

## Nuevos datos sobre la Pequeña Edad de Hielo en el macizo de Eriste (Pirineos centrales)

Por Redacción - 22 marzo, 2019



### Premios ICOG a la excelencia académica 1ª edición, 2018.



Ixeia Vidaller<sup>1</sup>, Ánchel Belmonte<sup>2</sup> y Jesús Guerrero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Aragón; [697693@unizar.es](mailto:697693@unizar.es); [jgiturbe@unizar.es](mailto:jgiturbe@unizar.es)

<sup>2</sup>Sobrarbe-Pirineos UNESCO Global-Geopark, Boltaña, Huesca, Aragón; [ajbelmonte@educa.aragon.es](mailto:ajbelmonte@educa.aragon.es)

**ABSTRACT:** The Eriste massif is located in the Pyrenees; between Lardana (3369 m) and Cotiella (2912 m) peaks. This landscape is conditioned by the lithology and periglacial climatic conditions. During the Little Ice Age (LIA), the Eriste massif had three glaciers with N orientation, six with S orientation, three with W orientation and four with E orientation. The major cluster of LIA moraines is in the Bagüeña cirque. Two glacial phases have been detected, associated with the maximum glacier expansion of LIA (1600-1750) and a posterior phase between 1905 and 1920. The present study makes a paleoambiental reconstruction from the LIA to present conditions according to the paleoELAs shift. PaleoELAs results (obtained from an altitudinal temperature gradient of  $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  and ELA at 3100 m) are an average of 2685 m and suggest a  $2.5^{\circ}\text{C}$  temperature increase from the LIA and the present ELA.

**Key words:** Eriste massif, Little Ice Age, Moraine, PaleoELAs, Pyrenees.

**RESUMEN:** El macizo de Eriste se localiza en los Pirineos; entre los picos Lardana (3.369 m) y Cotiella (2.912 m). Su paisaje está condicionado por la litología y el desarrollo de procesos periglaciares. Durante la Pequeña Edad de Hielo (PEH), este macizo tuvo 3 glaciares con orientación N, 6 con orientación S, 3 con orientación W y 4 con orientación E. La mayor agrupación de morrenas de esta época se concentra en el circo de Bagüeña. Se han detectado dos fases glaciares asociadas con la máxima expansión glacial de la PEH (1600-1750) y otra posterior y de menor extensión entre 1905 y 1920. El presente estudio pretende realizar una reconstrucción paleoambiental desde la PEH hasta la actualidad en base a los cambios de las paleoELAs. Los resultados de las paleoELAs (obtenidos para un gradiente altitudinal de temperatura de  $-0,6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  y una ELA actual de 3.100 m presentan una media de 2.685 m, lo que sugiere un incremento de temperatura de unos  $2,5^{\circ}\text{C}$  desde el máximo de la PEH hasta la actualidad.

**Palabras clave:** Macizo de Eriste, morrena, paleoELA, Pequeña Edad de Hielo (PEH), Pirineos.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El macizo de Eriste es un macizo principalmente granítico, situado en la Zona Axial del Pirineo, dentro del Parque Natural Posets-Maladeta (Huesca). Hasta hace algunas décadas los glaciares ocupaban los circos más elevados, dejando la huella que se pretende estudiar en este trabajo, centrado en la Pequeña Edad del Hielo. El término PEH fue acuñado por *Matthes (1939)* y definido por *Dyurgerov y Meier (2000)* y *Grove (2004)* como un periodo frío entre los siglos XIII-XIV y mediados del siglo XIX que supuso un enfriamiento global de entre 1 y 2°C. En los Pirineos, los glaciares de la PEH estaban limitados a los fondos del circo (*Gellatly et al., 1992*).

La ELA (Equilibrium Line Altitude) es una isohipsa que representa la línea de equilibrio de los glaciares, separando la zona de acumulación de la de ablación. Es sensible a los cambios climáticos, por lo que su estudio permite inferir las variaciones ambientales del pasado (*Sissons y Sutherland, 1976; Sutherland, 1984; Dahl y Nesje, 1992; Úbeda et al., 2018*).

## 2. OBJETIVOS

El principal objetivo de este trabajo es el cálculo de paleoELAs de los glaciares del macizo de Eriste durante la PEH mediante fotogrametría, trabajo de campo y el uso de Sistemas de Información Geográfica. Dicho objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos concretos:

- Revisión de bibliografía de las fases glaciares en el macizo de Eriste durante la PEH.
- Estudio geomorfológico detallado haciendo especial hincapié en las morfologías glaciares y periglaciares.
- Determinación de las paleoELAs por medio de distinto métodos (AAR, AABR, AA, THAR y MGE) y comparación de los resultados obtenidos.
- Correlación de las paleoELAs del macizo de Eriste con las calculadas en otros puntos del Pirineo.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1 Revisión bibliográfica

En primer lugar se ha llevado a cabo una labor de revisión bibliográfica. Se trata de una zona que cuenta con muy pocos estudios geológicos de detalle y casi ninguno geomorfológico. Entre los trabajos previos se encuentra la cartografía geológica y la memoria explicativa de la Hoja 179 (Bielsa) a escala 1:50.000 elaborada por el IGME, pero sobre todo destaca la cartografía geomorfológica de la Hoja de Benasque a escala 1:50.000 de (*García-Ruiz et al., 1992*).

### 3.2 Estudio geomorfológico

La realización del estudio geomorfológico detallado necesitó de fotografías aéreas del vuelo PNOA 2012 (obtenidas del Centro de Descargas del IGN) y del de 1957 (prestadas por el Instituto de Estudios Altoaragoneses) y trabajo de campo. El objetivo principal de este estudio fue la localización y caracterización de registros glaciares de la PEH que permitirán la reconstrucción de estos paleoglaciares y el posterior cálculo de paleoELAs.

### 3.3 Cálculo de paleoELAs

El cálculo de paleoELAs se ha determinado a partir de la topografía y del registro glaciar observado. Todos los métodos de cálculo parten de la base de la reconstrucción del paleoglaciar. La delimitación superior es el factor más controvertido y se deja a "criterio de experto". En este caso se ha seguido la metodología empleada por *Belmonte Ribas (2014)*, quien a partir de la morfología de los circos, toma como límite superior el comienzo de los procesos glaciares y periglaciares, manteniendo una forma coherente del glaciar, es decir, que no presente giros bruscos ni morfologías angulosas. La reconstrucción topográfica se ha llevado a cabo con la ayuda

de modelos digitales de elevaciones de alta resolución LIDAR de 0,5m/píxel obtenidos del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG).

Existen numerosos métodos para el cálculo de paleoELAs. La obtención de datos a partir de ArcGIS es el método más laborioso y consiste en dividir cada reconstrucción del paleoglaciar en polígonos equidistantes en altura y sumar sus áreas desde la cota más baja hasta alcanzar el 35% del área total (Porter, 2001). El método THAR (*Termonious Headwall Altitude Ratio*) asume que la ELA se sitúa a una altura media entre la altura máxima y mínima del glaciar. Se obtiene mediante la fórmula:

$$ELA = H_{\min} + THAR * (H_{\max} - H_{\min})$$

siendo THAR 0,5 según Porter (2001) y 0,4 según Meierding (1982). El método AAR (*Accumulation-Area Ratio*) se basa en los trabajos de Brückner, 1886 y Ritcher, 1885, recopilados por Porter (2001), considerando la relación entre el área de acumulación y el área total de 0,650,05. Este método tiene en cuenta que la hipsometría y la forma del glaciar varían en función del balance de masas, por lo que se consideran situaciones de equilibrio (Porter, 2001; Serrano y González, 2004). Este método se puede aplicar extrayendo los datos necesarios de ArcGIS o mediante la herramienta "ELA Calculation Tool" desarrollada por Pellitero et al., 2015 (que también permite calcular las ELAs mediante los métodos AA, AABR y MGE). El método AA (*Area x Altitude*) fue desarrollado por Kurowski en 1891, y Osmaston (2005) desarrolló la siguiente fórmula:

$$ELA = \frac{H_{\text{media}} * \text{área de cada poligono equidistante}}{\text{área total del glaciar}}$$

Este mismo autor desarrolló un método muy complejo, pero a la vez muy fiable, el AABR (*Area \* Altitude Balance Ratio*), basado en el cálculo del *Balance Ratio* mediante la fórmula:

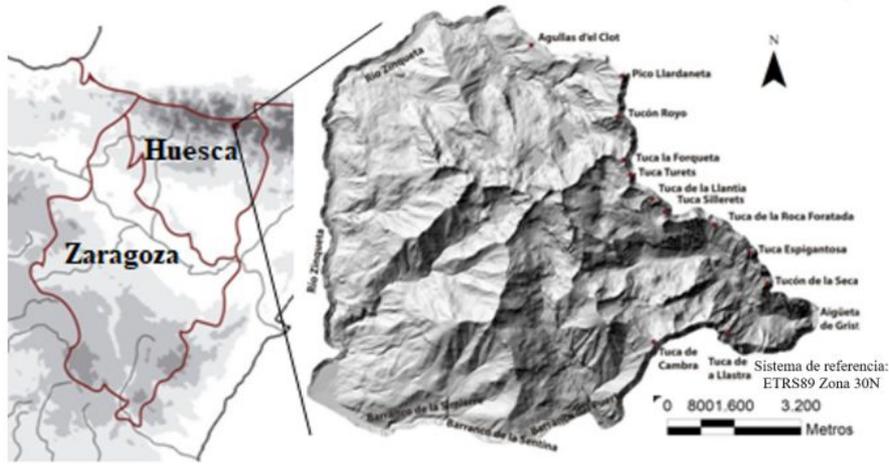
$$BR = \frac{Z_{ac} * A_{ac}}{Z_{ab} * A_{ab}}$$

( $Z_{ac}$ : altitud media del área de acumulación,  $Z_{ab}$ : altitud media del área de ablación,  $A_{ac}$ : área de acumulación,  $A_{ab}$ : área de ablación). El método MGE (*Median Glacier Elevation*) es el mismo que el AA, pero con otra denominación

#### 4. ÁREA DE ESTUDIO

##### 4.1 Situación geográfica

El macizo de Eriste engloba un área de 69 km<sup>2</sup>, a caballo entre las comarcas de Sobrarbe y Ribagorza. La zona de estudio está limitada por el pico Llardaneta (3.369 m) al NE, el río Zinqueta al N y W, el barranco de la Semierre y el barranco del Puerto al S, y por la tuca Foratada (2.537 m), tuca la Llantia (2.932 m) y tuca la Forqueta (3.008 m) al E (Figura 1).



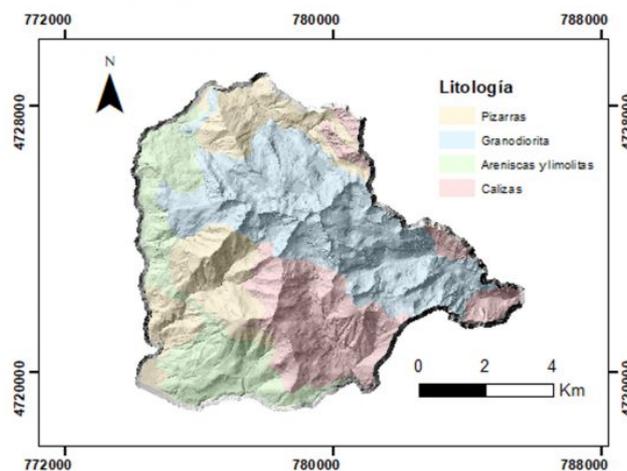
**Figura 1:** Localización del área de estudio en los Pirineos. Los límites de la imagen de la derecha hacen referencia a la definición del área de estudio.

**Figure 1:** Localization of the study area in the Pyrenees. The limits of the right image refer to the definition of the study area.

La temperatura y precipitación media del macizo es de 8,35°C y 981 mm/año (*Climate-Data.org* (1) y (2)), el gradiente altitudinal de la temperatura es de -0.6°C/100m (obtenido a partir de la temperatura media y la altitud de las localidades de San Juan de Plan y Eriste) y la ELA actual se sitúa a 3.100 m (*Serrano y González, 2004*).

#### 4.2 Situación geológica

*Ríos et al. (1982)* describen de manera detallada la litología del macizo diferenciando un batolito granodiorítico de edad varisca; pizarras ordovícicas gris oscuro y pizarras ampelíticas silúricas; calizas y pizarras devónicas de colores beige a gris oscuro; y calizas y areniscas pérmicas rojas con estratificación cruzada (Figura 2).



**Figura 2:** Mapa litológico de la zona de estudio, extraído y simplificado de la hoja 179 (Bielsa) del Magna 50.

**Figure 2:** Lithologic map of the studied area, extracted and simplified of the Hoja 179 (Bielsa) of Magna 50.

La zona muestra una estructura compleja con deformación debida a la orogenia varisca, influida también por la intrusión del batolito de Eriste. La orogenia alpina ha influido muy poco en las distintas fases de generación de pliegues representadas en el macizo de Lardana.

## 5. DESCRIPCIÓN GEOMORFOLÓGICA

### 5.1 Contexto geomorfológico

El modelado de la zona de estudio está condicionado por la litología. Los granitoides se localizan en las cotas más altas, dando relieves escarpados, mientras que la serie paleozoica muestra relieves más tendidos, en altitudes medias y bajas, en consecuencia con la dureza de las rocas. Las calizas presentan un modelado kárstico, caracterizado por lapiaces en el ibón de Barbarisa, pequeños campos de dolinas en el collado de la Ribereta, surgencias y sumideros en el barranco de Surn (en la desembocadura del ibón de Barbarisa).

El relieve está condicionado también por la estructura del macizo. Se ha descrito una falla en la tuca de la Roca Foratada, responsable de un giro de 90° del curso de la Aigüeta de la Vall. En los granitos se puede apreciar un intenso diaclasado, sobre todo entre los ibones de Millás, Lenés y Solana, con direcciones preferentes N170 y N45.

La sucesión de etapas glaciares durante el Cuaternario y el periglacialismo han sido determinantes dejando una impronta marcada en el relieve del macizo de Eriste. Durante el MIS4 (*Marine Isotope Stage 4*, 65 ka), la zona de estudio estaba ocupada por grandes masas de hielo (*Sancho et al., 2008; Lewis et al., 2009*). El posterior retroceso de los glaciares hasta las cabeceras de los circos fue, según *Palacios et al. (2017)*, de forma constante salvo avances como hace 20 ka (*Last Glacial Maximun*, LGM) y entre los 14-18 ka (Oldest Dryas). Tras la deglaciación, los procesos periglaciares cobraron protagonismo hasta convertirse en los procesos dominantes en la actualidad.

La deglaciación causó el desconfinamiento lateral de las laderas, favoreciendo caídas de bloques en las paredes de los circos y en las zonas de calizas; deslizamientos en los márgenes de las artesas glaciares de la zona del barranco de la Ribereta y en las Basas de l'Abet, afectando a pizarras y areniscas; y sakungs sobre pizarras en el ibón de Barbarisa. Al tratarse de una zona glaciada hasta hace relativamente poco tiempo, las formas fluviales no son muy abundantes, registrándose algunos abanicos aluviales en la desembocadura de los barrancos en el río Zinqueta, así como depósitos de terrazas en este mismo río.

Los canchales y conos de derrubios cubren una superficie importante del área de estudio, siendo las formas periglaciares más frecuentes. En algunos casos, cuando estos son embebidos en pequeñas láminas de agua derivan en derrubios afectados por flujo (Figura 3).



**Figura 3:** Morrena del circo E de la tuca Llantia. Bajo la cresta de la morrena frontal (indicada con una flecha negra) se aprecian los derrubios afectados por flujo (Señalados con una flecha roja), que se deslizan ladera abajo, durante una longitud de 400 m. Las características de estos depósitos son pequeños arcos muy mal definidos y sin ningún tipo de orden.

**Figure 3:** *Moraine of tuca Llantia E circus. Under the crest of the frontal moraine (indicated with a black arrow) could be observed the debris affected by flow (mark by a red arrow), which glide down the slope for a length of 400 m. The characteristics of these deposits are very poorly defined by small arches and without any sort of order.*

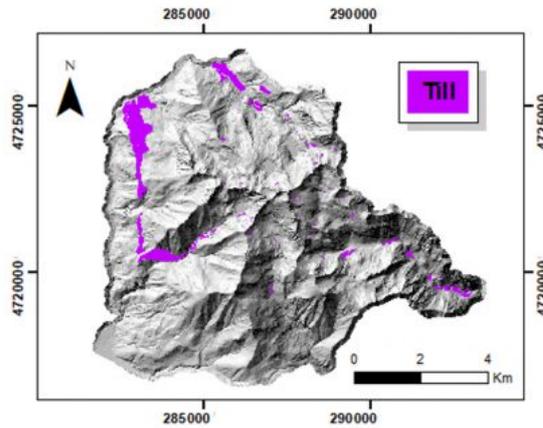
La acumulación de gelifractos al pie de los canchales situados por encima de 2.600 m forma morrenas de nevero como las del pico de la Solana o punta Millás. Estas se sitúan próximas a los límites del circo y presentan una morfología arqueada con un gran radio y muy próximas a los límites del circo. En la actualidad, ninguna de ellas conserva neveros permanentes. Otra forma periglacial recurrente son los glaciares rocosos, localizados a cotas entre 2.100 y 2.700 m. Existe una clara diferencia en cuanto al tamaño entre los orientales y occidentales (respecto a la zona de estudio), siendo estos últimos los que alcanzan mayores dimensiones. Los más pequeños tienen un origen muy variado, tanto en la cabecera de los circos como a partir de los frentes de morrenas terminales por su desmantelación.

## 5.2 Modelado glaciar

Durante el máximo glaciar, el macizo de Eriste albergaba, al menos, 6 grandes masas glaciares que fueron: (1) los glaciares de la Solana, Ribereta y Bagüeña (tributario de la Aigüeta de la Vall) en la cara norte, (2) el glaciar de Barbarisa en la cara sur, (4) el glaciar del Sen en la cara suroeste y (3) el glaciar de la Aigüeta de la Vall en la cara este.

Las cotas altas y medias del macizo se caracterizan por la presencia de lagos de origen glaciar (conocidos en el Pirineo aragonés como ibones), que rellenan las cubetas de sobreexcavación, formadas por la diferente resistencia del sustrato a la erosión. Además estas zonas suelen presentar rocas aborregadas.

Respecto a la sedimentación glaciar, los depósitos de till están caracterizados por tener una composición principalmente granítica y situarse entre los 2.000 y 2.600 m. Los localizados en cotas más bajas suelen ser depósitos de mayor espesor y mayores dimensiones, mientras que los más altos tienden a tener morfología de cordón morrénico de pequeñas dimensiones y adosados a las paredes de los circos (Figura 4). Los depósitos situados a cotas en torno a los 2.000 m se han asociado al Último Máximo Glaciar Pirenaico (hace 60.000 años; *Belmonte Ribas, 2014*), los de 2.500 al Younger Dryas (YD), y aquellos situados a alturas superiores a la PEH, por analogía a los de otros macizos cercanos.



**Figura 4:** La imagen superior muestra la distribución de los depósitos morrénicos en la zona estudiada. La imagen inferior izquierda muestra dos morrenas frontales del YD bajo el Tusal de las Llenas de Cecilia, mientras que la de la derecha muestra un depósito de till del Último Máximo Glaciar Pirenaico en el valle del Sen.

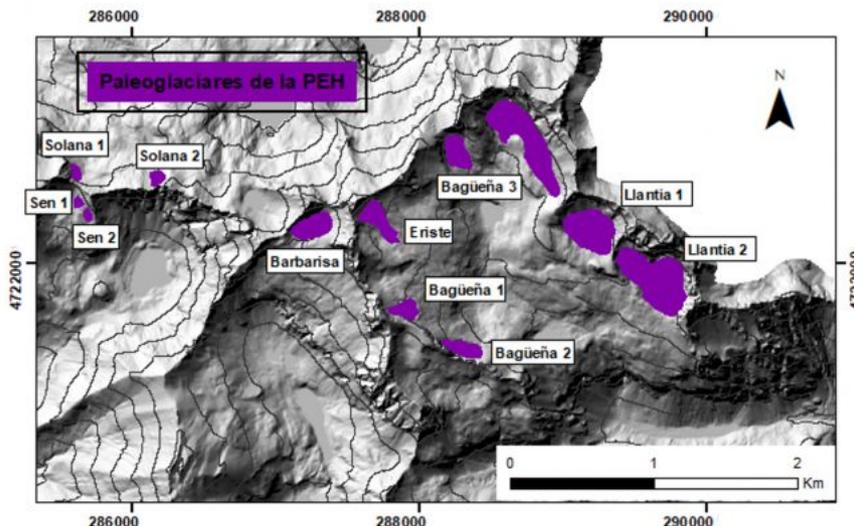
**Figure 4:** The upper image shows the distribution of till in the studied area. The lower left image shows two front moraines of the YD under the Tusal de las Llenas de Cecilia, while the right one shows a till of the Last Maximum Pyrenean Glacier in the Sen Valley.

Además de estos depósitos glaciares, se han observado bloques erráticos, sobre todo en superficies de granito pulido muy diaclasadas. Estos alcanzan dimensiones de hasta 5 m de eje mayor. En algunos casos las morrenas han llegado a bloquear valles, generando lagos de obturación, en la actualidad colmatados. Dos ejemplos se encuentran en la Aigüeta de la Vall y aguas abajo del ibón del Sen.

## 6. PALEOELAS DE LA PEQUEÑA EDAD DE HIELO

### 6.1 Caracterización de los glaciares

Se han reconocido evidencias geomorfológicas de la PEH en 10 de los 37 circos encontrados en el macizo de Eriste, a partir de las cuales se ha llevado a cabo la reconstrucción de los glaciares de esta época (Figura 5).



**Figura 5:** Reconstrucción de paleoglacières de la PEH.

**Figure 5:** LIA paleoglacier reconstruction.

En base a este registro se han diferenciado dos fases glaciares dentro de este mismo periodo. Se ha considerado que la primera fase se corresponde con el máximo glaciar de la PEH, datado entre 1600 y 1750, mientras que la segunda fase se asocia a un avance menor entre 1905 y 1920 (Serrano y González, 2002). Cabe mencionar que algunas de las morrenas presentan varios pulsos dentro de una misma fase.

De los glacières descritos a continuación (Figura 6), en los que solo se conserva una fase, ésta se ha atribuido al máximo glaciar de la PEH. La segunda fase solo se registra en los circos de Bagüena, Eriste y Forqueta.

Glaciar	Fase	Centroide X (ETRS 89 ZONA 31N)	Centroide Y (ETRS 89 ZONA 31N)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Cota máxima (m)	Cota mínima (m)	Desnivel (m)	Orientación
Bagüena 1a	1	287917	4721675	21069	2842	2762	80	NE
Bagüena 1b	2	287889	4721656	6288	2835	2774	60	NE
Bagüena 2	1	288302	4721407	25314	2730,09	2618	112	N
Bagüena 3	1	288271	4722766	33751	2791	2688	103	SE
Barbarisa	1	287250	4722252	39523	2871	2794	76	S
Eriste a	1	287730	4722278	38474	2971	2862	110	SE
Eriste b	2	287687	4722325	23367	2971	2862	110	SE
Forqueta a	1	288741	4722853	129122	2815	2716	99	SW
Forqueta b1	2	288698	4723006	27626	2813	2744	69	S
Forqueta b2	2	288873	4722760	11458	2810	2736	74	SW
Llantia 1	1	289199	4722223	86314	2735	2637	97	SSW
Llantia 2	1	289649	4721870	138722	2703	2547	156	SW
Sen 1	1	285616	4722423	5037	2585	2541	44	SSW
Sen 2	1	285685	4722336	4982	2584	2528	56	SSW
Solana 1	1	285608	4722653	7149	2613	2562	51	N
Solana 2	1	286165	4722605	10374	2690	2623	68	NNW

**Figura 6:** Principales características que describen a los paleoglacières identificados de la PEH.

**Figure 6:** Main characteristics of the LIA paleoglacières.

Tanto los glacières Bagüena 1a, 1b y 2 como Eriste a y b se caracterizan por situarse en un circo muy abierto que no los protegía, por lo que no alcanzaron grandes dimensiones. Todo lo contrario que Bagüena 3, enmarcado en un circo alargado muy protegido bajo el collado de Millares (2.826 m). El glaciar de Barbarisa se desarrolló en unas condiciones menos protegidas. Forqueta a, b1 y

b2 son el sistema glaciar más complejo del macizo y el que ocupa mayor extensión, pese a su mala orientación. Por otra parte, Llantia 1 y 2 se dan en circos cerrados, que justifican su extensión, aún con orientación desfavorable. Los glaciares Sen 1 y 2 se localizan en un circo protegido y adosados a la pared W. Por último, Solana 1 y 2, parten de una buena orientación pero se dan en pequeños circos que no permitieron su desarrollo.

## 6.2 Cálculo de paleoELAs

La Figura 7 muestra los resultados de las paleoELAs calculadas para cada glaciar mediante los distintos métodos.

Glaciar	ArcGIS ±1m	THAR (0,5) ±150m	THAR (0,4) ±150m	AAR ±1m	AAR (GIS) ±0,55m	AA ±1m	AA (GIS) ±0,55m	AABR (GIS) ±0,55m	MGE (GIS) ±0,55m
Bagüña 1a	2782	2802	2794	2782	2760	2791	2791	2787	2788
Bagüña 1b	2787	2804	2798	2787	2773	2795	2795	2792	2794
Bagüña 2	2647	2674	2663	2647	2616	2660	2660	2655	2659
Bagüña 3	2726	2739	2729	2726	2687	2738	2739	2733	2741
Barbarisa	2800	2833	2825	2800	2793	2814	2815	2810	2812
Eriste a	2879	2917	2906	2879	2846	2904	2905	2894	2909
Eriste b	2918	2917	2906	2918	2860	2927	2926	2919	2932
Forqueta a	2746	2765	2755	2746	2714	2755	2755	2749	2756
Forqueta b1	2758	2778	2772	2758	2742	2765	2765	2762	2764
Forqueta b2	2766	2773	2766	2766	2734	2773	2772	2768	2775
Llantia 1	2657	2686	2676	2656	2636	2674	2675	2668	2672
Llantia 2	2579	2625	2609	2579	2545	2604	2605	2594	2603
Sen 1	2555	2563	2558	2555	2539	2561	2561	2558	2562
Sen 2	2543	2556	2550	2543	2526	2551	2550	2547	2551
Solana 1	2576	2587	2582	2576	2561	2582	2582	2579	2583
Solana 2	2647	2656	2650	2647	2621	2655	2655	2651	2657

**Figura 7:** PaleoELAs calculadas para los paleoglaciares de la PEH.

**Figure 7:** PaleoELAs of the LIA paleoglaciers.

Los glaciares con orientación N deberían de presentar una paleoELA más baja (lo que indican una mayor acumulación), por tener unas condiciones más favorables, pero esto no se cumple. Los glaciares más occidentales (Sen 1 y 2 y Solana 1 y 2) presentan las paleoELAs más bajas. En Solana 1 y 2 estos datos son muy lógicos, al tratarse de circos cerrados que protegen la masa de hielo con buena orientación. En el caso de Sen 1 y 2, la orientación (SSW) ya no garantiza el desarrollo y preservación del glaciar, pero se encuentran muy resguardados por el E y W, lo que determina las condiciones frías necesarias para su desarrollo. Los glaciares más orientales (Llantia 1 y 2) presentan los siguientes valores más bajos y unas de las mayores extensiones con las mismas características que Sen 1 y 2. En el caso de Bagüña 1a y 1b, es comprensible que la segunda fase tenga una línea de equilibrio más elevada, ya que se trata de una fase posterior en la que el clima era más cálido. Su orientación favorece el desarrollo glaciar, por lo que los valores obtenidos son coherentes. En el caso de Bagüña 3, aunque se trate de un circo muy resguardado pero con mala orientación, se trataría de un glaciar de gran extensión pero poco espesor, de ahí que el valor de la paleoELA también sea ligeramente elevado. En el sistema de glaciares Forqueta, la situación es similar a la de Bagüña 3. Por último, Eriste a y b tienen los valores más elevados. Aunque su orientación no es excesivamente buena, no acaba de explicar estos resultados tan elevados, además el registro morrénico de este glaciar es muy completo, presentando morrenas frontales y laterales muy bien conservadas, lo que lleva a pensar que se ha podido sobreestimar la extensión glaciar en alguno de los otros casos.

## 6.3 Reconstrucción paleoclimática a partir de las paleoELAs

En base al gradiente térmico altitudinal (-0,6°C/100m) y la ELA actual (3.100 m) se ha estimado la variación de temperatura entre las distintas fases de la PEH y la actualidad. La fase 1 se ha

asociado con el máximo glacial de la PEH (1600-1750), mientras que la segunda fase a un avance menor entre 1905 y 1920 (*Serrano et al., 2002*). Comparando los valores de la ELA con los del máximo de la PEH, se estima un ascenso de temperatura medio de unos 25°C (Figura 8) entre estos dos periodos.

Glaciar	Fase	AABR (GIS) $\pm 0,55m$	$\Delta$ cota (m)	$\Delta$ temperatura (°C)
Bagüena 1a	1	2787	312,5	1,9
Bagüena 2	1	2655	444,5	2,7
Bagüena 3	1	2733	366,5	2,2
Barbarisa	1	2810	289,5	1,7
Eriste a	1	2894	205,5	1,2
Forqueta a	1	2749	350,5	2,1
Llantia 1	1	2668	431,5	2,6
Llantia 2	1	2594	505,5	3,0
Sen 1	1	2558	541,5	3,2
Sen 2	1	2547	552,5	3,3
Solana 1	1	2579	520,5	3,1
Solana 2	1	2651	448,5	2,7

**Figura 8:** Variación de temperatura estimada en el máximo de la PEH y la actualidad.

*Figure 8: Temperature variation between LIA maximum and present.*

Si se considera la variación de temperatura entre las dos fases de la PEH se obtiene un incremento medio de 0,1°C (Figura 9).

Glaciar	Fase	AABR (GIS) $\pm 0,55m$	Diferencia cota (m)	Diferencia de temperatura (°C)
Bagüena 1b	2	2792	5	0,1
Eriste b	2	2919	25	0,2
Forqueta b1	2	2762	13	0,1
Forqueta b2	2	2768	19	0,1

**Figura 9:** Variación de temperatura estimada entre las dos fases de la PEH.

*Figure 9: Temperature variation between the two phases of the LIA.*

Otro análisis posible es determinar el aumento de temperatura en función de la orientación de los glaciares (Figura 10). En este caso, los mayores incrementos de temperatura (entre 1,72 y 2,90°C) se producen en las orientaciones N, NW y SSW.

Orientación	Glaciares	Diferencia de temperatura (°C)
NE	Bagüena 1a	1,9
N	Bagüena 2 y Solana 1	2,9
NNW	Solana 2	2,7
SE	Bagüena 3 y Eriste a	1,7
S	Barbarisa	1,7
SSW	Forqueta a, Llantia 1 y 2 y Sen 1 y 2	2,9

**Figura 10:** Variación de temperatura estimada desde el máximo glacial de la PEH hasta la actualidad en función de las orientaciones de los glaciares.

*Figure 10: Temperature variation between the LIA maximum and present, attend to the glaciers orientations.*

## 7. DISCUSIÓN

La variación de temperatura entre las dos fases reconocidas de la PEH es muy pequeña (0,1°C) en comparación con la diferencia entre el máximo glaciar de la PEH y la actualidad (2,58°C). Además, el incremento desde la primera fase no ha sido homogéneo en todo el macizo. Los glaciares con orientación N, NNW y SSW indican un calentamiento mayor, que puede ser debido a direcciones de vientos dominantes de E a W o a las características de los circos ya comentadas.

Los estudios más recientes para el cálculo de paleoELAs aseguran obtener mejores resultados con el método AABR (*Pellitero et al., 2015*). Los datos obtenidos con el método THAR tienen un margen de error muy elevado, por lo que se han descartado. Por otro lado, el método AAR fue uno de los más fiables. Por último, los métodos AA, AA (GIS) y MGE son los mismos, que equivalen al método de *Kurowski (1891)* simplificado.

Hay numerosos estudios sobre esta temática en Pirineo y la mayoría obtienen resultados similares. *Serrano y Martín Moreno (2018)* estiman las paleoELAs de la PEH en el Pirineo entre 2.620 y 2.945 m, siendo los macizos situados más al W los que presentan las paleoELAs más bajas, al estar más próximos a las influencias atlánticas, que aportan más alimentación nival a los glaciares. Otros, como Monte Perdido, Lardana o Maladeta, con climas continentales e influencia mediterránea ofrecen valores más altos. Estiman incrementos de 0,7 a 0,9°C desde la PEH. *Serrano y González (2002)* analizan los depósitos glaciares del macizo de Posets, situado al NE del macizo de Eriste, obteniendo unas paleoELAs entorno a los 2.900 m. Estos valores son más elevados que los del macizo de Eriste. Se trata de glaciares con orientación N y situados en cotas más altas, por lo que la diferencia de altitud de las paleoELAs puede deberse a la mayor altura de estos circos. *López Moreno (2000)* estudia las líneas de equilibrio glaciar de la PEH de las sierras de Tendeñera y Sabocos (valle de Tena), obteniendo resultados muy semejantes a los de este trabajo (paleoELAs entorno a 2.400 m y un aumento de 2°C), validando los resultados obtenidos. El valle de Tena se sitúa al W del macizo de Eriste, con mayor influencia atlántica, por lo que las precipitaciones nivales son mayores favoreciendo el desarrollo de glaciares (y por lo tanto paleoELAs más bajas).

## 8. CONCLUSIONES

Tras haber analizado los datos expuestos anteriormente se pueden obtener las siguientes conclusiones, derivadas del cálculo de las paleoELAs:

- Se encuentran grandes masas glaciares en circos que no presentan una orientación adecuada para el desarrollo glaciar. Se trata de hecho atípico en este macizo, en comparación con el resto de los Pirineos, aunque las características de los circos ya comentadas facilitan esta situación.
- La paleoELA media calculada es de 2.685 m y el incremento de temperatura desde el máximo de la PEH hasta la actualidad es de 2,5°C. Estos valores coinciden con los estimados por diferentes autores en otras zonas del Pirineo central.
- No en todos los glaciares han quedado registradas las dos fases de estabilidad durante la PEH. Puede ser porque falte el registro sedimentario o porque el retroceso en algunos circos fuese más rápido.
- Conforme los glaciares retroceden hacia los fondos de los circos, la orientación deja de ser un factor importante y pasan a predominar las características concretas de los circos, direcciones de viento dominante o la presencia de canales de avalanchas.

## Agradecimientos

Los autores deseamos expresar nuestro agradecimiento a Alodia y Rafa por su compañía y ayuda en el trabajo de campo; a Carles Pons, José Úbeda y Joshua Iparraguirre su ayuda con el cálculo de paleoELAs, y a Iván y Domingo con ArcGIS. Queremos agradecer también a Jaume Bordonau y Ángel Martín por la revisión crítica del artículo.

## BIBLIOGRAFÍA

- Belmonte Ribas, Á. (2014): *Geomorfología del Macizo de Cotiella (Pirineo oscense): cartografía, evolución paleoambiental y dinámica actual*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 582pp.
- Brückner, E. (1886): Die hohen Tauern und Ihre Eisbedeckung, eine orometrische Studie, Z. Deut. Österreich. *Alpenver.*, 17, 163– 187.
- Climate-Data.org (1) (en línea): Clima: Benasque. Fecha de consulta: 29/03/2018. Disponible en: <<https://es.climate-data.org/location/729631/>>
- Climate-Data.org (2) (en línea): Clima: San Juan de Plan. Fecha de consulta: 29/03/2018. Disponible en: <<https://es.climate-data.org/location/224852/>>
- Dahl, S.O. y Nesje, A. (1992): Paleoclimatic implications based on equilibrium-line altitude depressions of reconstructed Younger Dryas and Holocene cirque glaciers in inner Nordfjord, western Norway. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 94: 87-97.
- Dyurgerov, M.B. y Meier, M.F. (2000): Twentieth century climate change: evidence from small glaciers. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 97: 1406-1411.
- García-Ruiz, J. M., Bordonau, J., Martínez de Pisón, E. y Vilaplana, J. M. (1992): Mapa geomorfológico de Benasque (M.T.N. 180) (Huesca-Lleida). *Geoforma Ediciones*, Logroño, 39pp. + 1 mapa a escala 1:50.000.
- Gellatly, A. F., Grove, J. M. y Switsur, V. R. (1992): Mid- Holocene glacier activity in the Pyrenees. *The Holocene*, 2: 266-70.
- Grove, J.M. (2004): *Little Ice Ages: Ancient and Modern*. Routledge. London. 718 p.
- Kurowski, L. (1891): Die Höhe der Schneegrenze mit besonderer Berücksichtigung der Finsteraarhorn Gruppe, *Pencks Geographische Abhandlungen* 5, 119–160.
- Lewis C.J., McDonald E.V., Sancho C., Peña J.L. y Rhodes E.J. (2009): Climatic implications of correlated Upper Pleistocene glacial and fluvial deposits on the Cinca and Gállego Rivers (NE Spain) based on OSL dating and soil stratigraphy. *Global and Planetary Change*, 67:141–152.
- López Moreno, J. I. (2000): Los glaciares del alto Valle del Gállego (Pirineo Central) desde la Pequeña Edad de Hielo: Implicaciones en la evolución de la temperatura. Proyecto de Fin de Carrera, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza. *Geoforma Ediciones*, 77pp.
- Matthes, F.E. (1939): Report of the Committee on Glaciers, April 1939. *Transactions of the American Geophysical Union*, 20: 518-523.
- Meierding, T.C. (1982): Late Pleistocene equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range: a comparison of methods. *Quaternary Research* 18: 289-310.
- Osmaston, H. (2005): Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the Area x Altitude, the Area x Altitude Balance Ratio and the Area x Altitude Balance Index methods and their validation. *Quaternary International*, 138-139: 22-31.
- Palacios D., García-Ruiz J.M., Andrés N., Schimmelpfennig I., Campos N., Léanni L. y ASTER Team (2017): Deglaciation in the central Pyrenees during the Pleistocene-Holocene transition: Timing and geomorphological significance. *Quaternary Science Reviews*, 162:11-127.
- Pellitero, R., Rea, B. R., Bakke, J., Hughes, P., Ivy-Ochs, S., Lukas, S. y Ribolini, A. (2015): A GIS tool for automatic calculation of glacier equilibrium-line altitudes. *Computers & Geosciences*, 82:

55- 62.

Porter, S.C. (2001): Snowline depression in the tropics during the Last Glaciation. *Quaternary Science Reviews*, 20:1067-1091.

Ríos Aragüés, L. M., Lanaja del Busto, J. M., Ríos Mitchell, J. M. y Marín Blanco, F. J. (1982): *Mapa geológico de España 1:50.000, hoja nº179 (Bielsa) y memoria*. IGME, Madrid. 48pp.

Richter, E. (1885): Beobachtungen an den Gletschern der Ostalpen.2. Die Gletscher der O tztaler Gruppe im Jahr 1883.Z. Deut.O sterreich. *Alpenver*, 16: 54-65.

Sancho C., Peña J. L., Lewis C., McDonald E. y Rhodes E (2008): Actividad glaciar y desarrollo de terrazas durante el Pleistoceno Superior en Pirineos, Cuenca del Ebro. *Geo-Temas* 10:763-766.

Serrano Cañadas, E. y González Trueba, J. J. (2002): La deglaciación de la alta montaña. Morfología, evolución y fases morfogénicas glaciares en el macizo del Posets (Pirineo Aragonés). *Revista Cuaternario y Geomorfología*, 16: 111-26.

Serrano Cañadas, E. y González Trueba, J. J. (2004): El método AAR para la determinación de paleo-ELAs: análisis metodológico y aplicación en el macizo de Valdecebollas (Cordillera Cantábrica). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 30: 7-34.

Serrano, E. y Martín-Moreno, R. (2018): Surge glaciers during the Little Ice Age in the pyrenees. *Cuadernos de Investigación Geográfica: Geographical Research Letters*, 44 (1): 213-244.

Sissons, J.B. y Sutherland, D.G. (1976): Climatic inferences from former glaciers in the south-east Grampian Highlands, Scotland. *Journal of Glaciology*, 17: 325-46.

Sutherland, D.G. (1984): Modern glacier characteristics as a basis for inferring former climates with particular reference to the Loch Lomond stadial. *Quaternary Science Reviews*, 3: 291-309.

Úbeda, J., Niño, R. C., Vásquez, P., Msías, P. y Iparraguirre, J. (2018): Prospección de edades <sup>36</sup>Cl de la última máxima expansión de los glaciares y el comienzo de la deglaciación al noreste del complejo volcánico Nevado Coropuna (Región Arequipa). *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, 8: 97-123.

### Redacción

<http://www.icog.es>

Tierra y Tecnología es una publicación del Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG). El ICOG es una institución sin finalidad lucrativa creada para la defensa y apoyo de los intereses de los Geólogos, creada por Ley 73/1978 de 26 de Diciembre, es una corporación de Derecho Público, amparada por Ley y reconocida por el Estado, con personalidad jurídica propia y capacidad plena para el ejercicio de sus funciones y cumplimiento de sus fines.

