a partir del promedio y la desviación estándar exige que las series candidatas se ajusten a una distribución normal. Para comprobar la normalidad de las series se utilizó la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. Las series mensuales de temperatura cumplen en su gran mayoría el precepto de normalidad. En cambio, algunos meses de las series de precipitación no superaban la prueba de normalidad. Estos casos se solucionaron mediante la transformación de las series originales en las de su logaritmo natural. El análisis de la evolución temporal de las distintas series se basó en la relación entre las series climáticas y el tiempo. Si existe una relación significativa de la respuesta de las variables climáticas con el paso del tiempo significa que la variable presenta tendencia temporal. En este trabajo la relación entre las variables y el tiempo se ha medido mediante métodos de correlación por rangos, que no se basan en la relación entre las cantidades de dos conjuntos de valores, sino en el orden relativo o rango que ocupan dentro de las secuencias utilizadas. Así, el estadístico utilizado es el coeficiente de correlación de Spearman, que no es sensible a la existencia de valores extremos o a la existencia de correlaciones no lineales, que sí afecta a los coeficientes de correlación lineal (BORRADAILE, 2003).

2.4. Radiación solar.

La radiación solar es determinante para numerosos procesos físicos y biológicos que se producen en nuestro planeta y, entre otros, condiciona las pautas de fusión en superficies glaciares. Los modelos de estimación de radiación solar potencial pueden incluirse en dos grandes categorías: i) los modelos de estimación puntual, que computan la insolación para una localización concreta basándose en la geometría de la orientación de esa superficie y el cielo visible desde la misma; el efecto local de la topografía se considera a partir de relaciones empíricas (RICH *et al.*, 1994); y ii) los modelos de estimación por áreas, que calculan la insolación para un área geográfica determinada partiendo de los datos de geometría del terreno aportados por un modelo digital de elevaciones (HEGGEM *et al.*, 2001).

En nuestro caso hemos optado por esta segunda aproximación, utilizando el módulo *INSOLDIA* del SIG MiraMon, atendiendo a las recomendaciones de PONS (1996). Se obtuvo, para cada celda del MDE, la radiación solar potencial (medida en $10\text{KJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}\cdot\mu\text{m}^{-1}$) para los meses de verano (julio, agosto y septiembre) y el total anual, por ser ambos periodos de interés de cara a establecer relaciones con el balance de masa glaciar. En el proceso de cálculo, el programa considera la latitud, altitud, orientación, efecto de las sombras por la topografía circundante (precisión en acimut: 10° ; precisión en altura: 1°), trayectoria solar a lo largo del día (horaria) y ángulos de incidencia en cada celda (precisión dependiente de la resolución planimétrica del MDE), distancia Tierra-Sol (mensual) y el efecto de extinción atmosférica (a falta de estaciones meteorológicas próximas, se utilizó el valor estándar recomendado de condiciones de atmósfera clara).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evolución climática.

La evolución de los glaciares se encuentra íntimamente relacionada con las condiciones climáticas y meteorológicas que se producen en su entorno. La elevada sensibilidad que muestran respecto a dichas condiciones (sobre todo los de más reducido tamaño, como los analizados aquí), explica que se consideren uno de los mejores indicadores proxy de la evolución del clima tanto a escala regional como global.

Mes	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Temperatura media	Precipitación
Enero	0,15	-0,04	0,13	0,03
Febrero	0,06	0,23	0,18	-0,42*
Marzo	-0,02	0,29*	0,21	-0,42*
Abril	-0,41*	0,06	-0,15	0,11
Mayo	-0,28*	0,05	-0,11	0,03
Junio	-0,28*	0,41*	0,15	-0,31*
Julio	-0,08	0,49*	0,26	-0,19
Agosto	0,00	0,58*	0,42*	-0,26
Septiembre	-0,26	0,06	-0,12	-0,06
Octubre	-0,17	-0,03	-0,13	0,04
Noviembre	0,03	-0,04	-0,02	-0,04
Diciembre	0,12	-0,02	0,10	-0,07

Tabla 1: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN (RHO DE SPEARMAN) ENTRE VALORES DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA Y LA EVOLUCIÓN TEMPORAL (1950-2002) EN LA ZONA DE ESTUDIO (CON ASTERISCO APARECEN SEÑALADAS LAS CORRELACIONES SIGNIFICATIVAS AL 95%)

La Tabla 1 recoge las tendencias de los valores de temperatura y precipitación durante el periodo 1950-2002. En general se observan importantes diferencias entre el signo y significación de las tendencias de cada parámetro a lo largo del año. Así, las temperaturas mínimas muestran un incremento significativo ($\alpha < 0,05$) durante los meses de abril, mayo y junio. En septiembre se observa un descenso de cierta magnitud, pero carente de significación, y apenas han mostrado cambios durante el resto del año. Las temperaturas máximas han aumentado de forma significativa en los meses de marzo, junio, julio y agosto. En febrero el coeficiente es positivo, pero carente de significación. El resto del año las temperaturas máximas se han mantenido muy estables con coeficientes próximos a cero. Puesto que la temperatura media se estima como el promedio entre los valores mínimos y máximos, la tendencia que muestran sus valores expresan una situación intermedia entre las dos variables mostradas anteriormente. Únicamente posee significación estadística el incremento ocurrido en el mes de agosto. El resto de los meses, carecen de significación, aunque en ocasiones los coeficientes son positivos, como sucede en febrero, marzo y julio. La precipitación muestra descensos acusados en los meses de febrero, marzo y junio. Los meses de julio y agosto muestran un descenso más moderado, y por tanto carente de significación estadística. Los coeficientes del resto del año sugieren que apenas han mostrado variación desde las últimas décadas.

A la hora de conocer la relación entre las oscilaciones climáticas y la dinámica glaciar en la zona de estudio, resulta de especial interés considerar la evolución de las variables disponibles durante los periodos del año que mejor sintetizan el balance de masa de sus glaciares. Así, se debe considerar la precipitación acumulada durante el periodo en el que ésta se produce

mayoritariamente en forma de nieve y los procesos de congelación dominan a los de fusión, y la temperatura promedio de los meses en los que domina la fusión. La determinación de los periodos en los que dominan estos procesos de fusión y congelación se fundamentó en el cálculo de la altura a la que se encuentra la isoterma media mensual de 0°C (RASO y GARCÍA LOUREIRO, 1998), en el entorno de la zona glaciada, durante el periodo 1970-2002. La estimación de las altitudes a las que se encuentra la isoterma en cada mes se basó en el gradiente térmico obtenido para la zona de estudio a partir de la temperatura media de cada mes (periodo 1970-2002) y la altitud a la que se encuentra cada observatorio utilizado. El efecto del incremento de gradiente durante los meses calidos es evidente, tendiendo a reducirse progresivamente hacia los meses más fríos. Considerando que los glaciares del macizo de la Maladeta se encuentran en todos los casos (tanto en la actualidad como a comienzos de los años 80) por encima de los 2.700 m, el periodo en el que domina la acumulación de nieve se prolonga desde noviembre hasta mayo, mientras que la fusión domina desde junio hasta octubre. La inclusión del mes de octubre en el periodo de fusión, a pesar de que la isoterma de 0°C se encuentre en torno a 2.650 m, se basó en la escasa diferencia altitudinal con la base de los glaciares y la escasa aportación de este mes al total de la innivación anual para la zona de la Alta Ribagorza aragonesa (CHUECA, 1993).

La Figura 2 muestra la evolución de la temperatura mínima, máxima y media durante el periodo de fusión, y la precipitación durante el periodo de acumulación, para el tramo 1950-2002. En la figura, las curvas de evolución de las cuatro variables desde 1980 se encuentran destacadas ya que representa el periodo del que se reconstruye la evolución glaciar en el presente trabajo.

La temperatura mínima muestra a lo largo de las últimas décadas un comportamiento cíclico en torno a la media. Así, desde 1950 hasta 1970 predominan los valores positivos, mientras la década de los setenta se caracteriza por la persistencia de las anomalías negativas. En los años ochenta se produce una recuperación de los valores térmicos, volviendo a dominar los de signo negativo desde la década de los noventa hasta el 2002. La persistencia e intensidad del signo negativo en los últimos años explica que la línea de tendencia muestre un suave descenso ($\rho = -0,21$) aunque carente de significación (Fig. 2A).

La evolución de las temperaturas máximas resulta bien distinta a la descrita para los valores mínimos. Si bien los valores presentan ciclos de una duración aproximada de diez años, estos siguen una persistente tendencia positiva desde mediados de los años cincuenta hasta mediados de los ochenta. En las dos últimas décadas su comportamiento es más estable, destacando importantes anomalías negativas a comienzos de los años noventa y una elevada irregularidad interanual durante la última década. El acusado y estadísticamente significativo ($\rho = 0,50$) incremento térmico supone que durante el periodo 1981-2005, en el que se ha reconstruido la evolución de los glaciares, únicamente cuatro años se hayan observado valores por debajo de la media del periodo 1950, y en ocho ocasiones las anomalías positivas han excedido una desviación estándar (Fig. 2B).

La temperatura media, al ser el promedio entre los valores máximos y mínimos, muestra en su evolución un comportamiento intermedio respecto a las series mostradas en las Figuras 4A y B. Así, se obtiene una tendencia positiva y significativa, aunque con una pendiente sensiblemente inferior a la observada para los valores máximos ($\rho = 0,34$) (Fig. 2C).

La evolución de la precipitación durante los meses en los que domina la acumulación de nieve sobre la fusión (Fig. 2D) presenta dos periodos bien diferenciados: i) desde 1950 hasta 1980,

cuando dominan de forma clara las anomalías positivas o valores próximos a la media; y ii) el periodo 1980-2002 en el que predominan de forma clara las anomalías negativas, especialmente desde finales de los años ochenta hasta mediados de los noventa. En el periodo más reciente, dentro del que se enmarca la evolución de los glaciares del macizo presentada aquí, únicamente en cinco ocasiones se supera la media del periodo 1950-2002. Así, la tendencia de las últimas décadas posee un coeficiente negativo ($\rho = -0,35$) y estadísticamente significativo.

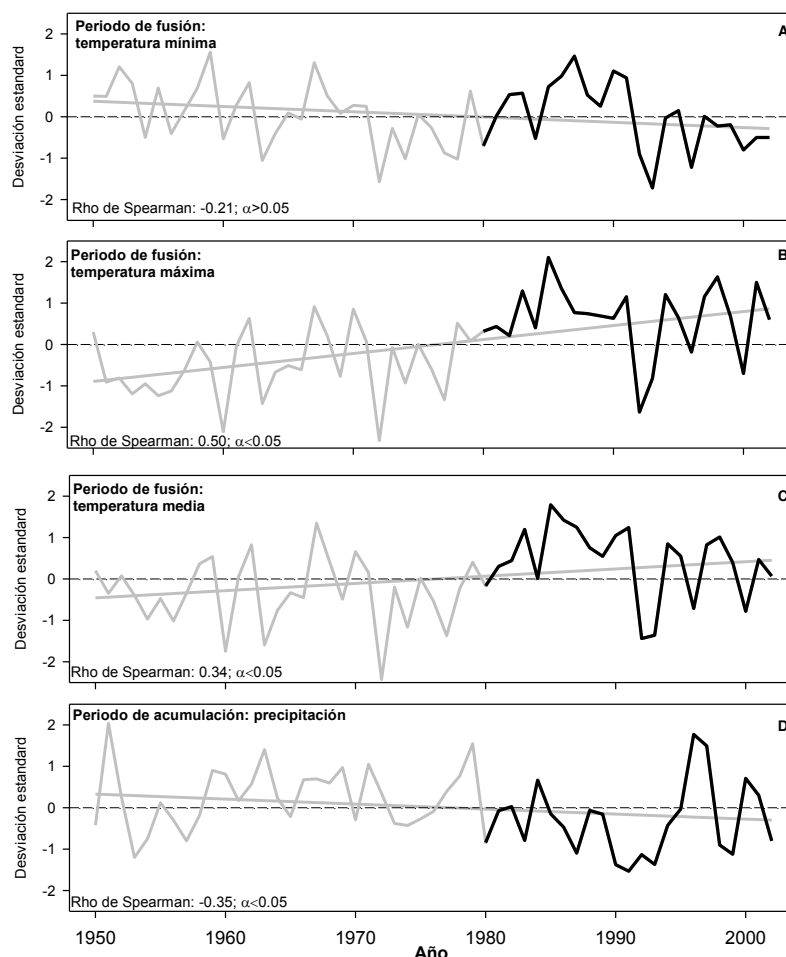


Fig. 2: Evolución de la temperatura en el periodo de fusión y la precipitación en el periodo de acumulación durante la segunda mitad del siglo XX.

3.2. Pérdidas de superficie y volumen.

La cartografía con las pérdidas de superficie y volumen de los glaciares analizados aparece en la Figura 3, y su cuantificación, junto a otros parámetros asociados, se recoge en las Tablas 2 y 3. En términos generales, la evolución de todos los cuerpos de hielo ha sido la misma, con pérdidas marcadas de área y volumen y asociados incrementos en la localización altitudinal media de cada aparato.

Los glaciares del macizo de la Maladeta, durante el período 1981-2005, decrecieron en superficie un 33,5%, pasando de 233,0 ha a 155,0 ha. La tasa de retroceso se situó en 3,2 ha/año. Las pérdidas en volumen total de hielo entre 1981-1999 ascendieron a 0,013 km³, con una tasa de 725.673,57 m³/año (al no existir estimaciones de volumen para los glaciares del macizo en 1981 no es posible apreciar la importancia relativa de estas pérdidas sobre el total

inicial de cada masa glaciaria). De cara a poder comparar los valores de aparatos con extensiones distintas, se diseñó un índice que pone en relación las pérdidas de volumen registradas durante el periodo 1981-1999 con la superficie de cada aparato en 1981 (Índice PV/Sup). Su valor general para el macizo en el periodo 1981-1999 es de 5,60. Por último, la altitud media de los glaciares estudiados ascendió entre 1981 y 2005 un total de 42 m, con una tasa de incremento de 1,75 m/año.

	Pérdida vol. 1981-99 (m ³)	Sup. 1981 (ha)	Sup. 2005 (ha)	% Pérd. Sup. 1981-2005	Índice PV/Sup
Alba	120.891,2	2,6	1,0	62,52	4,51
Maladeta	2.621.193,0	48,9	43,0 (6,3+36,7)	12,02	5,35
Aneto	4.736.314,5	106,7	79,6	25,36	4,43
Barrancs	1.190.135,3	22,4	13,9	37,97	5,29
Tempestades	2.051.492,2	28,7	14,5	49,42	7,12
Salenques	896.866,3	12,8	-	100,00	6,98
Coronas	1.445.231,6	10,5	2,7	74,00	13,67

Tabla 2: VALORES DE EXTENSIÓN SUPERFICIAL Y PÉRDIDA DE VOLUMEN EN LOS GLACIARES ANALIZADOS (EL PORCENTAJE DE PÉRDIDA DE SUPERFICIE DEL GLACIAR DE LA MALADETA SE HA CALCULADO SUMANDO LA EXTENSIÓN EN 2005 DE SUS DOS APARATOS ACTUALES)

	Alt. máx. 1981	Alt. mín. 1981	Alt. media 1981	Alt. máx. 2005	Alt. mín. 2005	Alt. media 2005	Incremento alt. media 1981-2005
Alba	3.039	2.923	2.970	3.038	2.950	2.992	22
Maladeta	3.206	2.801	3.051	3.196	2.884	3061,5	10,5
Aneto	3.325	2.855	3.101	3.316	2.911	3.126	25
Barrancs	3.332	2.899	3.080	3.323	2.938	3.121	41
Tempestades	3.085	2.792	2.928	3.070	2.890	2.966	38
Salenques	3.122	2.854	2.988	-	-	-	-
Coronas	3.213	2.984	3.081	3.206	3.100	3.156	75

Tabla 3: VALORES DE LOCALIZACIÓN ALTITUDINAL (EN M) MÁXIMA, MÍNIMA Y MEDIA EN LOS GLACIARES ANALIZADOS (LAS ALTURAS MÁXIMA, MÍNIMA Y MEDIA DEL GLACIAR DE LA MALADETA EN 2005 SE HAN OBTENIDO PROMEDIANDO LAS DE LOS APARATOS OCCIDENTAL Y ORIENTAL)

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, estos cambios están en clara y casi inmediata relación (el tiempo de respuesta de glaciares de tan pequeño tamaño es casi inexistente) con las variaciones climáticas generales registradas en la zona durante el periodo de estudio (menor acumulación de nieve, aumento en las temperaturas máximas) y han sido analizados con detalle para periodos de tiempo prolongados en algunos trabajos previos (CHUECA *et al.*, 2003; 2005). Sin embargo, existen diferencias espaciales de detalle significativas en la magnitud de estos cambios, que se relacionan fundamentalmente con la orientación de cada glaciar (que controla en gran medida los aportes de radiación solar), su altitud y su tamaño inicial. Parámetros como la presencia de cubiertas de derrubios (por caída de bloques procedentes de las paredes de la caja glaciaria o por afloramiento de material englacial), que ralentiza los procesos de ablación y, por tanto, minimiza las pérdidas en superficie y volumen, y que son frecuentes en zonas en proceso de deglaciación, no han tenido durante el periodo analizado, ni tienen todavía, excesiva importancia en los aparatos estudiados.

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS GLACIARES DEL MACIZO DE LA MALADETA (PIRINEO ESPAÑOL): FACTORES CONDICIONANTES

Entre las diferencias espaciales observadas, las más evidentes son las que afectan a los glaciares en función de su orientación al norte o al sur. Para cuantificar sus repercusiones, se agruparon y promediaron los valores de pérdida de superficie, volumen e incremento altitudinal en dos conjuntos: glaciares en orientación de componente norte (incluyendo a los aparatos de Alba, Maladeta, Aneto, Barrancs, Tempestades y Salenques occidental) y glaciares en orientación de componente sur (glaciar de Coronas). De esta forma, se constató que las mayores pérdidas e incrementos en altura se registraban en las orientaciones de solana, frente a las de los aparatos con orientación en umbría. Durante los periodos estudiados, los glaciares orientados al sur decrecieron en área el 74% (0,3 ha/año), presentan un índice PV/Sup de 13,67 (0,75 unidades PV/Sup/año) y su altitud media aumentó 75 m (3,12 m/año); los glaciares orientados al norte disminuyeron su superficie en un 31,6% (2,9 ha/año), tienen un índice PV/Sup de 5,22 (0,29 unidades PV/Sup/año) y su altitud media se incrementó en 33,7 m (1,40 m/año).

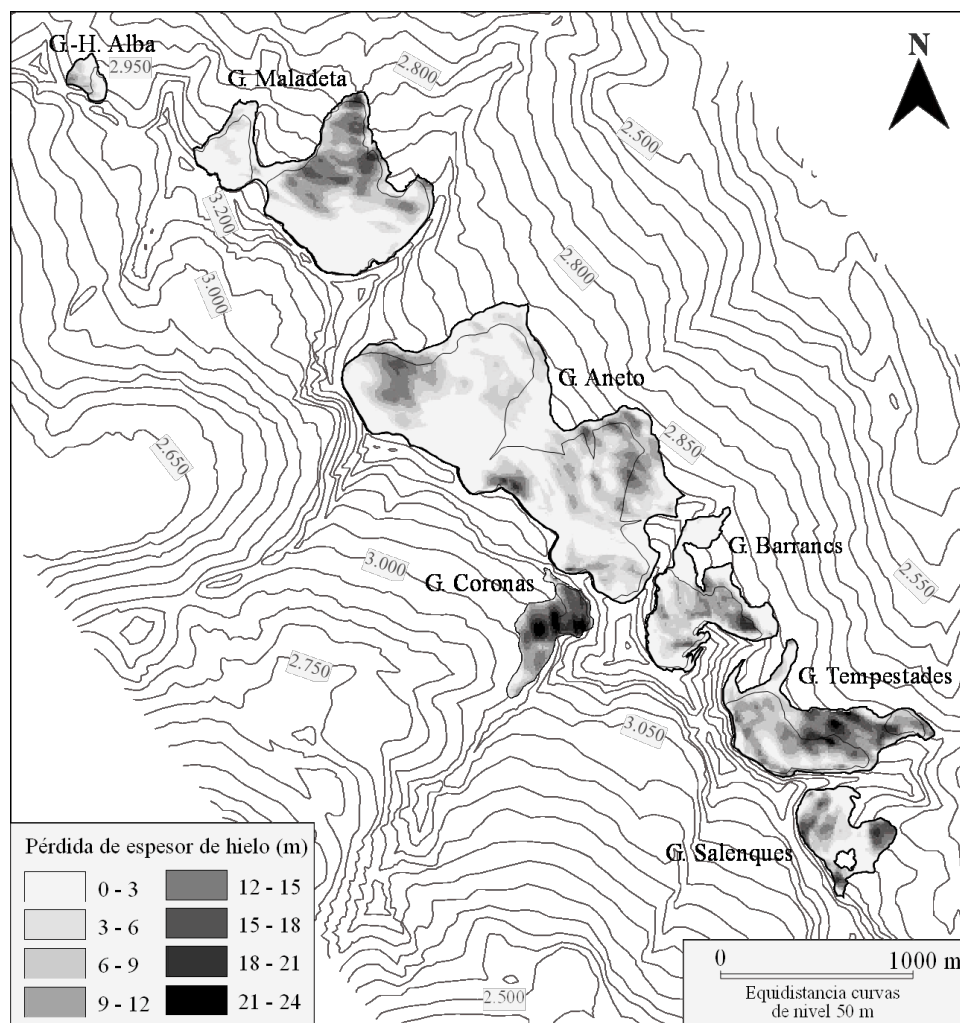


Fig. 3: Pérdidas de extensión superficial (perímetros de 1981 y 2005) y volumen en los glaciares analizados.

Adicionalmente se estudiaron, a partir de análisis de correlación lineal simple, los grados de asociación existentes entre distintas variables que influyen -a escala espacial de detalle- en el comportamiento evolutivo de cada aparato: radiación solar potencial estival y anual (calculada para la superficie de cada glaciar en 1981), índice PV/Sup, altitud media en 1981, superficie

en 1981, porcentaje de pérdida de superficie 1981-2005 e incremento en la altitud media. En la Tabla 4 se muestran los resultados de las correlaciones bivariadas y su significación.

Los cinco casos en los que se han encontrado asociaciones significativas ($\alpha \leq 0,05$) son los que relacionan a las variables de radiación solar anual y estival media con el índice PV/Sup, a la radiación solar anual y estival media con los incrementos en la altitud media, y a la superficie inicial de cada aparato con el porcentaje de pérdida de superficie (existe igualmente una correlación apreciable, aunque no significativa, entre los valores de radiación y el porcentaje de pérdida de superficie). La radiación solar, por tanto, parece controlar de forma clara las pérdidas de volumen por unidad de superficie registradas en los aparatos glaciares del macizo y el incremento en altitud derivado de su degradación: a mayor cantidad de radiación solar, mayores son las pérdidas de volumen por unidad de superficie observadas y mayor el incremento altitudinal medio de cada glaciar. También se ha constatado que, cuanto mayor es la superficie inicial de cada aparato, menor es el porcentaje en el que decrece su superficie; este hecho atestigua la mayor sensibilidad de los glaciares de reducido tamaño, que normalmente tienen un rango altitudinal más limitado, ante los cambios en las variables ambientales básicas (temperaturas, precipitaciones) que tienen siempre un fuerte componente de gradiente vertical en su comportamiento.

Variables		R Pearson	Sig.
Índice PV/Sup	Rad. anual media	0,738	0,02
Índice PV/Sup	Rad. estival media	0,712	0,03
Índice PV/Sup	Alt. media 1981	0,135	0,38
Índice PV/Sup	Superficie 1981	-0,393	0,19
% Pérdida Superficie	Superficie 1981	-0,656	0,05
% Pérdida Superficie	Rad. anual media	0,538	0,10
% Pérdida Superficie	Rad. estival media	0,478	0,13
Incremento alt. media	Rad. anual media	0,799	0,02
Incremento alt. media	Rad. estival media	0,736	0,04

Tabla 4: COEFICIENTES DE CORRELACIÓN ENTRE VARIABLES DE INTERÉS Y NIVEL DE SIGNIFICACIÓN

4. CONCLUSIONES

La evolución glaciar observada en el macizo de la Maladeta entre 1981 y 2005 está caracterizada por las notables pérdidas de extensión y volumen registradas en todos sus aparatos glaciares. Estos cambios, que muestran una tendencia similar a la mencionada para el periodo reciente a escala global (HAEBERLI *et al.*, 2005), están en relación con las variaciones climáticas generales registradas en la zona durante la etapa analizada, sobre todo con la menor acumulación de nieve y el aumento en las temperaturas máximas. Sin embargo, existen diferencias de detalle significativas en la magnitud de estos cambios, que se relacionan fundamentalmente con la orientación de cada glaciar (que controla las entradas de radiación solar), su altitud y su tamaño inicial.

El periodo comprendido entre 1981 y 1999 ha sido una de las etapas en las se ha perdido más superficie y volumen glaciados desde el final del último máximo de la Pequeña Edad del Hielo. Los comienzos de la década actual parecen indicar una continuidad de las condiciones negativas para el desarrollo glaciar. Además, los escenarios climáticos previstos para el siglo XXI (HOUGHTON *et al.*, 2001) predicen para las zonas de montaña Mediterránea un incremento térmico y un descenso de la precipitación que supondrían un claro deterioro de los balances de masa. De esta forma, y en esos contextos, el descenso generalizado de las

superficies glaciadas y el volumen de hielo, y la próxima desaparición de los aparatos ubicados en las zonas más desfavorables -como el sector pirenaico analizado-, serían un hecho.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto “Estudio de la dinámica de los glaciares del Pirineo aragonés” (H-9007CMA), financiado por el Gobierno de Aragón. Y de los proyectos “Procesos hidrológicos y erosivos en cuencas pirenaicas en relación a cambios de usos del suelo y variabilidad climática” (PIRIHEROS, REN 2003-08678/HID) y “Caracterización y modelización de procesos hidrológicos en cuencas aforadas para la predicción en cuencas no aforadas” (CANOA, CGL 2004-04919-C02-01), financiados por la CICYT.

6. REFERENCIAS

- BORRADAILE, G. (2003). *Statistics of Earth Science Data*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 351 pp.
- CHUECA, J. (1993). *Geomorfología de la Alta Ribagorza: análisis de la dinámica de procesos en el ámbito supraforestal*. Asociación Guayente, Benasque, 250 pp.
- CHUECA, J., JULIÁN, A. y LÓPEZ MORENO, J.I. (2003). Variations of Glaciar Coronas, Pyrenees, Spain, during the 20th century. *Journal of Glaciology*, 49 (166), pp. 449-455.
- CHUECA, J., JULIÁN, A. y RENÉ, P. (2004). Estado de los glaciares en la cordillera pirenaica (vertientes española y francesa) a finales del siglo XX. En: BENITO, G. y Díez HERRERO, A. (Eds.). *Contribuciones recientes sobre geomorfología (Actas VIII Reunión Nacional de Geomorfología)*. SEG-CSIC, Madrid, pp. 91-102.
- CHUECA, J., JULIÁN, A., SAZ, M.A., CREUS, J. y LÓPEZ MORENO, J.I. (2005). Responses to climatic changes since the Little Ice Age on Maladeta Glacier (Central Pyrenees). *Geomorphology*, 68, pp. 167-182.
- COX, L.H. y MARCH, R.S. (2004). Comparison of geodetic and glaciological mass-balance techniques, Gulkana Glacier, Alaska, U.S.A. *Journal of Glaciology*, 50(170), pp. 363-370.
- HAEBERLI, W., ZEMP, M., FRAUENFELDER, R., HOELZLE, M. y KÄÄB, A. (Eds.) (2005). *Fluctuations of glaciers 1995-2000*. Volume III. IUGG (CCS)-UNEP-UNESCO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, 307 pp.
- HEGGEM, E.S.F., ETZELMÜLLER, B. y BERTHLING, I. (2001). Topographic radiation balance models: sensitivity and application in periglacial geomorphology. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 55, pp. 203-211.
- HOUGHTON, J.T., DING, D.J., GRIGGS, M., NOGUER, M., VAN DER LINDEN, P.J., DAI, X., MASKELL, K. & JOHNSON, C.A. (Eds.) (2001). *Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, New York, 881 pp.
- PONS, X. (1996). Estimación de la radiación solar a partir de modelos digitales de elevaciones. Propuesta metodológica. En: JUARISTI, J. y MORO, I. (Eds.). *VII Coloquio de Geografía Cuantitativa*. Vitoria, pp. 87-97.
- RASO, J.P. y GARCÍA LOUREIRO, M.C. (1998). Oscillacions termométriques a l'entorn de 0°C a Andorra. En: GÓMEZ ORTIZ, A., SALVADOR, F., SCHULTE, L. y GARCÍA NAVARRO, A. (Eds.). *Procesos biofísicos actuales en medios fríos*. U. de Barcelona, Barcelona, pp. 55-71.

RICH, P.M., DUBAYAH, R., HETRICK, W.A. y SAVING, S.C. (1994). Using viewshed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, 4, pp. 524–529.

RIVERA, A. y CASASSA, G. (2004). Ice elevation, areal, and frontal changes of glaciers from National Park Torres del Paine, Southern Patagonia Icefield. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36 (4), pp. 379-389.