

## **Permafrost, evolución de formas asociadas y comportamiento térmico en el Corral del Veleta (Sierra Nevada, España). Últimos resultados**

### **Permafrost, evolution of associated landforms and thermal control in the Veleta Cirque (Sierra Nevada, Spain). New results**

**Antonio Gómez Ortiz<sup>1</sup>, David Palacios Estremera<sup>2</sup> y Miguel Ramos Sainz<sup>3</sup>**  
*Coordinadores*

**Albert Casas Ponsati<sup>4</sup>, José J. Sanjosé Blasco<sup>5</sup>, Ferran Salvador Franch<sup>1</sup>, Lothar Schulte<sup>1</sup>, Luis M. Tamarro García<sup>2</sup>, Alan Atkinson Gordo<sup>5</sup>, Sebastián Sánchez Gómez<sup>6</sup>, Josefina C. Tapias Pantebre<sup>7</sup>, José J. Zamorano Orozco<sup>8</sup>, Pau Tomé Dessy y Ana Serrano Monje<sup>9</sup>**  
*Investigadores*

*1. Área de Geografía Física y Servei de Paisatge (Universitat de Barcelona). 2. Departamento de AGR y Geografía Física (Universidad Complutense de Madrid). 3. Departamento de Física (Universidad de Alcalá de Henares). 4. Departamento de Geoquímica, Petrología y Prospección geológica Universidad de Barcelona). 5. Escuela Politécnica (Universidad de Extremadura). 6. Departamento de Edafología y Química Agrícola (Universidad de Almería). 7. Departamento de Productos naturales, Biología vegetal y Edafología (Universidad de Barcelona). 8. Departamento de Geografía (Universidad Nacional Autónoma de México). 9. Escuela Técnica Superior de Topografía y Geodesia (Universidad Politécnica de Cataluña).*

**PALABRAS CLAVE:** Capa activa, Modelados, Nieve, Monitorización procesos, *Permafrost*, Sierra Nevada.

**KEY WORDS:** Active layer, Landforms, Snow, Monitorized processes, *Permafrost*, Sierra Nevada.

#### RESUMEN

Se presentan los datos de las campañas 2001 y 2002 en Sierra Nevada acerca de los procesos y formas de modelado asociadas al *permafrost* que alberga el Corral del Veleta (Sierra Nevada, España). Para ello se analizan y discuten los resultados de los controles realizados del comportamiento térmico de la capa activa (Tablas IV y V), recubrimiento nival del suelo y dinamismo del glaciar rocoso y talud detrítico (Tabla II). Los resultados permiten afirmar que la morfodinámica que define al Corral es la propia de un enclave recientemente deglaciado de montaña, por lo que procesos y formas están controlados por la eficacia del hielo y de la nieve en el suelo. El *permafrost* que aún conserva el Corral se encuentra recluido en su extremo más oriental y en proceso de degradación, a juzgar por los valores térmicos del suelo y los colapsos que afectan al glaciar rocoso (Figura 2). La cima del picacho del Veleta no alberga *permafrost* profundo (Figura 5).

#### ABSTRACT

We present new results of our field work undertaken during summer 2001 and 2002 in Sierra Nevada. The study focuses on processes and landforms associated to permafrost in the Veleta cirque, particularly the thermal monitoring of the active layer, the pattern of snow cover and the dynamics of the rock glacier and slope debris (Table II). The present morphologic dynamics are characteristic for recent deglaciaded mountains controlled by periglacial and nival environments. The thermal variability, detected in the debris layers, which overlie the frozen masses, shows the degradation of the existing fossil permafrost (Table IV and V).

#### 1. INTRODUCCIÓN

El Corral del Veleta, circo del antiguo glaciar del Guarnón (Sierra Nevada), alberga masas heladas (*permafrost*) en su mitad orien-

tal bajo escombros detríticos cuya existencia se interpreta como restos del pequeño glaciar que se desarrolló durante la Pequeña Edad del Hielo y que ha venido manteniéndose, aunque en lento proceso de regresión, hasta

bien entrado el siglo XX (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 1999). La existencia de estas masas heladas se debe al efecto de aislante térmico que hace la propia masa detrítica suprayacente favorecido, sobre todo, por la particular morfotopografía del Corral y adecuada orientación a los flujos húmedos y vientos atlánticos.

En la actualidad, la nieve permanece en el seno del Corral durante la estación fría y perdura, en menor medida y de manera irregular, durante el resto del año pudiendo casi desaparecer en los meses centrales del verano. Los estudios realizados hasta el presente ponen de relieve relaciones de interdependencia entre manto nival, régimen térmico local del suelo y *permafrost* subyacente con repercusión en los procesos y formas de modelado desencadenantes (RAMOS *et al.*, 2002; GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2003).

degradación del *permafrost* del Corral del Veleta, por lo que se mostrarán resultados del control térmico del suelo, reparto espacial del manto nival en el tiempo, procesos y formas desencadenadas y distribución del *permafrost*. Las conclusiones que se ofrezcan podrán tener interés ambiental en el debate abierto acerca del denominado cambio climático.

## 2. MARCO GEOGRÁFICO Y CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

Sierra Nevada fue afectada por el glaciario cuaternario y constituyó el foco más meridional de Europa. Sin embargo, el relieve que labraron los hielos sólo ha dejado huellas significativas en los tramos más ele-

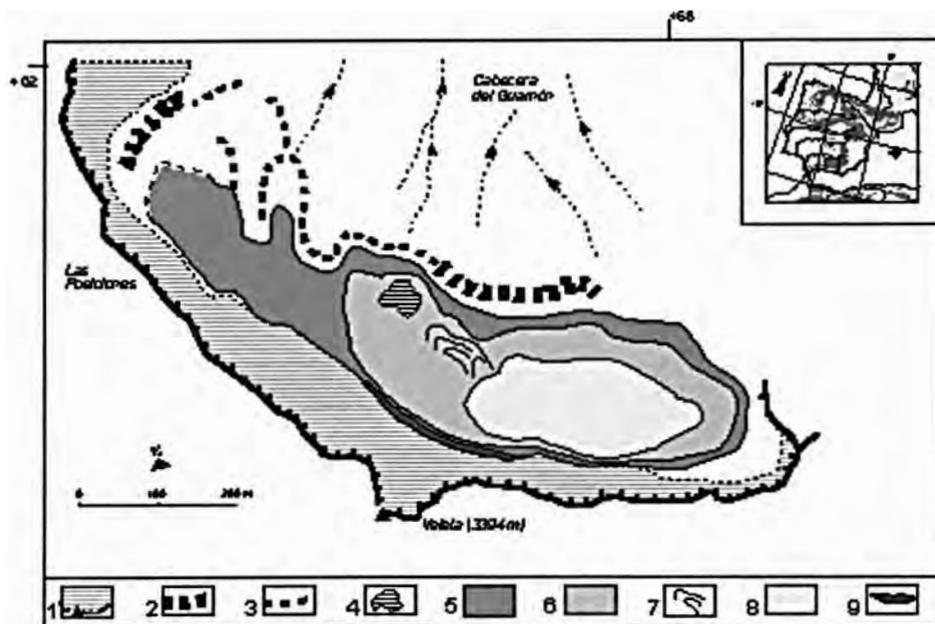


Fig. 1.—Evolución de la masa helada del glaciar histórico del Corral del Veleta: 1. Pared del Corral y picacho del Veleta; 2. Morrenas tardiglaciales; 3. Morrenas holocenas; 4. Actual laguna; 5, 6, y 8. Masa helada y retroceso a partir de mediados del siglo XIX; 7. Actual glaciar rocoso en formación; 9. Placas de hielo en 1995.

—Evolution of the frozen masses of the historical glacier of the Veleta cirque: 1. Cirque wall; 2. Late Glacial moraines; 3. Holocene moraines; 4. Present lagoon; 5, 6 and 8. Frozen body and glacier retreat after the second half of the 19<sup>th</sup> century; 7. Active rock glacier; 9. Firm patches in 1995.

El objetivo del presente artículo es mostrar los resultados obtenidos durante las campañas de 2001 y 2002 en el seguimiento de la

vados de la montaña, pues los glaciares, algunos de valle con recepción de emisarios, no consiguieron alcanzar las depresiones que

rodean al macizo (OBERMAIER, 1917; GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2002). De entre los más importantes sistemas glaciares el Guarnón fue uno de ellos y con seguridad de los que posee mayor interés paleoclimático y geomorfológico, particularmente porque en su cabecera, en el Corral del Veleta, durante la Pequeña Edad del Hielo (PEH), se desarrolló un pequeño glaciar, hoy desaparecido (Fig. 1). Este hecho explica que tal reducto, en la actualidad, albergue formas de modelado frío muy recientes y otras en proceso de elaboración.

El Corral del Veleta configura un cuenco elipsoide labrado en micasquistos grafitosos. Su longitud se estima en 600 m y en 175-250 m su anchura media. El edificio rocoso está muy fracturado y afectado por una tectónica reciente (SANZ DE GALDEANO *et al.*, 1999), lo que supone una alta vulnerabilidad a su fragmentación por procesos mecánicos. Abierto al norte y limitado por una potente pared vertical cuyo desnivel supera los 300 m, está presidido por el picacho del Veleta (3.396 m) y delimitado por el cerro de los Machos y los tajos del Campanario. Su interior se encuentra colmado por una amalgama de formas de origen glaciar y periglacial entre las que destacan, por su significado geomorfológico y paleoclimático, diferentes generaciones de morrenas, algunas pertenecientes al Tardiglacial. Otras son holocenas y las más recientes de la PEH. Destaca, asimismo, el prolongado talud detrítico que corre de este-oeste al pie de la pared, cuya elaboración, que aún continúa en el sector central y oriental, debió de iniciarse apenas comenzó a retroceder el glaciar histórico de la PEH, una vez ya recluido en el seno del Corral.

En la actualidad, el Corral del Veleta, en su mitad más oriental, a partir de la lagunilla y hasta el declive del cerro de Los Machos, –incluyendo también el sector del talud adyacente a la pared–, mantiene *permafrost* profundo (TERRADAT-LTD & ETH, 1998), aunque posiblemente discontinuo, de espesor variable y en proceso de degradación.

La configuración topográfica y la orientación del Corral del Veleta propician que el clima general de la montaña sufra en este enclave modificaciones significativas, particularmente en el mantenimiento prolongado de temperaturas muy bajas, lo que supone suelos helados durante la larga estación fría. También en el mantenimiento de la nieve, que puede permanecer en el interior del cuenco de

un invierno a otro. Sin embargo, durante estos últimos años la cobertura del manto nival viene resultando discontinua en el tiempo, sobre todo durante los meses pre y post nivales, pudiendo llegar a faltar en su totalidad en verano, como ocurrió en 1995, o en proporción muy acusada tal como sucedió durante 1999, 2000, 2002, que tan sólo perduraron pequeños neveros aislados. Estas condiciones topoclimáticas, contempladas en el proceso de deglaciación reciente del Corral, favorecen que la morfogénesis fría de alta montaña domine muy particularmente el enclave con predominio de procesos periglaciares, nivales y nivoperiglaciares.

### 3. MATERIAL Y MÉTODOS

En lo fundamental los materiales y métodos de trabajo empleados han sido los mismos que en anteriores ocasiones hemos venido utilizando conjunta o separadamente en la Antártida (Shetland del Sur), Pirineo Central y Oriental (Argüelas y macizo de Calmquerdós, respectivamente) y Sistema Central (Sierras de Gredos y Guadarrama).

#### 3.1. Control del movimiento del glaciar rocoso e inmediaciones

El control de desplazamiento (movimiento de avance y variación de volumen) se hizo a partir del seguimiento de puntos fijos (14 varillas metálicas instaladas en la superficie del glaciar rocoso e inmediaciones: 5, en el glaciar rocoso; 5, en coladas de bloques cordadas; 4, en lenguas de flujo) a través de diferentes técnicas geodésicas: topografía clásica, Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y fotogrametría de objeto cercano. El periodo de control abarcó desde septiembre de 2001 a septiembre de 2002. El método de trabajo se ajustó al empleado por SANJOSÉ *et al.*, (2002) y SANJOSÉ (2003) (Fig. 2).

El sistema de control a través de topografía clásica se realizó con una estación total, tipo Topcon GTS-502E (sensibilidad 90cc, aumentos 30X, apreciación 10cc). El margen de error máximo en la determinación tridimensional (X, Y, Z) de las varillas fue de +/- 3 cm. En cuanto al GPS los controles se obtuvieron a partir de la captación de las señales

codificadas de 3-4 satélites coincidentes en órbita. La exactitud de la localización precisa de las varillas ha mantenido rangos de  $\pm 3$  cm en su componente horizontal y de  $\pm 4$  cm en su componente vertical. Y en cuanto a la variación de las varillas a través de fotogrametría el cálculo se elaboró a partir de fotografías digitales oblicuas tomadas con cámara semimétrica Rolleiflex 6008 a una

ger modelo *Tiny-talk* y *Thermistor probe* instalados en el seno de dos sondeos que, posteriormente, éstos fueron entubados con PVC y sellado su contacto con el exterior.

Un sondeo se realizó en roca madre (micasquistos grafitosos, en el picacho del Veleta (3380 m), y cubrió 114,5 m de profundidad. En él se depositó una cadena de 30 termistores NTC (*negative temperature coeffi-*



Fig. 2.—Talud detrítico del Corral del Veleta (sector central/oriental). Localización del sondeo en glaciar rocoso y fijación de los testigos metálicos para su control.

—Debris talus of the Veleta cirque (central and eastern sector). Location of the rock glacier core and metal control bars.

distancia inferior a 300 m y siempre desde el punto más alto de la morrena frontolateral del Corral, que se dispone a mayor altura que el glaciar rocoso. Las varillas fueron identificadas a partir de señales sobre el terreno (banderas de color blanco y negro de 1m<sup>2</sup>). Las fotografías obtenidas se escanearon a una resolución de 20 micras. Los resultados obtenidos por esta técnica fotogramétrica han supuesto un margen de error de  $\pm 8$  cm.

### 3.2. Control térmico

Se ha realizado utilizando sensores térmicos autónomos y automáticos tipo *datalog-*

*cient thermistor*) de tipo Yellow Spring Instruments YSI44006, según procedimientos estandar de PACE. Los sensores se calibraron en el VAW (Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie) del ETH. Su precisión absoluta se sitúa en los  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$  y su resistencia es de  $2,95 \times 10$  W, a  $0^{\circ}\text{C}$ .

El otro sondeo se ejecutó en el interior del Corral del Veleta (3.107 m), sobre manto detrítico de fracción de bloques —frente de glaciar rocoso— y alcanzó 1,90 m de profundidad. En éste se instalaron 5 sensores tipo *Tiny-talk*, calibrados en el Departamento de Física de la Universidad de Alcalá de Henares, de rango  $-35^{\circ}\text{C}/+70^{\circ}\text{C}$ . Quedaron fijados

en superficie y en el seno de la perforación. Estos últimos a -15 cm, -40 cm, -90 cm y -190 cm, coincidiendo el más profundo con el techo de la masa helada (*permafrost*).

Los datos obtenidos de las diferentes campañas (para el picacho del Veleta, 2001 y 2002; para el Corral del Veleta, 1999-2000 y 2001-2002) fueron tratados estadísticamente, de acuerdo con la metodología ya ensayada por nosotros en la Antártida, Pirineo Oriental y también en Sierra Nevada (Ramos, 1995; Ramos et al. 1998, 2002). Igualmente se tuvieron en cuenta principios teóricos y experiencias de ISAKSEN *et al.* (2001) y HARRIS *et al.* (2003) para áreas alpinas con *permafrost*.

### 3.3. Control del manto nival

Se ha determinado a partir de fotografías oblicuas y verticales secuenciadas en el tiempo y obtenidas desde los mismos puntos de observación (mirador de la vereda del Corral—que permite una visión oblicua general del Corral— y picacho del Veleta—desde donde se tiene una visión vertical general del Corral— y misma fecha (15 de septiembre), tal como ha venido realizándose desde 1998. La metodología empleada ha seguido el protocolo ensayado en el Sistema Central por PALACIOS *et al.* (1997) y DE MARCOS *et al.* (2003).

Todas las fotografías han sido rectificadas o transformadas geoméricamente usando un programa de transformación de imágenes, el CAD MicroStation y su módulo Descartes. A continuación se digitalizó el contorno del área ocupada por la nieve para cada fotografía. Los contornos obtenidos han sido visualizados conjuntamente sobre la fotografía de 1998 y se ha entresacado, para cada año de estudio, la localización y extensión de la cubierta nival. La corrección de las imágenes oblicuas se ha obtenido a partir de la visión comparada de las tomas verticales. Minimizados los errores se ha obtenido una cartografía de recubrimiento nival sobre base topográfica 1/10000 de la Junta de Andalucía para el 15 de septiembre de los años de estudio (2001, 2002).

Además de estos controles anuales y con la finalidad de observar la tendencia de la nieve a concentrarse y perdurar más tiempo en aquellos sectores más favorecidos por las condiciones topoclimáticas, se ha llevado a cabo el solapamiento de las cinco cobertu-

ras de que se dispone (1998-2002) a través de tratamiento informático dentro de un SIG. El resultado se ha plasmado en una cartografía de síntesis acumulativa del dominio nival en verano (Figs. 3 y 4).

### 3.4. Control de los procesos-formas

Paralelamente al control del manto nival se han analizado y cartografiado, también a escala 1/10000 y 1/5000, modelados del talud detrítico del Corral asociados a flujos de fusión de nieve y reptación. La definición de los procesos y formas resultantes se ha realizado tomando como base la información procedente de técnicas fotogramétricas y monitorización del movimiento de bloques testigo, adaptando la metodología propuesta por SOUTADÉ (1980) y RAPP & NYBERG (1988). A través del contraste de imágenes de años contiguos se han detectado las variaciones geomorfológicas del talud. Igualmente se han llevado a cabo análisis morfológicos y sedimentológicos de las formas nuevas y se han clasificado éstas de acuerdo a su origen determinándose el cometido del aporte de agua procedente de la fusión de la nieve, la plasticidad de la formación detrítica y con la degradación del *permafrost* subyacente.

### 3.5. Determinación de la superficie de *permafrost*

Se ha llevado a término a partir de resistividad eléctrica del subsuelo siguiendo el método electromagnético en el dominio de las frecuencias. El instrumento utilizado ha sido un conductivímetro Geonics modelo EM-31 dotado de dos bobinas, una transmisora y otra receptora situadas a una distancia de 4 m. El sector analizado corresponde al extremo oriental de la base del Corral, entre su lagunilla y el declive del Cerro de los Machos, pues es donde la variedad de procesos fríos adquiere mayor representatividad.

El procedimiento de adquisición de datos ha consistido en la realización de una malla tipo *Random walk* definida por perfiles longitudinales con intervalos de 5 m que ha cubierto toda la superficie del Corral. El número total puntos controlados fue de 1431. En cada uno de ellos se midió la conductividad eléctrica tanto en la configuración de



Fig. 3.—Evolución del manto nival en verano (1998-2002).  
—Evolution of the summer snow cover (1998-2002).

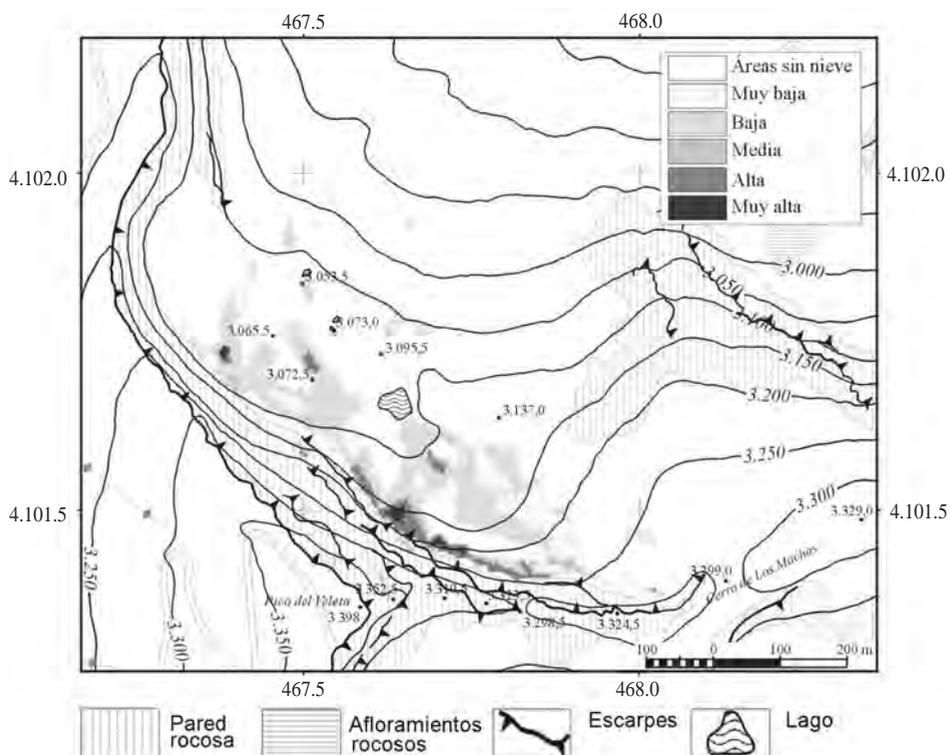


Fig. 4.—Duración temporal media de la nieve en verano (1998-2002).  
—Average summer snow duration (1998-2002).

dipolos horizontales como verticales correspondientes a profundidades de investigación de 3 y 6 m, respectivamente. Las coordenadas de las estaciones se han determinado por posicionamiento GPS. Los resultados fueron plasmados en un mapa de anomalías de conductividad aparente, sobre base topográfica a escala 1/1000.

lla, la 12, no ha ofrecido información, pues no se ha localizado en superficie (probablemente enterrada por invasión de material desplazado). Los valores máximos y mínimos de desplazamiento (en sentido de avance y hundimiento) para cada uno de los cuerpos sedimentarios han sido (Tabla III):

Tabla I.—Datos comparativos (topografía, GPS y fotogrametría).  
—Comparative data (topography, GPS, fotogrammetry).

Varilla	Topografía			G.P.S.			Fotogrametría		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
1	183,148	539,921	81,413	183,141	539,929	81,058	183,109	539,972	81,514
2	178,731	556,217	84,109	178,729	556,218	83,734	178,819	556,229	84,201
3	193,984	550,957	85,807	193,973	550,971	85,828	193,984	550,957	85,791
4	202,633	564,078	91,611	202,631	564,078	91,586	s.d.	s.d.	s.d.
5	218,055	568,805	98,015	218,060	568,797	98,022	218,056	568,708	98,015
6	160,966	508,142	75,337	160,989	508,137	75,344	s.d.	s.d.	s.d.
7	164,979	505,289	74,589	164,997	505,313	74,440	s.d.	s.d.	s.d.
8	168,618	499,559	72,619	168,614	499,562	72,613	s.d.	s.d.	s.d.
9	183,383	486,766	68,638	183,375	486,763	68,637	s.d.	s.d.	s.d.
10	177,981	485,410	68,535	177,963	485,398	68,540	s.d.	s.d.	s.d.
11	236,047	461,840	66,415	236,053	461,853	66,738	236,047	461,824	66,415
12	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.	s.d.
13	250,203	463,899	74,570	s.d.	s.d.	s.d.	250,238	463,899	74,575
14	267,594	475,780	82,765	s.d.	s.d.	s.d.	267,592	475,677	82,667

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. *Movimiento de la glaciación rocosa e inmediaciones*

Realizados los cálculos a través de cada una de las técnicas empleadas (topografía, GPS y fotogrametría) resultan los siguientes datos comparativos para la observación 2001-2002 (Tabla I):

Contrastadas y corregidas las mediciones de cada una de las varillas los desplazamientos detectados son (Tabla II).

En su conjunto, se detecta movilidad generalizada (desplazamiento horizontal y desplazamiento vertical) en todo el conjunto sedimentario (glaciación rocosa, coladas de bloques y lenguas de flujo) aunque diferenciada según tramos o puntos. Sólo una vari-

Tabla II.—Desplazamientos varillas.  
—Displacement of metal control bars.

Desplazamiento 2001-2002			
Varilla	Acimut	Distancia (horizontal, cm)	Desnivel (cm)
V1	166,307	6,100	-23,800
V2	205,771	2,200	-18,100
V3	208,579	23,800	-53,100
V4	240,617	25,500	-53,800
V5	245,248	55,900	-72,700
V6	194,556	3,500	-14,200
V7	186,079	5,500	-24,200
V8	216,950	4,500	-12,500
V9	182,086	13,300	-15,000
V10	194,049	6,400	-24,600
V11	290,625	21,100	-1,300
V12	s.d.	s.d.	s.d.
V13	259,859	16,900	-0,000
V14	284,134	40,100	-7,400

#### 4.2. Control térmico

a) Picacho del Veleta. Las observaciones resultaron puntuales pues el sistema de registro continuo previsto no llegó a funcionar correctamente por deficiencias técnicas

Tabla III.—Desplazamientos máximos/mínimos.  
—Maximum and minimum displacements.

Cuerpo Sedimentario	Desplazamiento (cm) 2001-2002	
	Horizontal	Vertical
Glaciar rocoso (varillas 6, 7, 8, 9, 10)	13,300/3,500	-24,600/-12,500
Coladas de bloques (varillas 1, 2, 3, 4, 5)	55,900/2,200	-72,700/-18,100
Lenguas de flujo (varillas 11, 12, 13, 14)	40,100/16,900	-7,400/0,000

(falta de alimentación de energía a través de placa solar). Por ello las tomas tuvieron que

realizarse manualmente y durante el estío de 2001 (8-IX, a las 12:00 h. GTM) y 2002 (27-VIII, a las 12:00 h. GTM).

Ninguno de los registros mostró valores negativos, pues todos se fijaron por encima de los 2,15°C, lo que supone admitir la inexistencia de *permafrost*. Hecho que quedó corroborado el 27 de agosto de 2002 al encontrar agua a partir de -80 m en el interior del sondeo. El rango de observación en el año 2001 alcanzó un tramo de 100 m y se detectaron tres secciones térmicas (Fig. 5): de 0 a 0,8 m la temperatura se fijó entre 9,85°C y 10,80°C; de 0,8 m a 13 m entre 10,80°C y 2,30°C; y por último, a partir de los 13 m los valores se situaron de manera uniforme en torno a 2,15°C. Por lo que se refiere a 2002 la distribución térmica varió poco respecto al año anterior: en la sección de 0-1,20 m se fijó entre 7,40°C y 9,65°C; entre 1,20-13 m se situó en el rango 9,65°C y 2,45°C y ya por debajo de los 13 m la temperatura quedó establecida en 2,25°C.

Los perfiles térmicos de ambos controles (Fig. 5) a partir de -1,20 m resultan casi

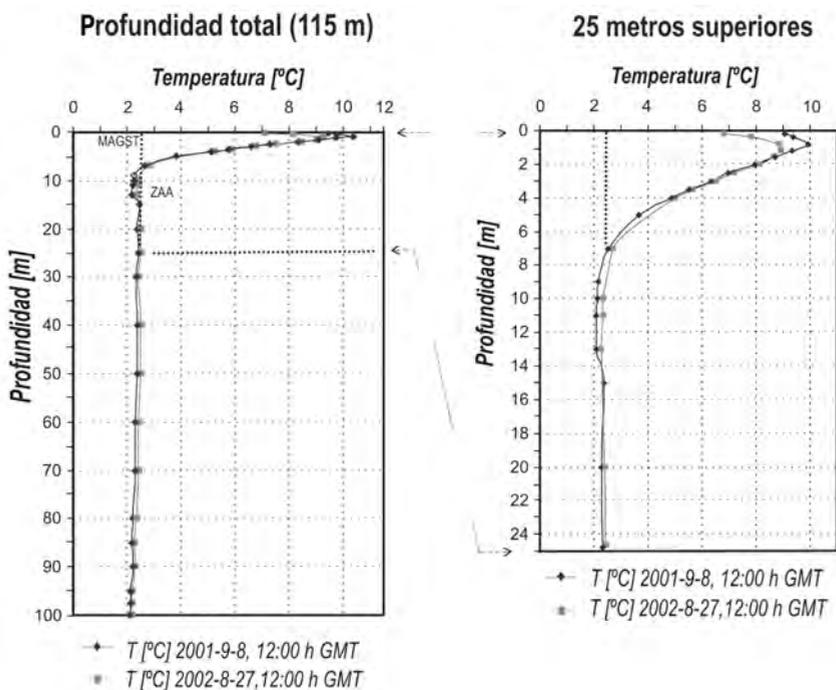


Fig. 5.—Estructura térmica en el seno del picacho del Veleta (3.380 m).  
—Thermal structure of the Veleta peak (3.380 m).

idénticos, pues la diferencia entre 0,05°C y 0,20°C no es significativa pues podría deberse a errores de calibración o al rango de precisión del propio sensor. Por debajo de 7 metros las variaciones térmicas son aún limi-

monitizados del proyecto PACE realizados en áreas de montañas europeas con *permafrost* (ISAKSEN *et al.*, 2001, HARRIS *et al.*, 2003). En nuestro caso el gradiente térmico de -0,004°C m<sup>-1</sup> entre los -20 y -100 m

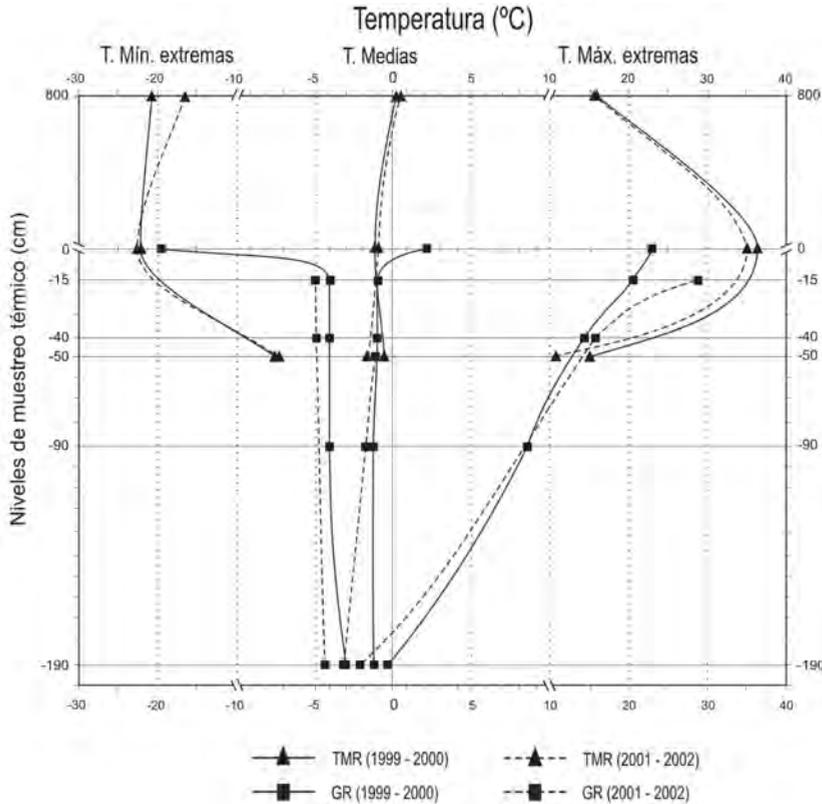


Fig. 6.—Estructura térmica en la TMR (3.095 m) y en el seno del glaciar rocoso del Corral del Veleta (3.107 m).  
—TMR thermal structure (3.095 m) and thermal profile of the Veleta rock glacier (3.107 m).

tadas situándose en torno a los 2,45°C. La amplitud cero anual (ZAA, *zero annual amplitud*), no alcanzada por la onda térmica desde superficie, se sitúa en los -20 m. A partir de este nivel no se registran variaciones de temperatura significativas. A profundidades de entre -9 y -14 m y por debajo de los -90 m, se observan depresiones térmicas en torno a los 0,2°C, probablemente debidas a corrientes de agua subterránea.

Llama la atención que en la parte inferior del sondeo no se registra ningún incremento de temperatura por gradiente geotérmico, tal como sucede en otros sondeos

incluso es negativo. Extrapolaciones de los valores de temperatura por debajo de la ZZA, sitúan la temperatura media anual superficial del suelo para el entorno del Veleta alrededor de 2,6°C (MAGST, *mean annual ground surface temperature*). Los sensores colocados por encima de la ZZA, más cercanos a la superficie, muestran variaciones intra-anales. Estas alcanzan 10,80°C a -0,80 m (2001) y 9,65°C a -1,2 m (2002).

b) Corral del Veleta. Las observaciones térmicas se realizaron mediante sensores autónomos tipo *Tiny-talk* en el seno de la

perforación abierta en el glaciar rocoso (GR) en la cota 3.107 m. Los niveles muestreados térmicamente fueron 0, -15, -40, -90 y -190 cm, este último en el techo de la masa helada, *permafrost*. Los datos obtenidos corresponden al período de noviembre-agosto de las campañas de 1999-2000 y 2001-2002. No hay datos del período intermedio (2000-2001), pues los sensores no pudieron recuperarse debido al espesor que presentaba la capa de nieve durante el verano de 2001.

Con objeto de contrastar los datos del Corral del Veleta se han tenido en consideración aquellos otros térmicos de la torre meteorológica de referencia (TMR) instalada, años antes, en la loma del Veleta a 3.095 m (observaciones de 1999-2000/2001-2002), con registros a +7,5 m (aire), 0 cm (superficie) y -50 cm (subsuelo).

Los registros térmicos obtenidos (Tabla IV, Fig. 6) permiten apuntar algunas ideas preliminares, que será necesario perfilar en el

mico semejante entre las dos periodos analizados, que se manifiesta tanto en los valores medios como en los valores extremos alcanzados en cada nivel. Destaca que la temperatura media siempre ofrece valores negativos en los niveles de subsuelo, con tendencia a decrecer, aunque no se alcanza, ni en el nivel más profundo muestreado (-190 cm), la estabilización térmica (ZAA) por lo que resulta detectable la influencia térmica externa. Las medias anuales son ligeramente positivas a nivel del aire (TMR-TA) e incluso ligeramente superiores (+2,2 °C) a nivel 0 cm en el glaciar rocoso, a pesar de su particular posición topográfica en el seno del Corral.

Acerca de las temperaturas extremas señalar que resultan significativas y, en consecuencia, la amplitud alcanzada en cada nivel controlado (Tabla V, Fig. 7). La amplitud térmica es elevada hasta -50 cm y a partir de esta profundidad decrece bruscamente, tanto en la TMR como en el GR. Los valores máximos coinciden a nivel de suelo (medias cercanas a 30° y extremas cercanas a 60°C, respectivamente). Los mínimos se sitúan a -190 cm, en el techo del *permafrost*, que ofrece valores medios de 0,5°C y extremos de 2,3°C. Estos valores de las capas más profundas reflejan que la ZAA no se alcanza en el balance anual, aunque sí en algunos meses preferentemente situados en otoño y primavera.

Tabla IV.-Temperaturas extremas y medias (TMR 3.095 m y GR 3.107 m).

-Maximum, minimum and average temperatures (TMR 3.095 m and GR 3.107 m).

	TMe TM tME (1999-2000)			TMe TM tME (2001-2002)		
<b>TMR (3095 m)</b>						
TA	-20,7	0,4	15,9	-16,5	0,2	15,7
0 cm	-22,2	1,3	36,5	-22,3	-1,1	35,1
-50 cm	-7,5	-0,8	15,0	-7,3	-1,7	10,7
<b>GR (3107 m)</b>						
0 cm	-19,6	2,2	23,0	sd.	sd	sd
-15 cm	-4,0	-1,1	20,6	-5,0	-1,3	28,9
-40 cm	-4,0	-1,1	14,2	-4,9	-1,8	15,7
-90 cm	-4,0	-1,4	8,4	sd.	sd.	s.d.
-190 cm	-3,1	-1,5	-0,6	-4,3	-3,2	-2,1

TMR (torre meteorológica de referencia), GR (glaciar rocoso), TMe (temperatura mínima extrema), TM (temperatura media), tME (temperatura máxima extrema)

Tabla V.-Amplitudes térmicas mensuales y extremas (TMR 3.095 m y GR 3.107 m).

-Monthly thermal amplitudes and extreme temperatures (TMR 3.095 m y GR 3.107 m).

<b>TMR (3095 m)</b>							
TA	36,6	13,0/27,5	19,3	32,2	15,6/24,2	20,0	
0 cm	58,7	17,4/42,4	27,3	57,4	20,8/40,1	29,5	
-50 cm	22,5	0,5/12,1	4,2	18,0	0,1/12,5	4,0	
<b>GR (3107 m)</b>							
0 cm	42,6	18,3/32,97	24,2	sd.	sd.	sd.	
-15 cm	24,6	0,0/20,7	3,0	33,9	0,2/30,4	6,5	
-40 cm	18,2	0,0/13,9	2,3	20,6	0,0/18,1	3,8	
-90 cm	12,4	0,0/8,5	1,7	sd.	sd.	sd.	
-190 cm	2,5	0,0/2,1	0,5	2,2	0,0/1,2	0,4	

TMR (torre meteorológica de referencia), GR (glaciar rocoso), A.ex. (amplitud extrema), A.ex.m (amplitudes extremas máximas y mínimas mensuales), A.m.m. (amplitud media mensual)

#### 4.3. Variabilidad del manto nival y dinámica geomorfológica

a) Control año 2001. En el año 2001 se detectó una situación parecida a la de 1998 (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2003), pues la cubierta

futuro ante mayor riqueza de datos. Se observa, en primer lugar, un comportamiento tér-

de nieve mantenía un 60% respecto a la superficie analizada. Su extensión mínima dominaba el fondo del sector oriental del Corral, salvo su contacto con los rebordes de la pared y algunos conos de gravedad. En el sector occidental la nieve permanecía en las áreas

en cuyo descenso atrapó un estrato de nieve de 3-4 m de espesor, que se mantenía protegido del deshielo.

b) Control año 2002. La cubierta nival fue muy reducida, similar a la del año 2000

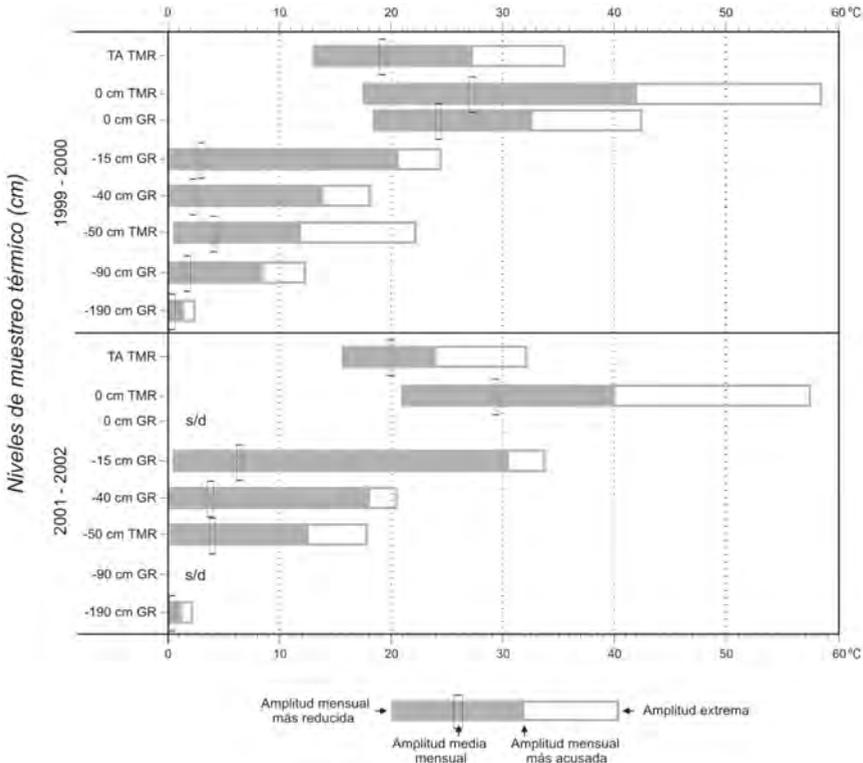


Fig. 7.—Amplitudes térmicas, medias y extremas, en la TMR (localizada a 3.095 m) y en el seno del glaciar rocoso del Corral del Veleta (localizado a 3.107 m).

—Average thermal amplitude and extremes at TMR (3.095 m) and on the Veleta rock glacier (3.107 m).

más deprimidas, entre conos de gravedad, o entre bloques procedentes de avalanchas.

Las áreas libres de nieve del sector occidental no ofrecían cambios en su modelado. Sin embargo, en el sector oriental, en el inicio de los conos de gravedad, aparecieron deslizamientos superficiales con longitudes medias entre 6 y 8 m y anchuras entre 3 y 5 m. En realidad, estas nuevas formas eran flujos con lóbulo frontal de 30-40 cm de altura y *levées* muy difuminados en sus márgenes. El sector central del Corral estaba ocupado por una gran avalancha de cantos y bloques

(GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2003). En el sector oriental del Corral sólo se conservó en las áreas más protegidas de la base de la pared y el talud y por lo que respecta a los sectores central y occidental se mantuvo en los ápices de los conos de gravedad. La situación fue idónea para el desarrollo de deslizamientos, aunque no sucedieron en la magnitud de los acontecidos en el año 2000. Sin embargo, la morfodinámica que afectó al talud fue importante detectándose dos tipos de movimientos diferenciados por su origen, formas resultantes y localización espacial.

Un primer tipo podría clasificarse como caótico, pues corresponde a desajustes en la trabazón de bloques, pequeños colapsos y flujos sin una forma definida. Esta mezcla de procesos-formas predominó en el sector oriental del talud, entre éste y las proximidades del glaciar rocoso. Igualmente afectó al sector central, desarticulando la avalancha de rocas acaecida en 2001.

El segundo tipo de movimientos resultó más nítido y con resultados morfotopográficos más definidos. Ahora se trató de flujos de materiales que dieron lugar a lenguas compuestas por bloques envueltos en abundante matriz limo-arcillosa muy plástica, procedente de la descomposición del substrato. Su instalación siempre coincidió con el frente de neveros de fusión tardía. De estos flujos se analizaron tres. Dos, en los márgenes del ápice del cono de gravedad mayor del sector central del talud. Y el tercero, junto al nevero que colma una oquedad bajo cornisa del sector occidental. Tanto en un caso como en otro la topografía local afectada por estos flujos coincidió con depresiones construidas en el propio talud detrítico, generalmente en el contacto entre conos u otras acumulaciones de material.

La morfología que presentaron los flujos fue similar a la descrita para otros casos en estas mismas áreas durante los veranos de 1998, 1999, 2000 y 2001 (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2003). Siempre se trató de lenguas de longitud considerable, de 20 a 50 m y anchura entre 8 y 15 m (Fig. 8). Sin embargo, su espesor fue reducido, pues la remoción y desplazamiento de material sólo afectó a los niveles superiores del talud (en torno a 1 m). Las lenguas incluyeron varios lóbulos intermedios y un gran lóbulo frontal arqueado. Los bloques mayores se apilaban en los frentes y los finos se concentraban en los núcleos. La pendiente que ofrecían no era excesiva, entre 7 y 12°, pues los diferentes flujos de material tendieron a colmar los fondos de las depresiones ya referidas.

#### 4.4. Superficie de *permafrost*

Los valores de conductividad medidos han sido, como era de esperar teniendo en cuenta las anteriores prospecciones geofísicas realizadas (TERRADAT LTD & ETH, 1998), bajos, con resultados entre 5 y 3 miliSie-

mens/m (mSm/m). Sin embargo, se ha puesto de manifiesto la existencia de suficiente contraste, sobre todo, en la configuración de dipolos horizontales sobre zonas con probable presencia de *permafrost* en el subsuelo, que ofrecen conductividades nulas. La extensión de estas zonas de muy baja conductividad tiene una extensión aproximada de 2500 m<sup>2</sup>. Todo el *permafrost* detectado es profundo y se desconoce si es continuo o irregularmente repartido en bolsas o placas.

Los resultados obtenidos ponen de relieve los deducidos por anteriores métodos y refuerzan la hipótesis planteada sobre el dominio areal del *permafrost* que tiende a concentrarse en el sector oriental del Corral, donde ofrece, además, mayor espesor. Esta zona incluiría el glaciar rocoso y su entorno y la concavidad adyacente al declive del cerro de los Machos. Igualmente se prolongaría por los declives del talud de ambos parajes. En su conjunto, podría estimarse una extensión en torno a 3.200 m<sup>2</sup>, en el supuesto de que el *permafrost* mantuviera continuidad.

## 5. DISCUSIÓN

La morfodinámica que caracteriza al conjunto a la unidad del Veleta es la propia de un espacio recientemente deglaciado que aún alberga, en el seno del Corral del Veleta (3.105 m) y en su sector oriental y talud contiguo, bolsas o placas de *permafrost* más o menos continuas a determinadas profundidades. Sin embargo, éste no parece probable que exista en las inmediaciones del picacho del Veleta (3.396 m), a juzgar por los controles térmicos realizados a través de sensores instalados en la perforación abierta a 3.380 m de altitud. Esta "inexistencia" de *permafrost* podría estar avalada por el gradiente térmico detectado por debajo de la ZZA, por la presencia de agua a partir de -80 m y por el efecto de pared del propio Corral, que supondría irradiación térmica hacia el interior del substrato. La penetración térmica de la onda externa, en sentido vertical, sólo afecta a los primeros 20 m, como ocurre en Tarfalarygen (Suecia) y Juvvasshoe (Noruega) (ISAKSEN *et al.*, 2001). Por debajo de tal cota las temperaturas se mantienen positivas.

Los acontecimientos térmicos en el seno del Corral del Veleta son diferentes, sobre todo

por el imperativo que supone su configuración morfotopográfica y orientación que han contribuido, en buena medida, al mantenimiento de *permafrost* profundo, herencia, como mínimo de la Pequeña Edad del Hielo (GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2001). Ello implica que los procesos morfodinámicos dominantes sean periglaciares y nivoperiglaciares, muy subordinados al binomio temperatura del suelo-cubierta nival del suelo que es, en definitiva, quien controla el grado de estabilización de la fracción sedimentaria, de manera muy acusada en el talud detrítico, construido, en origen, por la acumulación de escombros procedente de la destrucción mecánica de la pared del Corral, a la par que tenía lugar la deglaciación.

El resultado más significativo que muestra el seguimiento térmico de las capas profundas del glaciar rocoso del Corral del Veleto es, sin duda, que solamente a -190 cm (techo del *permafrost*) las temperaturas permanecen siempre con valores negativos, incluso en las extremas más elevadas, aunque próximas a los 0°C (-0,6°C máxima extrema). Este ritmo térmico permite plantear la hipótesis de que el grado de compacidad de la masa helada a la profundidad de -190 cm no debe ser permanente ni estable a juzgar por los valores que se han detectado en los niveles detríticos suprayacentes afectados, muy probablemente, por el efecto de la radiación externa (temperaturas máximas extremas positivas por encima de -90 cm). Este comportamiento térmico de las capas profundas del área del glaciar rocoso contribuye a explicar su merma de volumen, detectada por los resultados topográficos ofrecidos y que de nuevo más adelante tendremos en consideración.

Las observaciones y análisis llevados a término en el Corral del Veleto han puesto de relieve importantes movimientos de masa en su talud (colapsos, flujos y deslizamientos), aunque de tipología, entidad y frecuencia variables entre la mitad occidental y oriental del mismo. La morfodinámica resulta más activa cuando la cubierta nival desaparece del suelo, adquiriendo magnitud mayor en aquellas áreas con *permafrost* profundo y máximo desarrollo superficial cuando la fracción mineral desestabilizada, además, mantiene porcentajes muy elevados de finos. Por estos motivos los procesos desencadenantes suponen reordenación permanente de los modelados del talud.

La desestabilización de la fracción mineral se explica por la imbricación de tres componentes: la pendiente, la cubierta nival y la naturaleza física de la masa sedimentaria. Y de esta última interesa, particularmente, la capacidad de absorción de agua de fusión nival, muy supeditada a la granulometría. Así debió suceder en el sector occidental del talud con las lenguas construidas en 2001. Por las características que hemos descrito de ellas podrían tener su origen en flujos superficiales o epidérmicos (*skinflows*, según MCROBERTS *et al.*, 1974 y LEWKOWICZ, 1988; *sheet slides*, según Rapp, 1960) que son característicos de áreas pronivales (RAPP *et al.*, 1988; CHRISTIANSEN, 1998). Su formación está en relación con la persistente alimentación de agua desde un nevero superior, hasta alcanzar la saturación y liquefacción de la masa de sedimentos. La desestabilización de ella afecta sólo a un nivel muy superficial, ya que la riqueza de matriz fina impide una mayor permeabilidad pero, a cambio, le otorga una gran movilidad y capacidad de transporte, lo que facilita recorrer largos trayectos y movilizar gruesos bloques, incluso en pendientes escasas. A pesar de todo el talud detrítico de este sector occidental del Corral mantiene una relativa estabilidad, sólo alterada sustancialmente por los derrumbes de la pared o avalanchas ocasionales, como sucedió a mediados de la década de los setenta del siglo pasado.

El modelo de comportamiento en el sector oriental, en las inmediaciones de la lagunilla y glaciar rocoso fue distinto durante el periodo 2001 y 2002, pues ahora se trata de materiales detríticos de diferente calibre, siempre asentados sobre *permafrost*, tal como ya se había advertido (TERRADAT LTD & ETH, 1998; GÓMEZ ORTIZ *et al.*, 2001). y confirmado en 2002 a través de la auscultación de conductividad aparente.

En el conjunto del sector oriental y de éste su margen más occidental, se han determinado tres tipos de movimientos y sus correspondientes reordenamientos en los modelados originales y los tres detectados a partir del control topográfico y fotogramétrico. Junto a la pared del Corral, reptación afectando a una mezcolanza amorfa de coladas de bloques de cantos predominantemente pluridecimétricos envueltos en abundante matriz de arenas, gravas y limos. En el glaciar rocoso desplazamiento planar y hundi-

miento generalizado de la masa. Y colapsos y flujos en la avalancha de rocas y bloques ocurrida en el 2001. Todas estas formas de modelado han sufrido significativos movimientos en la horizontal y en la vertical, lo que pone de relieve el cometido del *permafrost* profundo, que dota a la masa supraya-

Respecto al glaciario rocoso los movimientos igualmente han resultado desiguales, lo que denota dinamismo diferenciado según zonas. Lo más destacado es el hundimiento generalizado que experimenta el conjunto del cuerpo sedimentario (entre -12,5 y -24,6 cm) y el modesto movimiento de avan-



Fig. 8.—Frente de flujo en forma de lengua cordada.

—Front of the ice-creep tongue.

cente capacidad migratoria al encontrarse saturada por absorción de agua nival y asentada sobre un lecho inclinado y, en gran medida, impermeable.

Los procesos de reptación se explican por la fusión de la capa de nieve suprayacente y posterior saturación de la masa detrítica. Se trata de movimientos rápidos y generalizados aunque desiguales según tramos, según se desprende de la estructura cordada de las coladas y de los avances detectados durante el periodo 2001-2002 a partir de los controles de las varillas (avance: entre 6,1 y 55,9 cm; desnivel: entre -18,1 y -72,7 cm). En la explicación de tal dinamismo debió influir la acusada pendiente, superior a 43°, sobre todo, la existencia de placas de *permafrost* en profundidad.

ce planar respecto a las coladas de bloques (entre 3,5 y 13,3 cm). Los primeros valores permiten pensar en dos causas. Una, la inestabilidad de la base, lo que equivaldría a decir hundimiento por degradación de *permafrost* —pozos de piedras cercanos (asimilables a *cultote de glace mort*, según TRICART *et al.*, 1967 y WASHBURN, 1979) permiten pensar en ello, como también los valores térmicos obtenidos en el sondeo, aunque aún esto último es pronto para tenerlo más en consideración—. La otra causa, que sería sumativa a la anterior, consistiría en la pérdida de volumen del conjunto de la masa, como respuesta a la fusión de nieves e hielos intersticiales, lo que supondría reajustes en el empaquetamiento y ajuste de los bloques. Los segundos valores suponen admitir desplazamiento planar que

podría explicarse, sobre todo, por el carácter impermeable de un substrato helado inclinado que soporta una carga dotada de cierta plasticidad. En cuanto a la distancia cubierta hay que señalar valores modestos (media de 6,5 cm), que respondería a estar asentada la zona controlada en pendiente poco acusada (en torno a los 13°), en comparación con aquellas otras de las coladas de bloques y avalancha (43° y 30°, respectivamente).

En cuanto a la avalancha de rocas y bloques ocurrida en el 2001 señalar su extraordinaria reordenación fruto de la combinación de movimientos rotacionales, flujos y colapsos afectando a escombro detrítico muy rico en finos y también asentado sobre lechos helados. En este caso los datos igualmente resultan significativos, pues ofrecen desniveles de entre -1,30 cm y -7,40 cm.

## 6. CONCLUSIONES

Por lo que respecta al picacho del Veleta, y a la luz de los datos obtenidos, no existe *permafrost* en su seno. Solo en los primeros 7 metros se detectan variaciones térmicas asociadas al flujo de radiación. Por debajo de ellos la temperatura tiende a mantenerse sin variaciones significativas, posiblemente debido a la influencia del flujo térmico irradiado a través de la pared del Corral, dadas sus características morfotopográficas. La falta de datos diarios no permite detectar un seguimiento térmico de los procesos hielo/deshielo del suelo, ni establecer conclusiones acerca de la profundidad de la influencia de las variaciones de temperatura estacionales inducidas desde superficie, particularmente para la estación fría, post y preñival.

En cuanto al Corral del Veleta los controles realizados durante las campañas de 2001 y 2002 parecen confirmar la tesis expuesta en trabajos previos acerca del dinamismo de procesos fríos y elaboración de nuevos modelados. En su conjunto el enclave ofrece dos sectores bien delimitados en cuanto al tipo de acontecimientos morfogénicos: oriental y occidental. El tránsito, entre uno y otro, que podría coincidir con el espacio del entorno oeste de la lagunilla, se define por la mezcolanza de procesos-formas que caracterizan los colindantes.

Somos de la opinión que la influencia del manto nival recubriendo el suelo resulta determinante en cuanto al tipo y magnitud de procesos-formas. El sector oriental del Corral, en el que ha sido confirmada la existencia de masas heladas en profundidad (*permafrost*), la ausencia de cubierta nival durante el estío implica desestabilización del talud, con resultados de remoción del paquete de sedimentos a través de deslizamientos y flujos. El sector occidental presenta mayor grado de estabilidad, pues carece de cuerpos helados profundos que generen desestabilización en la capa suprayacente, por lo que la morfodinámica es netamente nival. Así se desprende del análisis de los flujos y coladas habidas por sobresaturación del suelo frente a los neveros de fusión tardía (Fig. 9).

Los controles de movilidad del glaciar rocoso, colada de bloques y lenguas de flujo ponen de manifiesto migración planar, al tiempo que merma de volumen de la formación sedimentaria, muy destacable en el glaciar rocoso y que cada vez más atribuimos a la degradación del techo del *permafrost* subyacente en el que se asienta. Esta constatación vendría avalada por el comportamiento térmico de las capas profundas del suelo.

## AGRADECIMIENTOS

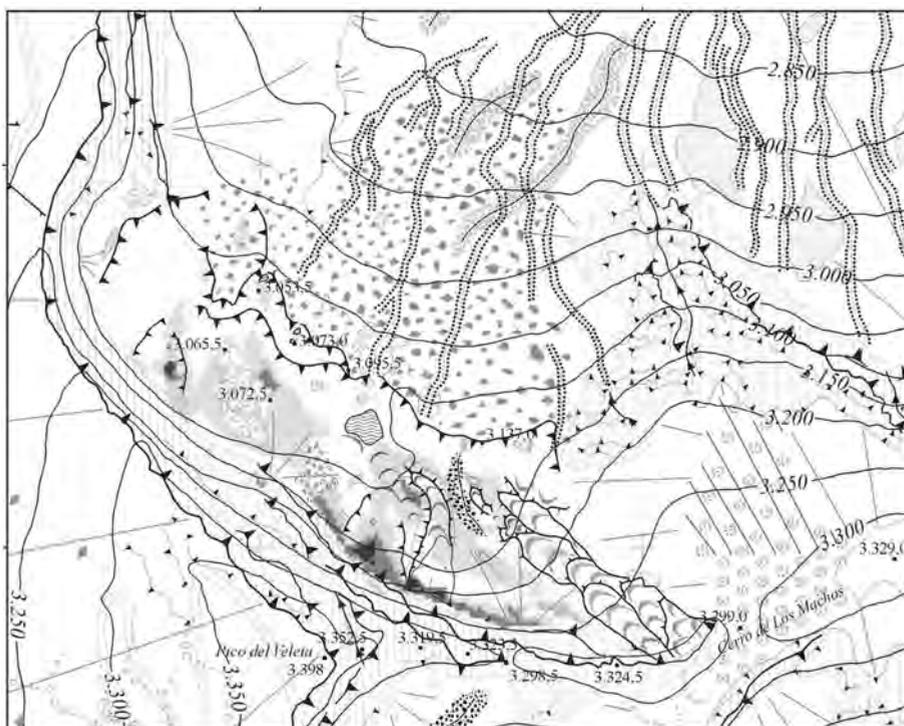
A los proyectos CICYT/BSO2000-0745 y BTE2001-5446-E del Ministerio de Ciencia y Tecnología y PACE (Permafrost and Climate in Europa), de la Unión Europea, ENV-CT97-0492. También al Parque Nacional de Sierra Nevada por su constante colaboración y a David Serrano Giné y Jordi Martínez Las- tre por su buen hacer en la parte gráfica.

*Recibido el día 10 de diciembre de 2003*

*Aceptado el día 30 de marzo de 2004*

## BIBLIOGRAFÍA

- CHRISTIANSEN, H. H. 1998. Nivation forms and processes in unconsolidated sediments in Greenland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 751-760.
- GÓMEZ ORTIZ, A., PALACIOS ESTREMER, D., RAMOS SAINZ, M., SCHULTE, L., SALVADOR FRANCH, F. & TANARRRO GARCÍA, L.M. 2001. Degradación de permafrost en Sierra Nevada y repercusiones geomorfológicas:



### LEYENDA

#### Permanencia de la nieve

	Áreas sin nieve
	Muy baja
	Baja
	Media
	Alta
	Muy alta

#### Sustrato rocoso

	Pared rocosa, Micasquistos
	Afloramientos rocosos

#### Formas estructurales

	Escarpes (> 25 m)
	Escarpes entre > 10 m y < 25 m)
	Escarpes (< 10 m)
	Canales

#### Formas y procesos exógenos

Formas glaciares y fluvio-glaciares	
	Cordones morénicos
	Ranpa morénica
	Depresiones por fusión de hielo fossil
Formas nivales	
	Nichos de nivación
Suelos estructurados	
	Círculo de piedras seleccionado
	Bandas de piedras seleccionadas

#### Laderas

	Grietas de deslizamientos
	Mudflow
	Cabeceera de debris flows
	Leyees y canales de debris flows
	Conos y taludes de gravedad
	Desprendimientos
	Desprendimientos en el 2001
	Deslizamientos superficiales
	Lóbulo con frente de piedras
	Cabeceera de arranque de la lengua de bloques
	Lengua de bloques activa por erosión-reptación
	Arcos activos por erosión-reptación
	Arcos inactivos por erosión-reptación
	Crestas pronivales
	Arcos indiferenciados
	Campo de bloques
	Lago



Fig. 9.—Dinamismo morfogenético del Corral del Veleta.  
—Morphogenetic dynamism of the Veleta cirque.

- el caso del Corral del Veleta. Resultados preliminares. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 27: 7-22.
- GÓMEZ ORTIZ, A., PALACIOS ESTREMEIRA, D., LUENGO NICOLAU, E., TANARRO GARCÍA, L. M., SCHULTE, L., RAMOS SAINZ, M. & SALVADOR FRANCH, F. 2002. Inestabilidad de taludes y cubierta nival en áreas marginales de *permafrost*. El caso de la pared norte del picacho del Veleta (Sierra Nevada, España). *Revista de Geografía*, 2º época, 1: 35-56.
- GÓMEZ ORTIZ, A., PALACIOS, D., LUENGO, E., TANARRO, L. M., SCHULTE, L. & RAMOS, 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., SCHULTE, L., GARCÍA NAVARRO, A. & PALACIOS ESTREMEIRA, D. 1999. Sobre la existencia de *permafrost* en Sierra Nevada. Significado geomorfológico y paleoclimático. In: *Avances en el estudio del Cuaternario español*, págs. 181-186. L. PALLÍ & P. ROQUÉ Eds. AEQUA-Universitat de Girona. Girona.
- HARRIS, C., VONDER MÜHLL, D., ISAKSEN, K., HAEBERLI, W., SOLLID, J. L., KING, L., HOLMLUND, P., DRAMIS, F., GUGLIELMIN, M., PALACIOS, D. 2003. Warming permafrost in European mountains. *Global and Planetary Change*, 39: 215-225.
- ISAKSEN, K., HOLMLUND, P., SOLLID, J. L. & HARRIS, C. 2001. Three Deep Alpine-Permafrost Boreholes in Svalbard and Scandinavia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12: 13-25.
- LEWKOWICZ, A. G. 1987. Headwall retreat of ground-ice slumps, Banks Island, Northwest Territories. *Canadian Journal Earth Science*, 24: 1077-1085.
- MARCOS GARCÍA-BLANCO, J. DE & PALACIOS ESTREMEIRA, D. 2003. Monitorización de la cubierta nival, régimen térmico del suelo y actividad geomorfológica en las cumbres de la Sierra de Guadarrama: primeros resultados. *El periglaciario en relación con otros procesos. VI Reunión IPA-España*. págs. 13-17. Resúmenes. La Granja-Segovia.
- MORBERTS, E. C. & MORGENSTERN, N. R. 1974. The stability of the thawing slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 11: 447-469.
- OBERMAIER, H. 1917. Los glaciares cuaternarios de Sierra Nevada. *Trabajos del Museo Nacional de Ciencias Naturales (Geología)*, 17: 1-68
- PALACIOS, D. & GARCÍA, M. 1997. The influence of geomorphologic heritage on present nival erosion: Peñalara, Spain. *Geografiska Annaler*, 79A (1-2): 25-40.
- RAMOS, M., GÓMEZ ORTIZ, A., SALVADOR, F. & SCHULTE, L. 1998. Evolución térmica de la capa activa en la estación geomorfológica de la planicie de La Feixa-La Màniga, 2.150 m (macizo de Calmquerdós, Pirineo Oriental). *Procesos biofísicos actuales en medios fríos*. págs. 74-97. Servei de Paisatge de la UB. Barcelona.
- RAMOS SAINZ, M. 1995. Automatic Decive to Measures the Active Permafrost Layer nears the Spanish Antarctic Station. *Terra Antartica*, 2: 61-63.
- RAMOS SAINZ, M., GÓMEZ ORTIZ, A., PALACIOS ESTREMEIRA, D., TANARRO, L. M., CRESPO, F. & BRETÓN, L. 2002. Método térmico para el estudio de la distribución de *permafrost* en Sierra Nevada. In: *Periglaciario en montaña y altas latitudes*. E. SERRANO & A. GARCÍA DE CELIS Eds., págs. 91-124. IPA-Departamento de Geografía de la Universidad de Valladolid. Valladolid.
- RAPP, A. 1960. Recent development of mountain slopes in Kärkevage and surroundings, Northern Scandinavia mountains. *Geografiska Annaler*. 42A (2-3): 1-199.
- RAPP, A. & NYBERG, R. 1988. Mass movements, nivation processes and climatic fluctuations in northern Scandinavian mountains. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 42: 245-253.
- SANJOSÉ BLASCO, J. J., LERMA GARCÍA, J. L. 2002. La fotogrametría digital: una herramienta idónea para el cartografiado y modelado de zonas de alta montaña. In: *Periglaciario en montaña y altas latitudes*. E. SERRANO & A. GARCÍA DE CELIS Eds., págs. 185-203. IPA-Departamento de Geografía de la Universidad de Valladolid. Valladolid.
- SANJOSÉ 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 (Inédita).
- SANZ DE GALDEANO, C. & LÓPEZ, A. C. 1999. Nature and impacte of the neotectonic deformation in the western Sierra Nevada, Spain. *Geomorphology*, 30: 259-273.
- SOUTADÉ, G. 1980. *Modelé et dinàmique actuelle des versants supraforestiers des Pirénées Orientales*. Imp. Coopérative du Soud Ouest. Albi (France).
- TERRADAT-LTD & ETH 1998. *Geophysical survey repért. Permafrost Investigation Veleta & Mulhacén, Sierra Nevada*. PACE. Report.