

PROCESOS PERIGLACIARES ACTUALES EN SIERRA NEVADA. DISTRIBUCIÓN Y MORFOMETRÍA DE LOS LÓBULOS DE SOLIFLUXIÓN*

Marc Oliva**, Antonio Gómez Ortiz***, Lothar Schulte*** y Ferran Salvador***
Universidad de Barcelona

RESUMEN

El macizo de Sierra Nevada se alza en las Cordilleras Béticas con los picos más elevados del conjunto peninsular. En los cabeceras de los altos circos occidentales, por encima de los 2.500 m, hay una amplia variedad de formas periglaciares activas e inactivas. Entre ellas destaca la existencia de centenares de lóbulos de solifluxión, cuya distribución y morfometría centra el interés del presente estudio.

Palabras clave: distribución, lóbulos de solifluxión, morfometría, periglaciario, topografía.

ABSTRACT

The massif of Sierra Nevada in the Betic Range holds the highest peaks in the Iberian Peninsula. In the headwaters of the high western cirques, above 2500 m, there is a wide range of active and inactive periglacial features. We studied the distribution and morphometry of hundreds of solifluction lobes present in these valleys.

Key words: distribution, morphometry, periglaciario, solifluction lobes, topography.

1. INTRODUCCIÓN

Desde finales de la Pequeña Edad de Hielo (PEH), el aumento gradual de temperatura ha liquidado los últimos focos glaciares que permanecían en enclaves aislados de Sierra Nevada (GÓMEZ ORTIZ et al., 2005), proclives por altura a un incipiente desarrollo glaciar cuando las condiciones climáticas lo permiten. Al pie de los taludes verticales del Veleta y Mulhacén, en sus vertientes septentrionales, todavía hoy restan bolsas de *permafrost* alpino y masas de hielo fosilizadas por el dinamismo de los procesos periglaciares, que han abocado una abundante masa de clastos encima, que las aísla y previene de una fusión más acelerada (GÓMEZ ORTIZ et al., 2002; SCHULTE et al., 2002). La rápida degradación de estos vestigios del glaciario europeo más meridional se percibe en los continuos

* Fecha de recepción: 26 de mayo de 2009.

Fecha de aceptación: 11 de septiembre de 2009.

** Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional i Servei de Gestió i Evolució del Paisatge. E-mail: oliva_marc@yahoo.com

*** Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universidad de Barcelona.

hundimientos y grietas que asedian los taludes detríticos que las recubren, demostrando la sensibilidad de los procesos geomórficos que acontecen hoy a Sierra Nevada a la señal climática regional y global.

Los lóbulos de soliflucción, geliflucción o gelisoliflucción son depósitos de vertiente ligados a movimientos lentos de un suelo que contiene elevados contenidos de agua y suelen caracterizarse por una forma lobular de dimensiones muy variables. Estas geoformas son registros sedimentarios característicos de ambientes periglaciares de altas latitudes y de montañas elevadas de latitudes medias. Su génesis puede estar vinculada a la existencia de *permafrost* o de suelo estacionalmente helado, si bien se constatan también procesos solifluidales asociados a intensas lluvias en vertientes de montañas tropicales bajo regímenes térmicos no relacionados con valores negativos en el suelo.

La soliflucción se ha definido como el movimiento de suelo más extendido en regiones periglaciares (LEWKOWICZ, 1988; FRENCH, 1996; KINNARD & LEWKOWICZ, 2005 y MATTHEWS et. al., 2005). La pionera definición del término se limitaba al flujo lento, pendiente abajo, de una masa de suelo saturada de agua sobre un sustrato estacional o permanentemente helado (ANDERSON, 1906). Más recientemente, JACKSON (1997) entiende por soliflucción aquel flujo lento y viscoso pendiente abajo de suelo y otro material superficial indiferenciado sobresaturado, que puede alcanzar velocidades de 0,5 a 50 cm/año y está situado sobre un nivel de suelo helado. La geliflucción, por su parte, se limita al movimiento del terreno por deslizamiento sobre un suelo helado (WASHBURN, 1979). Actualmente, pero, se generaliza el uso del término soliflucción para movimientos de masa lentos relacionados con la acción del hielo-deshielo (BALLANTYNE & HARRIS, 1994; FRENCH, 1996).



Figura 1: Sucesión de lóbulos en el valle de San Juan.

Por lo que respecta a las montañas ibéricas, en Sierra Nevada, como en enclaves aislados de los Pirineos, la existencia de *permafrost* queda circunscrita a sectores muy marginales, legado de la PEH. Las altas cordilleras de la región mediterránea se caracterizan por la marginalidad de los enclaves afectados por movimientos solifluídales, hecho que explica porque no han captado la atención de la comunidad científica. En nuestro marco geográfico más inmediato, conviene mencionar los estudios referentes a la soliflucción de CREUS & GARCÍA RUIZ (1977), GÓMEZ ORTIZ (1980), CHUECA & JULIÁN (1995) y GARCÍA RUIZ et al. (2004) en Pirineo, GRIMALT & RODRÍGUEZ (1994) en las Islas Baleares, PALACIOS et al. (2003) en el macizo de Peñalara en el Sistema Central y GÓMEZ ORTIZ et al. (2005) en Sierra Nevada.

En el piso crionival de la Sierra, dónde se acomodan los lóbulos, no hay presencia de *permafrost*, pero los sensores térmicos instalados a diferentes profundidades constatan la existencia de una profunda capa helada estacional de entre 70 y 100 cm en alturas próximas a los 3.000 m en ambas vertientes del macizo (OLIVA et al., 2008). Cabe concebir, pues, la soliflucción en Sierra Nevada como un movimiento de suelo característico del cinturón periglaciario asociado a un horizonte estacionalmente helado.

El estudio de los lóbulos de soliflucción en la Sierra ha permitido una doble finalidad: caracterizar el dinamismo presente de los procesos periglaciares bajo el régimen climático actual y, a su vez, reconstruir la dinámica de vertientes de los últimos milenios en el piso supraforestal nevadense (OLIVA et al., *in press*). En este estudio se pretende poner de manifiesto las condiciones topográficas que condicionan la distribución de estas geoformas lobuladas e incidir en los factores geográficos que explican su morfometría.

2. ÁREA DE ESTUDIO

Sierra Nevada forma parte del apéndice suroccidental de la orla alpina que circunda el Mediterráneo y acoge las alturas más elevadas de la Península Ibérica (Mulhacén, 3.478 m y Veleta, 3.398 m). El macizo, por su latitud y altura, combina características propias de un macizo semiárido de medias latitudes con elementos propios del mundo subtropical. La singularidad geográfica de la Sierra queda patente en la combinación entre la poca cobertura vegetal que la reviste y la riqueza florística que en ella se desarrolla, con un gran número de especies endémicas especialmente acomodadas en el piso crionival (MOLERO MESA & PÉREZ RAYA, 1987). La temperatura media a 2.500 m es de 4,4 °C y la precipitación anual alcanza los 700 mm. Nuestra área de estudio se ubica por encima de esta cota en el extremo occidental del macizo (figura 2).

La escasa cobertura vegetal facilita la meteorización del sustrato micaesquitoso del complejo Nevado-Filabres, ya debilitado por la intensa erosión de las glaciaciones pleistocenas e incentiva la acción periglaciario en las cumbres de la Sierra. El periglaciario es, actualmente, el principal modificador del relieve de Sierra Nevada. Estimada la Línea de Equilibrio Altitudinal (ELA) entre los 3.600 y 3.700 m, todo el macizo por encima de los 2.500 m, área de nuestra investigación, permanece en el cinturón periglaciario actual; además, la poca cubierta vegetal de Sierra, acusada en los niveles culminantes, y el alto grado de tectonización de los esquistos, facilita la meteorización mecánica y la acción del periglaciario.

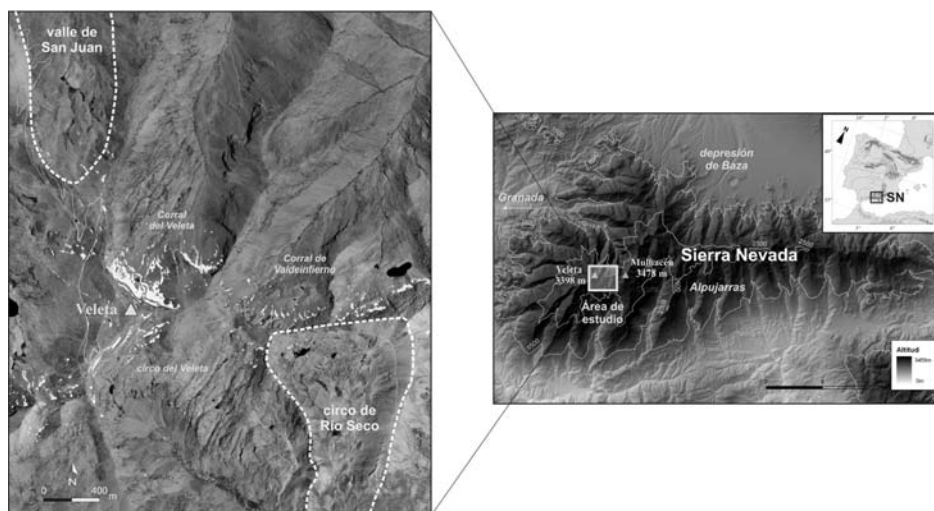


Figura 2: Localización del área de estudio en Sierra Nevada.

El aumento de temperatura estimado desde 1900 en $0,6^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2007) y la disminución de precipitaciones durante la primera mitad de siglo XX, explican la paulatina reducción del hielo en sectores topográficamente favorables de los altos circos septentrionales (ej. Corral del Veleta) y la actual degradación de las bolsas de hielo fósil y *permafrost* alpino todavía hoy existentes (GÓMEZ ORTIZ et. al., 1999, 2001).

3. DISTRIBUCIÓN DE LOS LÓBULOS DE SOLIFLUXIÓN EN SIERRA NEVADA

Los lóbulos de soliflucción en Sierra Nevada sólo se disponen en enclaves muy específicos, dónde la combinación de la topografía local y las condiciones microclimáticas (sobre todo disponibilidad de agua) lo permiten. Estas áreas reciben el nombre de *borreguiles*, localismo propio de la alta montaña semiárida andaluza que evidencia el alto grado de aprovechamiento ganadero de estos pastos húmedos de altura en un contexto regional escaso de agua. Los *borreguiles* se desarrollan en sectores por encima de los 2.000 m de altura, preferentemente en las cabeceras de barrancos y en zonas deprimidas de fondos de circo. La constante presencia de agua durante la estación cálida propicia un ambiente reductor que tiende a conservar la materia orgánica, siendo zonas especialmente útiles para el estudio de la reconstrucción paleoambiental y paleoclimática (OLIVA, 2009). Durante las últimas décadas ciertas actuaciones han dañado el estado original de algunos *borreguiles*: la proliferación de la ganadería ha contribuido a una excesiva nitrificación de los suelos, mientras que la construcción y las sucesivas ampliaciones de la estación de esquí han supuesto la remobilización de la capa superficial del suelo en determinados sectores. *Borreguiles* tales como los de San Juan, Guarnón, Río Seco y Siete Lagunas permanecen

todavía bien conservados, con una gran riqueza vegetal: hasta un 35% de las especies que se desarrollan son endémicas (MOLERO MESA & PÉREZ RAYA, 1987).

La estructura vegetal de los *borreguiles* se caracteriza por un centro con características turbosas y especies muy adaptadas a un alto contenido de agua, mientras que sus márgenes evolucionan hacia pastos de especies menos hidrófilas. Suelen ser enclaves de poca pendiente que permiten un drenaje más lento durante el deshielo y una mayor retención e infiltración paulatina en el suelo, promoviendo así el desarrollo edáfico. En zonas de pendiente entre 5 y 20° se desarrollan los lóbulos de soliflucción, mientras que zonas de pendiente inferior a 5° serán más proclives a la formación de turba.

Tabla 1: Resumen de los parámetros básicos de los valles en estudio.

PARÀMETROS BÀSICOS DE LOS VALLES EN ESTUDIO							
Valle	Altitud área de estudio (m)	Orientación	Superficie cuenca (km ²)	Vegetación (%)	Pendiente (%)	Altitud lóbulos (m)	Unidades
San Juan	2.474-3.040	N-NW	3,2	3,8	12,1	2.474-2.911	156
Río Seco	2.931-3.116	S	1,6	1,6	13,8	2.931-3.005	46

La zona de estudio yace en el sector occidental del macizo, concretamente en las cabeceras de San Juan y Río Seco, que vinieron actuando como circos glaciares durante las glaciaciones cuaternarias. Mientras en San Juan los lóbulos se asientan en un típico valle glacial, en Río Seco quedan restringidos a los escasos rincones vegetalizados de cabecera, ancho anfiteatro abierto a mediodía (tabla 1).

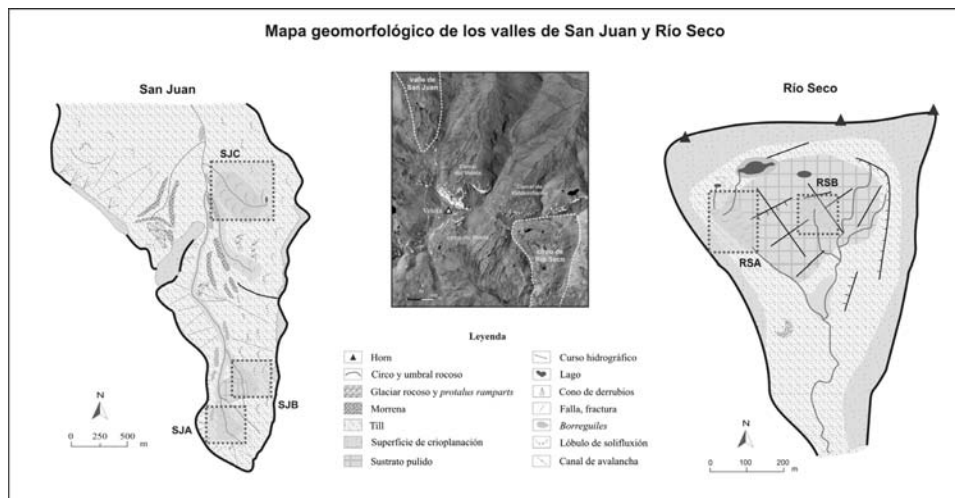


Figura 3: Mapa geomorfológico de los valles de San Juan y Río Seco.

3.1. San Juan

En el valle de San Juan encontramos unos *borreguiles* que se cuentan entre los mejor conservados de toda Sierra. Este valle orientado al N-NW tiene un perfil glacial suavizado por la acción del periglacialismo desde la desglaciación del macizo, con una cobertura vegetal escasa de sólo un 3,7% por encima de los 2.500 m. Los lóbulos se emplazan en tres sectores (SJA, SJB y SJC) en un rango altitudinal comprendido entre los 2.474 y 2.911 m, donde se distribuyen más de 150 lóbulos de solifluxión. Se trata de un valle relativamente estrecho, apoyado en la estructura tectónica general, que tiende a ensancharse aguas abajo; las vertientes están recubiertas de material proveniente de las crestas rocosas sobrestantes y en el fondo de valle se detectan numerosos restos morrénicos y glaciares rocosos relictos. Los sectores de estudio están escalonados en altura; SJA es el área de estudio emplazada a cota más elevada donde se han cartografiado 28 lóbulos de solifluxión, SJB es el sector intermedio y presenta 50 lóbulos y SJC es la parcela inferior con 78 unidades (figuras 3 y 4).

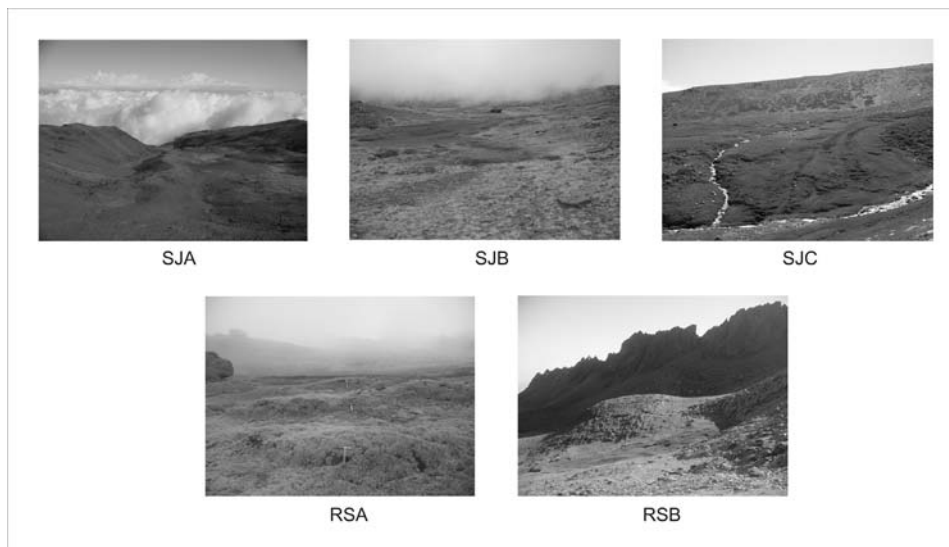


Figura 4: Detalles de los sectores que concentran los lóbulos estudiados.

Los lóbulos de SJA se disponen en dos sectores en el tramo superior del valle, entre 2.844 y 2.911 m: en el margen superior, enlazando el fondo de valle con la vertiente, donde restan los últimos neveros de la temporada, y en un sector más distal y llano, aprovechando la dispersión de agua en la confluencia de dos riachuelos. El sector SJB se emplaza inmediatamente por debajo de SJA y se caracteriza por la presencia de una densa cobertura vegetal, turbosa en la zona central. La elevada disponibilidad líquida en esta área es consecuencia de la intensa fracturación del sustrato y del roquedo y de la elevada porosidad de los depósitos de vertiente no estabilizados, que facilitan la circulación de agua profunda y su reaparición

en superficie. Los lóbulos se emplazan entre 2.787 y 2.843 m, próximos a los neveros de fusión tardía y adyacentes a la zona central turbosa saturada de agua.

En cotas inferiores, sin contigüidad geográfica con SJA y SJB, encontramos el sector SJC, con lóbulos situados entre 2.474 y 2.548 m. Es un sector topográficamente llano, un anfiteatro de suaves flancos, dónde el valle se ensancha orientándose al NW. Es un ámbito intensamente antropizado, en el cuál el hombre ha derivado y transportado las aguas para ampliar la superficie de pasto. Los lóbulos de soliflucción conectan los taludes de derrubios dónde permanecen las últimas manchas nivales y los suaves lomos colonizados por una vegetación cerrada que amortigua la dinámica de vertientes. Destaca la sucesión y encañamiento de lóbulos, de notable longitud y potencia, ubicados en una zona de marcada pendiente en la parte superior de SJC, en el flanco izquierdo del colector principal.

3.2. Río Seco

Río Seco es una ancha caja glacial de la vertiente meridional de Sierra Nevada enjaulada por los Crestones de Río Seco. El sustrato del circo, pulido y con numerosas estrías y acanaladuras glaciares, denota un flujo del glaciar en cabecera en dirección SW, posiblemente empujado por la transfluencia glacial desde el circo de Valdeinferno (GÓMEZ ORTIZ, 2002). Este vasto circo de cerca de 1 km de anchura en cabecera conecta suavemente las crestas rocosas con el fondo de circo gracias a la abundante masa de clastos que la acción del periglaciario ha depositado desde la deglaciación de la vertiente meridional de la Sierra. El fondo de circo permanece relativamente libre de materiales detríticos, aflorando recurrentemente el sustrato en superficie.

La cobertura vegetal a la cabecera de Río Seco es muy pobre, del orden del 2% de la superficie del circo por encima de los 2.800 m. La contundencia de la insolación en la cara sur del macizo, una menor permanencia de la nieve y una pendiente más elevada que en San Juan, se combinan para propiciar una escorrentía superficial más rápida, limitando la vegetación solamente a aquellos enclaves dónde la presencia líquida es más continuada durante la estación cálida.

Los lóbulos de soliflucción se emplazan en dos sectores vegetalizados (RSA y RSB) a la boca de las lagunas de Río Seco (figura 3); ambos son los escasos lugares de este circo que acogen vegetación y lóbulos, ya que por debajo de ellos, los rincones dónde se ha desarrollado una incipiente cobertura vegetal son sectores dónde la carencia de pendiente impide la formación de los lóbulos. El sector de RSA, de vocación meridional, destaca por tener una mayor extensión y un número de lóbulos sensiblemente superior a RSB (38 vs 8) entre 2.987 y 3.005 m. Aun así, RSA presenta una disponibilidad hídrica inferior, puesto que el nivel de la laguna de Río Seco durante los meses estivales no es lo suficientemente elevado como para drenar agua. Este hecho es fundamental para comprender el actual dinamismo de los lóbulos en uno y otro sector, y será decisivo para entender su actividad durante los últimos milenios, bien diferente en RSB que en RSA (Oliva, 2009). En el sector de RSA destaca una limitada intervención humana, con poca derivación de agua: sólo se ha detectado un canal antrópico en el margen inferior del área de estudio. Los lóbulos de RSA tienen una cobertura prácticamente total, aun cuando la vegetación presenta un grado de desecación notable ya a inicios de agosto (figura 4).

RSB es, por el contrario, un sector de dimensiones más restringidas con lóbulos emplazados entre 2.931 y 2.952 m, de notable potencia y tamaño. La vegetación (y los lóbulos) restan muy recortados por la topografía y el sustrato, que aflora rápidamente en ambos márgenes. Es una área con una orientación dominante E-SE, abierta al Mediterráneo y a sotavento de la influencia atlántica. RSB permanece ligado con la Lagunilla de Río Seco por un talud vertical intensamente diaclasado que permite el filtraje y escurrimiento del agua procedente de la laguna superior, implicando así una aportación extra de agua a los lóbulos en cuestión.

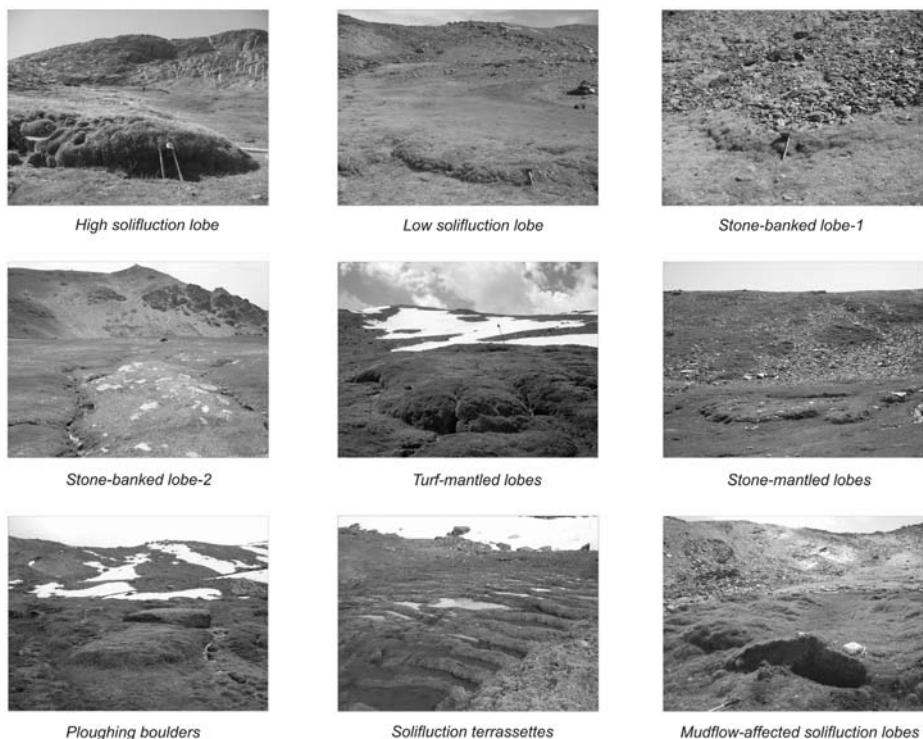


Figura 5: Tipologías solifluidales en Sierra Nevada (Oliva, 2009).

4. MORFOMETRÍA DE LOS LÓBULOS

Con la finalidad de clasificar los lóbulos de soliflucción de Sierra Nevada se ha procedido a realizar una catalogación de las características morfométricas y pedológicas que éstos presentan. Se han adaptado las propuestas previas de caracterización de las morfologías solifluidales (FRENCH, 1996; HUGENHOLTZ & LEWKOWICZ, 2002; MATSUOKA et. al., 2005) a las peculiaridades de la Sierra, asumiendo nuevas tipologías más específicas de lóbulos. Junto a su tipificación, se han medido una serie de variables relativas al emplazamiento (latitud, longitud, altitud, orientación, pendiente y recubrimiento vegetal) y

morfometría (longitud, anchura, potencia vertical, ángulo respecto a la pendiente, superficie, volumen y morfología) de cada lóbulo de los valles estudiados.

4.1. Tipologías solifluídales

La figura 5 muestra ejemplos de las diferentes tipologías solifluídales presentes en Sierra Nevada y la tabla 2 resume las principales características geométricas de cada una de ellas, pudiendo destacar dos grandes grupos de lóbulos en el macizo: los que presentan un recubrimiento mayoritario de vegetación (71,8%) y aquellos que sustentan una mayor proporción de gravas y rocas en su superficie (28,2%).

Entre los lóbulos vegetalizados encontramos los *high solifluction lobes* (HSL) y los *low solifluction lobes* (LSL), que suman entre los dos el 67% del total de lóbulos; la diferencia entre ellos es que los HSL tienen un frente igual o superior a los 80 cm, mientras que la potencia vertical de los LSL es inferior a este umbral. Destacan también los *turf-mantled lobes* (MST), que tienen una cobertura vegetal densa y unas dimensiones superiores, conectando las laderas inclinadas con los suaves fondos de valle. Los *mudflow-affected solifluction lobes* (MSL) son lóbulos donde su morfología irregular induce a considerar un comportamiento más anárquico, con numerosas protuberancias y peldaños en su frente, indicativos de diferentes fases de impulso y colapso en su desplazamiento; están mayoritariamente recubiertos de vegetación y engloban una matriz fangosa. Aquellos lóbulos con un elevado contenido de gravas se han clasificado atendiendo a la proporción de bloques que presentan en su superficie. Más de un 50% de gravas se corresponde con un *stone-banked lobe-1* (STL-1) y una relación inferior es el tipo *stone-banked lobe-2* (STL-2), el cuál representa un 58% de todos los lóbulos con presencia de rocas. Los *stone-mantled lobes* (MSS) son una tipología análoga a los MST pero con una significativa proporción de gravas liberadas por una dinámica de vertientes más activa. Los *ploughing boulders* (STL-block) son aquellos lóbulos que transportan un bloque de notables dimensiones que labra el terreno y deja la huella a su paso (bloques aradores). Las *solifluction terrassettes* (ST) son pequeñas terrazas de soliflucción que se disponen en pendientes de $\sim 10^\circ$ y configuran un tapiz de vegetación dispersa e irregular en pequeños peldaños.

En relación con la distribución geográfica de los lóbulos, las variables que se han contemplado son su latitud, longitud, altitud, orientación, pendiente y cobertura vegetal. Esta última ha sido concretada a partir de una estimación visual del porcentaje de recubrimiento de vegetación de la superficie de los lóbulos: muy alta (80-100%), alta (60-80%), moderada (40-60), baja (20-40%) y escasa (0-20%). Las variables geométricas consideradas son la longitud, anchura, potencia vertical, ángulo del lóbulo respecto la pendiente, pendiente, superficie, volumen y morfología de cada lóbulo. La superficie ha sido calculada a partir de la fórmula $A = (L*W)/4$, mientras que el volumen que comprende el lóbulo de soliflucción se ha determinado aplicando el ángulo que forma con la vertiente $V = H*(A*\cos \alpha_1)/2$ (MATSUOKA et. al., 2005). Para concretar la morfología se ha aplicado la ratio propuesta por WAHRHAFTIG & COX (1959): si longitud/anchura ≥ 1 la morfología resultante es un lóbulo en forma de lengua, mientras que si esta relación es < 1 la morfología se clasifica como lobular.

Tabla 2. Principales características pedológicas y morfométricas de las diferentes tipologías de lóbulos de soliflucción identificadas en Sierra Nevada (OLIVA et al., 2008).

Tipología	Características	Lóbulos (monitorizados)	Activos / estables	Longitud (m)		Anchura (m)		Potencia frente (m)		Pendiente (°)	
				Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
<i>High solifluction lobe</i> HSL	Dominancia de turba con un frente ≥ 80 cm	33 (5)	1/4	2-10	6,6	2-10	5,3	0,8-1,2	0,9	4-19	11,5
<i>Low solifluction lobe</i> LSL	Dominancia de turba con un frente < 80 cm.	103 (4)	2/2	1,2-15	4,4	1-5	3,6	0,2-0,7	0,47	5-21	9,8
<i>Stone-banked lobe-1</i> STL-1	Dominancia de gravas/rocas $> 50\%$	6 (1)	1/0	3-10	5,1	2-5	3,4	0,6-1	0,39	9-19	13,0
<i>Stone-banked lobe-2</i> STL-2	Abundancia de gravas/rocas $< 50\%$	33 (2)	1/1	1,8-8	5,4	2-8	4,5	0,3-0,9	0,52	6-26	10,5
<i>Turf-mantled lobes</i> MST	Extenso lóbulo con dominancia de turba ≥ 8 m longitud	6 (1)	0/1	10-22	13,3	10-19	12,7	0,5-1,5	0,78	9-19	13,2
<i>Stone-mantled lobes</i> MSS	Extenso lóbulo con dominancia de gravas/rocas ≥ 8 m longitud	10 (0)	0/0	9-16	11,1	8-13	9,5	0,6-1,4	0,86	12-19	14,0
<i>Ploughing boulders</i> STL (block)	Bloque transportado sobre un lóbulo ("bloqueo arador")	5 (1)	1/0	3-6,8	4,6	2-3,5	2,8	0,5-0,9	0,67	6-10	8,0
<i>Solifluction terrassettes</i> ST	Pequeñas terrazas de soliflucción	3 (2)	0/2	0,6-2	1,1	0,3-1	0,8	0,2-0,3	0,24	6-18	10,0
<i>Mudflow-affected solifluction lobes</i> MSL	Lóbulos de morfología irregular con matriz fangosa	3 (1)	0/1	5-6,5	5,8	5-10	7,5	0,2-0,7	0,67	6-9	7,7

Un 77,2% de los lóbulos cartografiados se sitúan en el valle de San Juan y un 22,8% en Río Seco. La exposición septentrional de la primera, con un número de lóbulos sensiblemente superior, explica la orientación mayoritaria al N-NW y el limitado número de lóbulos encarados al Mediterráneo, de orientaciones E y NE. Las alturas en las que se encuentran los lóbulos son muy variables, siendo decisiva la topografía local; este es el caso del valle de San Juan, donde la disposición estructural dominante determina la no existencia de lóbulos entre 2.550 y 2.750 m. La pendiente óptima para la presencia de lóbulos en Sierra Nevada se encuentra entre los 5 y los 15°, concentrándose el 87,6% de los lóbulos en este rango. En el 65% de los lóbulos la vegetación sobrepasa el 80% de su superficie, un 24% tienen una cobertura vegetal entre un 60 y 80% y el restante 11% presenta un recubrimiento más disperso, inferior al 60%.

Con respecto a las dimensiones de los lóbulos, conviene destacar que suelen tener unas longitudes moderadas, con un 90% de los lóbulos que no llegan a los 8 m de longitud, y un 64% de ellos oscilando entre 2 y 6 m. Lo mismo sucede con la anchura: sólo un 7% de los lóbulos tienen una anchura superior a los 8 m y un 70% tienen entre 2 y 6 m de ancho. El hecho de que la longitud tienda a mostrar valores más elevados que la anchura (5,5 vs 4,6 m por término medio) explica porque un 74% de los lóbulos tienen forma de lengua, más alargados, mientras que sólo en un 26% domina una morfología lobular con un anchura mayor que la longitud. También suelen contar con potencias reducidas: un escaso 4% de los lóbulos supera el metro de espesor en su frente, con un 60% fluctuando entre los 20 y 60 cm de potencia (LSL). Lógicamente, el área y volumen que ocupan los lóbulos es una función directa de estas variables anteriormente comentadas; el 86,1% tienen una área inferior a 50 m² y el 84,7% tiene un volumen de menos de 100 m³.

La tipología resultante de estas características anteriores es una preponderancia de las morfologías solifluídales vegetalizadas (LSL: 51%; HSL: 15,8%), a pesar de un considerable número de lóbulos con una proporción < 50% de gravas (STL-2: 17,4%). Las seis tipologías restantes cubren un espectro menor, representando entre todas ellas un discreto 15,8%.

El control que ejerce la microtopografía en los lóbulos de soliflucción se percibe en su morfología (tabla 3). La altura no es determinante en la forma de los lóbulos, presentando correlaciones ligeramente negativas con la longitud ($r = -0,17$), anchura ($r = -0,22$), potencia ($r = -0,19$), recubrimiento vegetal ($r = -0,27$) y morfología ($r = -0,19$). Así pues, a medida que los lóbulos se emplazan a alturas superiores, tienden a tener unas dimensiones más reducidas y a presentar una cobertura vegetal más dispersa: la altura limita la extensión de la vegetación aumentando la efectividad de los procesos crionivales. La orientación no parece jugar un papel destacado en la morfología de las formas solifluídales en la Sierra y no presenta correlaciones significativas con ninguna variable morfométrica, pese a que la concentración de un 65,3% de los lóbulos al N-NW tiende a enmascarar las correlaciones con el resto de parámetros. La pendiente, negativamente correlacionada con la altura ($r = -0,20$), controla moderadamente la longitud ($r = 0,46$), la potencia ($r = 0,34$) y la anchura ($r = 0,23$) de los lóbulos. Superficies más inclinadas promueven unos lóbulos más largos, más anchos y con un frente más potente; además, facilitan un drenaje más rápido de la escorrentía superficial y propician una menor vegetación, existiendo una débil correlación negativa entre la pendiente y el recubrimiento vegetal ($r = -0,17$).

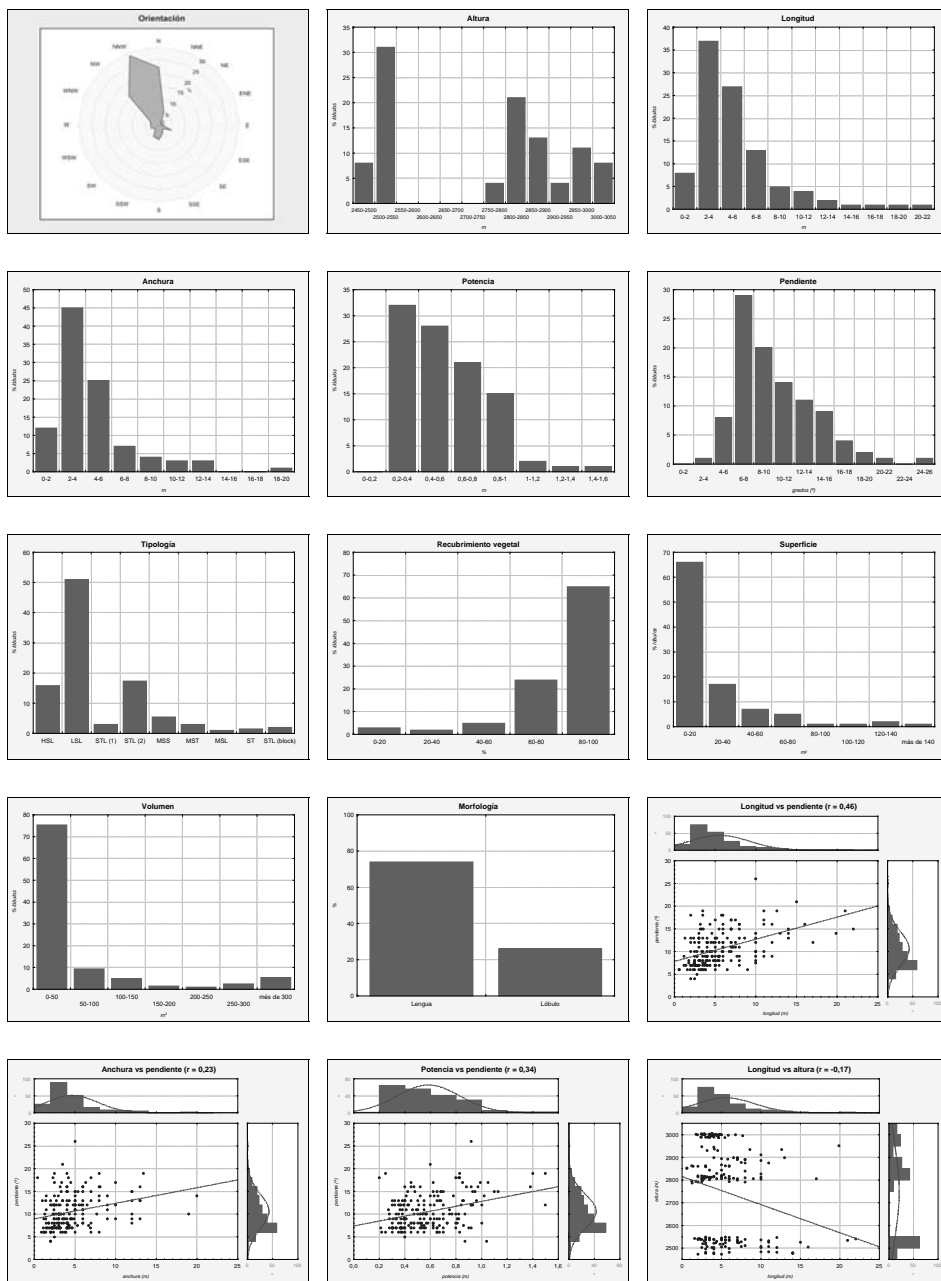


Figura 6: Variables morfométricas estudiadas de los lóbulos de solifluxión.

Tabla 3. Correlaciones entre las variables morfométricas analizadas de todos los lóbulos.

	H	O	L	W	H	α_1	α_2	T	V	A	V _o	M
H												
O	-0,19											
L	-0,17	0,06										
W	-0,22	0,04	0,59									
H	-0,19	-0,03	0,48	0,38								
α_1	-0,28	-0,02	0,39	0,17	0,47							
α_2	-0,20	0,01	0,46	0,23	0,34	0,91						
T	-0,11	0,11	-0,05	0,01	-0,12	-0,17	-0,15					
V	-0,27	0,09	0,02	0,09	0,13	-0,14	-0,17	0,28				
A	-0,22	0,07	0,81	0,88	0,41	0,24	0,31	0,05	0,02			
V _o	-0,20	0,07	0,58	0,78	0,33	0,13	0,18	0,15	0,04	0,84		
M	-0,19	0,02	-0,15	0,39	0,03	-0,15	-0,14	0,14	0,10	0,15	0,23	

* En cursiva, correlaciones significativas con $p < 0,05$.

H: altura; O: orientación; L: longitud; W: anchura; H: potencia; α_1 : ángulo lóbulo; α_2 : pendiente ladera; T: tipología; V: vegetación; A: área; V_o: volumen; M: morfología.

Lógicamente, las variables geométricas de los lóbulos muestran unas correlaciones dependientes entre sí. El área y el volumen ocupados por los mismos presentan unas correlaciones significativas con la longitud ($r = 0,81$; $r = 0,58$), la anchura ($r = 0,88$; $r = 0,78$), moderadas con la potencia ($r = 0,41$; $r = 0,33$), e, indirectamente, más suavizadas con la pendiente ($r = 0,31$; $r = 0,18$). La tipología merece una consideración especial, puesto que su catalogación es consecuencia, y no causa, de las características morfológicas y pedológicas de los lóbulos. No se pueden extraer conclusiones de la relación entre las diferentes tipologías y la altura: los lóbulos se distribuyen en una relativa anarquía altitudinal.

Los parámetros relativos a las dimensiones de los lóbulos (longitud, anchura, potencia, área, volumen) muestran siempre unos valores más elevados en aquellas tipologías definidas atendiendo a un tamaño y una extensión mayores (MST, MSS y HSL), y más reducidos en aquellos tipos que representan dimensiones menores (LSL, ST). La pendiente y la tipología también presentan también cierta correlación, mostrando pendientes más elevadas aquellos lóbulos que enlazan las vertientes y los fondos de valle (MST y MSS), los poco vegetalizados (STL-1) y los de frente más potente (HSL). La vegetación también muestra un patrón consecuente con las características que definen los lóbulos explicitadas en la tabla 2: son aquellos lóbulos recubiertos de vegetación (HSL, LSL, MST y MSL) los que muestran unos valores más elevados, entre 80 y 100% de recubrimiento de la superficie lobular. La morfología denota una relación menos evidente, con una prevalencia de la forma de lengua en la mayoría de tipologías, excepto en los MSL y ST.

Todas estas geoformas solifluídales tienen su origen en otras condiciones climáticas más favorables para la dinámica periglaciares, ya que el control dinámico y térmico de los lóbulos de soliflucción que actualmente se lleva a cabo en la Sierra muestra su práctica inactividad bajo las condiciones climáticas actuales (OLIVA et al., 2008). Los sensores instalados en el interior de los lóbulos a profundidades de hasta un metro constatan la existencia de un

profundo horizonte helado estacional de entre 70 y 100 cm, aunque este significativo nivel helado no fue suficiente para activar la soliflucción en San Juan y Río Seco. Efectivamente, la monitorización dinámica de los lóbulos señala que entre 2005-2008 se detectaron desplazamientos inferiores a 0,5 cm/año sólo en aquellos lóbulos con mayor suministro líquido (OLIVA et al., **in press**).

5. CONCLUSIONES

En las cabeceras de los altos valles occidentales de Sierra Nevada las condiciones climáticas favorecen la actividad de los procesos periglaciares por encima de los 2.500 m. En el presente artículo se ha analizado la distribución de los lóbulos de soliflucción como ejemplo de la dinámica periglacial en dos valles nevadenses: San Juan y Río Seco.

En Sierra Nevada, como en otros ámbitos alpinos de latitudes medias, los lóbulos se ubican en el cinturón crionival y destacan por presentar unas dimensiones moderadas en contraposición a las morfologías solifluidales existentes en altas latitudes con presencia de *permafrost* (MATSUOKA, 2001). Se propone una catalogación del amplio abanico de manifestaciones solifluidales existentes en la Sierra, básicamente resumidos en dos tipologías: los lóbulos recubiertos mayoritariamente de vegetación y aquéllos con una proporción destacable de clastos en su superficie. La distribución de estas geoformas evidencia el papel clave de la topografía para su desarrollo. Los lóbulos actualmente están muy recubiertos de vegetación ocupando los espacios de fondo de valle conocidos como *borreguiles*, que el hombre ha favorecido y extendido a lo largo de los últimos siglos con finalidades ganaderas. El análisis de la topografía sugiere que son los sectores por encima de los 2.500 m, de pendientes suaves entre 5-15° y de orientación septentrional los emplazamientos más favorables para la presencia de registros solifluidales (OLIVA, 2009).

Finalmente, cabe destacar que los lóbulos de soliflucción son morfologías heredadas de fases más frías y/o húmedas (OLIVA et al., **in press**). La monitorización térmica y dinámica actual evidencia su escasa actividad bajo el régimen térmico e hídrico presente y los estudios sedimentarios realizados sugieren una actividad mayor durante las fases frías holocenas, especialmente durante la PEH (1300-1850).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha realizado durante la beca/contrato disfrutada entre 2005-2008 en el marco del programa de Formación de Personal Universitario (FPU) del Ministerio de Educación y Ciencia. Cabe agradecer el apoyo del Parque Nacional de Sierra Nevada y el amparo del Grupo de Investigación Consolidado “*Paisatge i reconstrucció ambiental de la muntanya mediterrània*” y de los proyectos “*Degradación de hielo fósil y permafrost y cambio climático en Sierra Nevada*” (018-2007) y “*Fluvalps-3000*” (CGL2006-01111).

6. BIBLIOGRAFÍA

ANDERSSON, J.G. (1906): “Solifluction, a component of subaerial denudation”. *Journal of Geology*. 14, pp. 91-112.

- BALLANTYNE, C.K. & HARRIS, C. (1994): *The periglaciation of Great Britain*. University of Cambridge, Cambridge.
- FRENCH, H. (1996): *The periglacial environment*, 2nd ed. Longman, Harlow. 341 pp.
- GÓMEZ ORTIZ, A. (2002): *Mapa geomorfológico de Sierra Nevada*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS ESTREMER, 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*, Vol. 1, pp. 35-56.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; SCHULTE, L.; SALVADOR FRANCH, F.; PALACIOS, D.; SANZ DE GALDEANO, C.; SANJOSÉ BLASCO, J. J.; TANARRO GARCÍA, L.M. & ATKINSON, A. (2005). "Field trip to Sierra Nevada massif glacial geomorphology and present cold processes". *Sixth International Conference on Gemorphoogy*. Field Trip Guides. pp. 309-326.
- HUGENHOLTZ, C.H. & LEWKOWICZ, A.G. (2002): "Morphometry and environmental characteristics of turf-banked solifluction lobes, Kluane Range, Yukon Territory, Canada". *Permafrost and Periglacial Processes*. **13**, pp. 301-313.
- IPCC (2007). *Intergovernmental Panel on Climate Change*. World Meteorological Organization.
- JACKSON, J.A. (1997). *Glossary of Geology*. American Geological Institute. Fourth Edition, Virginia. 769 pp.
- KINNARD C, LEWKOWICZ AG. (2005): "Movement, moisture and thermal conditions at a turf-banked solifluction lobe, Kluane Range, Yukon Territory, Canada". *Permafrost and Periglacial Processes*. **16** (3), pp. 261-275.
- LEWKOWICZ, AG. (1988): Slope processes. In Clark, MJ (Eds). *Advances in Periglacial Geomorphology*, John Wiley and Sons. Chichester, 325-368.
- MATSUOKA N. (2001): "Solifluction rates, processes and landforms: a global review". *Earth-Science Reviews*. **55**, pp. 107-134.
- MATSUOKA, N., IKEDA, A. & DATE, T. (2005): "Morphometric analysis of solifluction lobes and rock glaciers in the Swiss Alps". *Permafrost and Periglacial Processes*. **16**, pp. 99-113.
- MATTHEWS JA, SEPPÄLÄ M, DRESSER PQ. (2005): "Holocene solifluction, climate variation and fire in a subarctic landscape Al Pippokangas, Finnish Lapland based on radiocarbon-dated buried charcoal". *Journal of Quaternary Science*. **20**, pp. 533-548.
- MOLERO MESA, J. & PÉREZ RAYA, F. (1987): *La flora de Sierra Nevada*. Universidad de Granada.

- OLIVA, M. (2009): *Reconstrucció paleoambiental holocena de Sierra Nevada*. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona.
- OLIVA M, SCHULTE L, GÓMEZ ORTIZ A. (2008): “Solifluction Lobes in Sierra Nevada (Southern Spain): Morphometry and Palaeoenvironmental Changes”. In: *Proceedings of the IX International Conference on Permafrost*. Fairbanks (Alaska), 29 June-3 July 2008. Vol. 2, pp. 1321-1326.
- OLIVA, M.; SCHULTE, L. & GÓMEZ ORTIZ, A. (*in press*): “Morphometry and Late Holocene activity of solifluction landforms in the Sierra Nevada, Southern Spain”. *Permafrost and Periglacial Processes*.
- SCHULTE, L.; MARCOS GARCÍA-BLANCO, J. DE; GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS-ESTREMER, D.; TANARRO GARCÍA, L.M.; FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ, A. & RAMOS SAINZ, M. (2002). “Evolución glaciar y periglacial del Circo del Mulhacén (Sierra Nevada, Península Ibérica)”. In: Pérez-González, Vegas & Machado (Ed.): *Aportaciones a la Geomorfología de España en el inicio del tercer milenio*. pp. 491-499.
- WAHRHAFTIG, C. & COX, A. (1959): “Rock glaciers in the Alaska Range”. *Geological Society of America Bulletin*. 70, pp. 383–436.
- WASHBURN, A. (1979): *Geocryology: a Survey of Periglacial Processes and Environments*. Arnold, London. 406 pp.