

LÓBULOS DE SOLIFLUXIÓN Y FLUCTUACIONES PALEOCLIMÁTICAS DURANTE EL HOLOCENO EN SIERRA NEVADA

Marc OLIVA

*Grupo de Investigación Paisaje y Reconstrucción Paleoambiental de la Montaña
Mediterránea, Universitat de Barcelona*

Departamento de Geografía Física y Análisis Geográfico Regional, Universitat de Barcelona
oliva_marc@yahoo.com

RESUMEN

Sierra Nevada concentra las cumbres más altas de la Península Ibérica (Mulhacén 3.478 m., Veleta 3.398 m.). Las cabeceras de los valles de San Juan y Río Seco presentan numerosos lóbulos de solifluxión, cuyo control dinámico demuestra una actividad muy leve de los procesos solifluidales bajo las actuales condiciones climáticas. La génesis y desarrollo de los lóbulos se concibe durante unas condiciones más propicias, ligadas a temperaturas más bajas y/o mayores índices de humedad. El análisis sedimentológico de los lóbulos de solifluxión permite deducir fases de actividad solifluidal (e.g. Pequeña Edad de Hielo) alternándose con periodos de desarrollo edáfico (e.g. Óptimo Climático Medieval) durante el Holoceno tardío.

Palabras clave: control térmico, Holoceno, lóbulos de solifluxión, monitorización dinámica, Sierra Nevada.

ABSTRACT

Sierra Nevada concentrates the highest peaks in the Iberian Peninsula (Mulhacén, 3.478 m., Veleta 3.398 m.). Headwaters of San Juan and Río Seco valleys have an important number of solifluction lobes, but dynamic control reports a very weak solifluction activity in the massif. These lobes must have formed and developed under different climate conditions, possibly related to lower temperatures and/or higher moisture conditions. Sedimentological studies of different solifluction lobes show phases of enhanced solifluction activity during the Late Holocene (e.g. Little Ice Age) alternated with periods of edaphic development (e.g. Medieval Warm Period).

Key words: dynamic control, Holocene, Sierra Nevada, solifluction lobes, thermal monitoring.

1. INTRODUCCIÓN

La solifluxión se define como el lento movimiento pendiente abajo asociado a la acción del hielo-deshielo (BALLANTYNE y HARRIS, 1994) y se caracteriza por ser el flujo de masa más extendido en ambientes periglaciares (KINNARD y LEWKOWICZ, 2005).

En altas latitudes y en montañas elevadas de latitudes medias, la presencia de una densa red de infraestructuras y equipamientos susceptibles de ser afectados por procesos solifluidales, impulsó la investigación durante la segunda mitad de siglo XX en torno a los factores que influyen en su dinámica de flujo. En cambio, en el ámbito peninsular, debido al confinamiento de los procesos periglaciares activos a las más altas cumbres ibéricas, su estudio ha centrado la atención en un reducido número de casos. Entre ellos, cabe destacar CHUECA y JULIÁN (1995) en el Pirineo Central, PALACIOS et al. (2003) en el Sistema Central y GÓMEZ ORTIZ et al. (2005) en Sierra Nevada.

Nuestra área de estudio se focaliza en el sector occidental de Sierra Nevada. Este macizo, a 37° de latitud norte, se alarga de oeste a este en el sur peninsular y cuenta con las alturas más elevadas de la Península Ibérica (Mulhacén 3.478 m. y Veleta 3.398 m.). El desplazamiento latitudinal anual de la Circulación General Atmosférica determina una marcada dualidad en el ritmo climático del macizo, a caballo del margen septentrional del cinturón subtropical de altas presiones en verano y la influencia de las bajas presiones asociadas a los *westerlies* de medias latitudes durante el semestre frío del año. En el albergue universitario de Sierra Nevada (2.507 m.), la temperatura media anual es de 4'4°C y la precipitación ronda los 710 mm, el 88% del total concentrado entre octubre y mayo. La cobertura vegetal del macizo es escasa por encima de los 2.500 m., aunque destaca la existencia de un elevado número de endemismos (MOLERO MESA y PÉREZ RAYA, 1987). En el valle de San Juan, de exposición septentrional y típica morfología glacial, la cobertura vegetal llega al 3,8%, mientras que en el circo meridional de Río Seco la vegetación sólo recubre un 1,6% de su superficie.

Las cabeceras de los valles de San Juan y Río Seco acogen un amplio abanico de geoformas solifluidales en forma de lóbulos, lenguas, terrazas y mantos. Los 156 lóbulos cartografiados en San Juan se emplazan entre los 2.474-2.911 m., mientras que en Río Seco se contabilizan 46 unidades distribuidas en el desguace de las lagunas homónimas, en un rango altitudinal que oscila entre los 2.930-3.005 m.

El objetivo del presente artículo será presentar el dinamismo de la soliflucción bajo las condiciones climáticas actuales e intentar establecer una geocronología de la dinámica de vertientes y de los cambios ambientales acontecidos en el macizo durante los últimos milenios. La alternancia de depósitos solifluidales y horizontes edáficos induce a considerar implicaciones paleoclimáticas y pone de manifiesto la sensibilidad de estos registros sedimentarios a la variabilidad climática holocena.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Uno de los objetivos que persigue la presente investigación es la caracterización térmica y dinámica de los procesos solifluidales actuales en Sierra Nevada; para ello, se ha llevado a cabo un seguimiento anual del régimen térmico del suelo y un control dinámico del desplazamiento de los lóbulos de soliflucción.

La monitorización térmica del suelo se ha realizado mediante la instalación de 4 dispositivos *Universal Temperature Logger* (UTL) a las profundidades de 10, 20, 50 y 100 cm en un lóbulo del circo de Río Seco ubicado a 3.002 m. de altura.

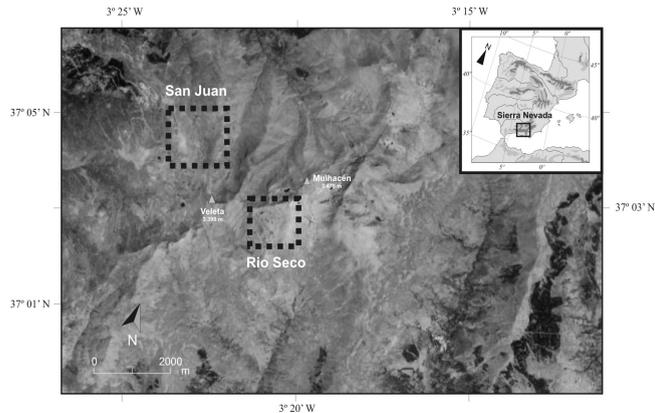


Fig. 1: Área de estudio.

Los datos presentados contemplan el periodo de observación de setiembre del 2006 a agosto del 2007, con la toma de temperaturas programada a intervalos de 2 horas. Por su parte, el control dinámico de la soliflujión se basó en la instalación de casi un centenar de estacas de madera (50 cm de longitud x 3 cm de anchura) insertadas unos 45-50 cm en el suelo en los frentes y márgenes de cada lóbulo.

Con la finalidad de reconstruir la dinámica solifluidal durante los últimos milenios, durante las campañas de trabajo de 2006 y 2007, se analizó la estructura interna de más de 30 lóbulos de soliflujión en los valles de San Juan y Río Seco. Las pertinentes descripciones edafológicas y sedimentológicas de campo se han realizado basándose en la normativa FAO (2006) y, en aquellos lóbulos donde la estratigrafía lo aconsejaba, se ha extraído ~ 0,5 kg de cada horizonte para sus análisis.

La analítica de laboratorio se ha realizado en la Universidad de Berna (Suiza), con muestras secas y tamizadas < 2 mm. La determinación de la granulometría de cada muestra ha requerido del tratamiento previo con 10% HCl para eliminar la materia orgánica; las arcillas (< 2 μm) y limos (2-63 μm) se han cuantificado con el detector de partículas *Micromeritics SediGraph 5100*, mientras que las arenas (> 63 μm) se han determinado por el tamizado bajo agua a presión. El contenido de carbono orgánico (C_{org}) de cada unidad sedimentaria se ha cuantificado con un Analizador Elemental y la fracción del hierro pedogénico (Fe_d) se ha analizado según los procedimientos estándar (MEHRA y JACKSON, 1960).

La geocronología de los cambios ambientales se ha obtenido a partir de las dataciones de los horizontes orgánicos por espectrometría de masas (*Accelerator Mass Spectrometry*, AMS). Con el objetivo de evitar la posible contaminación de las raíces modernas derivadas de la propia morfología de los lóbulos en cuestión, se concentró el polen fósil de los niveles orgánicos clave para su datación. La concentración polínica de estas muestras se ha realizado en el laboratorio del Departamento de Prehistoria de la Universidad Rovira i Virgili (Tarragona), mientras que las dataciones han sido procesadas por AMS en el *Angström Laboratory* (Uppsala, Suecia).

3. PROCESOS SOLIFLUIDALES ACTUALES

La monitorización de los lóbulos durante el periodo agosto 2005-agosto 2007 constata la poca o nula actividad de la solifluxión en el macizo. Las actuales condiciones climáticas no parecen adecuadas para inducir desplazamientos solifluidales en Sierra Nevada, especialmente en la vertiente meridional, donde sólo el 11,8% de las estacas registraron un movimiento inferior a 0,5 cm/año. En San Juan, se constataron pequeños desplazamientos en un 61,8% de las estacas monitorizadas, siempre en lóbulos cercanos a cursos de agua y neveros de fusión tardía (OLIVA et al., accepted).

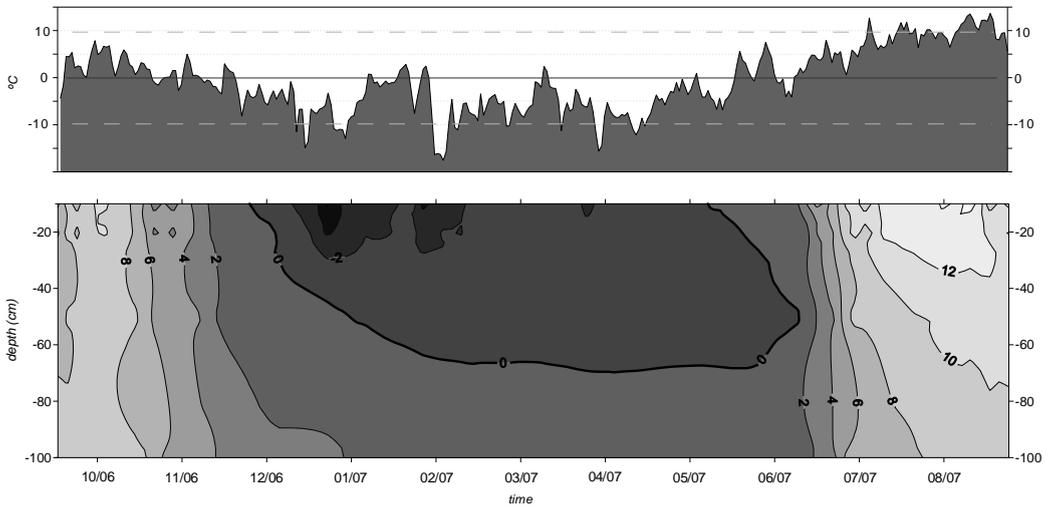


Fig. 2: Temperatura en el Picacho del Veleta, a 3.398 m. (fig. superior), y evolución térmica del suelo en un lóbulo del circo de Río Seco (fig. inferior) (OLIVA et al., accepted).

Los sensores térmicos ubicados en un lóbulo del circo de Río Seco constatan la inexistencia de *permafrost* en las cumbres del macizo, salvo en enclaves muy concretos heredados de fases más frías (GÓMEZ ORTIZ et al., 2001).

El período de observación presentado se alarga de septiembre 2006-agosto 2007 y se caracterizó por unas temperaturas elevadas hasta el inicio de noviembre, cuando se empiezan a registrar valores negativos en el lóbulo con la consolidación del manto nival. La protección térmica que ejerce la nieve no permitió una intensa penetración de la onda térmica en profundidad, estabilizándose en valores ligeramente negativos con puntas de frío ocasionales a finales de diciembre y enero. Las nevadas tardías de primavera retrasaron la desneveación del lóbulo hasta principios de junio; en apenas tres semanas, a 50 cm de profundidad, se asciende de temperaturas inferiores a 0°C en el seno del lóbulo a valores superiores a 8°C; este ritmo térmico es similar al que se viene detectando en el Corral del Veleta (GÓMEZ ORTIZ et al., 2005).

La existencia de este profundo horizonte helado de hasta 70 cm de profundidad, que se alargó durante 8 meses, no fue suficiente para desencadenar la solifluxión en este lóbulo, donde no se detectó movimiento alguno. La observación de campo ya apunta la estabilidad del mismo bajo el régimen climático actual: su morfología suave con un frente bien definido es indicativa de la inactividad de vertientes en este sector.

En lóbulos de solifluxión de otras zonas de alta montaña de latitudes medias, se detectan avances anuales decimétricos en presencia de horizontes estacionalmente helados similares en duración y profundidad (MATSUOKA, 2001). Consideramos, pues, que la termicidad no es el factor clave para activar la solifluxión en Sierra Nevada; el hecho de que sólo aquellos lóbulos con un suministro líquido más duradero y continuado registren pequeños desplazamientos, nos sugiere que la disponibilidad hídrica es el elemento crucial para activar los movimientos solifluidales en el macizo.

4. CRONOESTRATIGRAFÍA DE LOS LÓBULOS DE SOLIFLUXIÓN

La numerosa presencia de morfologías solifluidales en su mayoría inactivas por encima de los 2.500 m. induce a considerar su génesis y desarrollo bajo unas condiciones climáticas diferentes a las actuales e insinúa la existencia de fases más favorables para la solifluxión durante los últimos milenios, seguramente ligadas a temperaturas más bajas y/o mayores índices de humedad.

El análisis litoestratigráfico de numerosos lóbulos de solifluxión en ambos valles muestra una alternancia de depósitos de vertiente y horizontes edáficos. Los primeros se caracterizan por un porcentaje notable de gravas finas y medias (10-50%), contenidos relativamente bajos de materia orgánica y una matriz fina arenosa; los niveles orgánicos, en cambio, muestran elevadas proporciones orgánicas, en ocasiones próximas a valores turbosos, una matriz más fina y poca o nula presencia de gravas. Los valores del Fe_d son indicativos de la intensidad del desarrollo edáfico (ALEXANDER, 1985).

En un lóbulo del valle de San Juan se distingue una sucesión continuada de impulsos solifluidales y fases de inestabilidad de laderas (figura 3). La datación inferior sugiere que el lóbulo empieza su agradación durante la época conocida como Neoglaciación (4-3,5 ka BP), fase fría que en el continente europeo se caracteriza por niveles de lagos más elevados, disminución en altura del *timberline*, avances glaciares, abandono de la agricultura en ciertos sectores y aumento de la solifluxión en zonas de montaña (BELL y WALKER, 2005).

Posterior a este avance solifluidal, se detecta una recuperación paulatina del C_{org} paralela a un significativo pico de hierro pedogénico, que insinúa una ralentización de los procesos de vertiente y un cierto desarrollo edáfico hacia los 3,3 ka BP. La formación de un potente horizonte turboso se inicia en torno a 2,5 ka BP y culmina hacia los 800 años BP. Durante este periodo se percibe una estabilidad en el aporte de material fino, sin presencia de gravas y con valores muy elevados de C_{org} . El Óptimo Climático Romano (OCR) y el Óptimo Climático Medieval (OCM) son dos periodos cálidos que se reflejan en las cumbres de Sierra Nevada con una extensión de la cobertura vegetal herbácea y una intensificación de la edafogénesis, sólo truncada por dos breves impulsos solifluidales.

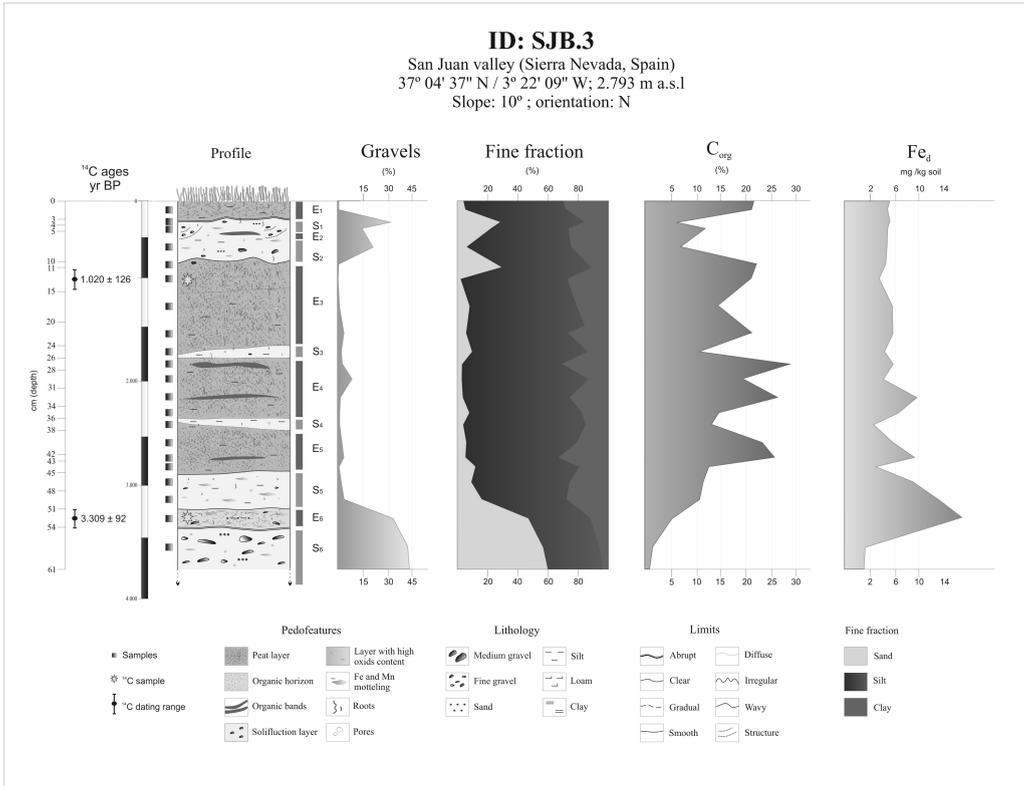


Fig. 3: Litoestratigrafía de un lóbulo en el valle de San Juan.

Durante la Pequeña Edad de Hielo (PEH) parece percibirse un brusco cambio en la dinámica de vertientes. Dos empujes solifluidales bruscos, con abundante aporte de gravas y arenas y una sensible caída del C_{org} de valores superiores al 20% al 7-8%, fosilizan el suelo inferior y denotan una inestabilización de laderas inducida por la dinámica climática. A continuación, se detecta una recuperación de la materia orgánica y una mayor proporción de finos, que parece correlacionarse con el calentamiento acontecido desde finales del siglo XIX hasta nuestros días.

En el valle de Río Seco, se ha analizado un lóbulo instalado en el pie de un resalte rocoso que conecta con la laguna homónima, la cuál suministra aporte líquido al lóbulo en cuestión. La base de este lóbulo fue datada por ESTEBAN (1994) en 1.120 ± 120 años BP y el inicio de la formación del nivel orgánico superior en 170 ± 120 años BP; nuestra datación del suelo intermedio en 652 ± 30 años BP parece validar las dataciones previas (figura 4).

Se trata pues de un lóbulo de reciente formación, con una evolución geocronológica muy parecida desde su génesis a aquél analizado en San Juan. El suelo inferior se corresponde con el OCM y se manifiesta en valores altos de C_{org}, escasa presencia de gravas y poca proporción de arenas.

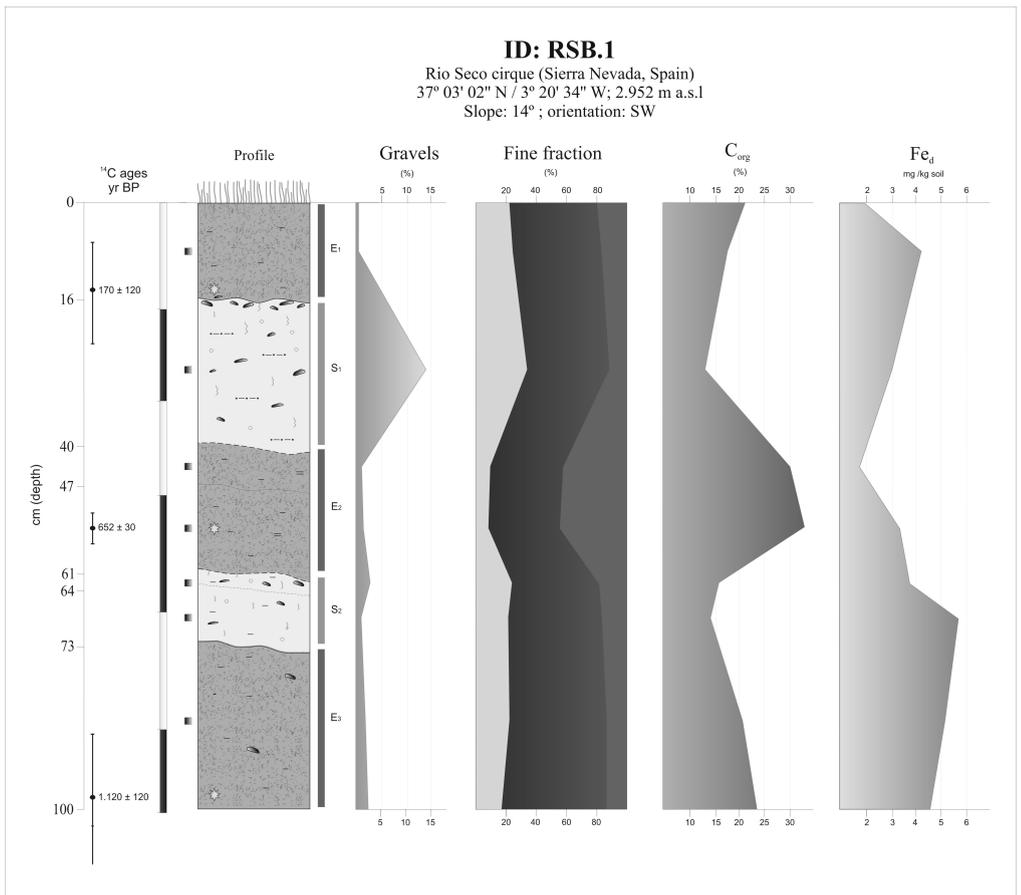


Fig. 4: Litoestratigrafía de un lóbulo en el circo de Río Seco.

Una primera fase solifluidal acontece entre 1.100-1.300 A.D. durante un primer pulso de la PEH, aunque seguidamente hay una recuperación orgánica con los máximos valores de C_{org}. Este desarrollo edáfico se ve truncado por el pulso más intenso de la PEH, que supone una evidente inestabilización de laderas reflejada en un abundante aporte de gravas y arenas y una disminución de la materia orgánica. A partir de fuentes documentales, RODRIGO et al. (1999) sitúan la máxima intensidad de la PEH en el sur peninsular entre 1590-1650, periodo que parece corresponderse con esta activa fase geomórfica en Nevada.

Como en el caso de San Juan, la inercia térmica iniciada la segunda mitad de siglo XIX, y que acabó con los últimos vestigios de glaciario en la Sierra, se traduce en un nuevo desarrollo de los suelos y una extensión de la cobertura vegetal, dificultando así la soliflución.

5. CONCLUSIONES

El control dinámico de los procesos solifluidales actuales en Sierra Nevada demuestra su inactividad o carácter muy puntual en los sectores de cumbres del macizo. A pesar de la

existencia de un horizonte helado de hasta 70 cm de profundidad, que se alarga de noviembre a junio, no se registraron desplazamientos en este lóbulo del sector de Río Seco. Los pequeños movimientos detectados en lóbulos principalmente del valle de San Juan están relacionados con la mayor disponibilidad de agua en los mismos, ya sea por su proximidad a los cursos de agua o bien por su cercanía a neveros de fusión tardía.

La presencia de numerosos lóbulos de soliflucción inactivos sugiere su formación bajo unas otras condiciones climáticas más propicias. El análisis de la estructura interna de una treintena de lóbulos en ambos valles muestra potentes depósitos sedimentarios en alturas de hasta 2.500 m. correspondientes a la PEH, que inducen a considerar condiciones climáticas sensiblemente más frías y húmedas. Cifrándose el aumento de temperatura de las fases más frías de la PEH respecto a la actualidad en 0,8-1°C (BRADLEY, 2000), y, considerando el gradiente térmico vertical medio de 0,65°C/100 m., se percibe un necesario aumento de la precipitación para activar la soliflucción hasta cotas de 2.500 m. durante esta pulsación fría.

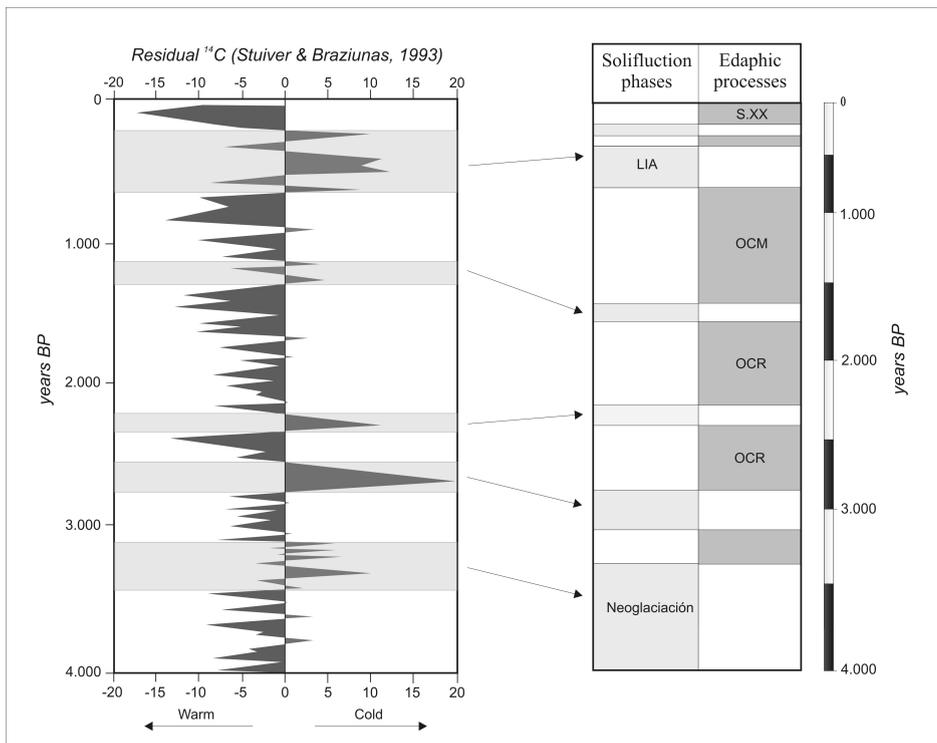


Fig. 5: Relación entre la dinámica de vertientes en Sierra Nevada y las anomalías de radiocarbono (STUIVER y BRAZIUNAS, 1993).

Si bien el Holoceno se ha definido tradicionalmente como un periodo relativamente cálido y estable, en Sierra Nevada, los lóbulos de soliflucción atestiguan notables fluctuaciones climáticas durante los últimos milenios. La cronología de la soliflucción en este macizo durante

el Holoceno medio y tardío es indicativa, pues, de la evolución paleoclimática local y regional, mostrando también una significativa correlación con las anomalías de radiocarbono (figura 5): fases frías y/o húmedas comportan una menor cobertura vegetal en el macizo activándose la dinámica de vertientes en el mismo (e.g. PEH), mientras que las pulsaciones cálidas inducen el desarrollo del tapiz vegetal y la formación de suelos (e.g. OCM).

6. AGRADECIMIENTOS

La investigación se ampara en el programa de Formación del Profesorado Universitario (FPU) del Ministerio de Educación y Ciencia. Se agradece el apoyo del Grup de Recerca Consolidat *Paisatge i paleoambients a la muntanya mediterrània* y de los proyectos 017/2007 de Parques Nacionales (MMA) y Fluvalps-3000 (CGL2006-01111).

7. REFERENCIAS

- ALEXANDER, E.B. (1985). Estimating relative ages from iron-oxide/total-iron ratios of soils in the western Po Valley, Italy. *Geoderma* 35, pp. 257-259.
- BALLANTYNE, C.K. y HARRIS, C. (1994). *The Periglaciation of Great Britain*. Cambridge, University Press.
- BELL, M. y WALKER R, M.J. (2005). *Late Quaternary Environmental Change. Physical and Human perspectives*. Pearson Prentice Hall, Glasgow.
- BRADLEY, R. (2000). 1000 Years of Climate Change. *Science* 288, pp. 1353-1355.
- CHUECA, J. y JULIÁN, A. (1995). Cuantificación de movimientos en masa lentos en medios de montaña: Pirineo Central. *Lurralde* 18, pp. 173-196.
- ESTEBAN, A. (1994). *Evolución del paisaje durante los últimos 10.000 años en las montañas del Mediterráneo occidental: ejemplos del Pirineo Oriental y Sierra Nevada*. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona.
- FAO (2006). *Guidelines for soil description*. United Nations.
- GÓMEZ ORTIZ, A.; PALACIOS, D.; RAMOS, M.; TANARRO, L.M. y SALVADOR FRANCH, F. (2001). Location of permafrost in marginal regions: Corral Del Veleta, Sierra Nevada, Spain. *Permafrost and Periglacial Processes* 12 (1), pp. 92-110.
- GÓMEZ, A.; SCHULTE, L.; SALVADOR, F.; PALACIOS, D.; SANZ DE GALDEANO, C.; SANJOSÉ, J.J.; TANARRO, L.M. y ATKINSON, A. (2005). Field trip to Sierra Nevada Massif Glacial Geomorphology and Present Cold Processes. *6th International Conference on Geomorphology*. September 7-11, 2005 Zaragoza (Spain). Field trip guides II, pp. 309-354.
- KINNARD, C. y LEWKOWICZ, A.G. (2005). Movement, moisture and thermal conditions at a turf-banked solifluction lobe, Kluane Range, Yukon Territory, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes* 16, pp. 261-275.
- MATSUOKA, N. (2001). Solifluction rates, processes and landforms: a global review. *Earth-Science Reviews* 55, pp. 107-134.
- MEHRA, O.P. y JACKSON, M.L. (1960). Iron oxide removal from soils and clays by dithionit-citrate systems buffered with sodium bicarbonate. *Clays and Clay Minerals* 7, pp. 317-327.
- MOLERO MESA, J. y PÉREZ RAYA, F. (1987). *La flora de Sierra Nevada*. Granada, Spain. Universidad de Granada.

- OLIVA, M.; SCHULTE, L. y GÓMEZ ORTIZ, A. (accepted). Solifluction lobes in Sierra Nevada (southern Spain): morphometry and palaeoenvironmental changes. *IX International Conference on Permafrost*. Fairbanks (Alaska), 29-3 July 2008.
- PALACIOS, D.; ANDRÉS, N. y LUENGO, E. (2003). Distribution and effectiveness of nivation in Mediterranean mountains: Peñalara (Spain). *Geomorphology* 54, pp. 157-178.
- RODRIGO, F.S.; ESTEBAN-PARRA, M.J.; POZO-VÁZQUEZ, D. y CASTRO-DIAZ, Y. (1999). A 500-year precipitation record in Southern Spain. *International Journal of Climatology* 19, pp. 1233-1253.
- STUIVER, M. y BRAZIUNAS, T.F. (1993). Radiocarbon and ^{14}C ages of marine samples to 10,000 B.C. *Radiocarbon* 35, pp.137-189.