

Factores determinantes y relieves asociados a la dinamica glaciaria en la fachada mediterránea de Sierra Nevada

Antonio GÓMEZ ORTIZ
Ferran SALVADOR i FRANCH
Universitat de Barcelona

Dedicatòria

La figura de Salvador Llobet passarà a la història com una de les més rellevants en el conreu científic de la Geografia catalana. Nosaltres el coneguèrem en la seva faceta de geògraf físic, preocupat, sobretot, per la Geomorfologia i especialment pel modelat propi de països freds. Durant els nostres anys d'aprenentatge, a les aules de la Universitat, el seu magisteri, manera de fer i de ser, va acostar-nos definitivament al camp naturalista de la Geografia. Ja llicenciats, descobrírem el Salvador Llobet investigador. Ens fascinà, per damunt de tot, la seva capacitat d'interpretació del territori, la precisió terminològica i el seu rigor i entusiasme en l'explicació dels fenòmens geogràfics.

En Geomorfologia glacial i periglacial ha estat una personalitat fonamental a la Universitat de Barcelona, durant les últimes dècades. Va dedicar la seva darrera etapa d'investigador incansable a descobrir el significat morfològic del gel a les muntanyes de l'entorn mediterrani, esforçant-se sempre a fer veure que formes i modelats responen a la interacció dinàmica de processos. Aquesta preocupació metodològica per copsar l'objecte d'estudi des d'una òptica netament geogràfica fou, sens dubte, la característica que millor el defineix com un excel·lent quaternarista.

Amb Salvador Llobet estem en deute. Gràcies a ell vam descobrir el significat geogràfic de la geomorfologia com a element clau en la interpretació del territori. Al seu costat vàrem introduir-nos en l'estudi del glacialisme i periglacialisme de les muntanyes pirinenques i bètiques. Amb la seva ajuda aprofundírem en el coneixement de la morfodinàmica actual de l'alta muntanya mediterrània... Per tot, i per l'amistat que ens oferí, per sempre més, el nostre record i sincer agraïment.

Introducción

El glaciario de Sierra Nevada fue el más meridional de Europa. Sus morfologías quedaron arrinconadas al núcleo de máximas altitudes, aunque en ningún momento la morfodinámica del hielo consiguió romper las líneas maestras del relieve. A lo sumo, propició cierto carácter agreste a las cabeceras de barrancos, principalmente (fig. 1).

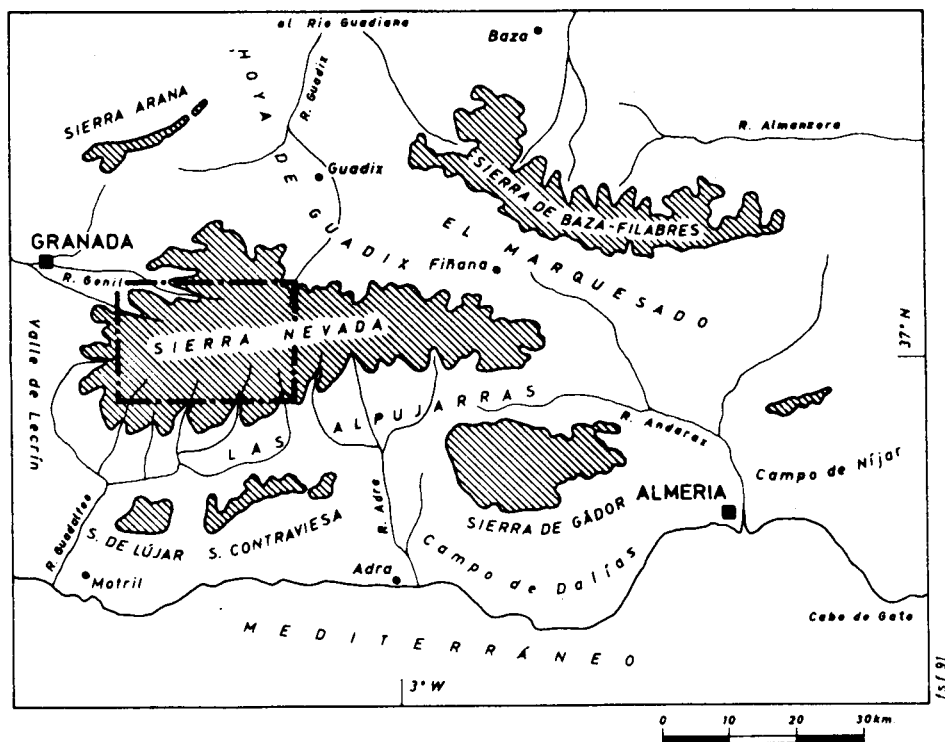


Figura 1. Situación de Sierra Nevada en el contexto regional.

El recuadro interior corresponde al área afectada por el glaciario, en Sierra Nevada (véase mayor detalle en la figura 2).

La existencia de formas glaciares en el conjunto de la Sierra fue debida a la repercusión de determinados factores. Unos, de rango general, como la situación latitudinal de la cordillera. Otros, en cambio, de rango regional y local. La coincidencia espacio-temporal de estos últimos permite diferenciar al glaciario de Sierra Nevada de aquel otro del resto de la Península Ibérica, o, al menos, particularizarlo. Del segundo grupo de factores, algunos resultaron definitivos para los aparatos glaciares inscritos en la vertiente mediterránea de la Sierra, pues de no haber existido, la magnitud del área glaciada y las huellas morfológicas creadas hubiesen sido mucho más reducidas.

Los factores que explican la existencia del glaciario meridional de Sierra Nevada son:

a) *El volumen y altitud de la montaña* que determinó la existencia del espacio glaciado, mucho más restringido en la vertiente sur que en la norte.

b) *El relieve preexistente* que durante toda la historia glaciaria de la Sierra subordinó la instalación de los diferentes heleros.

c) *La morfoestructura y litología* que facilitó el desarrollo de determinadas formas erosivas y deposicionales.

d) *La orientación de la montaña* que contribuyó al fenómeno de sobrealimentación niválica por efectos eólicos a favor de la cara meridional de la Sierra.

1. El volumen y altitud de la montaña

Uno de los factores explicativos de la magnitud glaciaria de un macizo lo indica su espacio glaciado, esto es, el territorio comprendido entre el nivel de cumbres y la línea de nieves perpetuas, que, normalmente, coincide con la isoterma de los cero grados anuales. La fijación altimétrica de esta cota en la montaña nevadense ha sido objeto de diferentes interpretaciones según los autores que se han ocupado de ello, tal como indica la siguiente tabla:

Autor	valor medio en vertiente norte	valor medio en vertiente sur
H. Obermaier, 1916	Würm, 2.400-2.500 m.	Würm, 2.600-2.700 m.
A. Casas Morales, 1943	Würm, 2.300 m.	
H. Paschinger, 1957	Würm, 2.400-2.500 m. Tardiglaciario, 2.800 m.	Würm, 2.600-2.700 m. Tardiglaciario, 2.950 m.
L. Hempel, 1960	pre-Würm, 2.000 m. Würm, 2.400-2.500 m. Tardiglaciario, 2.850 m.	
B. Messerlí, 1965	Riss, 2.100 m. Würm, 2.300 m. Tardiglaciario, 2.800-2.900 m.	Würm, 2.400 m.

Lo más llamativo de la tabla es la variación que experimenta la fijación del referido nivel de nieves entre ambas vertientes, es decir entre la cara atlántica y la mediterránea, cifrado en torno a los 200 m. Este contraste altimétrico se debió a la procedencia de las precipitaciones y a la desigual insolación recibida en ambas fachadas, como veremos oportunamente. Pero incluso, en una misma fachada u orientación la franja glaciada no sería uniforme, pues la diferencia de cota entre el nivel de nieves perpetuas y la línea cimera de la Sierra no se mantendría uniforme.

Por las observaciones geomorfológicas que venimos realizando, sustentadas en un laborioso trabajo de campo, el nivel inferior de nieves permanentes en la Sierra debió sufrir variaciones altimétricas en dos sentidos. De sur a norte tendería a declinar y también lo

haría de este a oeste. De esta forma, los territorios más beneficiados por las nieves, al menos durante los últimos períodos glaciares, serían los valles del nordeste y oeste, encarrados a la dirección de los flujos atlánticos. A continuación, la fachada septentrional y, por último, la meridional y sureste, a pesar de haber recibido ambas una sobrealimentación nival por efectos eólicos.

Si bien es cierto que Sierra Nevada mantiene las áreas más elevadas de la Península Ibérica, la distribución geográfica de éstas resulta muy localizada, restringiéndose al sector Veleta-Mulhacén-Alcázar, donde las cumbres superan los 3.300 m., aunque sus sinuosos cordales no sumen más de 7 km. en línea recta. Orográficamente se trata del núcleo culminante de la Sierra, dispuesto a manera de una formidable cúpula ovalada que tiende a declinar disimétricamente hacia sus márgenes. En este sector culminante, que es donde el espacio glaciado sería máximo, la fachada norte incluiría 850 m. de desnivel y 650 m. la fachada sur (fig. 2).

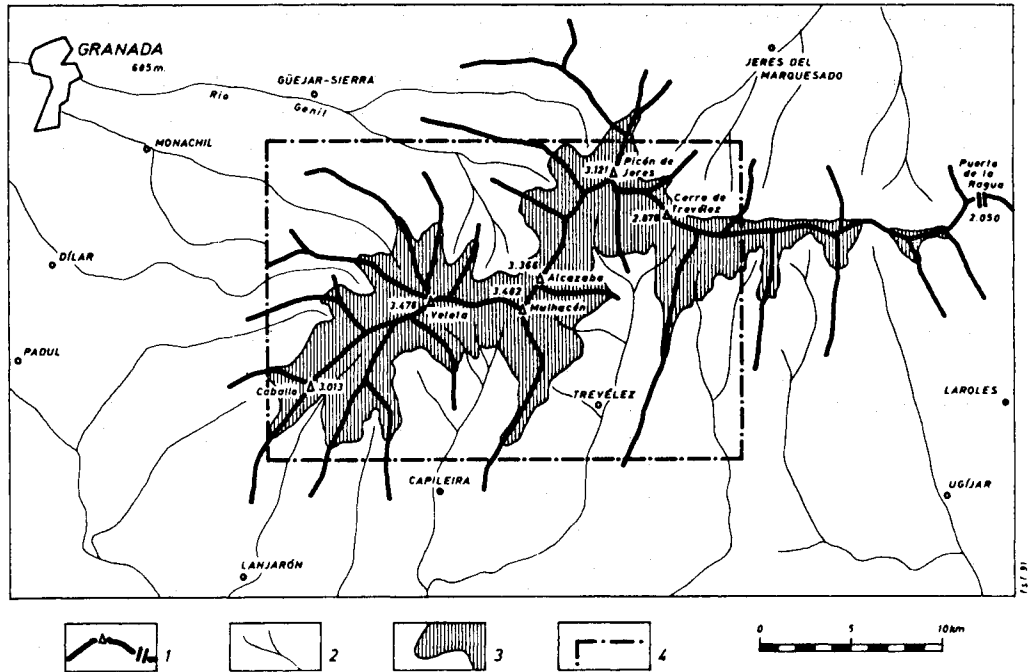


Figura 2. Núcleo orográfico de Sierra Nevada y determinación del área glaciada.

1. Cresta, pico, collado; 2. Red fluvial; 3. Espacios situados por encima de 2.500 m. de altitud; 4. Área glaciada

A partir del Veleta (3.478 m.), en dirección hacia la depresión de Granada o hacia el surco del Guadalfeo, la cadena montañosa pierde altitud de forma brusca. Por ejemplo, el cerro del Caballo, distante 8 km del picacho del Veleta, ya no sobrepasa los 3.013 m.; el peñón de Dílar, a 6 km, se fija en los 2.462 m.; el Albergue Universitario, a 4,5 km, se sitúa a 2.550 m y la propia ciudad de Granada, a 25 km. de distancia, se alza a 685 m. En esta ocasión el margen inferior de nieves permanentes se instalaría a menor cota

que en el sector Veleta-Mulhacén-Alcazaba, aunque, a juzgar por los registros morfológicos, los valles encarados a los flujos húmedos de poniente continuarían recibiendo abundantes precipitaciones.

El área menos glaciada de la Sierra se debió situar hacia oriente, en dirección al puerto de la Ragua, a pesar de que la cadena continúa manteniendo alturas medias en torno a los 2.700 m. Teniendo en consideración la fijación de nieves permanentes a partir de los 2.500-2.600 m. en la fachada meridional del núcleo cimero, el área cubierta por los hielos permanentes en la prolongación oriental de la Sierra sería muy restringida, sobre todo a partir del valle de Trevélez. Al respecto, la geometría de la línea de cumbres resulta elocuente. La inflexión del cordal se generaliza a partir de la Alcazaba (3.366 m) y de manera más acusada desde el puntal de Juntillas (3.141 m), hasta el morrón de Laroles (2.614 m), en una distancia de 25,5 km.

A pesar del anterior razonamiento, cabrían matizaciones entre la cara norte y la sur, tal como se detecta en la morfología que define los cuencos de los barrancos orientados hacia el Marquesado o bien hacia la Alpujarra. Los primeros, con entalles y morfologías deposicionales mucho más acusadas que los segundos, al margen de la influencia que la estructura del edificio montañoso haya podido suponer. Al respecto, los ventisqueros del Gallo y de las Cabras, inscritos a oriente del glaciar de Alhorí y encarados al Marquesado, resultan elocuentes, pues se definen por modestos alveolos dotados de empinadas paredes y tenues orlas morrénicas que tienden a cerrarlos, incapaces de contener la energía erosiva de las aguas de fusión.

En vertiente sur las huellas glaciares más bajas se reparten por encima de los 2.200 m., pero siempre recluidas en el seno de los surcos de los barrancos glaciados, especialmente en aquellos inscritos entre los valles de Lanjarón y Trevélez, que son los que fijan sus cabeceras en las cotas más altas. Fuera del ámbito de los valles glaciados, las lomas meridionales de la Sierra denotan la huella glaciar por encima de los 2.600 m, bien en formas erosivas o deposicionales, aunque no aparecen claras hasta los 2.700-2.800 m. La fachada alpujarreña, a partir de la loma de Las Albardas, no alberga formas glaciares nítidas, tal como lo hace la del Marquesado. En el mejor de los casos, sólo las concavidades alojadas por debajo del cordal culminante denotan una génesis glacionival, aunque muy desfigurada por los procesos nivoperiglaciares. Como antes se señalaba, la pérdida sistemática de altura de la montaña debió jugar un papel relevante.

2. El relieve preexistente

La instalación de los diferentes sistemas glaciares nevadenses estuvo supeditada al relieve preexistente, como sucedió en el resto de la Península Ibérica. Ello supuso que las distintas unidades se amoldaran a las topografías heredadas. Las masas heladas siempre se canalizaron a lo largo de los ejes de los barrancos, de tal suerte que la red hidrográfica precuaternaria condujo el fluir de los hielos. También las concavidades labradas en las lomas condicionarían el asentamiento de las nieves.

Durante los tiempos pliocuaternarios el relieve de la Sierra, en sus más altas cotas, no diferiría mucho del actual, si exceptuamos la denudación que realizaron los hielos. A grandes

rasgos, la arquitectura de estas tierras, por encima de los 2.000 m., se resolvería en retazos escalonados de superficies de erosión, compartimentados por los surcos de los barrancos, organizados, éstos, conformes a la estructura (FONTBOTÉ, 1957, 1970).

La tectónica en el conjunto de la Sierra ha sido prácticamente continua, pues en el Neógeno-Cuaternario es cuando alcanza su actual elevación y orografía definitivas. Sin embargo, los arrasamientos que presentan las cumbres parece prudente atribuirles una edad neógena (BIROT y SOLÉ, 1959; LHENAFF, 1977), a juzgar por las secuencias del relleno de las cuencas circundantes (DÍAZ de FEDERICO y PUGA, 1980).

La red fluvial principal se consolidaría y jerarquizaría en el Pliocuaternario y fijaría sus cabeceras en los declives de las lomas, aunque sin alcanzar el nivel de cumbres. La evolución de la red fluvial tendería a recortar las superficies de erosión culminantes, aunque en contadas ocasiones la erosión remontante de las aguas lograría sobrepasar los cordales, lo que explica que algunos tramos de la Sierra se caractericen por la presencia de retazos aplanados conformando las máximas alturas. Sí, en cambio, modeló surcos encajados y de pronunciada pendiente dispuestos perpendicular u oblicuamente al eje axial. Tal es el trazado de los barrancos con cabecera en la cuerda cimera de la Sierra y que dirigen sus aguas en dirección al Guadalfeo (Lanjarón, Poqueira, Trevélez), al Genil (Dílar, Monachil, San Juan, Guarnón, Valdeinfierno), o a la depresión de Guadix (Alhorf).

La irrupción de los períodos fríos pleistocenos supuso para la morfogénesis de las áreas culminantes de la Sierra un cambio radical que modificó los modelos existentes. Lo más destacado consistió en que los surcos y cabeceras de barrancos del área situada a lo largo de la cuerda Caballo-Veleta-Mulhacén-Alcazaba-Juntillas-Trevélez, fueron invadidos por hielos permanentes, aunque éstos tuvieron un desarrollo muy restringido en determinados enclaves de plataformas cimeras. De esta forma pudo configurarse un glacialismo de cortos valles, muy compartimentado y arrinconado a los tramos más elevados de los barrancos (foto 1).

Fuera del área culminante los hielos adquirieron poco desarrollo permaneciendo, en el mejor de los casos, reclusos en concavidades bien expuestas, sobre todo en fachada norte, como sucedió en el ventisquero de las Cabras, instalado a la caída del collado del Puerto, a oriente del cerro de Trevélez. A pesar de todo, se trata de testimonios puntuales más cercanos a morfogénesis glacionivales que glaciares.

Por lo que respecta a las planicies erosivas culminantes, conformadas antes de la instalación de los glaciares, no deberían ser reductos favorables al desarrollo de mantos de hielo tipo casquete o «fjeld». Las razones, como veremos, son de índole climático relacionadas con el barrido que sobre ellas llevarían a cabo los vientos dominantes. Sin embargo, la ausencia de glaciares tipo casquete no impidió que se modelaran en terrazas de crioplanación, merced a la coexistencia y eficacia de los procesos periglaciares.

El máximo desarrollo de estas formas rasas se sitúa al este del Picón de Jeres, donde una dilatada planicie, ligeramente desnivelada hacia oriente, interpuesta entre los 3.100 m. y los 2.800 m., señala la línea de cumbres. En el área Caballo-Veleta-Mulhacén, estas plataformas erosivas escasean, aunque existen significativos retazos como la Allanada del Mulhacén (3.400 m.), el collado de los Machos (3.299 m) y la cabecera del valle de Lan-

jarón (3.100 m.). Las razones que explicarían esta escasez de reductos planos se debe a que se trata del área donde los glaciares alcanzaron el máximo desarrollo, lo que supuso una mayor evolución de circos y construcción de agudas cresterías (Raspones de Río Seco, Tajos de la Virgen, etc.), a expensas del retroceso de sus cabeceras y paulatina aniquilación de las plataformas cimeras.



Foto 1. El circo de la Caldera, en primer término, está esculpido en una unidad litotectónica que entra en brusco contacto con el edificio del Mulhacén. Al fondo el picacho del Veleta. Fotografía tomada desde la Allanada del Mulhacén (agosto 1988).

3. La morfoestructura y litología

Si el glaciario de Sierra Nevada se amoldó a las líneas maestras del relieve preexistente, éste se desarrolló de acorde a las morfoestructuras dominantes. El conjunto orográfico de la Sierra constituye un vasto domo integrado por una serie de mantos de corrimiento superpuestos, en cuya parte central, desmantelada por la erosión, afloran las unidades más profundas.

El núcleo cristalino, que es donde se instaló el glaciario, está esencialmente configurado por el manto del Veleta y el manto del Mulhacén. El primero, formando base y techo el segundo. A su vez, cada uno de ellos se ha elaborado por la superposición de diferentes unidades de corrimiento que, instaladas de muro a cima, son (PUGA et al., 1974):

Manto	Unidad
	formación de mármoles conglomeráticos con metacinerita
del Mulhacén	de las Sabinas formación de mármoles conglomeráticos con metacinerita de la Caldera de San Francisco
del Veleta	de las Yeguas

Cada una de estas unidades la componen formaciones litológicas de diversas facies metamórficas con predominancia de micasquistos feldespáticos y anfíbolíticos, cuarcitas feldespáticas, micasquistos grafitosos, serpentinitas y bancos de ortoneises. El tránsito de unas unidades a otras se realiza mediante corrimiento o discordancia, que es la característica tectónica del conjunto de la Sierra. La edad precisa de los grandes corrimientos está aún por resolver pero a ellos se asocian las distintas etapas del metamorfismo.

Los más importantes acontecimientos tectónicos son alpinos, tal vez del Eoceno o del Oligoceno, aunque durante el Neógeno, Sierra Nevada sufriría importantes deformaciones de gran radio de curvatura y fracturas de salto considerable, que han contribuido a configurar las grandes líneas del relieve (FONTBOTÉ, 1970). En este sentido hay que señalar la importante etapa tectónica acaecida durante el Messiniense o el Plioceno, durante la cual el núcleo de la Sierra sufrió una brusca sobre elevación seguida de episodios de distensión que se tradujeron en la compartimentación de los terrenos cristalinos, a base de fallas directas y fracturas de orden local con repercusión muy clara en la zona de contacto con las depresiones periféricas (FONTBOTÉ, 1957, 1970; DÍAZ de FEDERICO y PUGA, 1980).

Con respecto al metamorfismo que afecta al conjunto del roquedo se tiende a calificar de polimetamórfico, polifásico y plurifacial, distinguiéndose la existencia de dos períodos bien marcados y, dentro de ellos, etapas de deformación de diferente grado de intensidad. El primer período correspondería al Trias Medio y el segundo abarcaría desde el Oligoceno al Mioceno Inferior (DÍAZ de FEDERICO y PUGA, 1980).

La zona glaciada de la Sierra participa litoestructuralmente de los mantos del Veleta y del Mulhacén. La unidad de las Yeguas del manto de Veleta, actúa a manera de ventana tectónica y cubre la mayor parte del territorio. Sobre ella y corrida de SW a NE, se sitúa la unidad de la Caldera del manto del Mulhacén. Petrográficamente la unidad de las Yeguas está compuesta por cuarcitas feldespáticas, pero sobre todo, por micasquistos grafitosos con feldespato. La unidad de la Caldera ofrece una variedad de rocas mayor, destacando enclaves de mármoles con granates y reductos de micasquistos feldespáticos y ortoneises, tal como sucede en el circo de la Caldera e inmediaciones.

La articulación y naturaleza de los terrenos geológicos que definen a la Sierra han tenido una importancia capital en la distribución de las grandes formas del relieve. En este sentido y para el área que nos ocupa, el accidente más notorio es el dilatado frente de cabalgamiento que constituye la línea de cumbres y que se prolonga en el segmento pica-

cho del Mulhacén-Alcazaba puntal de Vacares-el Cuervo-la Atalaya. Su valor morfológico resulta indudable a la hora de explicar la disimetría que ofrecen las vertientes de ese sector de la Sierra. La meridional, de perfil convexo; la septentrional de pronunciada caída.

La razón de tal asimetría topográfica es tectónica y, en gran modo, asociada al manto del Mulhacén —unidad de la Caldera— que, con procedencia SSE y dirección NNW, tendió a trasladarse y desnivelarse sobre el manto del Veleta. Tal estructura explica, además, la Allanada del Mulhacén, la dilatada y suave loma del Tanto y su enlace con el Pandero del Mulhacén, tan poco retocados por el glaciario. A nivel local, igualmente ha desempeñado repercusiones morfológicas significativas, especialmente, en el tránsito hacia el circo de la Caldera, donde el frente de cabalgamiento de desarticula por fallas y fracturas con direcciones dominantes WNW-ESE y NE-SW condicionando el Corral del Mulhacén y el propio collado del Ciervo o de la Caldera (foto 2).

La tectónica, además, ha condicionado la elaboración de otras formas mayores asociadas al glaciario. Muchos circos y valles han evolucionado gracias a la explotación de una adecuada red de fallas y fracturas, como ocurre en los surcos del Veleta y Río Seco, orientados según eje NW-SE, o del Goterón, que en su tramo bajo lo hace del SW-NE, etc. También determinadas disimetrías de barrancos obedecen a razones estructurales, como sucede en Lanjarón, donde el buzamiento que presentan los estratos conlleva repercusiones muy acusadas en los modelados. Los denominados «vasares» son otra de las formas asociadas a la estructura del roquedo. Se trata de rellanos escalonados creados a merced de un juego de fracturas a distinta altura, tal como ocurre en los Vasares del Veleta o en toda la cara norte de la Sierra y de manera muy particular en la cabecera del Guarnón, por debajo del Corral del Veleta y en la Hoya del Mulhacén, en uno de cuyos vasares se asienta la laguna de la Mosca.

En otro orden de hechos, la estructura local del roquedo también ha ejercido su influencia en determinadas formas glaciares, aunque ahora de dimensiones más modestas. Al respecto, hay que resaltar el modelado erosivo de los circos, en especial aquellos dotados de caja amplia y paredes empinadas, como el de Aguas Verdes, Río Seco y Juntillas. En todos ellos el entramado de dislocaciones tectónicas que afecta al substrato ha propiciado que la carga subglaciar denudara con mayor intensidad determinados ámbitos, generando incisiones acusadas y cubetas de sobreexcavación. La observación atenta del paraje de las Chorreras, desde el Mirador del Padre Ferrer, resulta muy ilustrativa, entre otras cosas porque ha ordenado el drenaje en Aguas Verdes (fig. 3). También resulta elocuente la fijación de la laguna de Río Seco, en las inmediaciones del refugio de Félix Méndez o la de Juntillas, en la cabecera del río Trevélez, ambas labradas en la intersección de tupidas redes de fracturas en disposición ortogonal.

4. La orientación de la montaña

El análisis de los sistemas glaciares existentes en Sierra Nevada permite interpretar que el máximo desarrollo de los hielos se refugió en el extremo noroccidental del núcleo culminante y en toda la cara norte. Por el contrario, los diferentes aparatos glaciares instalados en vertiente sur, si bien resultan numerosos, sus registros morfológicos son netamente más modestos. En la explicación de esta realidad la orientación de las vertientes, la procedencia de los flujos húmedos, la topografía de los niveles cimeros y la sobrealimentación nival, debieron desarrollar un papel muy destacado, sino definitivo.

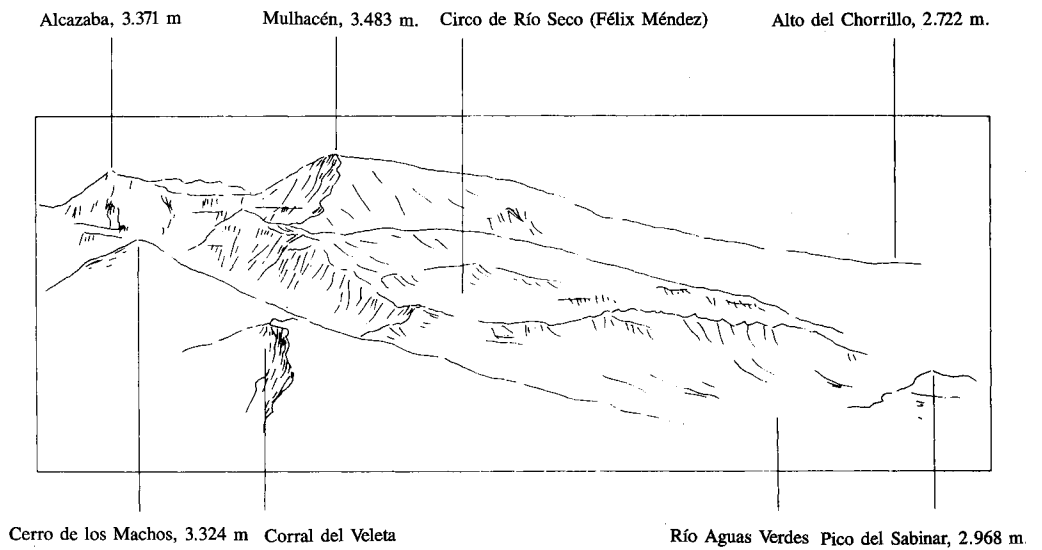
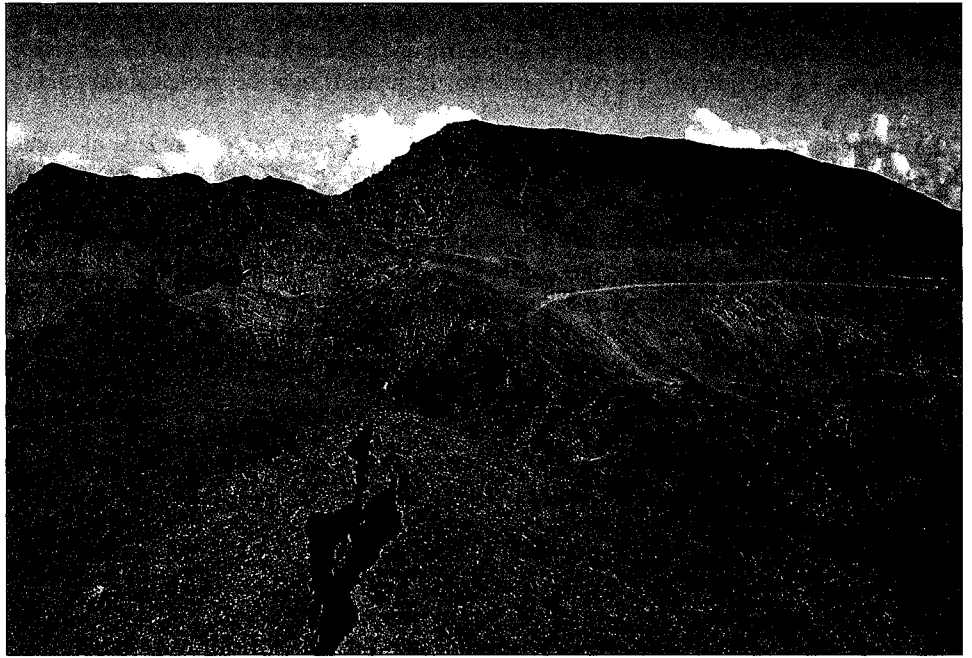


Foto 2. Panorámica del núcleo culminante de Sierra Nevada. Contraste de pendientes entre la fachada norte y sur. El origen de tal asimetría es tectónico, acentuado por el superior labrado de los hielos en los circos septentrionales. Al respecto nótese el dorso alomado del Mulhacén. Fotografía tomada desde el picacho del Veleta (julio, 1979). Relaciónese con el gráfico adjunto.

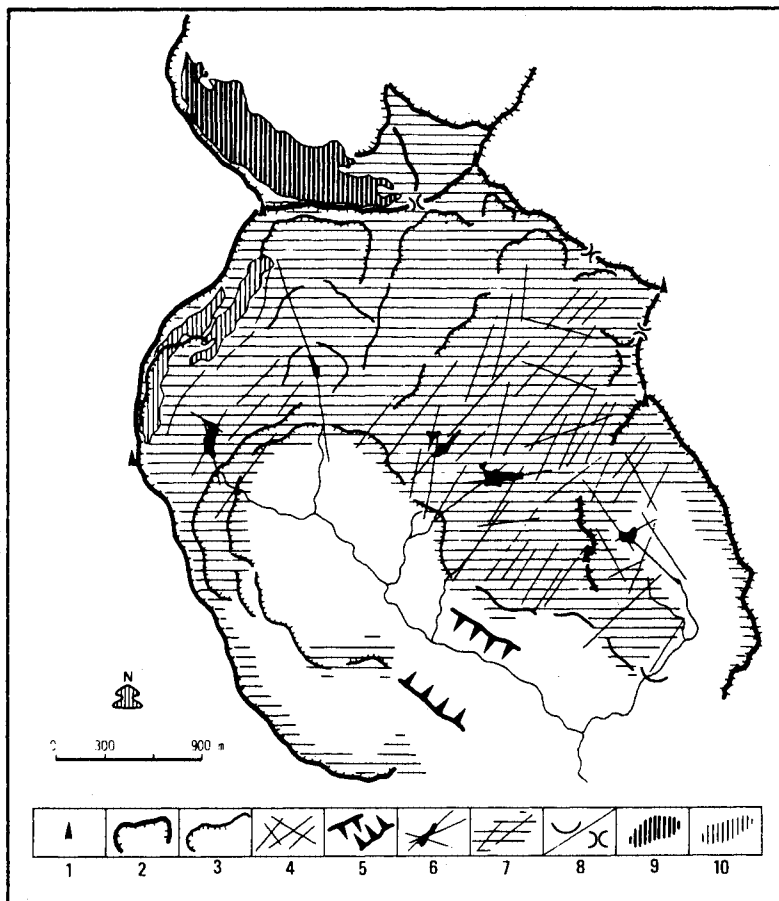


Figura 3. Influencia de la litoestructura en el modelado de los circos (Cabeecera del Veleta).

1. Hörn; 2. Circo de paredes abruptas; 3. Escalón, desnivel de origen estructural; 4. Red de fracturas o dislocaciones locales; 5. Valle modelado en U; 6. Cubeta de sobreexcavación fijada en discontinuidades tectónicas; 7. Sustrato pulido y rastrillado por carga subglaciar; 8. Valle colgado, collado de transfluencia glaciar; 9. Helero permanente (Corral del Veleta); 10. Nevero de fusión tardía (Vasares del Veleta).

Las principales perturbaciones que dieron origen a los glaciares que modelaron los relieves culminantes tuvieron procedencia atlántica y su penetración preferente se canalizaría a través del surco del Guadalquivir manteniendo recorridos de dirección oeste y suroeste. Ésta es la causa de que los heleros de mayor envergadura quedaran fijados en los valles de Monachil, Dílar, Guarnón y Valdeinfierno, todos bien encarados a la trayectoria de las perturbaciones y liberados de obstáculos orográficos que actuaran a manera de pantalla.

La existencia de los heleros meridionales hay que relacionarla, fundamentalmente, con el acopio extraordinario de nieve que albergarían las cabeceras de los barrancos. Pues no sólo recibirían directamente los aportes mediterráneos, sino también aquellos otros de ori-

gen atlántico, gracias al barrido que los vientos de poniente efectuarían sobre las lomas y altiplanicies expuestas a barlovento. De no haber existido tal fenómeno eólico probablemente el suministro de nieve de origen mediterráneo habría sido incapaz de generar este tipo de glaciares, dada la fusión precoz impuesta por la orientación.

El fenómeno de sobrealimentación nival por efectos eólicos es un hecho bastante frecuente en el desarrollo del glaciario hispano, de manera particular en determinados macizos del Sistema Central, Sistema Ibérico y Pirineo Oriental. Por referirnos a casos bien conocidos por nosotros señalaremos que en Cerdanya, en el Pirineo catalán, los aparatos glaciares instalados a mediodía debieron su dinamismo, en gran medida, a los aportes de nieve suministrada por el barrido que los vientos del cuarto cuadrante (NW, principalmente) efectuaron sobre los rellanos erosivos cimeros (VIERS, 1971; SOUTADÉ, 1980; GÓMEZ ORTIZ, 1987a).

Con respecto a Sierra Nevada, L. García Sainz (1942), ya señaló la importancia de las borrascas atlánticas en la explicación del glaciario en vertiente norte, especialmente en su extremo noroccidental. También hizo notar el significado de la sobrealimentación nival en áreas a sotavento. En el mismo sentido incidió H. Paschinger (1957), al referirse a los heleros wümienses, señalando su asimetría y en el caso de los meridionales su refugio en laderas al abrigo de los vientos.

Desde la óptica geomorfológica existen sólidos argumentos para afirmar la eficacia de los vientos de poniente en el desarrollo de los glaciares sureños de la Sierra. Por un lado, la inexistencia de casquetes de hielo coronando las cimas de las lomas, pues en todas ellas existen niveles edáficos antiguos recubiertos por suelos estructurales (SÁNCHEZ, 1990). La presencia de tales horizontes de alteración pone en evidencia que de haber existido una efectiva dinámica glaciaria, el propio fluir de las masas heladas habría borrado todo vestigio edáfico. Los vientos sobre las planicies ejercieron su influencia barriendo la nieve y acumulándola en orientación meridional, sureste preferentemente. De ahí, que, cronológicamente al desarrollo del glaciario de valles, los rellanos cimeros conocerían una morfogénesis periglaciaria que tendería a modelarlos en terrazas de crioplanación (GÓMEZ ORTIZ y LLOBET, 1988).

La localización de los glaciares rocosos es el segundo argumento geomorfológico en favor de la efectividad de la sobrealimentación nival. El análisis de estas formas deposicionales en el área meridional del Veleta-Mulhacén resulta significativo, pues la mayor parte de estas formas, tal como se refleja en la siguiente tabla, se alojan en cuencos excavados sobre lomas encaradas al sureste, al abrigo de los vientos dominantes, pudiendo alcanzar cotas bajas en relación a la situación del nivel de nieves perpetuas durante el Tardiglaciario, que debió fijarse por encima de los 2.900 m.

	Aparato glaciario		
	Veleta	Río Seco	Mulhacén
Número de cuencos con glaciares rocosos labrados en vertientes del valle glaciario	7	9	6
Glaciares rocosos en exposición E o SE	6	8	4

Aparato glaciar

	Veleta	Río Seco	Mulhacén
Glaciares rocosos en exposición W o SW	1	1	2
Altura más elevada de los glaciares rocosos	3.120 m.	3.030 m.	3.000 m.
Altura mas baja de los glaciares rocosos inscritos en exposición E o SE	2.550 m.	2.500 m.	2.620 m.

En la actualidad, la repercusión de los vientos de poniente en la Sierra continúa siendo relevante en el reparto de la nieve, hasta el punto de que la fijación de los neveros de fusión tardía se localizan en la vertiente alpujarreña, a contrapendiente de las lomas y cerca del viso. Al respecto, el declive oriental de la loma del Tanto y del Chorrillo resultan elocuentes (neveros del Contadero, Peñón Negro, Chorrillo, etc.). Un dato significativo que avala lo anteriormente expuesto son las observaciones meteorológicas de las frecuencias de viento que registra la estación del Albergue Universitario, a 2.550 m.

Análisis efectuados por M. Pezzi i L. García Rosell (1978) detectan para el período 1973-1976 una predominancia de vientos del oeste (31%), seguidos de los del sur (15%). De los mismos años de observaciones, nosotros hemos calculado las frecuencias y porcentajes de aquéllos, aunque ajustándolos a lo largo del período octubre-mayo, que es cuando tienen lugar las precipitaciones nivosas. Los resultados, que se ofrecen en la siguiente tabla, muestran también un claro predominio de los del oeste, el 47,5 % para el período indicado, con mayores incrementos durante los meses anteriores y posteriores al invierno (octubre, noviembre, abril y mayo).

Mes/Período 1973-76	Viento dominante					
	Oeste			Sur		
	T	t	%	T	t	%
Octubre	73	46	63	73	17	23
Noviembre	74	31	41	74	16	21
Diciembre	69	31	44	69	13	18
Enero	70	26	37	70	16	22
Febrero	64	29	45	64	12	18
Marzo	64	25	39	64	15	23
Abril	64	38	59	64	13	20
Mayo	76	40	52	76	26	34

T: número total de observaciones; t: frecuencias parciales; %: porcentaje parcial Resumen de las observaciones: Vientos del oeste 47,5%; Vientos del sur: 22,3%

5. Los glaciares de Sierra Nevada, glaciares de montañas secas

Se ha señalado en diferentes ocasiones que el glaciario en Sierra Nevada permaneció recluído a sus áreas culminantes y localizado en cabeceras y altos tramos de los barran-

cos. Fue el propio de montañas secas, es decir, los hielos generaron heleros incapaces de evacuar la carga que arrastraban. La razón residió en la precoz fusión de las masas heladas, pues se realizaría muy cerca de las cabeceras. En este sentido, pueden considerarse como de tránsito entre los del Pirineo Oriental y Atlas (DRESCH, 1937; TAILLEFER, 1969).

La mayoría de los sistemas glaciares mantuvieron las características morfológicas de los aparatos colgados y, en el mejor de los casos, aquellos otros de valle, pero siempre de dimensiones modestas. Ni siquiera los instalados en fachada norte, que fueron los más desarrollados, consiguieron salir de la montaña. En todos los casos se canalizaron por barrancos empinados y estrechos, lo que dificulta su reconstrucción en el espacio, sobre todo en lo referido a las formas deposicionales que son las que permiten calibrar su empuje máximo, pues la mayoría han sido desmanteladas o desdibujadas por la morfodinámica postglaciar.

Sólo en la vertiente meridional es posible la identificación de un mayor número de estos registros debidos al máximo empuje, dada la menor inclinación de las lomas y la mayor sequedad del clima (foto 3). Los glaciares del tipo valle fueron:

Aparato	Localización	A	B	C (m.)	D (m.)	E (km)
Lanjarón	Valle de Lanjarón	SSW	1	3.100	1.800	8,0
Veleta	Valle del Veleta	SSE	3	3.350	2.550	4,0
Río Seco	Valle de Río Seco	SSE	-	3.100	2.200	3,5
Mulhacén	Valle del Mulhacén	SSW	-	3.150	2.300	3,7
Trevélez	Valle de Trevélez	S	3	3.050	2.200	4,0

A: Orientación general del aparato glaciar

B: Número de emisarios

C: Cota culminante del circo principal

D: Cota más baja del máximo empuje

E: Longitud de la lengua en el máximo visible

Por lo que respecta a aquellos otros heleros de circo, colgados en las faldas de las lomas, su número es muy considerable. Sin embargo, en pocos puede identificarse nítidamente la acción glaciar, pues los cuencos donde permanecieron alojados se presentan muy retocados, ya que en muchos de ellos debió coexistir una morfodinámica nivoglaciar con las consiguientes remodelaciones. Además, la suave pendiente de las laderas y la naturaleza del roquedo, muy apto al fácil desmoronamiento y alteración con abundante producción de finos, hacen difícil la reconstrucción de sus enclaves y formas primitivas. Los principales sistemas fueron:

Conjunto glaciar	Localización	A	B	C (m)	D (m)
Chico	Valle Río Chico	3	ESE	2.900	-
Lagunillos	Valle Río Lagunillos	5	SSE	3.100	2.650
Siete Lagunas	Loma del Mulhacén	3	E	3.100	2.400
Las Albardas	Valle de Trevélez	3	S	2.850	-

A: Número de emisarios

B: Orientación general del conjunto glaciar

C: Cota media de los cuencos

D: Cota más baja de los registros deposicionales

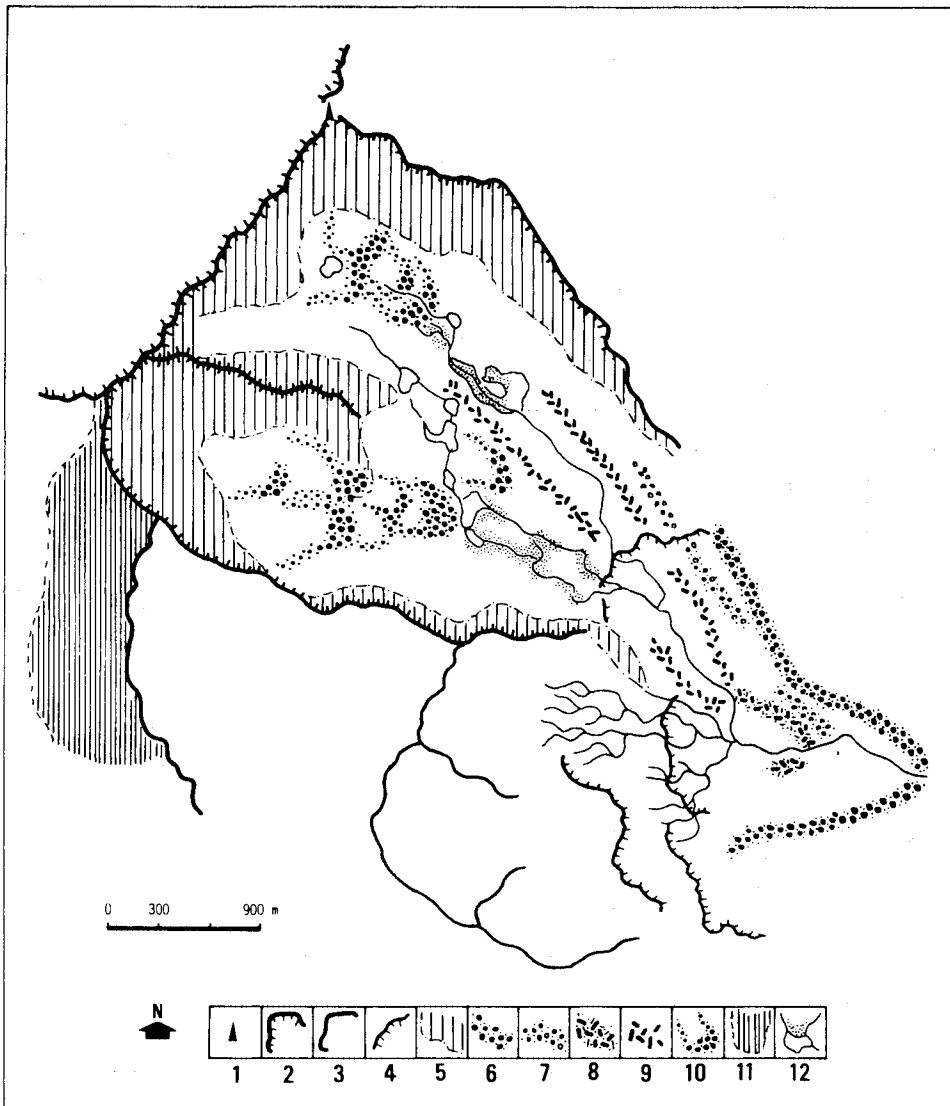


Figura 4. *Formas deposicionales de Siete Lagunas.*

1. Hörn; 2. Circo de paredes abruptas y límites bien definidos; 3. Circos de bordes difusos; 4. Escalón, umbral rocoso; 5. Paredes de circo en proceso de gelifracción; 6. Arcos morrénicos externos del máximo empuje; 7, 8 y 9. Arcos intermedios; 10. Glaciares rocosos; 11. Superficie de criplanación (Allanada del Mulhacén); 12. Cuenca lagunar con lóbulos de gelifluxión.

SISTEMA	MORFODINÁMICA DEL HIELO	PERÍODOS	CRONOLOGÍA (a BP)	APARATOS GLACIARES			
				VELETA	RÍO SECO	MULHACÉN	SIETE LAGUNAS
Holoceno	Neveros de fusión tardía	Postglacial	Actualidad	Gelifracción en cornisas y movimientos en masa	Gelifracción en cornisas y movimientos en masa	Gelifracción en cornisas y movimientos en masa	Gelifracción en cornisas y movimientos en masa
	Glaciares de circo	Tardiglacial	9.000 15.000	Glaciares rocosos en Vasares del Veleta (3120)	Glaciares rocosos de las Lagunas de Río Seco (3.030)	Glaciares rocosos circundando la laguna de La Caldera (3.000)	Glaciares rocosos de laguna Altera (3.150)
	Glaciares de valle	Retricesi		Morrena lateral de Tajos Colorados Morrena lateral del arroyo de las Cabras	Arco frontal en el margen externo del circo. Arcos sobre el cuenco del Pico del Púpito	Arco frontal de laguna de la Caldera. Arco frontal de laguna de Majano. Arco en tramo medio valle	Arco frontal laguna Altera Arcos frontales lagunas Medianera y Hondera. Arco frontal Chorreras Negras. Arco Prado Llano
		Estabilización			Depósitos de obturación de Loma Pelada	Depósitos de obturación de Pañón Grande	
		Máximo empuje visible		Arco lateral derecho de Loma Púa-Peñón de los Vencejos (2.550)	Arcos laterales extremos de laderas Terreras Azules -Horcajo Feo (2.200)	Arcos laterales y terminales de las Tomas de Acequia Alta (2.300)	Arcos frontales de Tajo del Mingo (Canhorros de las Hoyas (2.400)
	Pre-máximo empuje visible				Rputura de pendiente tramo alto valle Poqueira (2.050) Depósito en término barranco Peñón Grande (2.000)		

Cronológicamente resulta correcto, hasta el momento, sólo datar el período de amplitud mínima y que según datos palinológicos de Padúl (PONS et REILLE, 1986, 1988), podría corresponder al Tardiglaciario, situado en torno a 15.000-10.000 años BP. La inclusión del glaciario de altura en la fase tardiglaciaria parece prudente, pues coincide con la presencia de taxones estépicos (*Artemisia sp.*, *Chenopodiaceae*, *Ephedra sp.*, etc.) en la última secuencia bioestratigráfica de Padúl. También existen otros argumentos que avalan tal posición. Nos referimos a los glaciares rocosos que colmatan los cuencos del Pirineo Oriental, datados, en base a criterios morfológicos y paleobotánicos, también de tardiglaciares (JALUT, 1972; SERRAT, 1979; SOUTADÉ, 1980; GÓMEZ ORTIZ, 1986; etc.)

Si parecen claros los períodos fríos del máximo y mínimo empujes, opinamos que otros períodos rextásicos con presencia de glaciares debieron invadir la Sierra, a la vista de la ubicación de determinadas formas en la vertiente derecha del valle de Lanjarón, a la altura de Peñón Colorado; en la cavidad del circo del Veleta, en las Chorreras; en el valle de Río Seco, en el tránsito hacia el circo; etc. Sin embargo, donde los datos permiten apoyar más la hipótesis de glaciaciones antiguas es en Río Seco-Mulhacén, en las Tomas, donde se funden ambos sistemas morrénicos, a 2.250-2.300 m. Se trata de depósitos colgados sobre el talweg que tienden a interferir el trazado de las aguas procedentes de Peñón Negro. De confirmarse tales depósitos como morrenas deberían corresponder a períodos fríos anteriores al hasta ahora citado máximo empuje, lo que supondría un incremento de cerca de 3 km. para el valle glaciario, situando su frente en 2.000 m. (fig. 5).

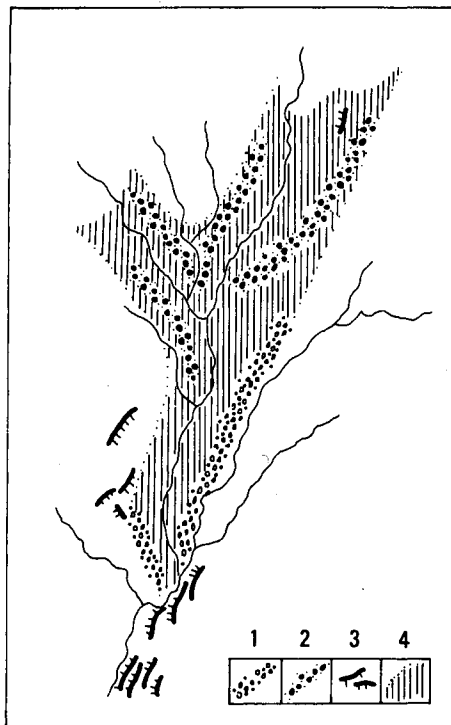


Figura 5. Hipótesis sobre la prolongación de las masas heladas de Río Seco-Mulhacén (relacionese con la foto 3).
 1. Supuestos arcos morrénicos del máximo empuje fijados en la Hoya del Capitán; 2. Arcos morrénicos bien definidos; 3. Resaltes rocosos; 4. Masa helada durante el supuesto máximo empuje.

De todas formas y tratando globalmente el problema del número de glaciaciones que debieron afectar a la Sierra, parece oportuno no querer interpretarlo desde un solo enfoque disciplinar. Debe ser el trabajo conjunto de diferentes especialistas quien tienda a clarificarlo. La armonización de los estudios edafológicos, sedimentológicos, palinológicos, su tratamiento conjunto con aquellos otros datos morfo-sedimentológicos del contacto de la Sierra y sus depresiones periféricas y la evolución de la línea de costa deben presidir la discusión que de luz a la cuestión paleogeomorfológica planteada.

7. Conclusiones

La huella glaciar en Sierra Nevada posee interés morfológico por cuanto ha modelado con cierta energía los barrancos de los macizos del núcleo culminante. Sin embargo, se trata de formas que quedaron arrinconadas en las cabeceras y altos tramos de los valles. La existencia de los glaciares, sobre todo en vertiente sur, se debió a una serie de factores coincidentes: volumen orográfico, relieve preexistente, morfoestructura y litología y orientación de la cadena montañosa.

Los glaciares que surcaron las vertientes mediterráneas de la Sierra permanecieron individualizados en sus respectivos reductos, pues en contadas ocasiones lograron fusionarse diferentes unidades. La extensión glaciada, modesta, estuvo supeditada, en gran manera, a la sobrealimentación que recibirían, como respuesta a la acción eólica de los vientos del oeste.

Dos períodos fríos parecen claros en la historia glaciar de Sierra Nevada, sin embargo, no se descarta la existencia de otros más antiguos a juzgar por los registros erosivos y deposicionales detectados en circos y valles.

El presente artículo forma parte del programa de investigación que sobre la «Evolución del paisaje altimontano de Sierra Nevada. Estudio geográfico» se lleva a término en el Servei de Paisatge de la Universitat de Barcelona, al amparo de la DGICYT (PS88-022).

Referencias bibliográficas

- BIROT, P. et SOLÉ SABARÍS, L. (1959): «Recherches sur la morphologie du sud-est de l'Espagne». *Rev. Geo. Pyr. et Sud-Ouest*, XXX, pp. 119-284.
- CASAS MORALES, A. (1943): «Contribución al estudio del glaciario cuaternario en Sierra Nevada». *Boletín de la Sociedad Española de Historia Natural*, XLI, pp. 543-567.
- DÍAZ DE FEDERICO, A. y PUGA, E. (1980): *Mapa Geológico de España Hoja 1.027 (Güejar-Sierra, 1/50.000)*, IGM. Madrid.
- DRESCH, J. (1937): «De la Sierra Nevada au Grand Atlas, formes glaciaires et formes de nivation». *Melanges de géographie et d'orientalisme offerts a E.E. Gautier*. Tours, pp. 194-212.
- FLORSCHUTZ, F., MENÉNDEZ-AMOR, J. & WIJMSTRA, T.A. (1971) «Palynology of a thick quaternary succession in southern Spain». *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 10, pp. 233-264.

- FONTBOTÉ, J.M. (1957): «Tectoniques superposées dans la Sierra Nevada (Cordilleres Bétiques. Espagne)». R. Acad. SC. París, 245, pp. 1.324-1.326.
- GARCÍA SAINZ, L. (1942): «El glaciario cuaternario en Sierra Nevada». *Estudios Geográficos*, IV, pp. 233-254.
- GÓMEZ ORTIZ, A. (1986): «Formes i modelants glacials i periglacials al Pirineu Oriental». *Butll. Inst. Cat. Hist. Nat.*, 53, pp. 77-98.
- GÓMEZ ORTIZ, A. (1987a): *Contribució geomorfològica a l'estudi dels espais supraforestals pirencens. Gènesi, organització i dinàmica dels modelats glacials i periglacials de la Cerdanya i Alt Urgell*. Institut Cartogràfic de Catalunya. Barcelona.
- GÓMEZ ORTIZ, A. (1987b): «Morfològia glaciària en la vertiente meridional de Sierra Nevada (Área Veleta-Mulhacén)». *Estudios Geográficos*, 188, pp. 379-407.
- GÓMEZ ORTIZ, A. y LLOBET, S. (1988): «Geomorfogénesis periglaciària en Sierra Nevada: formas heredadas y modelados actuales en la unidad orogràfica del Mulhacén». *Estudios Geográficos*, 193, pp. 527-558.
- HEMPEL, L. (1960): «Límites altitudinales geomorfològics en Sierra Nevada». *Estudios Geográficos*, 78, pp. 81-93.
- JALUT, G. (1972): *Évolution de la végétation et variations climatiques durant les quinze derniers millénaires dans l'extrémité orientale des Pyrénées*. Thèse. Université de Toulouse.
- LHENAFF, R. (1977): *Recherches géomorphologiques sur les Cordilleres Bétiques centro-occidentales (Espagne)*. Thèse. Université de Lille.
- MESSERLÍ, B. (1965): *Beitragè zur geomorphologie der Sierra Nevada (Andalusien)*. Juris Verlag. Zurich.
- OBERMAIER, H. y CARANDELL, J. (1916): «Los glaciares cuaternarios de Sierra Nevada». *Trabajos del Museo Natural de Ciencias Naturales*. (Geología), 17, pp. 1-68.
- PASCHINER, H. (1957): «Las formas glaciares de Sierra Nevada, España». *Memorias y Comunicaciones del Instituto Provincial*. Barcelona, pp. 81-94.
- PEZZI, M.C. y GARCÍA ROSELL, L. (1978): «Análisis del medio físico de Sierra Nevada». *Cuadernos Geográficos*, 8, pp. 211-230.
- PONS, A. et REILLE, M. (1986) «Nouvelles recherches pollenanalytiques a Padúl (Granada): la fin du dernier glaciare et l'Holocène» *Quaternary climate in Western Mediterranean*. Madrid, pp. 405-420.
- PONS, A. et REILLE, M. (1988): «The Holocene and Upper Pleistocene pollen record from Padúl (Granada. Spain): a new study». *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, 66, pp. 243-267.
- PUGA, E., DÍAZ DE FEDERICO, A. y FONTBOTÉ, J.M. (1974): «Sobre la individualización y sistematización de las unidades profundas de la Zona Bética». *Estudios Geológicos*, 30, pp. 543-548.
- SÁNCHEZ GÓMEZ, S.T. (1990): *Aplicación del estudio de suelos a la dinámica de la cuenca del río Lanjarón. Relación: suelos-geomorfología*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias de la Universidad de Granada.
- SERRAT, D. (1979): «Rock glaciers morainic deposits in the eastern Pyrenees», in *Moraines and Varves*. Balkema. Rotterdam, pp. 93-100.
- SORIA MINGORANCE, J., SORIA RODRÍGUEZ, F. y JABALOY SÁNCHEZ, A. (1985): «El modelado glaciària en las vertientes meridionales de Sierra Nevada (Granada)». *I Reuniao do Quaternario Iberico*. Lisboa, 1985, pp. 153-163.
- SOUTADÉ; G. (1980): *Modelé et dynamique actuelle des versants supra-forestiers des Pyrénées Orientales*. Imp. Coop. Sud-Ouest. Albi.

- TAILLEFER, F. (1969): «Les glaciations des Pyrénées». *Études Françaises sur le Quaternaire. VIII Congrès INQUA*. Paris, pp. 19-32.
- VIRS, G. (1971): «L'englacement quaternaire des Pyrénées orientales et ses problèmes climatiques». *Coll. Interd. Mill, Nat. Supraf. Medit. Occid.* Perpignan, pp. 57-64.