

El paisaje glaciar de Sierra Nevada: evolución del conocimiento, resultados recientes e investigaciones en curso en el Corral del Veleta

Antonio Gómez Ortiz
Àrea de Geografia Física
Servei de Gestió i Evolució del Paisatge
Universitat de Barcelona

Resum

Sierra Nevada va ser el focus glacial més meridional d'Europa durant les crisis climàtiques quaternàries, així com durant la denominada Petita Edat del Gel. El coneixement del fet glacial de Sierra Nevada es va iniciar a mitjan del segle XIX. No obstant això, no serà fins les darreries del mateix segle quan va començar a plantejar-se l'existència de petjades morfològiques de glaceres pleistocenes. En l'actualitat, Sierra Nevada no acull masses glacials però sí *permafrost* alpi en estat de degradació.

Paraules clau: glacialisme, *permafrost*, Sierra Nevada.

Resumen

Sierra Nevada, macizo andaluz instalado a 37° de latitud Norte en las Cordilleras Béticas, fue el foco glacial más meridional de Europa durante las crisis climáticas cuaternarias, como también lo fue durante la denominada Pequeña Edad del Hielo. El conocimiento del hecho glacial nevadense se inició a mediados del siglo XIX, siempre de la mano de naturalistas centroeuropeos que accedieron a la Sierra para describir su medio biofísico. Sin embargo, no

será hasta finales del mismo siglo cuando empezará a plantearse la existencia de huellas morfológicas glaciares pleistocenas. En la actualidad, y siempre a partir de estudios recientes, Sierra Nevada no alberga glaciares pero sí *permafrost* alpino en estado de degradación, secuela de aquel diminuto aparato glaciar que dió cobijo el Corral del Veleta durante la Pequeña Edad del Hielo.

Palabras clave: glaciario, *permafrost*, Sierra Nevada.

Abstract

In Sierra Nevada was placed the more southern glacier of Europe during Quaternary climatic crises. Also it were throughout the Little Ice Age. Sierra Nevada cold geomorphology knowledge began in middle XIX century. Nevertheless, it will not be until the end of the same century when Pleistocene glaciers morphologic tracks began to be considered. Nowadays Sierra Nevada does not lodge glaciers but *permafrost* alpine in degradation state.

Key words: glacial, *permafrost*, Sierra Nevada.

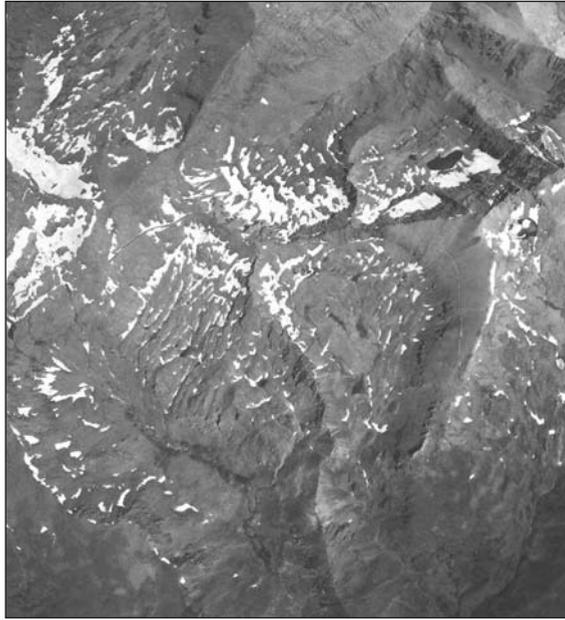
1. Introducción

Las cumbres de Sierra Nevada, en particular las cabeceras y tramos altos de barrancos, desde el cerro de Trevélez (2877 m) hasta el cerro del Caballo (3013 m), ofrecen una morfología labrada a partir del trabajo mecánico de sistemas glaciares. Este foco glaciar pleistoceno fue el más meridional de Europa. La construcción de este descubrimiento empezó a fraguarse a partir del momento en que viajeros ilustrados de mediados del siglo XVIII dan cuenta de la abundancia de hielos y nieves en las cumbres de la Sierra. Pero su explicación científica no se hilvanó hasta una centuria después. Sus descubridores fueron naturalistas centroeuropeos inmersos en la corriente de pensamiento evolucionista.

En la actualidad, la morfología glaciar de Sierra Nevada, que se reparte en una extensión de 326 km², se conoce con notable precisión, sobre todo, a partir de las aportaciones que hicieron Quelle (1905), Obermaier (1917) y Messerli (1965). Sin embargo, aún se desconoce en detalle su construcción a lo largo del tiempo y las condiciones paleoambientales en que tuvo lugar. No sucede lo mismo con la evolución postglaciar, particularmente a partir de la Pequeña Edad del Hielo, de la que se disponen importantes datos (figura 1).

La conferencia tratará de estos acontecimientos. Para afrontarlos se estructurará en dos apartados. Primero, se pasará revista a la historia del conocimiento del paisaje glaciar, es decir al cómo se fueron encadenando los hechos más significativos en la explicación morfológica glaciar de Sierra Nevada. Luego, se prestará atención a la situación actual y se dará información de los estudios que

Figura 1



Nivel de cumbres de Sierra Nevada, área Veleta-la Caldera-Mulhacén-Alcazaba (foto aérea de la JA, 1990 y oblícua, 1995).

venimos afrontando desde la Universidad de Barcelona relativos a la evolución morfológica de las cumbres de la Sierra, dedicando atención particular a las experiencias que se realizan en el Corral del Veleta desde 1995.

2. El descubrimiento de la Sierra: hielo y frío una constante en los relatos de viajeros

Sierra Nevada como la mayoría de las montañas de nuestro entorno cultural y de cierta envergadura (combinación de volumen y altitud y juego de pendientes) no fue inspeccionada y descrita hasta bien entrado el siglo XVIII. Los primeros datos de interés que se tienen se deben a los viajeros ilustrados, generalmente comisionados por la Corona, que la recorren para dar cuenta de sus riquezas y bienes. Sin embargo, hay que puntualizar que sí existían noticias del medio físico de la Sierra anteriores a las descripciones ilustradas, aunque resultan genéricas, repetitivas y dispersas (Titos Martínez, 1996, 1997). Así ocurre con las de origen árabe, que son la base del conocimiento de la Sierra hasta bien entrado el siglo XVI.

Los árabes y los primeros cristianos repobladores de los pueblos de Sierra Nevada, tras la conquista de Granada en 1492, no debieron adentrarse en los tramos más elevados de esta montaña, probablemente por ser un medio hostil y peligroso. Ello explica que las referencias escritas sobre sus cumbres escaseen o sean poco precisas y faltas de detalles. Cuando las hay siempre inciden en la abundancia de nieves que albergan, en el frío gélido que las domina, en el viento violento que barre las alturas, en las aguas cristalinas que de ella proceden y en la variedad de plantas medicinales que producen. Y cuando se incide en la morfología de la Sierra se resalta la pendiente y angostura de los barrancos y las considerables alturas de sus picos, que se distinguen desde el mar. De las referencias escritas hay dos que resumen muy bien estas ideas (que transcribimos a partir de Torres Palomo, 1996-1997). La de Muhammad b. Abi Bakú al-Zuhri, que en su visita a la ciudad de Granada, en 1137, señalaba: *“Y esta montaña es una de las maravillas del mundo porque no se ve limpia de nieve en invierno ni en verano. Allí se encuentra nieve de muchos años que, ennegrecida y solidificada, parece piedra negra, pero cuando se rompe se halla en su interior nieve blanca. En la cumbre de esta montaña las plantas no crecen ni los animales pueden vivir (...). Nadie puede subir a esta montaña, ni andar por ella, salvo en la época de calor, cuando el Sol está en el signo de Escorpión, siendo entonces posible su acceso...”*. La otra referencia que también transcribimos es más reciente, de 1553, y se debe a Ahmad b. Ali al-Muhalli. De la Sierra apuntaba: *“No tiene acceso esta montaña más que por tres lugares especiales y cuando se sube por alguno de ellos y se ha llegado a la cumbre se divisa desde allí la tierra de Tremecén (...). Sopla en ella un viento helado que mata a todos aquellos sobre los que pasa. Al pie de esta montaña, hacia occidente está la ciudad de Granada que se cuenta entre las más bellas”*.

Como antes anunciamos fueron los viajeros ilustrados, sobre todo a partir de la segunda mitad del siglo XVIII, quienes relataron con cierto detalle las cumbres de Sierra Nevada. En efecto, los itinerarios que hicieron, a través de barrancos y lomas, les permitió inventariar y describir todo aquello que pudiera resultar valioso y útil y también de interés científico. El resultado de este empeño

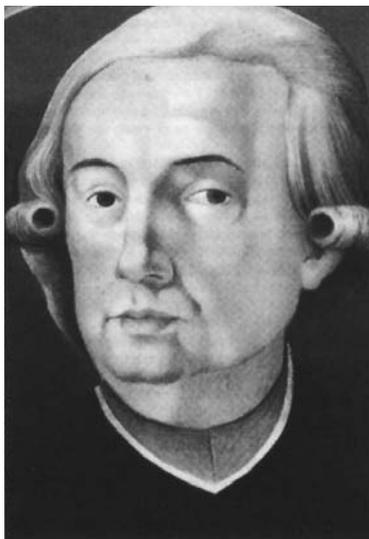
resultó doble, pues significó tener un conocimiento geográfico más completo del territorio y, al tiempo, contribuyó al progreso de determinadas ciencias, entre ellas las naturales, y de éstas, la botánica.

De las descripciones más interesantes y pioneras de estos años relativas al paisaje de cumbres de la Sierra destacan las de Antonio Ponz, que las recorre en 1754 (figura 2). Y de las referidas a su fisiografía y configuración morfológica sobresalen las dedicadas al Corral del Veleta, probablemente las primeras en las que se da información del hecho glaciar. De su contenido subrayamos: *“Dexado este sito (se refiere al picacho del Veleta) pasamos á registrar el propinquo llamado corral del Veleta, nombre ajustado á sus proporciones, por ser una profundidad ancha y cerrada de tajos muy peynados sin entrada por parte alguna, caxon ambicioso de nieve, que se cree guarda la primera que cayó después del Diluvio, reducida a piedra, pues estando descubierto hacia el Norte, aquí es yelo lo que es nieve en otros lugares; y nunca se derrite mas que la superficie que es lo que el Sol le descubre”*.

Pero sin lugar a dudas fueron los botánicos ilustrados los que precisaron más el paisaje de la Sierra, pues en sus campañas de recolección de plantas no se limitaron a describirlas sino que, además, resaltaron el medio ecológico en el que se desarrollaban. Esta manera de operar, recomendada desde el Real Jardín Botánico de Madrid –creado en 1755–, significó contemplar el medio biofísico de la montaña desde la perspectiva global. Esta metodología fue puesta en práctica en Sierra Nevada por Simón de Rojas Clemente y Rubio, discípulo de Antonio José de Cavanilles, durante los años 1804 y 1805. La novedad botánica de sus aportaciones fue la propuesta de estratificación vegetal que hizo en altura relacionando relieve, altitud y ambiente climático, posiblemente anterior o coetánea a la experiencia que en igual sentido realizó Humboldt en el Chimborazo, en 1802 (Capel, 2002). Su interés, desde la perspectiva geomorfológica y climática, es que a los dos pisos más elevados los califica frigidísimo y glaciar, resaltando de ellos la preponderancia de la nieve y el viento. Y lo describió así: *“Noto de paso que todas las altas cumbres de Sierra Nevada están peladas no porque deje de caer en ellas la nieve, sino porque la arrojan de ellas los vientos fuertes a que están expuestas, así muy cerca de ellas, como a 100 varas o menos más abajo (así se observa en el Mulhacén y Veleta) ya se hallan grandísimos ventisqueros perpetuos (...). Así, el verdadero límite de nieves perpetuas o permanentes en el Norte de Sierra Nevada será aproximadamente a 2800 varas sobre el nivel del mar”* (transcrito de Gil Albarracín, 2002).

3. De la descripción a la explicación científica: la aportación de botánicos y geógrafos

La afirmación del hecho glaciar en Sierra Nevada se construyó a lo largo del siglo XIX. Por la documentación analizada se desprende que primero, en el pri-

Figura 2

Ant.º Ponz

Antonio Ponz, ilustrado comisionado por la Corona de España.

Figura 3

Edmundo Boissier

Charles Edmond Boissier, botánico suizo que catalogó la flora de Sierra Nevada.

mer tercio del referido siglo, se identifica la presencia de un glaciario actual, focalizado en el Corral del Veleta. Y después, a partir del cuarto decenio, se constata la existencia de huellas morfológicas glaciares pleistocenas o cuaternarias. Los responsables de este progreso son geólogos, geógrafos y botánicos, principalmente, formados en universidades centroeuropeas (Berlín, Freiburg, Bonn, Munich, Berna, Viena) e influidos por los principios que fundamentaron el actualismo y la evolución geológica no catastrofista propugnada por Lyell (Gómez Ortiz y Plana Castellví, 2004a). Esta renovación en ideas y conceptos favoreció la consolidación de la geología y el nacimiento de la geomorfología, donde los ríos y las montañas, y de éstas, particularmente los glaciares, se interpretaron como eficaces agentes modeladores del relieve (Martínez de Pisón, 1995). Así se explica el interés por descubrir el interior de los valles de las montañas y las cumbres de ellas, especialmente de los Alpes y Pirineos. Figura relevante en este progreso científico fue Alfred Penck que marcó a finales del siglo XIX pautas metodológicas y empezó a ensayar su cronología alpina de los glaciares.

Desde esta inquietud descubridora y, al tiempo, científica, la primera noticia que se tiene del glaciar del Corral del Veleta fue del botánico suizo Edmond Boissier, que recorrió la Sierra en 1937 (figura 3). La descripción que hace denota conocimiento del tema y experiencia de campo, a juzgar por la terminología que emplea, siempre precisa: *“El glaciar tiene una pendiente muy inclinada, su altura perpendicular sólo tiene 200 a 300 pies, su ancho más o menos 600 pasos y está atravesado por numerosas grietas transversales de apenas una pulgada de ancho (...). Tiene la peculiaridad de ser el único en toda la Sierra y el más meridional de Europa: debe su formación a su posición, en el fondo de un circo abrigado y dominado en todas partes por las altas cumbres donde las tormentas barren la nieve en invierno. Su altura media es de 9000 pies y presenta en miniatura todos los caracteres de los glaciares alpinos, hendiduras, hielo impuro, morrenas fangosas en su base y sus laterales, por fin riachuelos de aguas turbias que se escapan en su extremidad por varias cavernas excavadas en el hielo”*.

Pero la confirmación de huellas glaciares cuaternarias en Sierra Nevada llegó después de que se tuviera noticia del pequeño glaciar del Veleta y se constató a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX. Los artífices fueron geógrafos y geólogos centroeuropeos y españoles y fue resultado de posiciones encontradas a favor y en contra de la existencia de masas de hielo antiguas surcando los barrancos. El primero en hablar de huellas asociadas a glaciares cuaternarios fue Schimper (1849), que asoció los conglomerados de la Alhambra a depósitos morrénicos del Genil. Idea, esta última, que fue rebatida por Penck (1894) aunque no la existencia de un glacialismo antiguo generalizado en la Sierra. Los autores que posteriormente se ocuparon del tema (Mac-Pherson, 1875; Rute, 1889; Bide, 1893; etc.) relegaron la morfodinámica de los glaciares al interior de la montaña responsabilizándolos de la formación de las lagunas de cabecera y de los depósitos de morrenas esparcidas en el seno de los barrancos (figura 4).

De las aportaciones más lúcidas emitidas durante estas décadas y que apoyan la idea de un glacialismo cuaternario y otro actual destacan dos. Por orden de aparición, primero, la de Mac-Pherson (1875) que al analizar el valle de Lanjarón afirma: *“Por lo tanto, queda, en mi juicio, fuera de toda duda, que durante la época cuaternaria estuvo toda esta región sometida, a semejanza del resto del continente, á la acción glacial; bien porque sus cumbres se elevasen a mayor altura que en la actualidad, ó como consecuencia, según la general creencia, del enfriamiento en que en aquella época experimentó nuestro hemisferio”*. Y, años después, la de Rute que confirma la acción pasada glaciar refiriéndose al valle del Guarnón. De éste señala: *“Más abajo se reúne el Genil al sombrío Gualnón que baja desde el Corral del Veleta, glaciar sin duda alguna, restos de otros glaciares que trabajaron aquella parte las vertientes del Genil, y que, de la gigantesca brecha abierta al pie de las tres pirámides, arrastraron los escombros que forman hoy el manto de aluviones del cerro del Sol que mide poco más de 100 m de espesor”*.

Figura 4



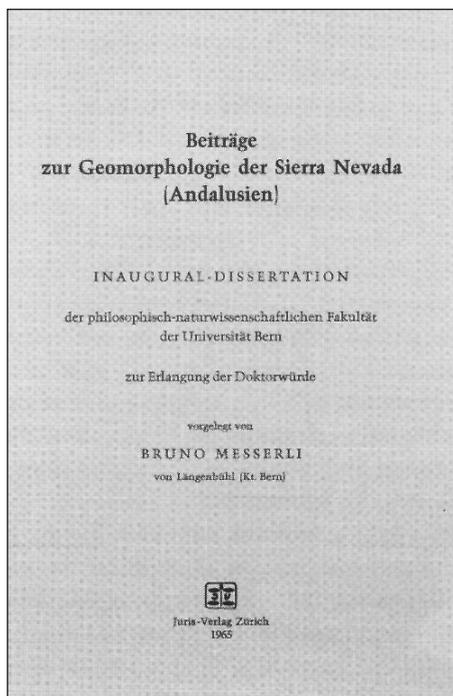
Esquema del Corral del Veleta atribuido a F. Bide (1893).

4. Los fundamentos del conocimiento actual

La confirmación definitiva del glaciario cuaternario y actual de Sierra Nevada y su relevancia morfológica se operó en los primeros decenios del siglo XX y se elaboró a partir de las aportaciones de Quelle (1905) y Obermaier (1917). Discípulos de Penck, ambos autores aplicaron en la Sierra principios y métodos de trabajo ya ensayados por ambos en los Alpes y Pirineos, lo que propició un considerable avance en el conocimiento de los relieves de cumbres del macizo, al tiempo que una muy aproximada delimitación del espacio glaciado —lo que supuso proponer límites altitudinales de las nieves perpetuas cuaternarias y actuales—.

La aportación de Quelle, inmersa en su tesis doctoral (*Beiträge zur Kenntnis der Spanischen Sierra Nevada*), significó la irrupción de ideas de contenido geomorfológico de gran interés, como las relativas a las lagunas, morrenas y rocas aborregadas. También las referidas al significado glaciario del Veleta, que lo contempla como hecho excepcional en el ámbito de la Sierra: “*El glaciar del Veleta debe su existencia única y exclusivamente al hecho de que está orientado hacia el norte al abrigo de sus altas paredes, por lo que no puede ser tomado como punto de referencia para establecer el límite de nieves perpetuas*”.

Y por lo que respecta a la contribución de Obermaier, autor alemán que puede considerarse como el precursor de la glaciología moderna en España (Martí Henneberg, 1988), hay que subrayar el metódico trabajo de campo que

Figura 6

Cubierta de la tesis doctoral de Bruno Messerli.

de los Alpes, Messerli aplicó en la Sierra técnicas analíticas y de observación cualitativa, sobre todo en la búsqueda genética de los depósitos morrénicos escalonados que identifica en los fondos de barrancos y en su fijación cronológica en el tiempo. Este modo de operar, apoyado en un detallado análisis del territorio a partir del vuelo fotográfico nacional de 1957, le llevó a contemplar el hecho glaciario en el contexto global de la morfología del núcleo cimero nevadense y muy en particular en la explicación de los acontecimientos geomorfológicos acaecidos a lo largo del pleniglaciario wurmiense-Tardiglaciario y tiempos holocenos (figura 6).

5. Estudios recientes: enfoque global y métodos pluridisciplinarios

Los estudios más significativos y recientes sobre el paisaje glaciario de Sierra Nevada tienen lugar a partir de la década de los ochenta del pasado siglo y se incluyen en el interés general que despierta el conocimiento de los ambientes fríos en las montañas de la Península Ibérica, tanto en lo que concierne a acontecimientos paleoambientales como a dinámica actual.

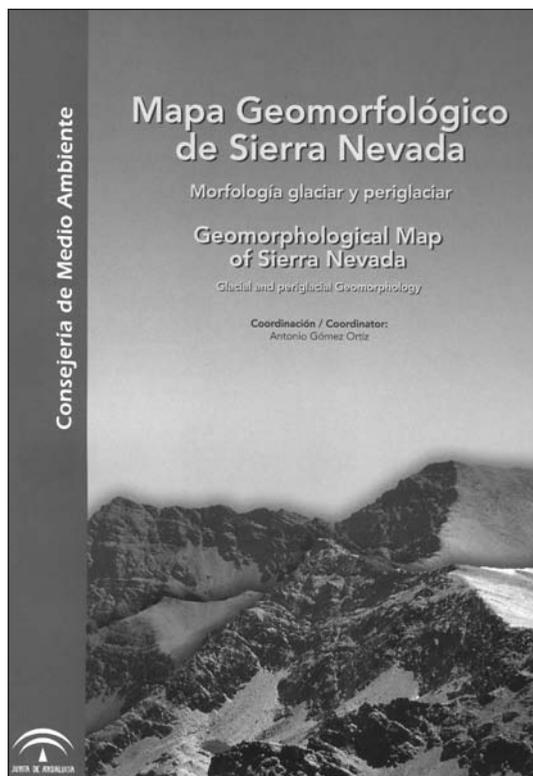
El sólido avance experimentado hay que interpretarlo en el contexto del progreso de la geomorfología española, pues partir de aquellos años enfoques, métodos y técnicas sufren una profunda renovación. Las causas que condujeron a ello hay que explicarlas desde diferentes hechos convergentes: a) El contacto con el exterior, a través de programas de actuación internacionales –visitas a centros de excelencia e intercambios de experiencias–, así como a la participación activa en eventos científicos; b) La mayor comunicación entre las disciplinas, lo que supuso trasvases de ideas y métodos entre especialistas de áreas afines tanto en el ámbito nacional como internacional; c) La implantación del Plan Nacional I+D, que ha facilitado no sólo la creación y consolidación de grupos de trabajos pluridisciplinarios e interuniversitarios, sino también la existencia de una fuente de financiación para asumir proyectos novedosos y competitivos.

Paralelamente a todo ello y por lo que respecta al desarrollo reciente y particular de los estudios glaciares y, en mayor medida, periglaciares, habría que añadir, además, otros hechos más precisos que, en su conjunto, y a lo largo de estas últimas décadas igualmente han venido a contribuir a la creación de un ambiente muy favorable hacia la investigación en medios fríos de montaña. Sin lugar a dudas, la fundación de la Sociedad Española de Geomorfología (SEG), en 1987 y, más recientemente, la creación en 1994 de IPA-España, grupo de trabajo miembro de la *International Permafrost Association*, cuyo cometido principal es el estudio global y particular de los medios fríos, sobre todo no glaciados (Gómez Ortiz et al. 2004a).

Fijándonos de nuevo en Sierra Nevada, probablemente, uno de los grupos de investigación que más frutos ha venido dando durante estos últimos años es el asentado en la Universidad de Barcelona (Grup de Recerca *Paisatge i paleoambients a la muntanya mediterrània*), que ha sabido diseñar un programa de actuación pluridisciplinar novedoso sobre la evolución del paisaje glaciar de Sierra Nevada y en el que han venido participando diferentes colectivos de distintos departamentos de las universidades de Madrid-Complutense, Alcalá de Henares, Cáceres y Almería. Siempre al amparo del Plan Nacional I+D, los resultados que ha venido ofreciendo han sido diversos y valiosos y han logrado rellenar huecos o lagunas significativas sobre el conocimiento paleoambiental de las cumbres de la Sierra, muy en particular a partir del Tardiglaciar, al tiempo que también ha sabido marcar una línea de investigación singular y pionera acerca de la morfodinámica actual del Corral del Veleta.

Sin duda, de las numerosas aportaciones publicadas por este colectivo la que mejor aglutina y sintetiza los resultados obtenidos es el monográfico bilingüe (castellano/inglés) *Mapa geomorfológico de Sierra Nevada. Morfología glaciar y periglaciar* (Gómez Ortiz et al. 2002) (figura 7). Su elaboración, concebida desde la Geografía física, fue el fruto de doce años de trabajo y su contenido una explicación muy completa de la formación del relieve glaciar y periglaciar de la Sierra, además de ofrecer un ensayo cronológico de los acontecimientos paleoambientales. Igualmente resulta relevante la cartografía geomorfológica

Figura 7

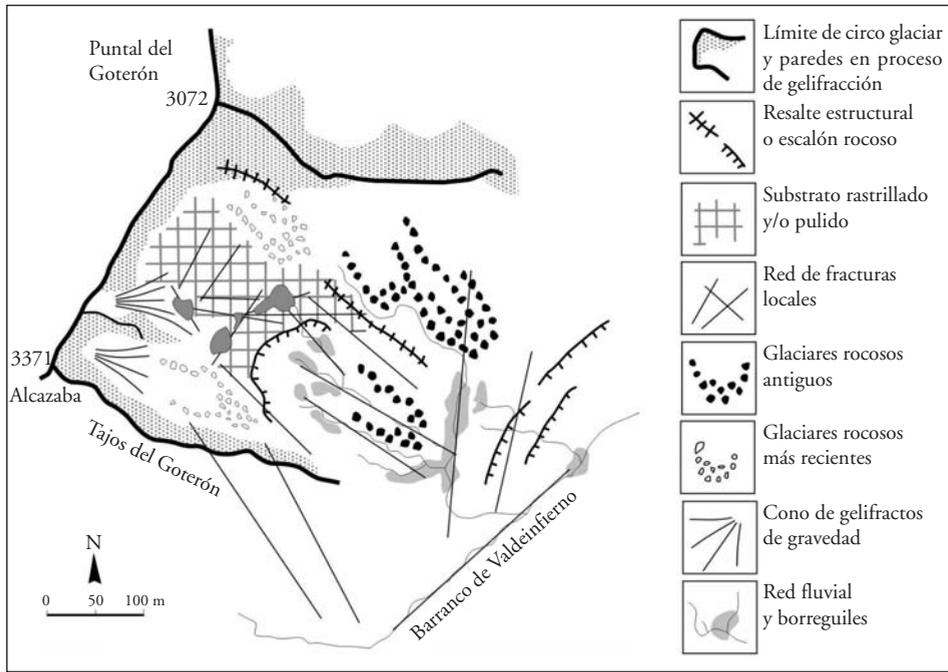


Cubierta del reciente monográfico de la geomorfología de Sierra Nevada.

que incluye, a escala 1/25000 (figura 8). Como ideas clave referidas al glaciarrismo se subrayan:

- a. Eficaz influencia de la tectónica y de la litología locales en la creación de formas erosivas, tanto en circos como en valles.
- b. Glaciarrismo alpino de valles encajados y no de casquete tipo *field*.
- c. Cuencas de alimentación individualizadas y bien delimitadas aunque con escasos portillos de transfluencia glaciar.
- d. Surcos glaciares muy empinados y sólo entallados en U en los tramos más cercanos a las cabeceras.
- e. Niveles de cumbres diferenciados en los que alternan agudas cresterías (“crestones”) y *hörner* (“puntales”) con planicies erosivas.
- f. Diferentes generaciones de sedimentos morrénicos esparcidos a lo largo de los cauces glaciares, más numerosos en la vertiente sur que en la norte.
- g. Profusión de glaciares rocosos colmando las partes más elevadas de los circos.

Figura 8



Morfología del cuenco del Goterón (1/25000).

Y por lo que respecta a formas periglaciares éstas se interpretan como resultado de un sistema morfogénico frío independiente, coetáneo e independiente a las glaciaciones en su desarrollo espacial. En la visión global que se ofrece del mismo se señala su eficacia en el modelado de laderas, a través de depósitos tipo *groize* o *grèze*, que se identifican por encima de los 800-1.000 m. En el ámbito glaciado, y ya retirados los hielos, la dinámica periglaciares unas veces creó formas propias (figuras geométricas en altiplanicies, glaciares rocosos en cuencos de alimentación glaciar) y otras, remodeló las ya elaboradas, tal como ocurrió con algunos segmentos de morrenas instalados en lomas, que fueron desdibujados por procesos gelifluidales (valle de San Juan, Peñón Negro, etc.) (figura 9). Por lo que respecta a las actuales condiciones climáticas se subraya la eficacia actual de los procesos fríos, conducidos por el hielo en el suelo. Las experiencias que se ofrecen concluyen afirmando que la morfodinámica criornival resulta general en la Sierra por encima de los 2.700 m.

6. Trabajos en curso en el Corral del Veleta

Los trabajos de investigación que se acometen por parte de la Universitat de Barcelona en Sierra Nevada inciden en el estudio de los procesos morfogé-

Figura 9

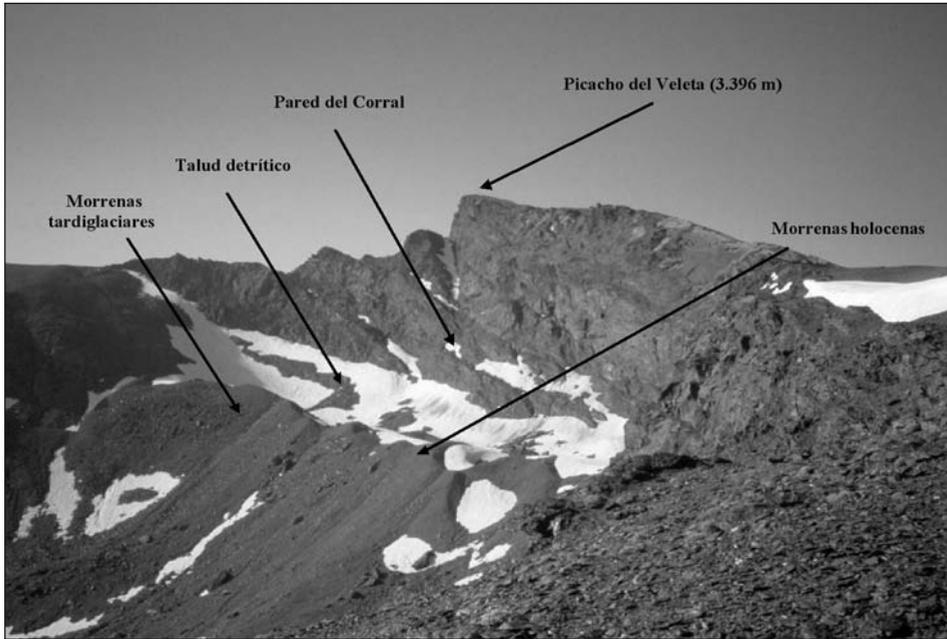
Campo de círculos de piedras heredados en el collado del cerro de Los Machos (3.315 m).

nicos actuales y se afrontan desde esquemas interpretativos pluridisciplinarios. La principal preocupación es la explicación reciente de la deglaciación del Corral del Veleta y su actual evolución morfoclimática. El centrar atención en el Corral del Veleta se justifica por el significado ambiental y geomorfológico que posee este enclave, pues fue el último foco glaciar histórico de la Sierra (figura 10). A este dato hay que añadirle aquél otro más genérico propio del conjunto de la montaña y es el relativo a su estratégica situación latitudinal en la región mediterránea, 37° latitud Norte, instalada entre las montañas áridas del Atlas y las templadas del Pirineo y Alpes, lo que la sitúa en una encrucijada significativa para el estudio del denominado cambio global.

La deglaciación reciente del Corral del Veleta: de glaciar negro a permafrost

Los resultados obtenidos y publicados (Gómez Ortiz et al. 1996) han venido a mostrar que el glaciar que alojó el Corral del Veleta durante la Pequeña Edad del Hielo tendió a fundir rápidamente a partir de los primeros decenios del siglo XX y a refugiarse paulatinamente hacia el declive del cerro de los Machos. La información documental de época y los análisis morfosedimentarios llevados a cabo así lo indican (Schulte, 2002). Su desaparición debió estar

Figura 10



Panorámica del Corral del Veleta desde los Lastrones (julio, 2001).

subordinada a unas condiciones climáticas desfavorables, sobre todo, relativas al incremento de las temperaturas medias y/o a la merma generalizada o irregular repartición anual de precipitaciones nivosas, circunstancias que dificultarían el mantenimiento de los hielos glaciares, muy en especial a partir de los primeros decenios del siglo XX, que es cuando los autores explicitan que las masas heladas del glaciar tienden, cada vez más, a quedar inmovilizadas: “*El ventisquero del Veleta es una masa de hielo muerta, sin movimientos ni fluctuaciones*” (Obermaier, 1916).

Instalados a mediados del siglo XX el glaciar reduciría, aún más, su extensión refugiándose paulatinamente hacia el tercio más oriental de la base del Corral (Solé Sabarís, 1942; García Sainz, 1947) al tiempo que, progresivamente, se recubriría de escombros procedente de la intensa gelificación procedente de la pared del propio circo. Esta morfodinámica, contemplada a lo largo del siglo XX, permite interpretar la sucesiva transformación del pequeño glaciar blanco de la Pequeña Edad del Hielo en glaciar negro y éste, en su devenir más reciente, en masas de *permafrost* profundo o alpino. Este proceso de deglaciación significó la construcción del talud detrítico que hoy corre a lo largo de la pared del tajío del Corral y al que nos referiremos más adelante (Gómez Ortiz et al. 2003).

Plantear la hipótesis de *permafrost* alpino pudimos hacerla en agosto de 1995 a la vista de las formas de modelado de la base del Corral y de su temperatura

Figura 11

Testigo de hielo del techo del *permafrost* (sondeo de 1999).

ambiente. Ello fue posible por ofrecerse ese verano libre de nieves. La ratificación de la hipótesis se constató en 1998, tras realización de rastreo geoelectrico en retícula (Terradat LTD, 1998), y su demostración fehaciente en 1999, que fue cuando se llevó a cabo extracción de testigo helado (tabla 1 y 2 y figura 11). El techo del *permafrost* se detectó a -190 cm y el área cubierta por éste se estimó en torno a 3.500 m², toda ella concentrada en el sector oriental del Corral del Veleta.

Tabla 1. Sondeo geoelectrico. Resistividades extremas (Ohm/m) de los diferentes sectores de la base del Corral

Valores de resistividad	Sector occidental	Sector central	Sector oriental 1	Sector oriental 2
Mínimos	153	451	3431	150
Máximos	4862	5702	58914	562220

Tabla 2. Características del testigo extraído

Tramo	Espesor	Tipo de material	Sedimentología
A	120 cm	micasquisto	bloque plurimétrico de estructura compacta sin alteración visible
B	30 cm	sedimento	amalgama de clastos de micasquistas con gravas y arenas envueltas en fragmentos de hielo en estado de fusión
C1	15 cm	sedimento	masa helada de fragmentos de micasquistos e hielo cristalizado
C2	25 cm	hielo	hielo más denso y cristalino

Demostrada la existencia de *permafrost* en el Corral del Veleta, los trabajos iniciados recientemente por el grupo de investigación de la Universitat de Barcelona tienden a evaluar su degradación y a explicar la evolución de las formas de modelado construidas en el talud detrítico del Corral, en concreto el glaciar rocoso que se orienta hacia la lagunilla. Una y otra dinámica parecen estar muy subordinadas a la variabilidad que presenta la cobertura nival en el seno del Corral.

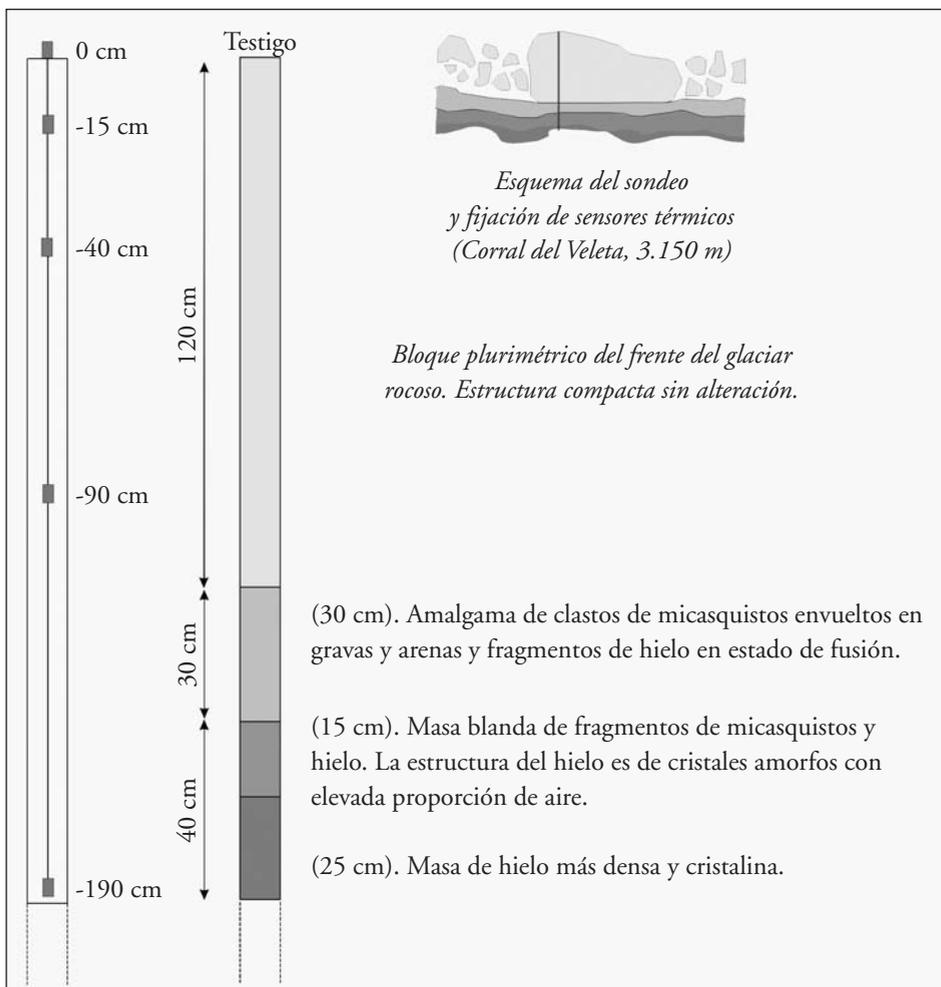
Degradación del permafrost: controles térmicos de la capa activa y techo del permafrost

El control térmico de la capa activa y techo del *permafrost*, localizado a -190 cm en la perforación que se realizó para la extracción del testigo helado, se viene realizando a través de una cadena de sensores térmicos autónomos y automáticos convenientemente protegidos (tipo *datalogger Tiny-talk*, rango -35°/+70°C) e instalados en el seno de la referida perforación, a 3.107 m de altitud, en el tramo frontal del glaciar rocoso de la lagunilla del Corral. Los datos que se capturan corresponden a 0 m, -15 cm, -40 cm, -90 cm y -190 cm (figura 12). De ellos, la tabla 3 expresa los valores extremos, media y amplitud.

Tabla 3. Registros térmicos sondeo del glaciar rocoso (extremo frontal, 3.107 m)

Nivel	Campaña 1999-2000				Campaña 2001-2002				Campaña 2003-2004			
	Tme	TM	tME	At	Tme	TM	tME	At	Tme	TM	tME	At
0 cm	-19,6	2,2	23,0	42,6	sd.	sd.	sd.	sd.	sd.	sd.	sd.	sd.
-15 cm	-4,0	-1,1	20,6	24,6	-5,0	-1,3	28,9	33,9	-2,98	-0,22	12,86	15,84
-40 cm	-4,0	-1,1	14,2	18,2	-4,9	-1,8	15,7	20,6	sd.	sd.	sd.	sd.
-90 cm	-4,0	-1,4	8,4	12,4	sd.	sd.	sd.	sd.	-2,53	-0,51	5,81	8,34
-190 cm	-3,1	-1,5	-0,6	2,5	-4,3	-3,2	-2,1	2,2	sd.	sd.	sd.	sd.

Tme (temperatura mínima extrema); TM (temperatura media); tME (temperatura máxima extrema); At (amplitud térmica); sd. (sin datos). No se disponen de datos de las campañas 2000-2001 y 2002-2003.

Figura 12

Cadena de sensores instalada en el seno del perfil del sondeo. Nótese la estructura del testigo extraído.

Evolución de formas de modelado: el caso del glaciar rocoso de la lagunilla del Corral

De este glaciar rocoso ya anunciamos su existencia y algunas de sus características físicas (Gómez Ortiz et al. 2004). Lo que ahora interesa es el control topográfico de su extremo medio y frontal, a partir del seguimiento de puntos fijos (varillas metálicas) (figura 13 y 14). Las técnicas que venimos empleando son geodésicas, topográficas y fotogramétricas (San José Blasco, 2003). Los resultados más significativos de las diferentes campañas se recogen en la tabla 4, donde se especifican desplazamientos en la vertical (hundimiento) y en la horizontal (avance).

Figura 13

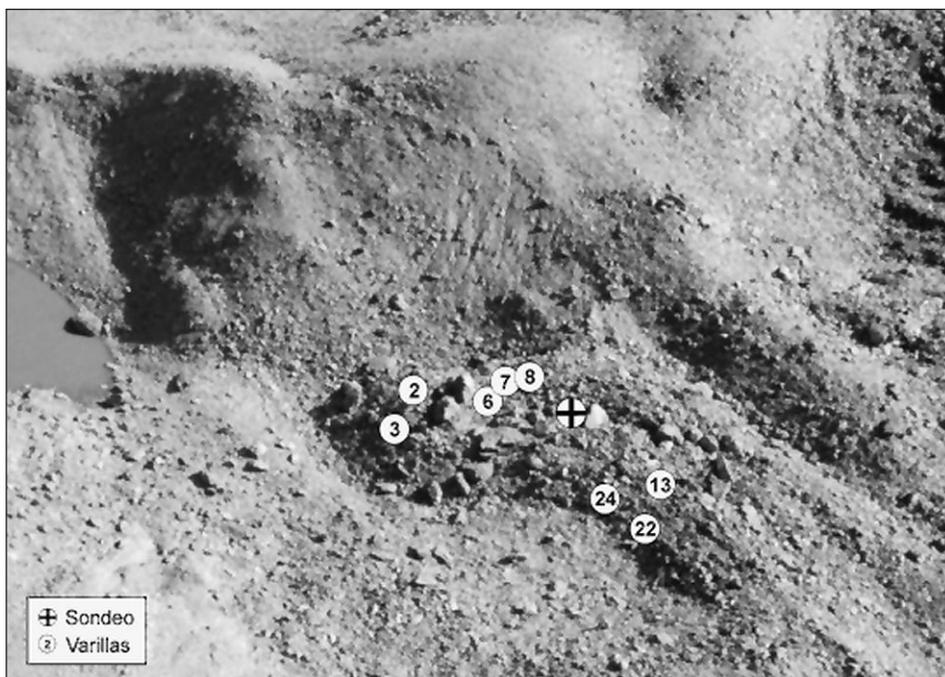
Panorámica del extremo oriental del Corral del Veleta. En primer plano la lagunilla y glaciar rocoso. Fotografía tomada desde los Lastrones (septiembre, 2004).

**Tabla 4. Control de desplazamientos (cm) de varillas.
Campañas 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004**

Varilla*	Tramo del glaciar rocoso	2001-2002		2002-2003		2003-2004	
		H	V	H	V	H	V
V2	Caída frente	6,4	-24,6	15,7	-38,4	4,4	-11,5
V3	Caída frente	13,3	-15,0	19,8	-38,2	5,4	-14,6
V6	Frente posterior	4,5	-12,5	6,4	-29,9	1,0	-7,0
V7	Frente posterior	5,5	-24,2	9,5	-23,9	4,0	-9,0
V8	Frente posterior	3,5	-14,2	6,7	-22,6	1,3	-7,1
V24	Medio	6,1	-23,8	11,0	-35,7	4,3	-17,6
V22	Medio	23,8	-53,1	26,1	-52,6	10,0	-28,3
V13	Medio	2,2	-18,1	6,0	-28,2	3,7	-9,9

* Numeración de varillas de las campañas 2002-2003 y 2003-2004;

H. Desplazamiento/planar (avance), V. Desplazamiento vertical (hundimiento).

Figura 14

Puntos de fijación de varillas de muestreo en el glaciar rocoso. Fotografía vertical tomada desde el picacho del Veleta.

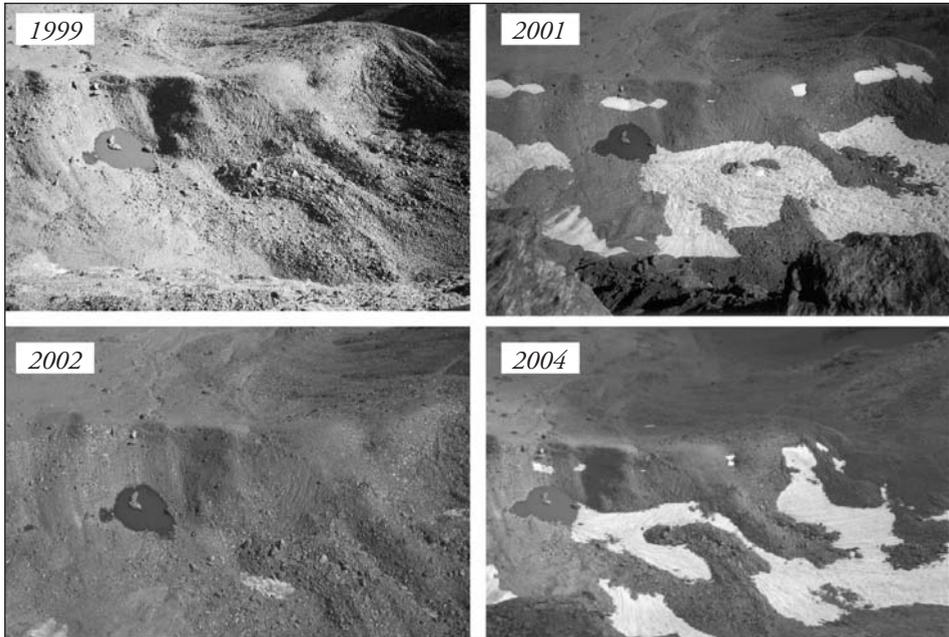
Primeras conclusiones

La variabilidad térmica detectada en el seno de la capa activa y techo del *permafrost* así como los movimientos de los puntos fijos bajo control del glaciar rocoso parecen estar relacionados con la inestabilidad de la capa nival, pues su presencia –en extensión y espesor– o ausencia durante los meses centrales del verano (finales de julio-comienzos de septiembre), debe determinar la intensidad y ritmo de propagación de la onda de radiación externa y, por consiguiente, el grado de cohesión de la formación sedimentaria o grado de estabilidad, lo que debe generar movimientos planares y verticales.

Desde esta consideración parece lógico admitir, por tanto, que los principales movimientos de avance y hundimiento detectados en el glaciar rocoso han de tener lugar, sobre todo, durante los meses del verano que es cuando la cobertura de nieve en el seno del Corral se restringe al máximo (tabla 5 y figura 15) y la penetración de la onda de radiación hacia el interior de la masa clásica debe ser máxima.

Sin embargo, esto último –la relación entre variabilidad térmica del suelo y pérdida de cohesión de la formación detrítica– aún debe precisarse más,

Figura 15



Secuencia nival del sector oriental del Corral del Veleta (1999-2004).

a la luz de la pobreza de datos térmicos que disponemos del suelo. Lo que sí parece demostrado es que la capa activa en el lugar de muestreo alcanza, como mínimo, hasta -90 cm y debe finalizar antes de rebasar los -190 cm, si tenemos en consideración que a tal profundidad la temperatura siempre es negativa aunque sin lograr la amplitud cero anual (*ZZA, zero annual amplitud*).

Por todo lo expuesto consideramos muy oportuno proseguir con los controles iniciados.

**Tabla 5. Comparación de valores
(cubierta nival/movimiento glaciar rocoso)**

	Grado de recubrimiento nival*	movimiento planar**	movimiento vertical**
Periodo 2001-2002	parcialmente	8,1	-23,1
Periodo 2002-2003	libre	12,6	-33,6
Periodo 2003-2004	parcialmente	4,26	-13,1

* parcialmente: lomo del glaciar rocoso desprovisto de nieve, rebordes recubiertos de nieve; libre: ausencia de nieve

** valores medios (cm)

7. Agradecimientos

Al proyecto SEJ2005-00504/GEOG del MEC y a la Acción Especial BTE2001-5446-E del proyecto BSO2000-0745 del MCyT. También al Proyecto PACE de la UE (ENV4-CT97-0492) y al Parque Nacional de Sierra Nevada por su constante apoyo. Igualmente nuestro agradecimiento a David Serrano Giné, por su buen hacer en la parte gráfica.

8. Referencias bibliográficas

- BIDE, F. (1893). "Excursions à la Sierra Nevada. Deuxième excursion dans la Sierra Nevada". *Annuaire du Club Alpin Français* [París], vol. XX.
- BOISSIER, C. (1839). *Voyage botanique dans le midi de l'Espagne pendant l'année 1837*. Paris: Gide et Cie. Paris. Versión castellana en C.E. Boissier "Viaje botánico al sur de España durante el año 1837". Granada: Fundación Caja de Granada y Universidad de Málaga.
- CAPEL, H. (2002). "El viaje científico andaluz de Simón de Rojas Clemente Rubio: de la Historia Natural a la Geografía". En: *Viaje a Andalucía. Historia Natural del Reino de Granada (1804-1809)*. Barcelona: G.B.G. Editora, p. 17-46.
- GARCÍA SAINZ, L. (1947). *El clima de la España cuaternaria y los factores de su formación*. Valencia: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valencia.
- GÍL ALBARRACÍN, A. (2002). *Transcripción de Simón de Rojas Clemente Rubio Viaje a Andalucía. Historia Natural del Reino de Granada (1804-1809)*. Barcelona: G.B.G. Editora.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; SCHULTE, L.; SALVADOR FRANCH, F. (1996). "Contribución al conocimiento de la deglaciación reciente y morfología asociada del Corral del Veleta (Sierra Nevada)". *Cuadernos do Laboratorio Xeológico de Laxe* [Sada, A Coruña], núm. 21, p. 543-558.
- GÓMEZ ORTIZ, A. [coord.] (2002). *Mapa geomorfológico de Sierra Nevada. Morfología glaciar y periglaciar*. Granada: Junta de Andalucía-Parque Nacional de Sierra Nevada y Universitat de Barcelona.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, D.; LUENGO NICOLAU, E.; TANARRO GARCÍA, LM.; SCHULTE, L.; RAMOS SAINZ, M. (2003). Talus instability in a recent deglaciation area and its relationship to buried ice and snow cover evolution (picacho del Veleta, Sierra Nevada, Spain). *Geografiska Annaler. Series A* [Oxford], núm. 85A-2, p. 165-182.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PLANA CASTELLVÍ, JA. (2004a). "El paisaje glaciar de Sierra Nevada a través de los escritos de época (siglos XVIII y XIX). Contribución al conocimiento geográfico español". *Investigaciones Geográficas* [Alicante], núm. 34, p. 29-46.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; DESSY, P. (2004b). "Evolución del conocimiento glaciar de Sierra Nevada. La aportación del prehistoriador Hugo Obermaier". En:

- Miscelánea en Homenaje a Emiliano Aguirre*. Madrid: Museo Arqueológico Regional. Geología, vol. 1, p. 32-43.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, D.; SALVADOR FRANCH, F. (2004c). “La investigación reciente en geomorfología periglacial en España. La labor de IPA-España”. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* (Sección Geología) [Madrid], vol. 99 (1-4), p. 7-23.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; SALVADOR FRANCH, F.; SCHULTE, L.; SANJOSÉ BLASCO, J.J.; PALACIOS ESTREMER, D.; RAMOS SAINZ, M. (2004d). “Control morfométrico y térmico de un glaciar rocoso en montaña mediterránea (Corral del Veleta. Sierra Nevada)”. En: *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*. Madrid: SEG-CSIC, p. 115-124.
- MARTÍ HENNEBERG, J. (1988). “La difusión de la glaciología en España”. *Llull. Revista de la Sociedad Española de Historia de las Ciencias y de las Técnicas* [Madrid], vol. II, p. 235-246.
- MAC-PHERSON, J. (1875). De la existencia de fenómenos glaciares en el sur de Andalucía durante la época cuaternaria. *Actas de la Sociedad Española de Historia Natural* [Madrid], vol. IV, p. 56-61.
- MARTÍNEZ DE PISÓN, E. (1995). “La primera geomorfología española”. En: *Geógrafos y naturalistas en la España contemporánea*. Madrid: Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid, p. 81-106.
- MESSERLI, B. (1965). *Beiträge zur Kenntnis der Sierra Nevada (Andalusien)*. Zurich: Juris Verlag.
- OBERMAIER, H. (1916). “Los glaciares cuaternarios de Sierra Nevada”. *Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales* (Geología) [Madrid], vol. 17, p. 1-68.
- PENCK, A. (1894). “Studien über das Klima Spaniens während der jüngeren Tertiärperiode und der Diluvialperiode”. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zur Berlin*, p. 109-141.
- PONZ, A. (1754). “Relación del viaje que desde Granada hizo á Sierra Nevada D. Antonio Ponz á influxo del Excmo. Sr. Marqués de la Ensenada”. *Mensajero económico y erudito de Granada* [Granada], p. 25-30.
- QUELLE, O. (1908). *Beiträge zur Kenntnis der spanischen Sierra Nevada*. Tesis doctoral. Berlin: Universidad Friedrich-Wilhelm.
- ROJAS CLEMENTE RUBIO, S. de (2002). *Viaje a Andalucía. Historia Natural del Reino de Granada (1804-1809)*. Transcripción de Antonio Gil Albarracín. Barcelona: G.B.G. Editora.
- RUTE, L. (1889). *La Sierra Nevada*. París: Nouvelle Revue Internationale. Imprimerie Charaire et fils.
- SANJOSÉ BLASCO, J.J. (2003). *Estimación de la dinámica de los glaciares rocosos mediante modelización ambiental y técnicas fotogramétricas automáticas*. Tesis doctoral. Valencia: Escuela Técnica Superior de Topografía y Geodesia. Universidad Politécnica de Valencia.
- SCHIMPER, P. (1849). *Voyage géologique, botanique au Sud de l'Espagne*. París: Journal de l'Institut.

- SCHULTE, L. (2002). *Evolución cuaternaria de la depresión de Vera y Sorbas oriental (SE-Península Ibérica). Reconstrucción de las fluctuaciones paleoclimáticas a partir de estudios morfológicos y edafológicos*. Barcelona: Servei de Paisatge-Publicacions de la Universitat de Barcelona.
- SOLÉ SABARÍS, L. (1942). “2ª Reunión de Estudios Geográficos”. *Estudios Geográficos* [Madrid], núm. 9, p. 80-87.
- TERRADAT LTD & ETH. (1998). Geophysical survey report. *Permafrost Investigation Veleta & Mulhacén. Sierra Nevada*. PACE. Unpublished Report.
- TITOS MARTÍNEZ, M. (1996). “Los neveros: un oficio y un camino”. En: PÉREZ CHACÓN, J.; ROSÚA CAMPOS, J.L. [eds.] *1ª. Conferencia Internacional Sierra Nevada*. Granada: Universidad de Granada-Sierra Nevada 96, vol. 4, p. 215-223.
- TITOS MARTÍNEZ, M. (1997). *Sierra Nevada: una gran historia*. Granada: Universidad de Granada-Cetursa Sierra Nevada, S.A.
- TORRES PALOMO, MP. (1967-1968). “Sierra Nevada en los escritores árabes”. *Miscelanea de Estudios Árabes y Hebraicos* [Granada], vol. XVI-XVII, p. 57-88.