

## DEDUCCIÓN DE LA ALTITUD DE LA LÍNEA DE EQUILIBRIO GLACIAR DURANTE EL LGM EN SIERRA NEVADA (ESPAÑA)

*DEDUCTION OF THE EQUILIBRIUM LINE ALTITUDE OF THE GLACIERS DURING THE LGM IN SIERRA NEVADA (SPAIN)*

**Francisco FERNÁNDEZ<sup>1</sup>, Néstor CAMPOS<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Investigador Independente. Martos, 23600, España. E-mail: franciscofernandezgallardo@gmail.com

<sup>2</sup>Laboratório de Teledetección Ambiental, Departamento de Ciencias Geográficas, Facultad de Ciencias Naturales e Exactas. Universidad de Playa Ancha, Valparaíso, Chile. E-mail: nestor@ucm.es

Introducción  
Área de estudio  
Localización  
El clima de Sierra Nevada  
El relieve de Sierra Nevada: el glaciario  
Materiales y métodos  
La elección de los valles  
Identificación de la extensión ocupada por los glaciares durante el Máximo Avance Glaciar en Sierra Nevada  
Reconstrucción de la paleotopografía de los glaciares  
La reconstrucción de las paleoELAs de los valles del Guarnón y Río Seco  
Resultados  
Reconstrucción de la topografía paleoglaciaria  
Reconstrucción de las paleoELAs por el método THAR  
Reconstrucción de las paleoELAs por el método AAR (Accumulation Area Ratio)  
Reconstrucción de la curva hipsométrica  
Reconstrucción de las paleoELAs por el método AABR (Area x Altitude Balance Ratio)  
Discusión  
Conclusiones  
Referencias

**RESUMO** - Este trabalho apresenta um estudo de caso de aplicações de SIG para o cálculo da linha de equilíbrio glacial (ELA) em paleoglaciais da Sierra Nevada durante a Último Glacial Máximo (LGM). Para a análise deste estudo de caso, foi realizada uma delimitação da área dos paleoglaciais de Guarnón e Río Seco, a subsequente reconstrução de sua paleotopografia e a obtenção de ELAs, todos usando o software GIS. Os resultados obtidos mostram os valores de paleoELA durante o período da LGM de 2818 m para o paleoglaciar Río Seco e 2527 m para o paleoglaciar Guarnón, em ambos os casos calculados pelo método AABR. Este método demonstrou ser mais preciso que os métodos AAR e THAR, pois leva em consideração a hipsometria paleoglaciaria. O uso de SIG e sua combinação com outras técnicas provaram ser eficazes para a reconstrução de paleoglaciais na área de estudo e o cálculo de seus ELAs durante a LGM.

**Palavras-chave:** SIG, paleoglaciais, ELA, LGM, Sierra Nevada.

**ABSTRACT** - This research present a case of study of the GIS applications to the calculation of the Equilibrium Line Altitude (ELA) in paleoglaciars of Sierra Nevada during the Last Glacial Maximum (LGM). For the analysis of this case of study, a delimitation of the area of the paleoglaciars of Guarnón and Río Seco, the subsequent reconstructions of its paleotopography and the calculation of their ELAs were done, all using GIS. The obtained results show paleoELA values, during the LGM period, of 2818 m for Río Seco paleoglaciar and 2527 m for Guarnón paleoglaciar, in both cases calculated with the AABR method. This method has been demonstrated to be more accurate than AAR and THAR methods as it takes into account the glacier hypsometry. The use of GIS and its combination with other techniques has demonstrated to be valid for the reconstruction of the paleoglaciars of the study area and the calculation of their ELAs during the LGM.

**Keywords:** GIS, paleoglaciars, ELA, LGM, Sierra Nevada.

### INTRODUCCIÓN

Los glaciares acogidos en los macizos montañosos, tanto en latitudes medias como tropicales, son especialmente sensibles a las variaciones climáticas. En este sentido, su estudio proporciona una valiosa información de las fluctuaciones climáticas, por ejemplo desde el periodo denominado Último Máximo Glacial (UMG) o, en inglés, *Last Glacial Maximum* (LGM), periodo que tuvo lugar hace entre 26,5 y 19 ka (Clark et al., 2009). Por tanto, puede

decirse que la variación de la superficie de los glaciares es uno de los mejores indicadores del cambio climático en un entorno montañoso (Cossart, 2011).

Tal como indican algunos autores, un glaciar se comporta como un termómetro (Kaser et al., 2003) en el sentido que cualquier variabilidad climática se manifiesta rápidamente en la masa de hielo del glaciar, es decir en su balance de masa o relación entre su área de acumulación o

alimentación y de ablación o pérdida.

De este modo, resulta de gran interés conocer la altura de la línea teórica que separa el área de acumulación y ablación en la superficie de un glaciar ya que es un importante indicador del estado de equilibrio de un glaciar.

En este sentido, uno de los parámetros más útiles y empleados para estimar el efecto de los cambios climáticos en los glaciares y para la caracterización ambiental y paleoambiental de los ámbitos glaciados, es el cálculo de la denominada "Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar (*Equilibrium Line Altitude*: ELA, en inglés) (Zemp et al., 2007). La ELA, se define como la altitud donde el balance de masa neto en el perfil vertical del glaciar es igual a cero, es decir cuando la acumulación es igual a la ablación (Kaser y Osmaston, 2002; Kaser et al, 2003; Osmaston, 2005).

Según Kaser et al., (2003) se trata de un indicador sobre la distribución de la masa de hielo neta de un glaciar, de modo que puede variar según avance o retroceda el glaciar en un periodo de tiempo determinado. Así, por ejemplo, un aumento de la ELA supone que el área de ablación ocupe un área mayor que el área de acumulación, y se correspondería con un retroceso del glaciar y un balance de masa negativo.

Por el contrario, un descenso de la ELA significaría que el área de acumulación sería mayor que la de ablación, estando en relación con un avance del glaciar y, por consiguiente, un balance de masa positivo

El balance de masa de un glaciar y por tanto la variación anual de la ELA, depende de factores fundamentales y factores secundarios. Los primeros, según Serrano y González Trueba (2004), se relacionan con la acumulación anual expresada básicamente a través de la precipitación en forma de nieve en el período invernal, y con la ablación anual, que viene dada por las temperaturas del período estival.

Como factores secundarios pueden señalarse las condiciones topo-climáticas de cada macizo montañoso, que controlan la mayor o menor radiación solar, innivación, etc.

Así pues, el conocimiento de la ELA permite estudiar la dinámica de los glaciares debido a que varía según las condiciones climáticas del entorno glacial, por lo que es fundamental para conocer el balance de masa de los glaciares y para establecer las características paleoclimáticas

y climáticas de glaciares del pasado o de la actualidad (Serrano et al., 2004). También se ha utilizado el cálculo de paleoELAS para la reconstrucción de ambientes cuaternarios.

En este caso, el concepto, tal como apuntan Serrano y González-Trueba (2004) se refiere a la altitud a la que se encontraba la línea de equilibrio de los glaciares ya desaparecidos. La estimación de la paleoELA sería representativa de una fase glaciar considerada estable.

El cálculo de la ELA puede obtenerse a través de métodos estadísticos. Éstos permiten reconstruir tanto los paleoglaciares como los glaciares actuales. Para poder llevar a cabo este proceso se tiene en cuenta tanto la hipsometría de las masas de hielo, como los gradientes de acumulación y ablación.

Aun así es necesario disponer (o en su defecto poder reconstruir) la superficie y topografía de glaciares o paleoglaciares (Úbeda, 2011).

En la Península Ibérica se han llevado a cabo diferentes estudios, que utilizan las tecnologías de información geográfica (TIGs), cuyo principal objetivo ha sido la reconstrucción de las ELAs en algunos enclaves montañosos de la Cordillera Cantábrica (Macizo de Valdecebollas y Picos de Europa) (Serrano y González-Trueba, 2004; González Trueba, 2005). También, en diferentes sistemas montañosos de Europa se han llevado a cabo estudios similares.

Uno de los estudios a los que podemos hacer referencia es el de Hughes et al., (2006) que hace un análisis de la historia glacial del cuaternario en las montañas mediterráneas, reconstruyendo las paleoELAs.

Por su parte, Zemp et al. (2007), realizan una modelización de la distribución de la ELA en los glaciares de los Alpes Europeos, para interpretar el cambio climático regional.

No obstante, buena parte de los estudios cuyo objetivo es el cálculo de la ELA se han desarrollado en zonas tropicales (Kaser y Osmaston, 2002).

Por ejemplo, el trabajo realizado por Benn et al., (2005), en el cual lleva a cabo la reconstrucción de la ELA en glaciares tropicales y subtropicales. Algunos de estos estudios son los realizados por Ramage et al. (2005) en los Andes Peruanos; o el estudio llevado a cabo por Úbeda (2011) en complejo volcánico del Nevado de Coropuna, en Perú.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, este estudio se plantea con la finalidad de

calcular la ELA en un ámbito de montaña mediterránea que estuvo glaciado durante las fases frías del Cuaternario. En concreto, en el macizo de Sierra Nevada (España) durante el último máximo glaciario.

El objetivo general de este estudio es el cálculo de la altitud de la línea de equilibrio glaciario en el macizo de Sierra Nevada para el último máximo avance glaciario (LGM). La reconstrucción de la paleoELAs se lleva a cabo en dos valles de este macizo, el valle del Guarnón y el valle de Río Seco.

El interés de reconstruir las paleoELAs en el macizo de Sierra Nevada se debe a que albergó

los glaciares más meridionales de Europa, este hecho es relevante teniendo en cuenta su posición latitudinal en una zona templada próxima a la subtropical (37°N).

Por tanto, podría considerarse una “zona de transición” entre los glaciares de las montañas de latitudes medias (Alpes, Pirineos) y aquellas situadas en latitudes ya prácticamente subtropicales (Cordillera del Atlas).

De este modo, los resultados obtenidos permitirán realizar comparaciones de las condiciones glaciológicas en el macizo de Sierra Nevada con otros macizos de montaña a escalas locales y regionales.

## ÁREA DE ESTUDIO

### Localización

El Espacio Natural de Sierra Nevada es un extenso macizo montañoso situado al sureste de la Península Ibérica, formando parte de la Cordillera Penibética. En concreto se extiende desde el sureste

de la provincia de Granada hasta el extremo occidental de la provincia de Almería a lo largo de unos 90 km, alcanzando las cimas más altas de la Península Ibérica, Mulhacén, 3479 m; Veleta, 3398 m; Alcazaba, 3366 m (Figura 1).

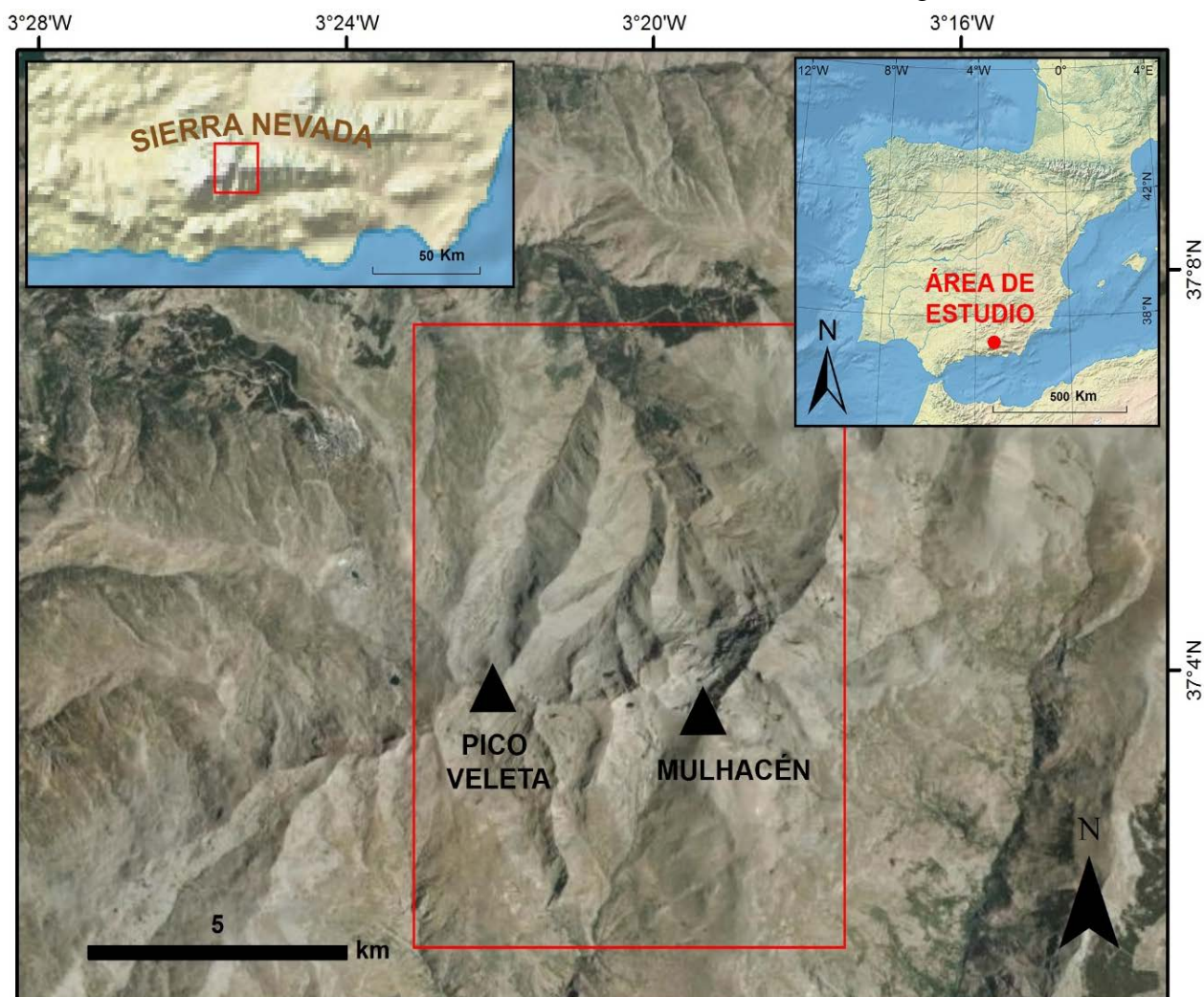


Figura 1 - Localización de los valles seleccionados.

Esta considerable altitud permitió que en sus cumbres se instalaran los glaciares más

meridionales de Europa durante el Cuaternario. Pero, además, las diferencias altitudinales han dado

lugar a la presencia de cinco pisos bioclimáticos, desde el inframediterráneo en los tramos más bajos hasta el crioromediterráneo de las altas cumbres. Por tanto, estas características se manifiestan en la gran variedad y diversidad de paisajes, algunos singulares y únicos, que justifican su protección como un espacio natural protegido, contando con varias figuras de protección tanto nacionales como internacionales: Parque Natural en el año 1989, Parque Nacional en 1999 y Reserva de la Biosfera, con anterioridad a estas dos figuras nacionales, en el año 1986. Sierra Nevada se encuentra en las coordenadas 37° de Latitud Norte y 3° de Latitud Oeste.

De norte a sur su anchura supera los 35 km; la extensión total ocupada es de 86.432 hectáreas. Esta cúpula orográfica, labrada en sus altas cumbres en materiales cristalinos se interpone entre la depresión de Lecrín–Granada–Guadix, al norte y el corredor del Guadalfeo–Andarax, al sur (Gómez Ortiz et al., 2011).

### **El clima de Sierra Nevada**

El clima predominante de Sierra Nevada es mediterráneo de alta montaña. Los rasgos más característicos del clima están condicionados por una serie de factores: su relativa aridez y la fuerte insolación de la zona mediterránea en la que se localiza, unido a su amplitud altitudinal y la compleja topografía del terreno.

Los vientos predominantes localizados en Sierra Nevada tienen componente mayoritariamente atlántica, este hecho hace que en las vertientes de exposición norte y oeste haya una mayor humedad y precipitación. La acumulación de nieve resulta muy abundante en las laderas expuestas al este. (Salvador Franch et al., 2010).

El régimen de los vientos determina un máximo de precipitación otoñal en la solana o vertiente sur (vientos del suroeste) y un máximo primaveral en la umbría o vertiente norte (vientos dirección norte y noroeste).

Estos rasgos determinan precipitaciones, en su mayoría en forma de nieve, durante el invierno, superándose los 775 mm a una altura de 2250 metros, mientras que en verano las precipitaciones son escasas.

La gran amplitud altitudinal determina un aumento de la insolación conforme ascendemos, dando lugar a fuertes oscilaciones térmicas: por encima de los 2000 metros, las temperaturas medias se sitúan entre los 4 y 8°C, por debajo, hasta los 1400 metros, aproximadamente, entre 8 y 13°C y a cotas inferiores a los 1400 metros, entre 13 y

16°C, siendo la vertiente norte más fría que la vertiente sur.

Observaciones y registros más recientes llevados a cabo en la zona de cumbres de Sierra Nevada, arrojan temperaturas medias anuales negativas: -0,4°C a 3398 metros de altura en el Pico del Veleta (Salvador Franch et al., 2010). Este fuerte desnivel de la sierra determina un gradiente vertical de 0,48°C en la vertiente sur, y de 0,61°C. en la vertiente norte, y la isoterma anual de los 0°C se localiza aproximadamente en torno a los 3100 m (Roldán et al., 1996; Rodríguez Martínez et al., 1981).

### **El relieve de Sierra Nevada: el glaciario**

El modelado principal de Sierra Nevada tiene su origen en la actividad de procesos morfogenéticos fríos acaecidos durante el Pleistoceno y Holoceno. Así, las cumbres de la Sierra situadas por encima de los 2500 m. estuvieron modeladas por la acción mecánica de los glaciares que durante los periodos fríos cuaternarios quedaron instalados en las cabeceras de los principales barrancos (Gómez Ortiz et al., 1998, 2005, 2011).

El glaciario en Sierra Nevada ocupó mayoritariamente el sector más occidental del macizo, entre el cerro del Caballo (3011 m) y el Picón de Jeres (3088 m). El espacio glaciado de Sierra Nevada cubrió una franja que osciló entre los 600 – 700 metros, en la vertiente sur y los 800 – 1000 metros en vertiente norte (Gómez Ortiz, 2004).

Gómez Ortiz y Salvador Franch (1998) han explicado los factores que condicionaron y favorecieron el glaciario en Sierra Nevada, y son los que se describen a continuación:

- El volumen y altitud del macizo, que supeditó el espacio glaciado.

- El relieve preexistente, que subordinó la instalación de las cuencas de alimentación de los diferentes glaciares.

- La morfoestructura y litología, que facilitó el desarrollo de determinadas formas erosivas y deposicionales.

- La orientación de la montaña, a favor de la influencia de los flujos húmedos atlánticos o mediterráneos en vertientes, permitiendo una sobrealimentación nival.

En todo caso, como apuntan los autores citados, los glaciares que surcaron los barrancos de Sierra Nevada mantuvieron medidas modestas, quedando individualizados en los valles, y donde apenas rebasaron los 10 km de longitud.

Los elementos geomorfológicos más

representativos generados por el sistema de aparatos glaciares de Sierra Nevada son los circos, los valles y las formas deposicionales, relacionadas con la construcción de morrenas. Los circos glaciares quedan localizados en las antiguas cabeceras de los barrancos.

La acción erosiva de los hielos dio lugar al modelado de aristas rocosas, conocidas como “raspones” y algunos picos de tipo horn. Durante las últimas pulsaciones frías, los circos fueron los últimos enclaves donde el hielo quedó retenido, y asimismo, en ellos se instalaron los glaciares rocosos.

Los valles fueron los principales cauces por los que fluyó el hielo, tan sólo muestran los típicos perfiles en “U” en las partes más elevadas, debido a que el trayecto recorrido por las lenguas fue reducido. Las causas se explicarían por la fusión temprana de las masas heladas, determinada no sólo por la altitud de la Sierra, sino también por la reducida magnitud de las cuencas de alimentación (Gómez Ortiz et al., 1998).

Finalmente, los depósitos morrénicos son relativamente escasos y se encuentran por lo general bastante destruidos debido a la pronunciada pendiente de las vertientes (mayor a 25 grados) y la agresividad de los procesos morfogénicos postglaciares, tal y como ocurrió por ejemplo, en los valles del Guarnón, Valdecasillas y Valdeinfierno (Gómez Ortiz et al., 2011).

De este modo, las morrenas de Sierra Nevada sólo conservan sus formas originales en aquellos tramos de poca inclinación, donde incluso pueden distinguir diferentes generaciones, como sucede en el Valle de Río Seco y Mulhacén (Gómez Ortiz et

al., 2002).

El precario estado de conservación de las morrenas en los valles dificulta la posibilidad de establecer una precisa cronología glacial en Sierra Nevada.

Aunque numerosos estudios apoyan la existencia de más de una glaciación y un último periodo frío reciente, denominado Pequeña Edad de Hielo (Gómez Ortiz et al., 1996; Gómez y Plana, 2006, síntesis realizada al respecto por Gómez-Ortiz, 2004). No obstante, recientemente Gómez et al., (2012) establecen una primera aproximación a la deglaciación de Sierra Nevada a partir de la datación cosmogénica por  $^{36}\text{Cl}$  realizada en depósitos morrénicos.

A partir de las fechas obtenidas en los bloques de algunas morrenas del valle de Río Seco y Mulhacén, estos autores datan una fase de Último Máximo Glaciar Local (LLGM, Last Local Glacial Maximum Advance) para Sierra Nevada, que puede ser considerada próxima al Último Máximo Glaciar (LGM) entre 26.5 a 19-19 ka. También reconocen restos de morrenas más antiguas, pero su escasa preservación impide su datación. Posteriormente, la deglaciación alcanzó la cabecera de los circos entre 15.4 y 13.2 ka, según se desprende de las dataciones realizadas en los umbrales rocosos de los valles.

Finalmente, durante las últimas pulsaciones frías, los circos fueron los últimos enclaves donde el hielo quedó retenido a lo largo del Tardiglaciar y también durante la Pequeña Edad de Hielo, coincidiendo también con el desarrollo de glaciares rocosos. (Soria y Soria, 1986; Palade et al., 2011; Gómez Ortiz et al., 2012).

## MATERIALES Y MÉTODOS

La realización del estudio se ha desarrollado dentro del entorno de un Sistema de Información Geográfica. El software de SIG empleado para el tratamiento y análisis espacial ha sido ArcGIS 10 (ESRI), concretamente el módulo ArcMap. Los materiales, fuentes cartográficas e imágenes que han sido utilizados para llevar a cabo los objetivos propuestos en este estudio se detallan y describen a continuación:

- Mapa topográfico de Sierra Nevada en formato raster a escala 1:10.000 del año 2001. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, dependiente de la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia, de la Junta de Andalucía.

- Mapa topográfico de Sierra Nevada en

formato vectorial a escala 1:10.000 del año 2007. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, dependiente de la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia, de la Junta de Andalucía.

- Serie completa de Ortofotos, hoja 1027, perteneciente al conjunto de Sierra Nevada. Ortofotos correspondientes a los siguientes años: 1956, 2004, 2007 y 2010. Se utilizó principalmente la ortofoto de 2007 (resolución 0,5 m), debido a la práctica ausencia de nieve en la Sierra. Fuente: Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, dependiente de la Consejería de Economía, Innovación y Ciencia, de la Junta de Andalucía.

- Mapa geológico de la hoja 1027 (Güejar –



Sierra). Fuente: Serie “Mapa Geológico de España a escala 1:50.000, del Instituto Geológico y Minero de España (1975).

- Mapa geomorfológico de Sierra Nevada: Morfología glaciar y periglacial. Elaborado por Gómez Ortiz et al., (2002). Fuente: Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente, Parque Nacional de Sierra Nevada, Parque Natural de Sierra Nevada, Universidad de Barcelona.

### **La elección de los valles**

Para este estudio se han elegido dos valles: el valle del Guarnón y el valle de Río Seco (Figura 1). El valle del Guarnón está englobado dentro del sistema glaciar asociado al río Genil. Este sistema glaciar está situado en la vertiente norte de Sierra Nevada.

La orientación del sistema glaciar es NO. Se compone de cuatro valles glaciares que son: Guarnón, Valdeinfierno, Valdecasillas y Vacares. La cota más alta de las cuencas de alimentación se encuentra en torno a los 3400 metros (Gómez et al., 1998).

Por su parte, el valle de Río Seco se encuentra dentro del sistema glaciar del río Poqueira. Este sistema glacial se localiza en la vertiente sur de Sierra Nevada.

Está compuesto por cuatro valles glaciares, que son: Veleta, Río Seco, Mulhacén y La Majada. La cota culminante de las cuencas de alimentación del sistema glacial se situó en los 3300 metros.

La cota más baja cubierta por la lengua principal se encuentra en torno a los 1700 metros, la longitud de esta es aproximadamente de 6 km. El especial interés que muestra el Valle de Río Seco, es la datación reciente de depósitos morrénicos (Gómez et al., 1998, 2012).

La elección de estos valles obedece a varias razones. La primera se relaciona con su distinta orientación, respecto de la línea de cumbres. El valle del Guarnón está orientado al norte, mientras que el valle de Río Seco está encarado al sur.

De este modo, los resultados que se obtengan permitirán valorar la influencia de la orientación en la evolución de los glaciares. La segunda estriba en que ambos valles han sido bastantes estudiados.

El Valle del Guarnón, en especial su cabecera, conocida como Corral del Veleta, ha sido objeto de numerosos estudios, pues este enclave albergó el último glaciar más al sur de Europa: durante la

Pequeña Edad de Hielo el Corral del Veleta contó con un pequeño foco glaciar, que se mantuvo hasta la primera mitad del siglo XX.

En la actualidad mantienen un glaciar rocoso activo y permanece una masa helada en profundidad o permafrost en proceso de degradación. (Gómez Ortiz et al., 1999). Por su parte, y como se acaba de indicar, recientemente se han datado las morrenas del valle del Río Seco

### **Identificación de la extensión ocupada por los glaciares durante el Máximo Avance Glaciar en Sierra Nevada**

Para la realización de la cartografía geomorfológica se ha prestado especial atención al reconocimiento y a la ubicación de las morrenas, al ser, estas formas de acumulación, los elementos que atestiguan la extensión alcanzada por la masa glaciar. Así, pues, el documento básico para proceder al cálculo de la ELA es disponer de una detallada cartografía geomorfológica.

En el caso de Sierra Nevada, y como se indicó previamente al explicar la selección de los valles, las morrenas, en especial, de las fases glaciares más antiguas se encuentran bastante erosionadas, lo que dificulta identificar la extensión que ocuparon las masas de hielo.

Para resolver este problema inicial, pero básico, se ha utilizado el mapa geomorfológico de Sierra Nevada (a escala 1:25.000) elaborado por Gómez et al., (2002), y, sobre todo, a partir de la cartografía aproximada de la extensión de los glaciares publicada en un reciente trabajo por Gómez et al., (2012), cuya reconstrucción de lo los glaciares se fundamenta en la interpretación del mapa geomorfológica citado.

El mapa con la extensión de los glaciares durante el Máximo Avance Glaciar Local se ha georeferenciado utilizando el módulo “*georeferencing*” disponible en ArcMap.

Para la georeferenciación se utilizaron como apoyo las curvas de nivel y la red hidrográfica (equidistancia 50 m) del mapa, donde fácilmente se reconocieron diferentes inflexiones en las curvas, cotas, confluencia de arroyos, que permitieron identificarlas en la cartografía del mapa topográfico a escala 1:10.000 (Junta de Andalucía).

Se realizó una transformación polinomial de primer orden y el RMS (siglas en inglés de la raíz del error cuadrático medio) obtenido fue de ~24. El ajuste puede considerarse aceptable para el objetivo del trabajo.

## Reconstrucción de la paleotopografía de los glaciares

Tras delimitar la extensión de los paleoglaciares, unos de los problemas que aparecen al reconstruir la paleotopografía es que en valles que estuvieron ocupados por glaciares, y donde además, después de su retirada, los procesos geomorfológicos posteriores (encajamientos de la red fluvial, dinámica de laderas) han transformado aún más la topografía previa.

Para reconstruir la paleotopografía resulta de gran utilidad el mapa topográfico con las curvas de nivel actuales, que servirán de apoyo para digitalizar la posible forma que tuvieron en dicho período.

En este sentido es de gran ayuda fijarse en la

disposición que adoptan las curvas de nivel a lo largo de la lengua de los glaciares actuales.

## La reconstrucción de las paleoELAs de los valles del Guarnón y Río Seco

Para la reconstrucción de la altitud de la línea de equilibrio glaciar (ELA) de los antiguos glaciares del valle del Guarnón y Río Seco, se ha utilizado como herramienta fundamental un Sistema de Información Geográfica (ArcGis 10). En este sentido, la preparación y el tratamiento cartográfico y la aplicación de varios métodos geomorfológicos ha cubierto una serie de etapas (Figura 2), siguiendo la metodología propuesta en varios estudios (Serrano y González Trueba; 2004; Bergman, 2007; Bate, 2008; Úbeda, 2011).



Figura 2 - Diagrama de flujo del proceso metodológico para el cálculo de las paleoELAs.

A partir de la reconstrucción de la topografía (o paleocurvas de nivel) de la superficie ocupada por los glaciares durante el LLGM, el siguiente paso necesario para posteriormente aplicar el cálculo de la ELA por diferentes métodos (en este estudio THAR, AAR y AABR), es obtener, en primer lugar, la hipsometría del glaciar a partir de la definición de una serie de intervalos de altitud (en este estudio se utiliza un intervalo de 50 metros) (Figura 3), y en segundo lugar, la superficie ocupada por cada uno de ellos.

Se parte de la capa con las paleocurvas de nivel, que se trata de una capa de isólinas, de modo que para obtener la superficie de los intervalos de altitud es preciso obtener, en una capa de polígono, cada uno de los “polígonos” representativos de cada intervalo de altitud. La elaboración de la curva hipsográfica es parte del procedimiento empleado para aplicar el método

AAR. Esta curva, representa el porcentaje de la superficie acumulada en cada intervalo de altitud de las masas de hielo.

El proceso incluye dos etapas:

- Construcción de la curva hipsográfica: se introducen los valores de la altura, teniendo ya las áreas calculadas en el sistema de información geográfica, las unidades de estas son metros cuadrados. Al calcular el % del área acumulada en cada intervalo de altura se obtendrá la curva hipsográfica.

- Determinación del nivel de la paleoELA AAR: en el eje vertical (y) de la curva hipsográfica queda reflejado el porcentaje de superficie acumulada, y en el eje horizontal (x) se expone la altitud.

Cruzando los ejes en el valor de ratio elegido, es decir, en términos de porcentaje es el 67%, se obtiene el valor de la paleoELA

## RESULTADOS

Como se ha indicado anteriormente la reconstrucción de la ELA (o paleoELAS) se ha llevado a cabo a partir de la aplicación de métodos geomorfológicos. Dentro de estos métodos, para la reconstrucción de la ELA se pueden tomar en cuenta diferentes variables o parámetros de tipo geomorfológico y morfométrico, lo que ha dado lugar a diferentes aproximaciones o métodos de cálculo, entre los que pueden destacarse los siguientes:

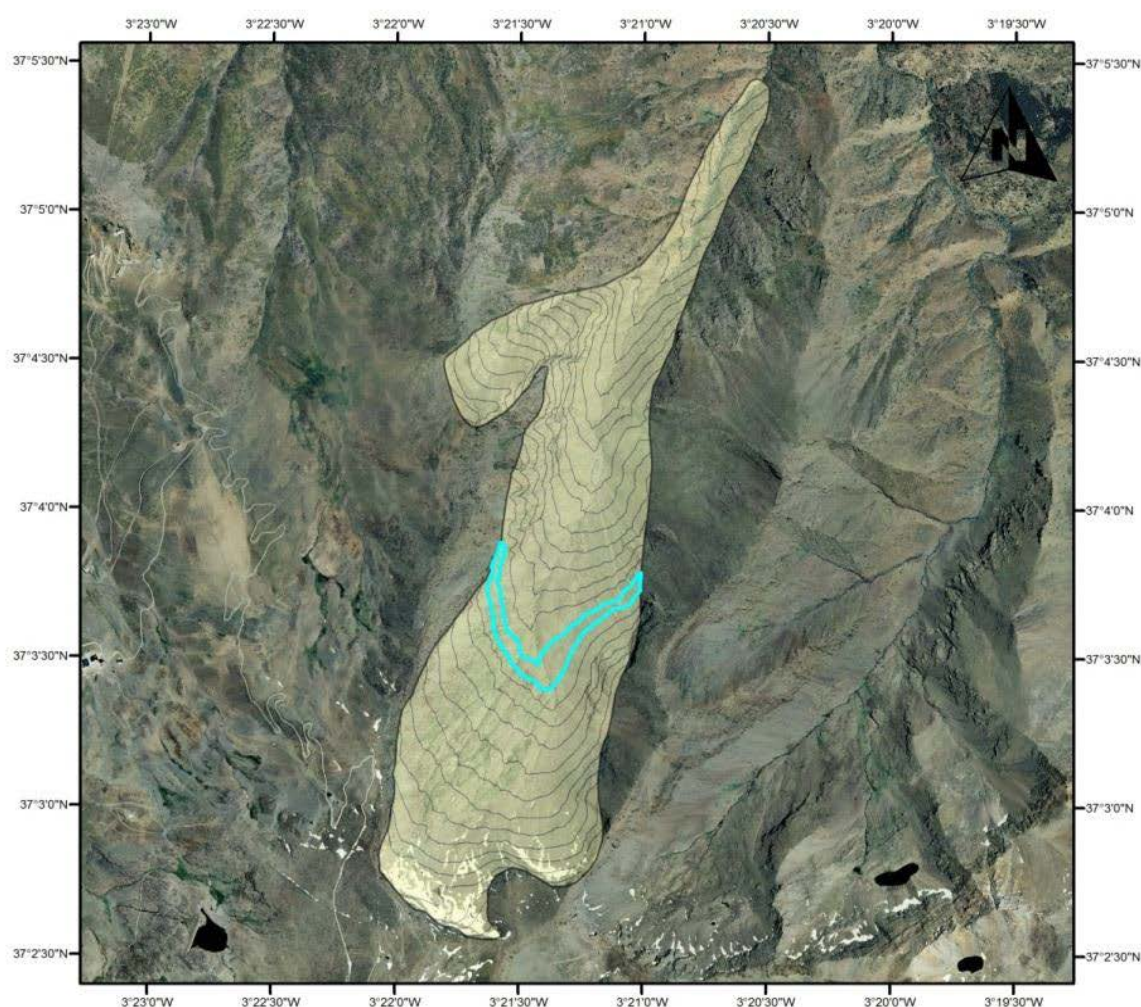
- La relación de la altitud, desde el frente del glaciar hasta su cabecera (THAR = Terminus Headwall Altitude Ratio).

- La relación entre el área de acumulación y el de ablación (AAR = Accumulation Area Ratio).

- La relación el área y la altitud (AA = Area x Altitude)

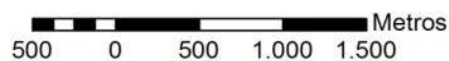
- La relación entre el área y el balance de la altitud (AABR = Area x Altitude Balance Ratio)

## Isolíneas Valle Guarnón - Corral del Veleta



### Leyenda

 Valle\_Guarnon

 Metros  
500 0 500 1.000 1.500

1:35.000

**Figura 3** - Ejemplo que muestra la definición de los intervalos de altitudes para el Valle del Guarnón.

Para la estimación de la paleoELA en los antiguos glaciares que ocuparon los valles del Guarnón y Río Seco se ha optado por tres métodos: THAR, AAR y AABR, que se exponen en cuanto a su complejidad de cálculo. En este apartado solamente se explicará el fundamento y el proceso de cálculo de las paleoELAs a partir de cada uno de los métodos aplicados, así como los resultados obtenidos para el Valle del Guarnón y Río Seco.

### Reconstrucción de la topografía paleoglaciario

La paleotopografía de los glaciares fue reconstruida mediante la modificación de curvas de nivel, quedando como resultado unas curvas

de nivel más suaves que se corresponden a una superficie glaciar (Figura 4).

### Reconstrucción de las paleoELAs por el método THAR

El fundamento de este método está basado en asumir que la ELAs para glaciares modernos se encuentran aproximadamente a media altura entre la altura de la cabecera del glaciar y el pie o frente del glaciar (Bergman, 2007), es decir es igual a la altitud media del glaciar. La identificación de los límites superiores e inferiores de los paleoglaciares permite llevar a cabo la aplicación de este método.

La altitud, tanto de la cabecera del glaciar



como del frente, se obtiene consultado las tablas de atributos asociadas a cada una de las capas de las paleotopografía.

Una vez que se obtienen ambas variables para cada uno de los valles estudiados se procede a llevar a cabo el cálculo del THAR, que se realiza resolviendo un sistema de ecuaciones (Porter, 1975, 2001; Bergman, 2007):

$$THAR = \frac{(ELA - Af)}{(Ac - Af)}$$

$$ELA = Af + THAR * (Ac - Af)$$

Donde:

- THAR: es la relación entre las altitudes de la cabecera y el frente glaciar.

- ELA: es la *Altitud de la Línea de Equilibrio glaciar* (m).

- Ac: es la altitud de la cabecera del glaciar (m).

- Af: es la altitud del frente del glaciar (m).

Para el cálculo de la paleoELAS de los paleoglaciares estudiados con el método THAR

se utilizan varios ratios distintos, que permiten posteriormente obtener la paleoELA. La utilización de estos ratios obedece a comparar los resultados con aquellos obtenidos al aplicar el método AABR.

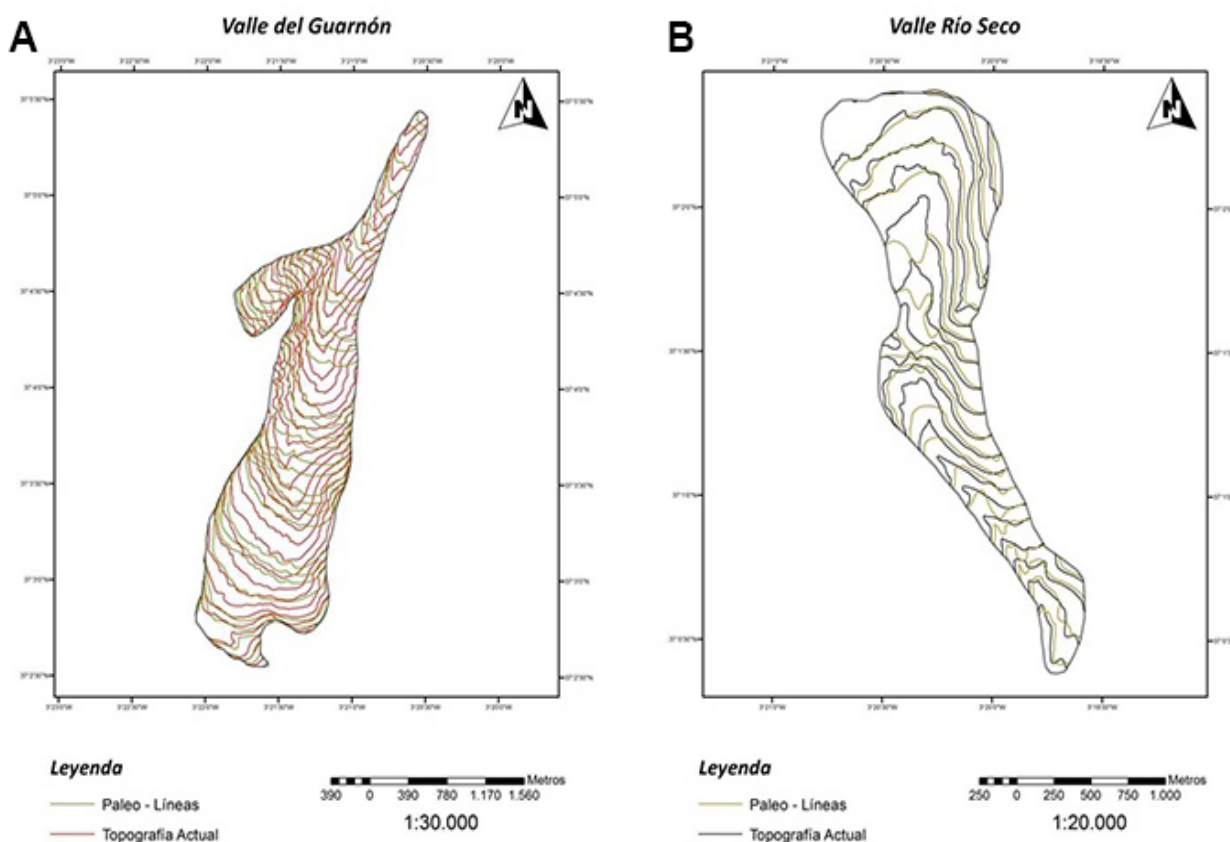
- THAR 1: el ratio del THAR 1, que se obtiene mediante el cociente entre las altitudes mínimas y máximas de cada paleoglaciar, determinadas en el sistema de información geográfica.

- THAR 2: el valor de ratio aquí utilizado se determinó haciendo la media de los valores obtenidos en el THAR 1.

- THAR 3: THAR = 0,50, es el considerado por Benn et al., (2005) para latitudes medias y altas.

- THAR 4: THAR = 0,3, utilizado por Osmaston (1965) en casquetes de hielo sobre volcanes de la misma región.

En la siguiente tabla (Tabla 1) se presenta los resultados obtenidos en la aplicación del método, con las variables utilizadas para cada uno de los valles.



**Figura 4** - Reconstrucción topográfica de los paleoglaciares, comparándolos con la topografía actual de los valles. A: Paleoglaciar del Valle del Guarnón. B: Paleoglaciar del Valle de Río Seco.

**Tabla 1** - Resultados obtenidos para distintos ratios con el método THAR.

PALEOGLACIAR	COTAS		paleoELAs THAR				PROMEDIO
	Ac	Af	THAR 1	THAR 2	THAR 3	THAR 4	
Valle Río Seco	3150	2180	2851	2741	2665	2471	2682
Valle Guarnón	3300	1550	2372	2562	2425	2075	2358

Los resultados obtenidos en el método THAR, establece la paleoELA del Valle de Río Seco, aproximadamente 325 metros mayor que la del Valle del Guarnón. Este hecho da información de la extensión de los paleoglaciares en ambos valles.

### Reconstrucción de las paleoELAs por el método AAR (Accumulation Area Ratio)

Los resultados obtenidos para el método AAR han sido de una ELA de 2855 m para el paleoglaciario del valle Río Seco y 2657 m para el del valle Guarnón.

El ratio elegido de 0,67 se debe a la Relación de Área de Acumulación (Accumulation Area Ratio, AAR en inglés), que es la proporción entre el área de acumulación de un glaciar con respecto al área total del mismo. El problema estriba en determinar cuál sería una proporción “equilibrada” de áreas de acumulación y ablación para determinar la ELA.

Se ha elegido 0.67 porque en general en glaciares “en equilibrio” se ha observado que tienen aproximadamente 2/3 (aproximadamente 67%) del área total actuando como zona de acumulación y el 1/3 (33%) restante como zona de ablación (IANIGLA-CONICET -en línea-)

En la página web del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (IANIGLA – CONICET, <http://www.glaciares.org.ar/>), se indican las características del estado del glaciar en relación a la ratio del área de acumulación y las ELAs:

- Glaciar “en equilibrio” (inviernos y veranos normales): AAR cercano a 0,67 (2/3 acumulación, 1/3 ablación). ELA normal, Balance de masa neto anual cercano a cero.

- Glaciar en un “buen año” (frío y con muchas nevadas): AAR > 0,67 (generalmente la mayor parte del área del glaciar actúa como zona de acumulación). *ELA más baja que lo normal*. Balance de masa neto anual positivo.

- Glaciar en un “año malo” (muy caluroso y sin nevadas): AAR < 0,67 (generalmente menos de la mitad del área total del glaciar actúa como zona de acumulación). *ELA más alta que lo normal*. Balance de masa neto anual *negativo*.

En este trabajo se utiliza la ecuación de Porter (2001), para la aplicación de este método, que es la siguiente:

$$AAR = \frac{Sc}{Sc + Sa}$$

Donde:

- Sc es la superficie de la zona de acumulación
- Sa es la superficie de la zona de ablación.

El segundo está determinado para cada glaciar en el software de SIG mediante el cálculo del cociente entre el área de su zona de acumulación y superficie total (Tabla 2).

Tabla 2 - Resultados del Método AAR.

PALEOGLACIAR	AAR = 0,67	AAR vble	
Valle Río Seco	2855	ratio 0,58	2500
Valle Guarnón	2657	ratio 0,49	2225

### Reconstrucción de la curva hipsográfica

Se han reconstruido las curvas hipsográficas para los valles de Guarnón (Figura 5) y Río Seco (Figura 6). La curva hipsográfica ha sido el resultado del cálculo de porcentaje de área acumulada del paleoglaciario en cada intervalo de altura.

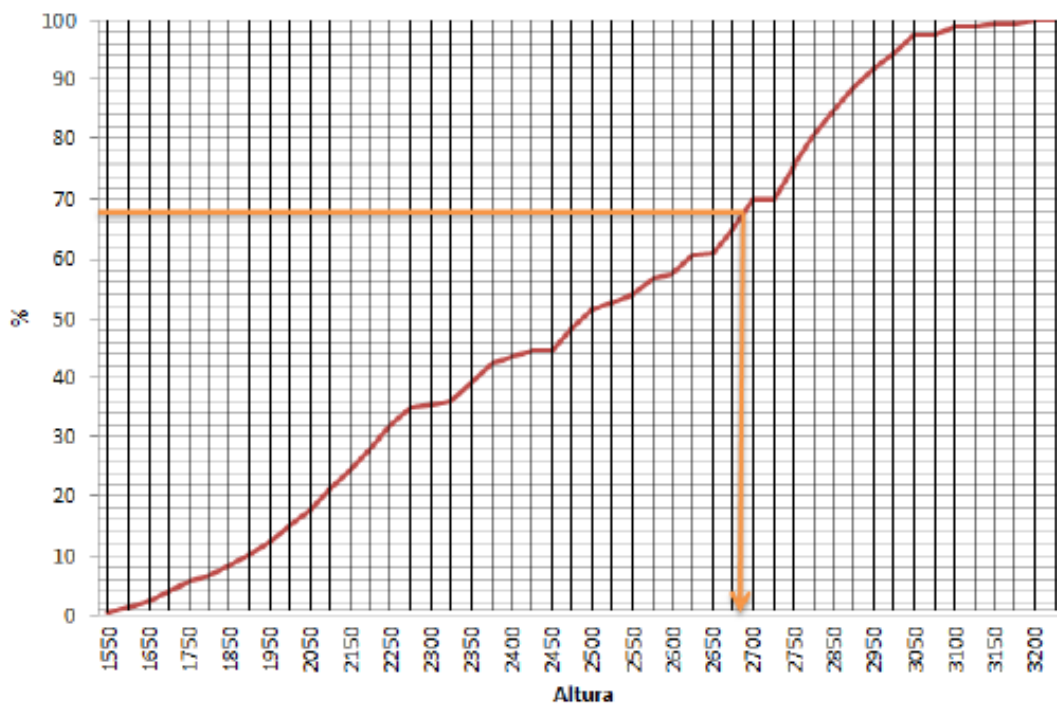
### Reconstrucción de las paleoELAs por el método AABR (Area x Altitude Balance Ratio)

Las paleoELAs obtenidas por este método tienen un valor promedio de 2818 metros en el caso del valle del Río Seco y de 2527 metros en el caso del valle Guarnón. El método AABR fue desarrollado por Osmaston en el año 1965.

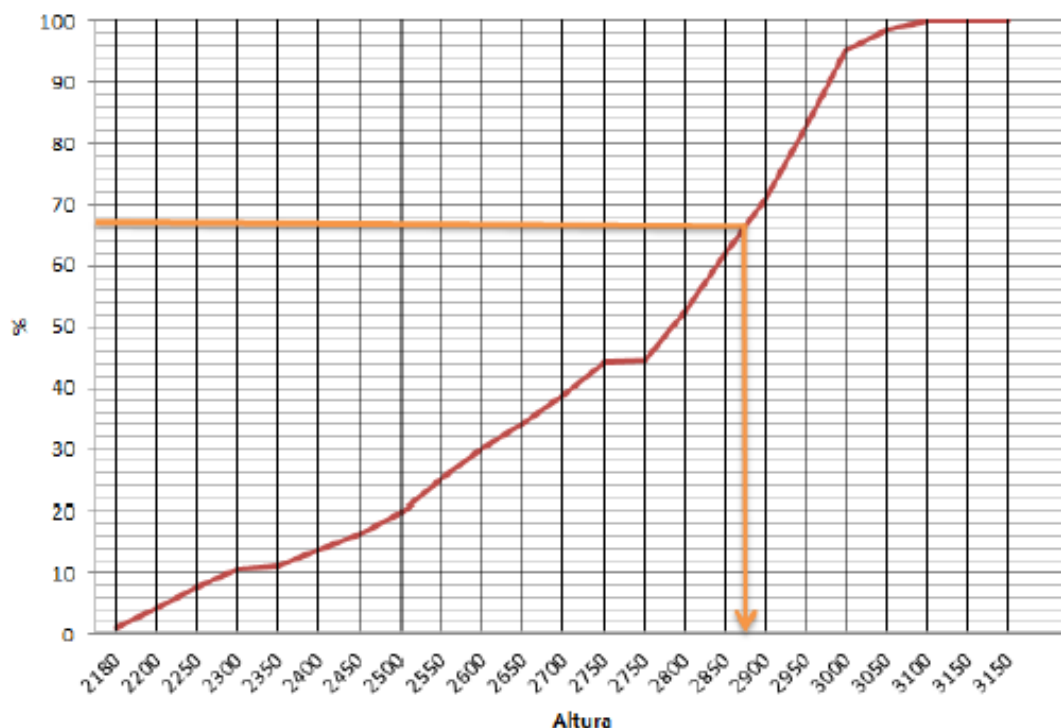
En un principio se denominó Área – Altura – Acumulación, y se creó para ser aplicado en los glaciares del este de África. Este método tiene en cuenta la hipsometría del glaciar, basada en la distribución detallada de la superficie de la masa de hielo con respecto a la altitud, para lo cual es preciso conocer la superficie de la misma por franjas o rangos altitudinales.

El método AABR se basa en ponderar el balance de masa en las áreas que se localizan muy por encima o por debajo de la ELA en mayor medida que en las áreas que se encuentran inmediatamente por encima o por debajo de ese nivel.

En el método AABR el resultado se redefine mediante el establecimiento de diferentes pendientes lineales del perfil del balance de masa por encima y por debajo de la ELA (Úbeda, 2011). A partir de la hoja de cálculo programada siguiendo las indicaciones de Osmaston (2005), se procede a calcular en primer lugar la paleoELA de cada uno de los paleoglaciares del área de estudio.



**Figura 5** - Curva hipsográfica del Valle del Guarnón. El valor obtenido para la paleoELA es 2657 m, con la utilización de AAR = 0,67.



**Figura 6** - Curva Hipsográfica del Valle Río Seco. El valor obtenido para la paleoELA es de 2855 m, con la utilización de AAR = 0,67.

En este caso se ha utilizado un valor de BR=2, debido a que se considera un valor representativo de glaciares de medias latitudes con influencia marítima (Benn y Gemell 1997; Rea 2009).

Los resultados obtenidos para el método AABR, presentan semejanza a los resultados obtenidos con los dos métodos anteriormente aplicados. En este caso la paleoELA del Valle de São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 39, n. 3, p. 779 - 794, 2020

Río Seco vuelve a encontrarse aproximadamente unos 300 metros más arriba que la del Valle del Guarnón, hecho significativo que en los tres métodos suceda esto.

En cuanto a las extensiones de los valles y su orientación, el Valle del Guarnón tiene orientación norte y una extensión de 4,5km<sup>2</sup>, mientras que el Valle Río Seco está orientado al sur y su área es de ~2,29 km<sup>2</sup>.

## DISCUSIÓN

En el presente estudio se han calculado las ELAs utilizando tres métodos distintos, los métodos THAR, AAR y AABR.

Utilizando los métodos THAR y AAR se han obtenido unas paleoELAs de 2682 m y 2358 m y de 2855 m y 2657 m para los valles Río Seco y Guarnón respectivamente. Un problema que se plantea cuando se aplica el método THAR es la posible sobre-estimación de los resultados, ya que es difícil establecer la altitud que llegó a alcanzar la cabecera del glaciar, y se puede situar en un punto más alto (Bate, 2008).

Según este autor, una cabecera alta y con una pendiente pronunciada puede proporcionar un rango de sobrestimación de la ELA que lleve a obtener valores de la paleoELA que varíen entre los 10 y 100 metros.

Para los cálculos mediante el método AAR se ha elegido un ratio de 0,67. El método AAR tiene su origen en los trabajos de E. Brückner y E. Richter en los glaciares de los Alpes del este a finales del siglo XIX.

Brückner asume para los glaciares de valle que el límite entre el área de acumulación y el de ablación se reparte en una proporción de 3:1, o lo que es lo mismo una ratio  $AAR = a$  0,75, y la línea resultante de dicho límite se corresponde con la ELA (tomado de Serrano y González-Trueba, 2004).

Otros autores han empleado otras proporciones, así por ejemplo Richter utilizó la proporción de 8:1, si bien en años posteriores vuelve a utilizar la proporción de 3:1 ( $AAR = 0,75$ ), asegurando que con esta proporción obtenían mejores resultados (tomado de Serrano y González Trueba, 2004).

Años más tarde, la relación de 3:1 fue rechazada, al considerar que subestima el valor real de la altitud a la que se sitúa la ELA.

Recientes estudios asumen que para los glaciares de valle de latitudes medias y en condiciones de equilibrio, el porcentaje del área de acumulación de un glaciar con respecto a su área total ( $AAR$ ), se sitúa en torno a 0,67, o lo que es lo mismo una proporción de 2:1 (Meierding, 1982, Serrano y González-Trueba).

Dependiendo de la zona en la cual se realiza el estudio, y por lo tanto la aplicación del método, se pueden modificar los valores del ratio, para que el resultado del método sea lo más preciso posible, ajustándose a las condiciones

ambientales de cada ámbito de montaña. Algunos ejemplos de los distintos valores de ratio son  $AAR$  entre 0,5 y 0,8 en regiones de Norteamérica o en los Alpes del Sur, en Nueva Zelanda el ratio paso a ser un  $AAR$  de 0,55 a 0,65 (Úbeda, 2011). Para este estudio, además del valor de 0,67 para el ratio  $AAR$  se ha elegido también un ratio variable.

El primero de estos ratios se corresponde con el valor que Kaser y Osmaston (2002) consideraron más apropiados para los glaciares tropicales. También el empleado en glaciares de latitudes medias (Meierding, 1982, Serrano y González – Trueba, 2004).

Los valores obtenidos son similares a los obtenidos en el método THAR aunque existen algunas diferencias. Por otro lado, las diferencias obtenidas de aplicar ratios diferentes arrojan valores medios de las paleoELAs que apenas llegan al centenar de metros, en cuanto a diferencia en altura se refiere.

Con este método la paleoELA del Valle de Río Seco vuelve a estar más alta que la paleoELA del Valle del Guarnón.

Mientras que los métodos THAR y AAR pueden tener algún error debido al efecto de la hipsometría, el método AABR ofrece los resultados más precisos, ya que tiene en cuenta la hipsometría del glaciar.

Con el método AABR, utilizando un  $BR = 2$  se han obtenido unas paleoELAs de 2818 m en el paleoglaciar del Río Seco y de 2527 m en el paleoglaciar de Guarnón. El  $BR$  elegido ha sido de 2 ya que es un valor que se utiliza habitualmente para glaciares de medias latitudes con influencia marítima (Rea 2009).

El primer dato importante que nos desvela este estudio es la extensión que alcanzaron los glaciares: La extensión del paleoglaciar del valle del Río Guarnón se ha estimado en 4,5 km<sup>2</sup>, mientras que la del paleoglaciar del valle de Río Seco alcanzó los 2,3 km<sup>2</sup>.

Este hecho se debe a la orientación de cada uno de los valles, orientación Norte en el caso el valle del Río Guarnón y orientación Sur en el caso del valle de Río Seco. En Sierra Nevada predomina la componente atlántica, en lo referente a circulación atmosférica, lo que determina una superior humedad y precipitación en las vertientes de exposición norte y oeste. Aunque, también cabe destacar, que como



respuesta a la dominancia de los vientos del cuarto cuadrante, la acumulación de nieve resulta muy abundante en las laderas expuestas al este, sureste y sur, en las zonas más cimeras de Sierra Nevada (Palade et al., 2011). Las paleoELAs en ambos valles quedan establecidas a distintas alturas, en función del método empleado para su cálculo.

En el valle del Guarnón la paleoELA se establece en una altura más baja, hecho indicativo de que la extensión del paleoglaciario es mayor, ya que sucede en la aplicación de los tres métodos empleados para su cálculo, por el contrario en el valle de Río Seco la paleoELA queda establecida en una cota más alta, también en los tres métodos empleados para el cálculo de la ELA, en consonancia a la menor extensión del paleoglaciario que hubo en este valle.

En cuanto al establecimiento de la paleoELA en los tres métodos en el Valle de Río Seco por encima de la paleoELA del Valle del Guarnón y como se observa en las tablas 1 y 2 y el apartado 4.4, donde se compara la extensión de los paleoglaciares existentes en ambos valles, el que el Valle del Guarnón tuviese una mayor extensión hace que la paleoELA se establezca más abajo que la del Valle de Río Seco. Las comparativas de los métodos THAR y AAR respecto al método AABR, nos muestran unas diferencias asumibles.

El método THAR da unos valores muy próximos a los otros dos métodos, aunque en este método se puede llegar a sobrestimar la altura a la que se estableció la cabecera del glaciar, pudiendo hacer que los resultados no sean correctos. La aplicación del método AAR, como se ha dicho anteriormente, se fundamenta en obtener unos buenos resultados mediante la correcta selección del valor del ratio en relación con las características geográficas del área de estudio.

El valor medio (media de los resultados AAR1 y AAR2) de las paleoELAs para el valle del Guarnón se establece en los 2441 metros y para el valle de Río Seco queda establecida en 2678 metros.

Finalmente, el método AABR, es el más preciso de los tres métodos que se han utilizado en el desarrollo de esta investigación, dando como resultado unas paleoELAs de 2818 y 2527 en los valles del Río Seco y Guarnón respectivamente. Esto se debe a que tanto el método THAR como el método AAR requieren

de una experiencia notable del investigador y del detallado conocimiento de las características geomorfológicas y climáticas del área de estudio a la hora de elegir los ratios que serán empleados. Sin embargo el método AABR, corrige las deficiencias de los métodos anteriores, ya que este método se basa en ponderar el balance de masa en las áreas que se localizan por encima o por debajo de la ELA (Osmaston, 2005).

En cuanto a la altura media de la paleoELA es este método el que la sitúa más arriba de los tres, es decir, en comparación con el método THAR en ambos valles supera los 100 metros de diferencia y respecto al método AAR en ninguno de los dos valles se llega a superar los 100 metros de diferencia.

El método AABR es el método más objetivo de los tres, ya que nos permite realizar tantas reconstrucciones de las paleoELAs como creamos conveniente, utilizando criterios estadísticos para seleccionar los resultados más fiables.

Con esto se conseguirá eliminar la subjetividad que introducen otros métodos, debido a las decisiones tomadas por los investigadores, como por ejemplo la selección de los ratios en los métodos anteriormente descritos. Otros autores han calculado paleoELAs en Sierra Nevada durante el LGM, Palma et al. (2017) calcularon las ELAs de los paleoglaciares en esta sierra y obtuvieron una diferencia significativa entre la vertiente norte y la vertiente sur, al igual que ocurre en este estudio, con los dos paleoglaciares estudiados con distintas orientaciones. Palma et al. (2017) obtuvieron una paleoELA de 2490 m para el paleoglaciario de Guarnón mediante el método AABR, este dato es casi similar a los 2527 m obtenidos en el presente estudio. En cuanto al paleoglaciario Río Seco, no hay datos disponibles, aunque Palma et al. (2017) obtuvieron una ELA media de 2728 m en el paleoglaciario Veleta, en el valle de Poqueira.

Este paleoglaciario estaba situado justo al oeste del paleoglaciario de Río Seco, en el cual se ha obtenido una paleoELA de 2818 metros en el presente estudio. Estas últimas diferencias no son significativas, ya que aunque sean áreas cercanas, se encuentran en una zona donde hay grandes variaciones de la topografía.

Todos estos datos se han obtenido mediante la combinación de diversas técnicas, y utilizando principalmente un software de SIG para el desarrollo de la investigación. Los SIG han sido

utilizados para cálculos similares por diversos autores en la Península Ibérica. Palma et al. (2017) los utilizaron en Sierra Nevada para el cálculo de paleoELAs durante el máximo avance de los glaciares. En el Sistema Central, en la Sierra de Gredos, Campos et al. (2019) utilizaron los SIG para reconstruir los glaciares durante el LGM, mientras que Pedraza et al. (2013) lo utilizaron para estudiar las fases glaciares del Pleistoceno tardío. También en el Sistema Central, en la Sierra de Béjar, Carrasco et al. (2013) utilizaron los SIG para la reconstrucción de un glaciar de meseta y Carrasco et al. (2015) los utilizaron para el estudio de la secuencia y la cronología del glaciar Cuerpo de Hombre durante último ciclo glaciar.

En el norte de la Península Ibérica, en la Cordillera Cantábrica, Rodríguez-Rodríguez et al. (2016) utilizaron los SIG para la producción

de un mapa geomorfológico en un estudio de la cronología de las glaciaciones en el valle del Porma. También en la Cordillera Cantábrica, Rodríguez-Rodríguez et al. (2017) se ayudaron de los SIG para investigaciones de la última deglaciación en el valle del Monaterio.

En la cordillera de los Pirineos, Fernandes et al. (2017) se valieron del uso de los SIG para el cálculo de ELAs en los Pirineos Centrales, mientras que Campos et al. (2020) los utilizaron para el estudio de la evolución del glaciar Aneto, también en los Pirineos Centrales.

Todos estos autores han utilizado con resultados positivos los SIG para sus investigaciones, al igual que lo sucedido en el presente estudio, esto demuestra la validez de los SIG para su utilización en investigaciones en el campo de las geociencias,

## CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza la validez de las aplicaciones SIG para la deducción de las ELAs, la investigación llevada a cabo constituye una primera aproximación para determinar la altitud de la línea de equilibrio glaciar en el macizo de Sierra Nevada (España) durante el Último Máximo Glaciar Local (LLGM, *Last Local Glacial Maximum*). El cálculo de las paleoELAs se ha llevado a cabo en los valles del río Guarnón y de Río Seco, estimándose a partir de tres métodos que tienen en cuenta diferentes variables geomorfológicas.

El método de cálculo de ELAs AABR ha

demostrado ser el más preciso, ya que tiene en cuenta la hipsometría del glaciar, con este método se han obtenido unas paleoELAs durante la fase del LGM de 2818 metros en el paleoglaciar del Río Seco y de 2527 metros en el paleoglaciar de Guarnón. Los resultados obtenidos en este estudio, junto con los obtenidos por otros autores, indican que la utilización de los SIG para determinar las paleoELAs ha demostrado ser de gran utilidad para la realización de estos y otros cálculos, debido a la posibilidad de simplificar y centralizar los cálculos realizados en el sistema.

## REFERÊNCIAS

- BATE, S. A reconstruction of equilibrium line altitudes of the little ice age glaciers in Linnédalen, Western Spitsbergen, Svalbard. University Centre in Svalbard. Term Project AG-212 Autumn 2008, 19 p., 2008.
- BEEN, D.I.; OWEN, L.A.; OSMASTON, H.A.; SELTZER, G.O.; PORTER, S.C.Y.; MARK, B.. Reconstruction of equilibrium line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers. **Quaternary International**, v. 138-139, p. 8-21, 2005.
- BENN, D.I. & GEMMELL, A.M.D. Calculating equilibrium-line altitudes of former glaciers by the balance ratio method: a new computer spreadsheet. *Glacial Geol Geomorphol*, 1997.
- BERGMAN, S.C. Late Pleistocene Glacial History and Reconstruction of the Fish Lake Plateau, South-Central Utah: Implications for Climate at the Last Glacial Maximum. Senior Integrative Exercise. Bachelor of Arts degree from Carleton College, Northfield, Minnesota, USA, 54 p., 2007.
- CAMPOS, N.; PALACIOS, D.; TANARRO, L. Glacier reconstruction of La Covacha Massif in Sierra de Gredos (central Spain) during the Last Glacial Maximum. **Journal of Mountain Science**, 2019. <https://doi.org/10.1007/10.1007/s11629-019-5382-2>
- CAMPOS, N.; ALCALÁ-REYGOSA, J.; WATSON, C.S.; GRIMA, N.; KOUKOULOS, I.; QUESSADA-ROMAN. Unravelling the retreat of the Aneto Glacier (Pyrenees, Spain) since the Little Ice Age. EGU 2020, EGU General assembly, 2020. [doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-1027](https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-1027).
- CARRASCO R.M.; PEDRAZA J.; DOMÍNGUEZ-VILLAR, D.; VILLA, J.; WILLENBRING, J.K. The plateau glacier in the Sierra de Béjar (Iberian Central System) during its maximum extent. Reconstruction and chronology. **Geomorphology**, v. 196, p. 83–93, 2013.
- CARRASCO, R.M.; PEDRAZA, J.; DOMINGUEZ-VILLAR, D.; WILLENBRING, J.K.; VILLA, J. Sequence and chronology of the Cuerpo de Hombre paleoglacier (Iberian Central System) during the last glacial cycle. **Quat Sci Rev**, v. 129, p. 163–177, 2015.
- CLARK, P.U.; DYKE, A.S.; SHAKUN, J.D.; CARLSON, A.E.; CLARK, J.; WOHLFARTH, B.; MITROVICA, J.X.; HOSTETLER, S.W., MCCABE, A.M. The Last Glacial Maximum. **Science**, v. 325, p. 710–714, 2009.
- COSSART, E. Mapping Glacier Variations at Regional Scale through Equilibrium Line Altitude Interpolation: GIS and Statistical Application in Massif des Écrins (French Alps). **Journal of Geographic Information System**, v. 3, p. 232-241, 2011.
- FERNANDES, M.; OLIVA, M.; PALMA, P.; RUIZ-FERNÁNDEZ, J.; LOPES L. Glacial stages and post-glacial environmental evolution in the Upper Garonne valley, Central

- Pyrenees. *Science of the Total Environment*, v. 584–585, p. 1282–1299, 2017.
- GÓMEZ A, SALVADOR F.; SÁNCHEZ-GÓMEZ, S.; SIMÓN-TORRES, M.; CAPEL-MOLINA, J.J.; SCHULTE L. Y GARCÍA-NAVARRO, A. Morfología de cumbres de Sierra Nevada. Una aproximación a la dinámica glaciar y periglacial. En A. Gómez-Ortiz; F. Salvador-Franch, L. Schulte y García-Navarro (eds). **Itinerarios geomorfológicos por Andalucía Oriental**. Servei de Gestió i Evolució del Paisatge. Universitat de Barcelona, Barcelona, p. 37-63, 1998.
- GÓMEZ ORTIZ, A. El paisaje glaciar de Sierra Nevada: evolución del conocimiento, resultados recientes e investigaciones en curso en el Corral del Veleta. **Treballs de la Societat Catalana**, v. 59, p. 63-86, 2005.
- GÓMEZ ORTIZ, A. Y PLANA CASTELLVI, J.A. La Pequeña Edad de Hielo (Littell Ice Age) en Sierra Nevada a través de los escritos de época (Siglos XVIII y XIX) en su relación con el progreso de la geografía física y geomorfología española. **Boletín de la A.G.E.**, v. 42, p. 71-98, 2007.
- GÓMEZ ORTIZ, A., PALACIOS ESTREMER, D., RAMOS SAINZ, M., SCHULTE, L., SALVADOR FRANCH, F., TANARRO GARCÍA, L.M., Degradación de permafrost en Sierra Nevada y repercusiones geomorfológicas: el caso del Corral del Veleta. Resultados preliminares. **Boletín de la A.G.E.**, v. 27, p. 7-21, 1999.
- GÓMEZ ORTIZ, A., SALVADOR FRANCH, F., SCHULTE, L., SANZ DE GALDEANO EQUIZA, C., ORTEGA ALBA, F., SIMÓN TORRES, M., SÁNCHEZ GÓMEZ, S., GARCÍA NAVARRO, A. Mapa Geomorfológico de Sierra Nevada: Morfología glaciar y periglacial. **Junta de Andalucía, Consejería de Medio Ambiente, Parque Nacional de Sierra Nevada, Parque Natural de Sierra Nevada, Servei de Gestió i Evolució del Paisatge de la Universitat de Barcelona**, 86 p., 2002.
- GÓMEZ ORTIZ, A., SALVADOR I FRANCH, F. Factores determinantes y relieves asociados a la dinámica glaciar en la fachada mediterránea de Sierra Nevada. *Servei de Paisatge de la Universitat de Barcelona*, 337 – 398 p., 2009.
- GÓMEZ ORTIZ, A., SCHULTE, L., SALVADOR FRANCH, F., PALACIOS ESTREMER, D., SANJOSÉ BLASCO, J.J., ATKINSON GORDO, A. Deglaciación reciente de Sierra Nevada. Repercusiones morfogénicas, nuevos datos y perspectivas de estudio futuro. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, v. 30, p. 147-168, 2004.
- GÓMEZ, A.; SCHULTE, L.; SALVADOR; F. Contribución al conocimiento de la deglaciación reciente y morfología asociada del Corral del Veleta (Sierra Nevada). **Cadernos do Laboratorio Xeológico de Laxe**, v. 21, p. 543–558, 1996.
- GÓMEZ; A.; SCHULTE, L.; SALVADOR, F.; PALACIOS, D.; SANZ DE GALDEANO, C.; SANJOSÉ BLASCO, J.J.; TANARRO, L.M. Y ATKINSON, A. La unidad geomorfológica del Veleta: enclave singular de Sierra Nevada. **Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente**. Madrid, 69 p., 2006.
- GÓMEZ-ORTIZ, A.; PALACIOS, D., PALADE, B.; VÁZQUEZ-SELEM, L. Y SALVADOR-FRANCH, F. The deglaciation of the Sierra Nevada (Southern Spain). **Geomorphology**, v. 159-160, p. 93–105, 2012.
- GÓMEZ-ORTIZ, A.; PALACIOS, D.; RAMOS, M.; TANARRO, L.M.; SCHULTE, L.; SALVADOR-FRANCH, F. Location of permafrost in marginal regions: Corral del Veleta (Sierra Nevada, Spain). **Permafrost and Periglacial Processes**, v. 12, p. 93–114, 2001.
- GONZÁLEZ TRUEBA, J.J. La Pequeña Edad de Hielo en los Picos de Europa (Cordillera Cantábrica, NO de España). Análisis morfológico y reconstrucción del avance glaciar histórico. **Revista C&G**, v. 19, p. 79-94, 2005.
- GONZÁLEZ TRUEBA, J.J.; MARTÍN MORENO, R.; SERRANO, E. El glaciario de la Pequeña Edad de Hielo en las montañas Ibéricas. Síntesis y estado actual de conocimiento. **Revista C&G**. ISSN: 0214 – 1744, 2005.
- HUGHES, P.D.; WOODWARD, J.C.; GIBBARD, P.L. Glacial history of the Mediterranean mountains. **Progress in Physical Geography**, v. 30, p. 334–364, 2006a.
- HUGHES, P.D.; WOODWARD, J.C.; GIBBARD, P.L. Late Pleistocene glaciers and climate in the Mediterranean region. **Global and Planetary Change**, v. 46, p.83–98, 2006b.
- IANGLA-CONICET - Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales-Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. (en línea). *Glaciares de Argentina*. Dirección URL: <http://www.glaciares.org.ar/>. Fecha de consulta: 15 noviembre de 2012.
- KASER, G.; FOUNTAIN, A.Y.; JANSSON, P. A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. **Technical Documents in Hydrology**, n. 59. UNESCO, Paris, 2002.
- KASER, G.Y. y OSMASTON, H. **Tropical Glaciers**. International Hydrological Series. UNESCO- IHP / Cambridge University Press. 2002.
- MEIERDING, T.C. Late Pleistocene glacial equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range: a comparison of methods. **Quat. Res.**, v. 18, n. 3, p. 289-310, 1982.
- MONTÁVEZ, J.P.; ROLDÁN, C.; RODRÍGUEZ, A.; JIMÉNEZ, J.I. Primeros resultados de la climatología de Sierra Nevada. In: I CONFERENCIA INTERNACIONAL SIERRA NEVADA. CHACÓN J (ed.). Universidad de Granada, Granada, p. 87–99, 1996.
- OSMASTON, H. 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**, v. 138-139, p. 22-31, 2005.
- PALADE, B., GÓMEZ-ORTIZ, A., PALACIOS, D. Glaciares Rocosos de Sierra Nevada y su significado paleoclimático: una primera aproximación. **Cuadernos de Investigación Geográfica**, v. 37, p. 95–118, 2011.
- PEDRAZA, J.; CARRASCO, R.M.; DOMÍNGUEZ-VILLAR, D.; VILLA J. Late Pleistocene glacial evolutionary stages in the Gredos Mountains (Iberian Central System). **Quaternary International**, v. 302, p. 88–100, 2013.
- PORTER, S.C. Equilibrium-line altitudes of Late Quaternary glaciers in the Southern Alps, New Zealand. **Quat. Res.**, v. 5, n. 1, p. 27-47, 1975.
- PORTER, S.C. Snowline Depression in the Tropics during the Last Glaciation. **Quaternary Science Reviews**, v. 20, p. 1067 – 1091, 2001.
- RAMAGE, M.J.; SMITH, J.A.; RODBELL, D.T.; SELTZER, G.O. Comparing reconstructed Pleistocene equilibrium – line altitudes in the tropical Andes of central Peru. **Quaternary Science**. v. 20, p. 777 – 788. 2005.
- REA BR. Defining modern day Area-Altitude Balance Ratios (AABRs) and their use in glacier-climate reconstructions. **Quat Sci Rev**. v. 28, p. 237–248, 2009.
- RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, L., JIMÉNEZ-SÁNCHEZ, M., DOMÍNGUEZ-CUESTA, M.J., RINTERKNECHT, V., PALLÀS, R., BOURLÈS, D. Chronology of glaciations in the Cantabrian Mountains (NW Iberia) during the Last Glacial Cycle based on in situ-produced  $^{10}\text{Be}$ . **Quaternary Science Reviews**, v. 138, p. 31–48, 2016.
- RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, L.; MONSERRAT, J.S.; DOMÍNGUEZ-CUESTA, M.J.; RINTERKNECHT, V.; PALLÀS, R.; AUMAÏTRE, G.; BOURLÈS, D.; KEDDADOUCHE, K. Timing of last deglaciation in the Cantabrian Mountains (Iberian Peninsula; North Atlantic Region) based on in situ-produced  $^{10}\text{Be}$  exposure dating. **Quaternary Science Reviews**, v. 171, p. 166-181, 2017.
- ROLDÁN, C.; MONTÁVEZ, J.P.; RODRÍGUEZ, A.; JIMÉNEZ, J.I. Contribución al estudio del régimen térmico en la zona esquiable de Sierra Nevada. In: I CONFERENCIA INTERNACIONAL SIERRA NEVADA, CHACÓN, J, (ed.). Universidad de Granada-Sierra Nevada 96: Granada; p. 55–70, 1996.
- SALVADOR FRANCH, F.; GÓMEZ ORTIZ, A.; SALVÀ CATARINEU, M.; PALACIOS E. Caracterización térmica de

- la capa activa de un glaciar rocoso en medio periglacial de alta montaña mediterránea. El ejemplo del Corral del Veleta (Sierra Nevada, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, v. 37, n. 2 p. 25-48, 2011).
- SERRANO C.E. & GONZÁLEZ TRUEBA, J.J. El método AAR para la determinación de paleo-ELAs: análisis metodológico y aplicación en el macizo de Valdecebollas (Cordillera Cantábrica). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, v. 30, p. 7-34.
- SERRANO, E.; MARTÍNEZ DE PISÓN, E.; LAMPRE, F. **Desaparición de glaciares pirenaicos españoles**. Greenpeace, 28 p., 2004.
- SORIA, F.J. y SORIA, J.M. Depósitos de glaciares rocosos en Sierra Nevada (Granada). *Acta Geológica Hispánica*, v. 21-22, p. 123-129, 1986-1987.
- TANARRO, L.M.; HOELZLE, M.; GARCÍA, A.; RAMOS, M.; GRUBER, S.; GÓMEZ, A.; PIQUER, M.; PALACIOS, D. Modelling of permafrost distribution in Mediterranean mountains: Corral del Veleta, Sierra Nevada, Spain. In: FIRST EUROPEAN PERMAFROST CONFERENCE, Rome. 2001. **Abstracts**...Roma.
- ÚBEDA, J. El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna, (Cordillera occidental de los Andes centrales). Madrid, 584 p. Tesis (Doctoral). Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid.
- ZEMP, M.; HOELZLE, M. Y HAEBERLI, W. Distributed modelling of the regional climatic equilibrium line altitude of glaciers in the European Alps. *Global and Planetary Change*, v. 56, p. 83-100, 2007.

*Submetido em 7 de junho de 2020*  
*Aceito para publicação em 30 de junho de 2020*