

## DEGLACIACIÓN RECIENTE DE SIERRA NEVADA. REPERCUSIONES MORFOGÉNICAS, NUEVOS DATOS Y PERSPECTIVAS DE ESTUDIO FUTURO

A. GÓMEZ ORTIZ (1)  
L. SCHULTE (1)  
F. SALVADOR FRANCH (1)  
D. PALACIOS ESTREMER (2)  
J.J. SANJOSÉ BLASCO (3)  
A. ATKINSON GORDO (3)

(1) Servei de Paisatge y Área de Geografía Física. Universitat de Barcelona  
(2) Dpto. de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense  
(3) Escuela Politécnica. Universidad de Extremadura

Correo electrónico de contacto: gomez@trivium.gh.ub.es

*RESUMEN. El Corral del Veleta (cabecera del glaciar del Guarnón, Sierra Nevada) albergó durante la Pequeña Edad del Hielo un pequeño glaciar. Su lenta desaparición, total a mediados del siglo XX, supuso la construcción del talud detrítico que se alinea al pie de la pared del Corral, al tiempo que la fosilización de los hielos glaciares residuales. En la actualidad, el talud evoluciona a partir de los materiales del derrumbe de la pared, afectados por procesos fríos (gelisoliflucción, crio-reptación, flujos, etc.) y controlados por la duración del manto nival. De las formas elaboradas el incipiente glaciar rocoso es de las más interesantes. De éste, se controla su movimiento planar y vertical y temperatura interna del suelo. Los resultados obtenidos parecen avalar que el permafrost alpino en el que se asienta se encuentra en proceso de degradación.*

*ABSTRACT. Modern deglaciation in Sierra Nevada. Morphogenetic effects, new data and outlook regarding future studies. During the Little Ice Age a small glacier occupied the Veleta cirque (Guarnón glacier, Sierra Nevada, Spain). The successive melting and disappearance of the glacier during the first half of the 20th century were followed by the construction of talus cones located at the foot of the cirque wall. Debris buried the residual ice body. At present the talus cones are fed by clasts from the cirque wall and show periglacial processes as gelifluction and ice-creep. These are mainly controlled by the persistence of the snow cover. Among the periglacial landforms the rock glacier is the most interesting feature. Therefore, thermal and morphometric monitoring of the rock glacier is undertaken. The obtained results point to a degradation of the alpine permafrost.*

**Palabras clave:** Corral del Veleta (Sierra Nevada), glaciar rocoso, monitorización, nieve, permafrost, temperatura.

**Key words:** Veleta Cirque (Sierra Nevada), rock glacier, monitoring, snow, permafrost, temperature.

*Enviado en Septiembre de 2004*

*Aceptado en Octubre de 2004*

*Desde 1989 venimos trabajando en Sierra Nevada en lo relativo a morfología de países fríos. Primero, se prestó atención a los temas relacionados con el glaciario y periglaciario pleistoceno-holoceno, a su instalación relativa en el tiempo y a su distribución espacial y a su cartografía geomorfológica detallada. Últimamente, los esfuerzos tienden a centrarse en lo concerniente al glaciario histórico de la denominada Pequeña Edad del Hielo (PEH), degradación del permafrost profundo y residual y procesos y formas actuales de origen crionival. Serán a estos últimos temas a los que dediquemos nuestro interés en esta ocasión aportando, además, datos recientes y anunciando futuras líneas de trabajo.*

*Algunos de los resultados que hemos logrado últimamente han sido puntualmente recogidos en diferentes certámenes científicos y medios especializados. Buena parte de ellos han cristalizado gracias al esfuerzo y colaboración conjunta entre diferentes grupos de investigación coordinados de las Universidades de Barcelona, Complutense de Madrid, Alcalá de Henares, Cáceres y Almería.*

## 1. Introducción

Sierra Nevada fue el reducto más meridional de Europa donde el glaciario pleistoceno y holoceno – p.e. el llamado de la Pequeña Edad del Hielo- tuvo lugar (Fig. 1). Los procesos morfogénicos fríos actuales en la montaña europea también encuentran su manifestación más meridional en Sierra Nevada, en su mitad occidental, que es donde los cordales superan los 3300 m (área del Mulhacén-Veleta), y donde las condiciones climáticas de la montaña -persistencia del frío, la nieve y el hielo en el suelo, principalmente, a lo que hay que añadir la prolongada aridez estival-, favorecen los procesos mecánicos.

Todos estos hechos convierten a Sierra Nevada en montaña de interés excepcional para el estudio de la morfodinámica de procesos fríos, particularmente por lo que se refiere a esta parte occidental del mundo mediterráneo, más, si tenemos en consideración, su reciente deglaciación y posición latitudinal. En efecto, ella está instalada a 37° de latitud norte y marca –y también marcó- tránsito entre ambientes morfogénicos subtropicales áridos (Alto Atlas) y templados, propiamente dichos (Pirineos, Alpes). Sin embargo, sus paisajes y formas de modelado están más cercanos a los primeros que a los segundos, lo que infunde al conjunto de la Sierra un particular interés por lo que respecta al significado ambiental de los procesos y formas de origen frío.

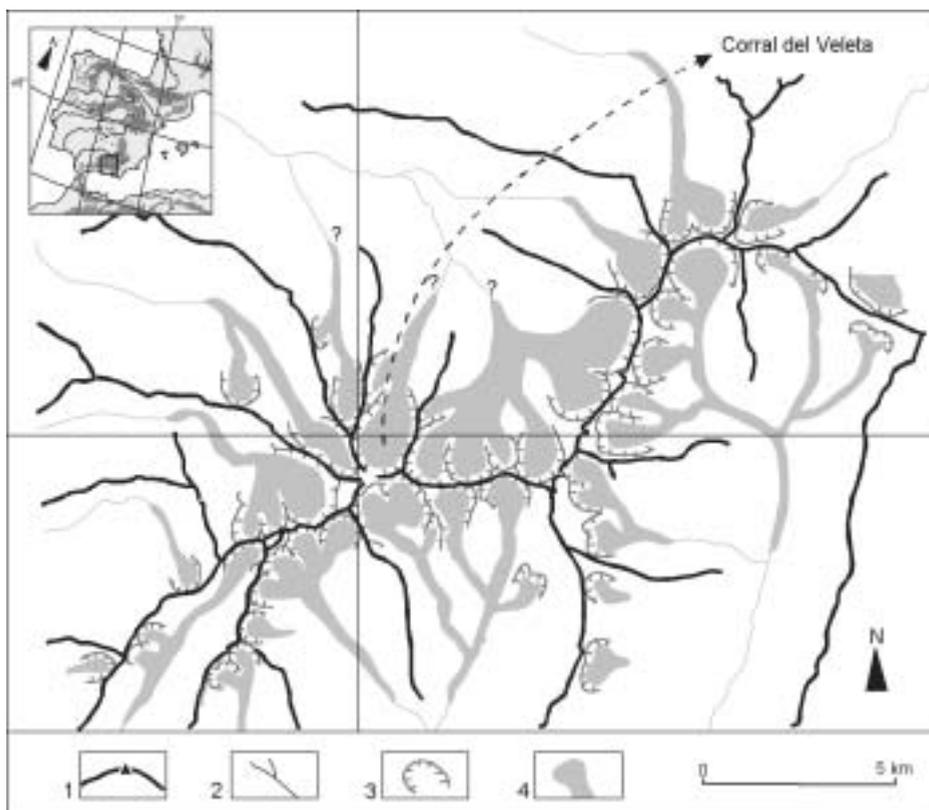


Figura 1. Esquema general del glaciario de Sierra Nevada y fijación del Corral del Veleta.

1. Línea de cumbres; 2. Red de barrancos; 3. Circos glaciares; 4. Glaciares.  
Se detalla el Corral del Veleta.

## 2. El significado morfológico de la Pequeña Edad del Hielo

El enfriamiento climático generalizado que afectó a las latitudes medias durante la denominada Pequeña Edad del Hielo (PEH) –entre los siglos XV y XIX- incidió también en montañas de la Península Ibérica (Pirineo central y andorrano, Picos de Europa, Sierra Nevada). Tuvo su manifestación más meridional en Sierra Nevada con el desarrollo de pequeños glaciares en el seno de algunos de sus circos, al menos en los más elevados de su vertiente septentrional. Así se deduce de los escritos de viajeros y científicos que acceden y describen a la Sierra (Ponz, 1754; Boissier, 1839; Madoz, 1849; Hellmann, 1881). Incluso la existencia de estos pequeños glaciares o focos de hielos permanentes podría remontarse a fechas anteriores, a juzgar por los relatos de cronistas árabes, como lo hizo en 1137 Muhammad b. Abi Bakú al-Zuhri: “Allí se encuentra nieve de muchos años que ennegrecida y solidificada, parece piedra negra; pero cuando se rompe se halla en su

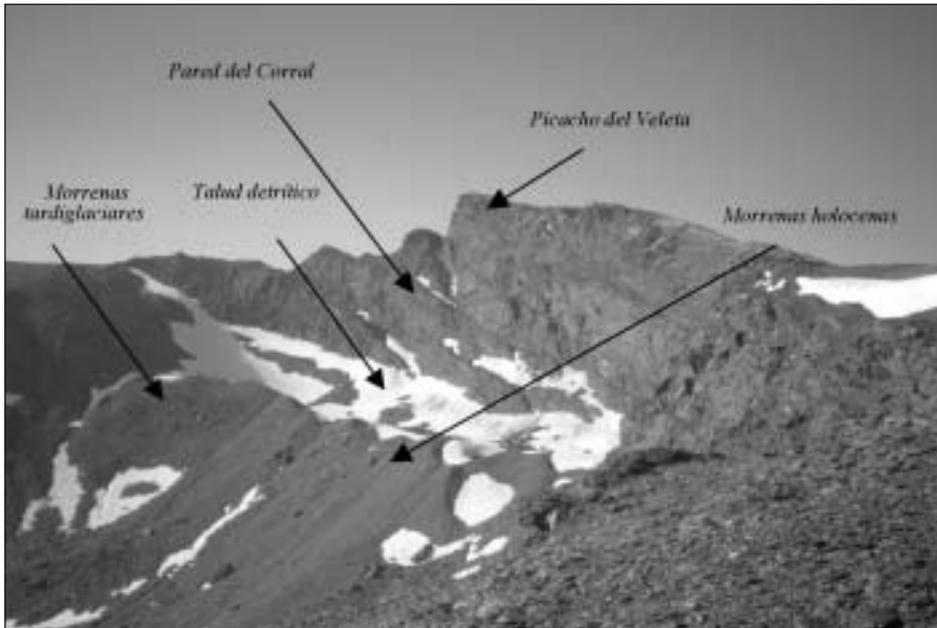


Foto 1. Panorámica general del Corral del Veleta (agosto, 2004).

*interior nieve blanca*” (citado por Torres Palomo, 1967-1968). También este enfriamiento que invadió la Sierra ha sido detectado a través de la reconstrucción palinológica de los borreguiles de cumbres (Esteban Amat, 1996).

De los vestigios de este glacialismo histórico en Sierra Nevada el reducto más interesante es el Corral del Veleta (foto 1), que albergó un pequeño glaciar cuya extensión colmó la base del cuenco y tendió a volcar hacia el valle. Su progresiva reducción significó que a mediados del siglo XX permaneciese ya refugiado en su sector oriental, al amparo de la pared limítrofe del propio Corral y declive del cerro de los Machos (Fig. 2). En total, la paulatina reducción del hielo significó la creación de diferentes cordones morrénicos en el seno de la base del Corral (Gómez Ortiz et al. 1996; Schulte, 2002a).

El análisis morfosedimentario y sedimentológico llevado a cabo en las formas de relieve creadas ha permitido reconstruir la lenta desaparición del pequeño glaciar, en ocasiones contrastando acontecimientos con la información de escritos de época (Bide, 1893; Quelle, 1908). En tal sentido, hay que resaltar que durante los últimos decenios del siglo XIX el hielo glaciar permanecería ya encajado entre el terraplén morrénico más externo y antiguo y el borde de la pared del circo y declive adyacente del cerro de los Machos. Así se deduce a partir de la datación de  $^{210}\text{Pb}$  realizada en sedimentos lacustres de la laguna aún existente en el seno del propio Corral (Schulte, 2002b, 2002c) y de la descripción que Hellmann hace en 1876 (1881).

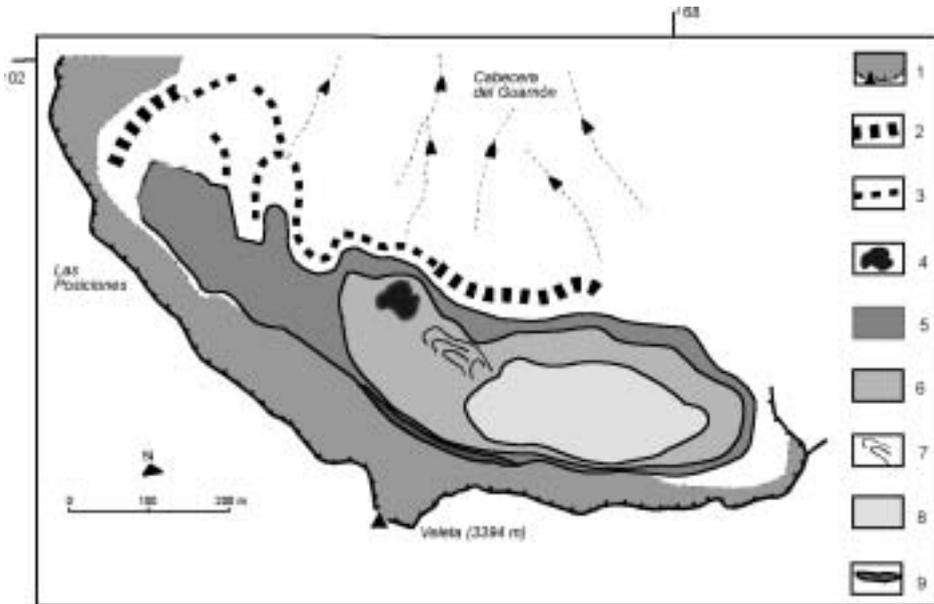


Figura 2. Deglaciación del Corral del Veleta. Etapas significativas.

1. Pared del Corral y picacho del Veleta; 2. Morrenas tardiglaciares; 3. Morrenas holocenas; 4. Actual laguna; 5, 6 y 8. Dominio de la masa helada glaciar y retroceso a partir de mediados del siglo XIX; 7. Actual glaciar rocoso en formación; 9. Masas de hielo permanentes adosadas a las paredes.

La desaparición del glaciar debió estar 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 precipitación nivosa, 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 tienden cada vez más a quedar arrinconadas hacia el extremo oriental del Corral: “*El ventisquero del Veleta es una masa de hielo muerta, sin movimientos ni fluctuaciones*” (Obermaier, 1916).

Instalados ya a mediados del siglo XX, el glaciar permanecería refugiado en el tercio más oriental de la base del Corral (Solé Sabarís, 1942; García Sainz, 1947) y cada vez más sus hielos se ofrecerían recubiertos de escombros detríticos procedente de la intensa gelificación que afectaría a la pared del propio circo. Esta morfodinámica, progresiva hasta nuestros días, nos permite interpretar la paulatina transformación del pequeño glaciar blanco, ya inmóvilizado, en glaciar negro, y éste, en su devenir más reciente, en masas de *permafrost* alpino.

### 3. De glaciario negro a *permafrost*

Durante el verano de 1995 toda la base del Corral del Veleta permaneció limpia de nieves lo que propició analizar “in situ” las formas hasta entonces enmascaradas, deducir los procesos morfogénicos formadores y registrar medidas térmicas del suelo y entre oquedades de bloques. El conjunto de estos datos permitió plantear la hipótesis de la existencia de *permafrost* alpino. Campañas de reconocimiento geofísico de las capas internas de la base del Corral (prospecciones eléctricas, sísmicas y mecánicas con extracción de testigo) ratificaron la hipótesis enunciada. Esto fue en agosto de 1999 (Gómez Ortiz et al., 1999, 2001).

El testigo de material extraído se obtuvo tras perforar el frente de un pequeño glaciario rocoso, a 3105 m. El total perforado fue de 190 cm, detectándose a 150 cm sedimento helado, que correspondería al techo del *permafrost* en este lugar. Las características físicas de la muestra fueron (tabla 1 y Fig. 3):

Tabla 1. Características del testigo.

| Unidad | 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 grafitos 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   |

El *permafrost* del Corral del Veleta (mezcolanza de masa helada que incluye clastos e hielo) se sitúa a oriente de la lagunilla del Corral, en dirección al declive del cerro de los Machos y se extiende entre el borde interno de la morrena externa y el talud detrítico de la pared del circo (Terradat LTD & ETH, 1998; tabla 2). Análisis recientes de la resistividad eléctrica del subsuelo han permitido estimar la superficie que podría cubrir el *permafrost*. Ésta se evalúa en torno a los 3200 m<sup>2</sup>, aunque se desconoce si conformando horizonte continuo o bolsas o placas sin conexión. Su techo está próximo a los -2 m y en algunos sectores su espesor supera los 20 m.

Tabla 2. 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            |

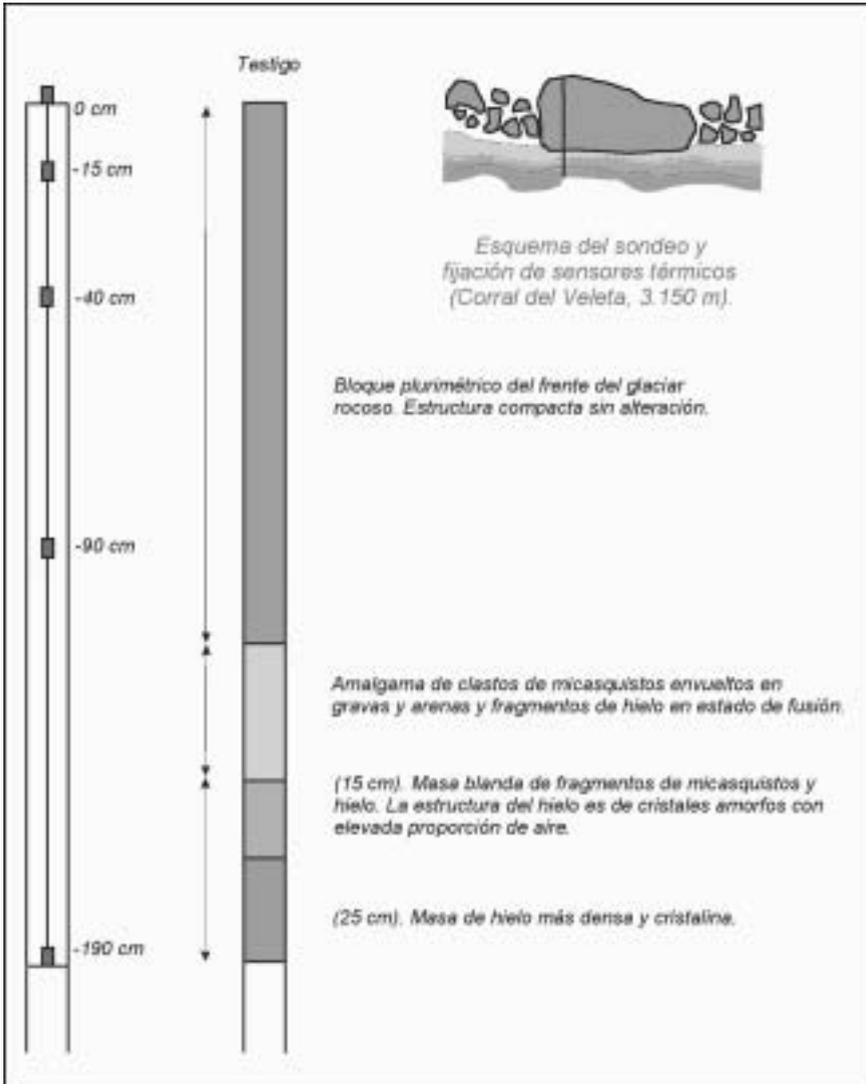


Figura 3. Prospección del glaciar rocoso y columna de sensores térmicos instalados en su seno.

La existencia de *permafrost* en el extremo oriental del Corral la asociamos a la evolución que debió seguir el primitivo glaciar negro y la interpretamos como la etapa última de la deglaciación del pequeño glaciar que colmó la base del Corral del Veleta durante la Pequeña Edad del Hielo. Su declinar y paulatina reclusión hacia oriente debió ser paralela a la formación del talud detrítico que caracteriza la base de la pared del Corral.

Así se desprende de las formas en él elaboradas, sobre todo de sus tramos más orientales que resultan los más dinámicos y donde el *permafrost* aún subsiste. El que aún se mantenga este hielo profundo es un hecho excepcional en el conjunto de la Sierra y se debe, particularmente, a la singularidad del propio Corral del Veleta. Nos referimos a su concavidad tan cerrada, orientación favorable al NE, débil insolación –sólo en verano y muy restringida-, y, sobre todo, al continuo suministro de clastos y nieves procedentes de su pared y rebordes limítrofes, circunstancias, todas ellas, que tienden a actuar a manera de aislante térmico sobre las capas heladas profundas.

Fuera del Corral del Veleta no hemos detectado de manera fehaciente *permafrost*. Sin embargo, sí datos orientativos de su posible existencia en diferentes lugares cimeros de la Sierra. Por ejemplo, en la Hoya del Mulhacén, en su talud detrítico, donde se han localizado lechos helados a 77 cm de profundidad y cuya existencia se debe a capas de nieve/nevé atrapadas entre cascajos procedentes del derrumbe de la pared del circo (Schulte et al. 2002). También hay signos de bolsas de *permafrost* alpino en el collado del Cerro de los Machos (3299 m) y Allanada del Mulhacén (3410 m), a juzgar por los datos preliminares de las prospecciones geoeléctricas y sísmicas realizadas. Pero se pone en seria duda su existencia en el entorno del Veleta, fuera de su Corral. Así se desprende de los registros térmicos obtenidos en el seno del sondeo de 114,5 m llevado a cabo en la cúspide del propio picacho del Veleta, a 3380 m, y sobre el substrato, que siempre han dado valores superiores a 2,15°C (campañas de 2001-2004) por debajo de –20 m (*ZZA*, *zero annual amplitud*) y oscilantes en torno a 0°C entre la superficie del suelo y la profundidad indicada. Resultados que no parecen estar en la misma línea con nuestras anteriores afirmaciones (Tanarro et al. 2001) y que deberemos revisar.

#### **4. Morfodinámica en el seno del Corral del Veleta**

La morfodinámica de procesos fríos que caracteriza a Sierra Nevada queda sintetizada y bien representada en el Corral del Veleta, pues su singularidad y multivariada de acontecimientos morfogénicos lo convierten en un significativo laboratorio, sobre todo por su reciente deglaciación. Del conjunto del Corral, su talud detrítico, aún en construcción, es la unidad morfológica más activa.

##### *4.1. El talud detrítico: evolución de formas y control de procesos*

El talud detrítico del Corral se alinea de occidente a oriente, al pie de la pared del circo y a lo largo de unos 600-620 m, desde los Tajos del Campanario hasta el cerro de los Machos. Su construcción fue a partir de derrumbes de la propia pared, –micasquistos friables y muy tectonizados (Sanz de Galdeano et al. 1999)-, y su evolución morfodinámica y formas de modelado resultantes están muy supeditadas a la combinación y complementariedad de procesos de crio-reptación, geliflujión y flujo nival que afectan al paquete detrítico, actuaciones que, en su conjunto, recuerdan la dinámica propuesta por Church & Ryder (1972) para laderas paraglaciacares.

La morfodinámica dominante en el talud detrítico está subordinada a la duración de la capa nival, a la evolución térmica del suelo, a la existencia de lechos internos helados

y al suministro de material clástico procedente de la destrucción de la pared. La conjunción de estos parámetros supone el desarrollo de variados y complementarios movimientos en masa con la consiguiente sucesión rápida de formas, que se traduce en una permanente inestabilidad, tal como expusimos cuando estudiamos la variabilidad del manto nival entre 1995 y 2001 (Gómez Ortiz et al., 2003). Entonces demostramos que la creación y sucesión de formas de modelado en el talud detrítico se encontraba en estrecha relación con la naturaleza física del manto nival, pues la persistencia de la nieve venía a suponer un eficaz protector térmico de las capas heladas subyacentes (*permafrost*) y, por tanto, predominio de estabilidad de la fracción mineral.

Sin lugar a dudas los sectores central y oriental del talud detrítico son los más activos. El primero, se caracteriza por el desarrollo de importantes deslizamientos y flujos de diferente velocidad y magnitud que han dado lugar a un cono detrítico encarado hacia la lagunilla del Corral. El segundo, por movimientos más pausados y lentos de origen gelifluidal, que han construido amalgamas de coladas y arcos de piedras yuxtapuestos, afectando, incluso, a las partes bajas de la ladera de los Machos. De estas coladas y arcos de piedras destacan las que han invadido el surco del Corral en dirección a su lagunilla y que en su evolución han derivado en un incipiente glaciar rocoso, probablemente iniciado antes de 1957 (Fig. 4).



Figura 4. Construcción del glaciar rocoso. Etapas.

#### 4.1.1. Morfodinámica del glaciar rococo

Especial atención se ha venido mostrando durante estos últimos años a la morfodinámica y evolución del glaciar rococo de la lagunilla del Corral, particularmente a su movimiento y configuración geométrica y, paralelamente también, al ritmo térmico de las capas internas del suelo y techo del *permafrost* sobre el que se asienta, éste, detectado antes por prospecciones geofísicas (foto 2).



Foto 2. Foto vertical del glaciar rocoso.

De este glaciar rocoso ya anunciamos su existencia (Gómez Ortiz et al. 1999) y algunas de sus características físicas (Gómez Ortiz et al. 2004). Desde entonces se ha venido controlando su evolución. Su origen, estado actual y dinamismo, aún por dilucidar en detalle, no es obstáculo para señalar que está asociado al continuo suministro de material clástico procedente de la pared del Corral, a la multivariedad de procesos fríos que afectan al material liberado y, consecuentemente, a los diferentes tipos de formas que se suceden. Del conjunto de este cuerpo sedimentario, que comienza formando parte del talud detrítico y se prolonga tras sucesivos modelados hasta los 3100 m –en las proximidades de la lagunilla del Corral en trayecto en forma de L-, lo que ahora interesa es su tramo medio y frontal, que se caracteriza por la existencia de arcos y cordones lobulados (longitud 120 m; anchura media 30 m; espesor 10 m y pendiente media de 23°) y por ser las zonas bajo control topográfico y térmico más continuado (Fig. 5).

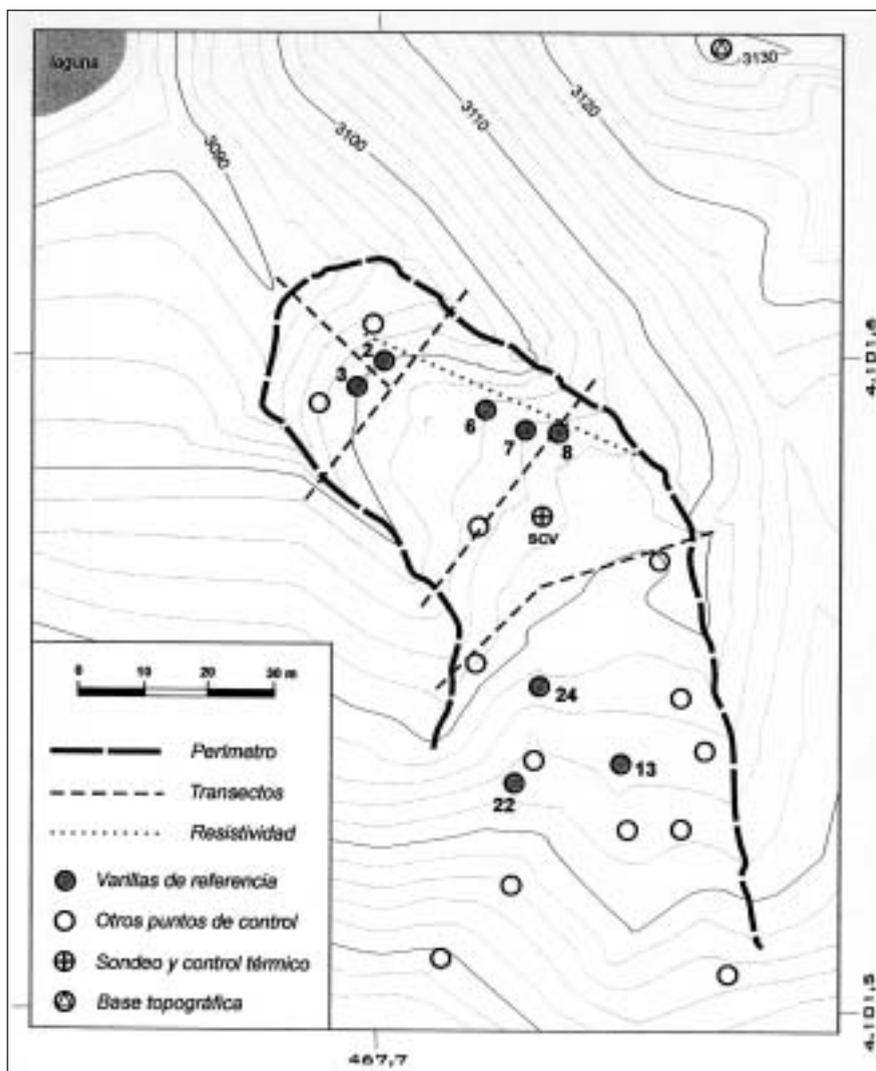


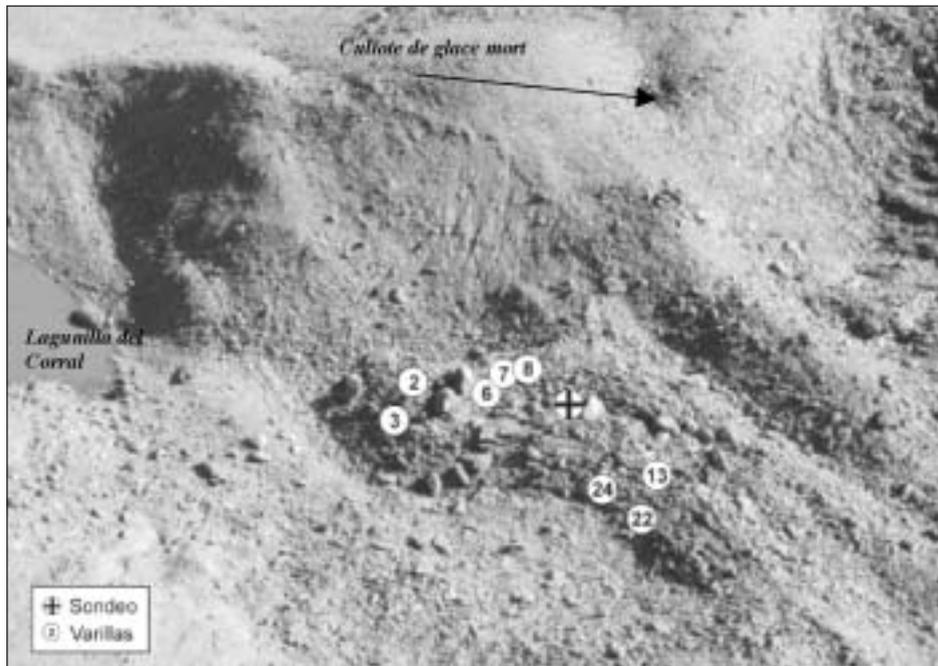
Figura 5. Topografía y puntos de muestreo del glaciar rocoso.

La metodología y técnicas empleadas (geodésicas, topográficas y fotogramétricas) para el seguimiento del tramo medio y frontal del glaciar rocoso han sido las de San José Blasco (2003) y han consistido en el control anual del perímetro, transectos y puntos fijos establecidos a partir de varillas fijadas en la superficie del glaciar rocoso (en esta ocasión se tienen en cuenta las más significativas) (fotos 3 y 4). Los resultados de las diferentes campañas se recogen en la tabla 3, donde se especifican desplazamientos en la vertical (hundimiento) y en la horizontal (avance).

*Tabla 3. 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, vuelco, cabeceo).



*Foto 3. Foto vertical del glaciar rocoso y puntos de muestreo.*



Foto 4. Detalle de varilla de control de movilidad del glaciar rocoso.

También y para el periodo 2002-2003 y 2003-2004 se ha ensayado el cálculo de pérdida de volumen a partir del hundimiento medio detectado en el conjunto de la masa. Para el periodo 2002-2003 se estima en torno a 1500 m<sup>3</sup>, frente a los 336 m<sup>3</sup> del periodo 2003-2004 (hundimiento medio de 33,6 cm y 13,1 cm, respectivamente para los ocho puntos referenciados).

Respecto a los controles térmicos se han llevado a cabo registros en el frente del glaciar rocoso, a 3107 m, a través de una cadena de sensores autónomos y automáticos convenientemente protegidos (tipo *datalogger Tiny-talk*, rango -35°/+70°C) instalados en el seno de la perforación que alcanza el techo del *permafrost*. Los registros corresponden a 0 m, -15 cm, -40 cm, -90 cm y -190 cm (Fig. 3). De ellos se expresan los valores extremos, media y amplitud (tabla 4 y fig. 6 y 7). El tratamiento estadístico se apoyó en la metodología de Ramos et al. (1998, 2002).

Tabla 4. Registros térmicos del glaciar rocoso (extremo frontal, 3107 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. \*Se hace referencia al periodo comprendido entre septiembre-agosto.

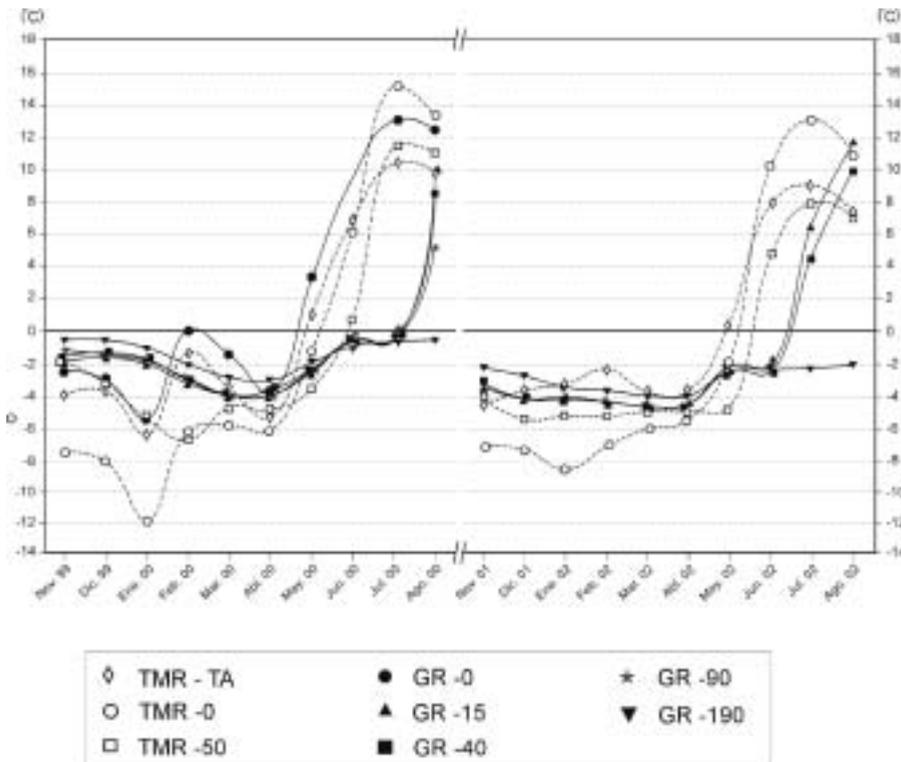


Figura 6. Gráfico térmico. Valores medios.

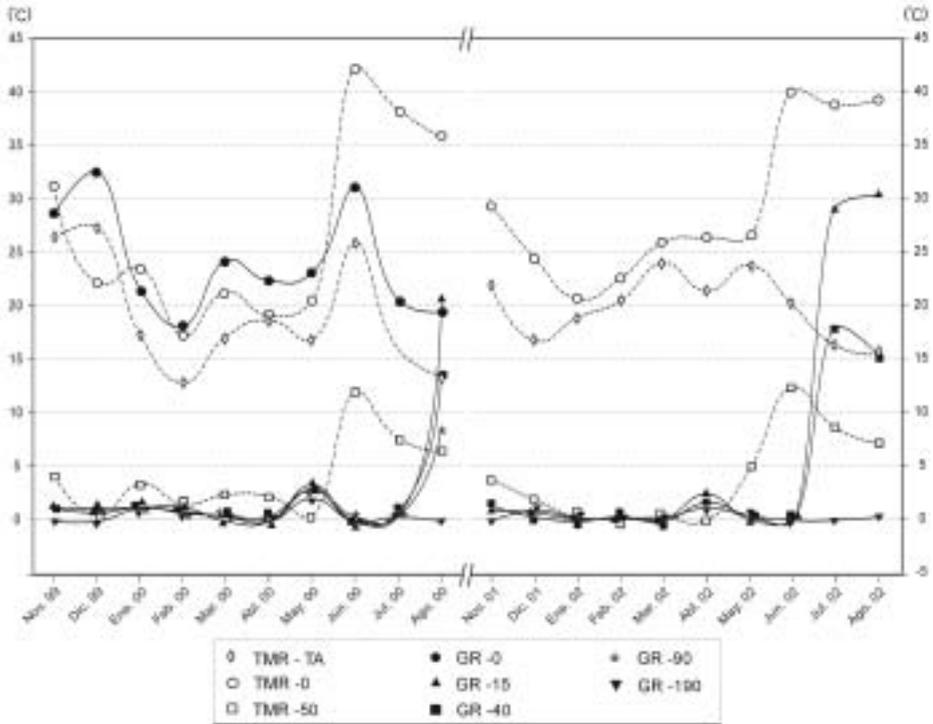


Figura 7. Gráfico térmico. Amplitudes.

El seguimiento que hemos venido haciendo del talud detrítico del Corral del Veleta pone en evidencia la relación que existe entre la evolución térmica del suelo (con y sin capa de nieve protectora) y el grado de inestabilidad de la fracción detrítica. La morfodinámica del glaciar rocoso así lo atestigua y ella se refleja en el comportamiento plástico diferencial del conjunto de la masa sedimentaria (movimientos planares y verticales) y en variación de volumen. El origen de esta plasticidad y diferencia de volumen podría residir en la distinta respuesta mecánica de la formación clástica ante los cambios térmicos detectados en todo su perfil, pues las variaciones de temperatura que afectan al conjunto de la capa activa y al techo del *permafrost*, -éste actuando como base helada en plano inclinado-, suponen pérdida de cohesión.

### 5. Enseñanzas asumidas en estos últimos años

Los trabajos más recientes realizados hasta ahora han permitido asumir logros de interés sobre la evolución glacial histórica de Sierra Nevada. También nuestras investigaciones han asentado conocimientos preliminares de su reciente deglaciación, bien documentada en el Corral del Veleta y cuya manifestación morfológica más significativa es la formación reciente de su talud detrítico y demás modelados asociados, buen

reflejo, todo ello, de la morfodinámica de laderas paraglaciaras, en las que predominan los procesos controlados por la nieve y la fusión de lechos helados y *permafrost* residual en el seno de la fracción mineral (Church et al., 1972; Rapp et al., 1988; Christiansen, 1998).

La particularidad topográfica del Corral del Veleta, su altitud y su adecuada orientación han debido ser factores determinantes para que el pequeño glaciar histórico de la PEH mantuviera restos hasta mediados del siglo XX. Y estos mismos factores son los que aún contribuyen al mantenimiento de *permafrost* alpino y discontinuo en el seno de su tercio más oriental y cuyo origen podría estar asociado a la eficaz protección que han venido haciendo los paquetes de rocas desprendidas de la pared del Corral, a los aludes de nieve recientes y a las masas heladas residuales del glaciar histórico de la PEH.

La deglaciación del glaciar histórico y su reclusión paulatina hacia oriente supuso, al tiempo, la formación del talud detrítico que corre adosado a la pared del circo del Corral, lo que explica su juventud y desigual dinamismo de procesos fríos y modelados resultantes que lo caracterizan, producto, siempre, de la desestabilización del sustrato de la pared rocosa que continuamente tiende a desmoronarse por descompresión y gelifracción.

De todos los modelados que singularizan el talud detrítico, los que vienen a dominar su mitad este, sobre todo los arcos yuxtapuestos y cordones lobulados que finalizan en glaciar rocoso, son los de mayor significado ambiental. Por ello, han venido siendo motivo de monitorización sistemática desde 1999. Los controles térmicos y topográficos llevados a cabo han venido a mostrar inestabilidad generalizada en todo el complejo detrítico, muy significativo en el cuerpo del glaciar rocoso, que ha venido evidenciándose en movimientos planares (avance) y verticales (hundimiento, cabeceo, vuelco). Los controles realizados también parecen confirmar inestabilidad del lecho helado (techo del *permafrost*) en el que se asienta el glaciar rocoso, reflejada en la merma de su volumen, lo que podría avalar su degradación, que igualmente parece estar apoyada por la existencia de pozos de piedra (asimilables a *culottes de glace mort*, -Tricart et al, 1967; Washburn, 1979-) abiertos en los márgenes adyacentes del referido glaciar rocoso.

Toda esta inestabilidad del glaciar rocoso y del resto de la formación clástica del talud se explica por la imbricación de diferentes procesos, aunque controlados, particularmente y en primer lugar, por la permanencia de la cubierta nival –irregular durante los estíos y en el espacio-, pues su presencia debe determinar el ritmo de las temperaturas internas del suelo, grado de cohesión de la formación sedimentaria y, por tanto, su movilidad y variabilidad de volumen. Parece lógico admitir, por tanto, que los principales movimientos de avance y hundimiento detectados tienen lugar, sobre todo, durante los meses centrales del verano (finales de julio-comienzos de septiembre), que es cuando la cobertura de nieve en el seno del Corral se restringe al máximo (tabla 5), y la radiación y su onda expansiva hacia el interior de la masa clástica debe ser máxima.

Tabla 5. Comparación de valores.

|                   | Grado de recubrimiento<br>nival* | movimiento<br>planar* | movimiento<br>vertical** | Temperaturas a -190 cm |      |      |     |
|-------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------|------|------|-----|
|                   |                                  |                       |                          | Tme                    | TM   | tME  | At  |
| Periodo 2001-2002 | parcialmente                     | 8,1                   | -23,1                    | -4,3                   | -3,2 | -2,1 | 2,2 |
| Periodo 2002-2003 | libre                            | 12,6                  | -33,6                    | sd.                    | sd.  | sd.  | sd. |
| Periodo 2003-2004 | parcialmente                     | 4,26                  | -13,1                    | sd.                    | sd.  | sd.  | sd. |

\* Se hace referencia a la última semana de agosto; *parcialmente*: lomo del glaciar rocoso desprovisto de nieve, rebordes con nieve; *libre*: ausencia de nieve; \*\*valores medios (cm)

Sin embargo, y ante la información térmica tan dispersa y poco sistemática de que disponemos para los periodos de control topográfico, el ritmo de penetración e intensidad de la radiación en el suelo aún resulta poco preciso (tabla 4) por lo que se hace necesario un mejor control –probablemente monitorizando más puntos del glaciar rocoso y no sólo en el que se viene haciendo- y más tiempo de observación. Lo que parece claro 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 cuenta que a tal profundidad la temperatura siempre es negativa aunque sin lograr la amplitud de cero anual (*ZZA*, *zero annual amplitud*) –véase periodo 1999-2000/2001-2002 (tabla 4)-.

## 6. Hacia nuevas metas

Ante los logros asumidos, lo que ahora interesa y en esa línea queremos fijar metas, es en dilucidar con mayor profundidad cómo se llevan a cabo los acontecimientos actuales y como éstos se han sucedido a lo largo del tiempo y, a partir de ello, vislumbrar la dinámica reciente de la configuración del paisaje de cumbres de Sierra Nevada y su evolución, que debería ser, para más adelante, punto de referencia para determinar las líneas maestras de la morfodinámica de las montañas de esta parte occidental mediterránea. Para asumir estos retos se ha programado un plan de actuación pluridisciplinar que incluye diferentes líneas de actuación:

### 1. Establecimiento de una cronoestratigrafía glaciar y periglacial pleistocena más precisa.

Al conocimiento relativo que se tiene de los sucesos glaciares y periglaciares pleistocenos de la Sierra sería oportuno completarlos con dataciones más ajustadas ( $^{14}\text{C}$  AMS, radiación cósmica  $^{32}\text{Cl}$ -, etc.) a partir de los registros ya seleccionados en formas sedimentarias y erosivas de diferentes enclaves (avances máximos de morrenas en fondos de valle (Poqueira, Dílar, Siete Lagunas), superficies erosivas en altiplanicies y circos (Lanjarón, Dílar, Panderero y Allana del Mulhacén), etc.).

## 2. Análisis de la variabilidad climática tardiglaciár-holocena a partir de archivos paleoecológicos

Resulta aún también una incógnita en el devenir biofísico de las cumbres de Sierra Nevada la reconstrucción de la evolución paleoclimática durante el tránsito Tardiglaciár-Holoceno, a pesar de la reciente información que se tiene de la formación de los borreguiles de la Sierra, que son posteriores a  $1.210 \pm 100$  BP. Para cubrir esta laguna se preveen análisis geoquímicos y polínicos en sedimentos lacustres (circos de la Hoya del Mulhacén y Río Seco y lagunillas de la Virgen). También análisis edafo-sedimentológicos en lóbulos de gelisoliflución (cabecera del barranco de San Juan).

## 3. Monitorización térmica del suelo-subsuelo y de la cubierta nival del Corral del Veleta

La experiencia acumulada confirma la relación entre la temperatura del suelo-subsuelo y cubierta nival, evolución física del *permafrost* alpino y dinámica de procesos. Dado el interés del tema se desea profundizar en su conocimiento particular, sobre todo, en lo relativo a la inestabilidad del suelo (binomio proceso-forma) y degradación del *permafrost* subyacente. Para ello, se proyecta establecer una red de sensores UTL estandarizados cubriendo sectores significativos de cumbres (área del Veleta -Corral y cima del Picacho-, Hoya del Mulhacén y San Juan). Los resultados obtenidos podrían, además, contribuir a determinar mejor el significado ambiental de las modificaciones del clima en las montañas mediterráneas.

## 4. Control y seguimiento de procesos morfogénicos y modelados asociados

Sobre todo centrado en la evolución morfológica del talud detrítico del Corral del Veleta (sectores central y oriental) y, particularmente, del glaciár rocoso de la lagunilla del Corral. De él interesa su origen y génesis evolutiva. Asimismo, y por su estrecha relación con la degradación del *permafrost*, el control sistemático de su morfotopografía y pérdida de volumen por lo que se continuaran utilizando técnicas fotogramétricas digital y GPS.

## 5. Reconstrucción histórica del paisaje a través de fuentes documentales de época.

Línea de investigación utilizada recientemente en la historia del pensamiento geográfico y, en particular, en la influencia del naturalismo del siglo XIX. En semejante línea se desea analizar la literatura de época (libros de viajeros y científicos) que referida a Sierra Nevada comenzó a publicarse a partir de mediados del siglo XVIII. Estudios preliminares han puesto de relieve su utilidad, sobre todo por la meticulosidad de las descripciones que se ofrecen del paisaje de cumbres, muy en especial en aquellas obras procedentes de comisionados ilustrados e investigadores románticos centroeuropeos. En tal sentido, los trabajos de botánicos, geólogos y geógrafos (especialmente de la segunda mitad del siglo XIX) están llamados a ser puntos de referencia obligados.

## Agradecimientos

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. Nuestro agradecimiento igualmente a David Serrano Giné, Jordi Martínez Lastre y Lara Carme Barbero por su buen hacer en la parte gráfica, y a Ana Serrano Monje por su eficaz labor topográfica.

## Referencias bibliográficas

- BIDE, F. (1893). Excursions à la Sierra Nevada. Deuxième excursion dans la Sierra Nevada. *Annuaire du Club Alpin Français*, vol. XX. Paris.
- BOISSIER, C. (1839). *Voyage botanique dans le midi de l'Espagne pendant l'année 1837*. Gide et Cie. Paris. Versión castellana en C.E. Boissier « Viaje botánico al sur de España durante el año 1837 ». Fundación Caja de Granada y Universidad de Málaga. Granada.
- CHURCH, M. y RYDER, JM. (1972). Paraglacial sedimentation: consideration of fluvial processes condicionated by glaciation. *Bulletin of the Geological Society of America*, 83: 3050-3072.
- CHRISTIANSEN, H.H. (1998). Nivation forms and processes in unconsolidated sediments in Greenland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 751-760.
- ESTEBAN AMAT, A. (1996). Evolución del paisaje nevadense durante los últimos 1500 años a partir del análisis polínico de borreguiles. In J. CHACÓN MONTERO y J.L. ROSÚA CAMPOS (Eds.) *1ª Conferencia Internacional Sierra Nevada*. Universidad de Granada-Sierra Nevada 96. Granada, vol 4, pp. 251-273.
- GARCÍA SAINZ, L. (1947). *El clima de la España cuaternaria y los factores de su formación*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valencia. Valencia.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; SCHULTE, L. y SALVADOR FRANCH, F. (1996). Contribución al conocimiento de la deglaciación reciente y morfología asociada del Corral del Veleta (Sierra Nevada). *Cadernos Laboratorio Xeologico de Laxe*, 21: 543-558.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, D.; RAMOS SAINZ, M.; SCHULTE, L.; SALVADOR FRANCH, F. y TANARRO GARCÍA, LM. (1999). Degradación de *permafrost* en Sierra Nevada y repercusiones geomorfológicas: el caso del Corral del Veleta. Resultados preliminares. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 27: 7-22.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, D.; RAMOS SAINZ, M.; TANARRO GARCÍA, LM.; SCHULTE, L. y SALVADOR FRANCH, F. (2001). Location of *permafrost* in marginal regions: Corral del Veleta, Sierra Nevada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12: 93-110.

- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, D.; LUENGO NICOLAU, E.; TANARRO GARCÍA, LM.; SCHULTE, L. y 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*, 85A-2: 165-182.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, D. y RAMOS SAINZ (Coord.) (2004). *Permafrost*, evolución de formas asociadas y comportamiento térmico en el Corral del Veleta (Sierra Nevada, España). Últimos resultados. *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural* (Sección Geología), 99 (1-4): 47-63.
- HELLMANN, G. (1881). Der südlichste Gletscher Europa's. *Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde*, 16: 362-367.
- MADOZ, P. (1849). Sierra Nevada. In *Diccionario Geográfico-Estadístico-Histórico de España y sus posesiones en ultramar*. Madrid, tomo XIV, pp. 379-386.
- OBERMAIER, H. (1916). Los glaciares cuaternarios de Sierra Nevada. *Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales* (Geología), 17: 1-68.
- 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*, 25-30. Granada.
- QUELLE, O. (1908). *Beiträge zur Kenntnis der spanischen Sierra Nevada*. Tesis doctoral. Universidad Friedrich-Wilhelm. Berlin.
- RAMOS, M.; GÓMEZ ORTIZ, A.; SALVADOR, F. y SCHULTE, L. (1998). Evolución térmica de la capa activa en la estación geomorfológica de la planicie de La Feixa-La Màniga, 2150 m (macizo de Calmquerdós. Pirineo Oriental). *Procesos biofísicos actuales en medios fríos*. Servei de Paisatge de la Universitat de Barcelona, pp. 74-97.
- RAMOS, M.; GÓMEZ, A.; PALACIOS, D.; TANARRO, LM.; CRESPO, F. y BRETÓN, L. (2002). Método térmico para el estudio de la distribución de permafrost en Sierra Nevada. In E. SERRANO y A. GARCÍA DE CELIS (Eds.). *Periglacialismo en montañas y altas latitudes*. IPA-Departamento de Geografía de la Universidad de Valladolid. Valladolid, pp. 91-124.
- RAPP, A. y NYBERG, R. (1988). Mass movements, nivation processes and climatic fluctuations in northern Scandinavian mountains. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 42: 245-253.
- SAN JOSÉ BLASCO, J.J. (2003). *Estimación de la dinámica de los glaciares rocosos mediante modelización ambiental y técnicas fotogramétricas automáticas*. Tesis doctoral. Escuela Técnica Superior de Topografía y Geodesia. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia (inérita).
- SANZ DE GALDEANO, C. y LÓPEZ GARRIDO, A.C. (1999). Nature and impact of the Neotectonic deformation in the western Sierra Nevada (Spain). *Geomorphology*, 30-3: 259-272.

- SCHULTE, L. (2002a). Climatic and human influence on river systems and glacial fluctuations in southeast Spain. *Quaternary International*, 93-94: 85-100.
- SCHULTE, L. (2002b). Aplicación del método de datación Pb210 a la determinación cronológica de procesos geomórficos. *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del tercer milenio*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid, pp. 483-490.
- SCHULTE, L. (2002c). *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*. Servei de Paisatge-Publicacions de la Universitat de Barcelona. Barcelona.
- SCHULTE, L.; MARCOS GARCÍA-BLANCO, J. DE; GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, D.; TANARRO GARCÍA, LM.; FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, A. y RAMOS SAINZ, M. (2002). Evolución glacial y periglacial del circo del Mulhacén (Sierra Nevada, Península Ibérica). *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del tercer milenio*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Madrid, pp. 491-499.
- SOLÉ SABARÍS, L. (1942). 2ª Reunión de Estudios Geográficos. *Estudios Geográficos*, 9.
- TANARRO, L.M.; HOELZE, M.; GARCÍA A.; RAMOS M.; GRUBER, S.; GÓMEZ, A.; PIQUER, M. y PALACIOS, D. (2001). Permafrost distribution modelling in the mountains of the Mediterranean: Corral del Veleta, Sierra Nevada, Spain. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 55: 253-260.
- TERRADAT LTD y ETH. (1998). Geophysical survey report. *Permafrost Investigation Veleta & Mulhacén. Sierra Nevada*. PACE. Unpubli. Report.
- TORRES PALOMO, M.P. (1967-1968). Sierra Nevada en los escritores árabes. *Miscelanea de Estudios Árabes y Hebraicos*. Vol. XVI-XVII: 57-88.
- TRICART, J. y CAILLEUX, A. (1967). *Le modelé des regions periglaciaires*. SEDES. Paris.
- WASHBURN, AL. (1979). *Geocryology. A survey of periglacial processes and environments*. E. Arnold. London.

