

Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional  
Facultat de Geografia i Història  
Universitat de Barcelona



**Tesi doctoral**

***Reconstrucció paleoambiental holocena de Sierra Nevada  
a partir de registres sedimentaris***

Memòria presentada per en  
**Marc Oliva i Franganillo**  
Per optar al títol de Doctor en Geografia

Programa de Doctorat  
*Gestió ambiental, Paisatge i Geografia*  
Bienni 2004-2006

Els directors de tesi

Dr. Antonio Gómez Ortiz

Dr. Lothar Schulte

## CAPÍTOL 8

## **CONCLUSIONS**



## **8. Conclusions**

Tot i la tradicional concepció de l'Holocè com un període càlid i relativament estable, la nostra recerca a Sierra Nevada constata notables canvis paleoecològics conduïts per la dinàmica climàtica holocena en els darrers mil·lennis al massís. Els processos geomorfològics dominants a les capçaleres de les valls nevadenses responen amb gran sensibilitat a petits canvis de temperatura i humitat, evidenciant la proximitat d'aquests processos dels seus límits climàtics.

Sierra Nevada es presenta com una frontera climàtica durant l'Holocè: petits desplaçaments a l'Atlàntic Nord de la CGA cap a latituds més meridians propiciaven, en bona part del relleu peninsular, uns majors índex d'humitat i unes temperatures més baixes per la procedència atlàntica dels vents dominants. Els focus glacials incipients dels circs septentrionals augmenten i redueixen el seu volum, amb construcció de petits cordons morrènics als seus peus, disminueix la coberta vegetal dispersa a les alçades de Sierra Nevada i es reforça el periglaciari i la dinàmica de vessants fins a cotes lleugerament inferiors als 2.500 m; s'estenen les congestes de fusió tardana durant els mesos estivals i s'allarga la persistència del sòl glaçat subsuperficialment<sup>77</sup>, fet determinant per activar els lòbuls de solifluxió a San Juan i Rio Seco. Els sediments lacustres són també testimoni d'una major aportació de material detrític, ja sigui per escorrentia superficial de la fusió nival canalitzada pels torrents com per una dinàmica de *debris flows* superior.

En canvi, una major plasmació del cinturó d'altres pressions subtropicals sobre la Península Ibèrica comportava una persistència més prolongada de l'anticicló de les Açores, implicant períodes de temperatures més elevades i menors precipitacions en el conjunt del massís. Els processos geomorfològics freds perden intensitat i remunten en alçada: les glaceres es redueixen i/o desapareixen i el periglaciari s'arrecera a cotes més elevades, la coberta vegetal tendeix a densificar-se en el cinturó periglacial i a esmorteir els desplaçaments de vessant, essent especialment efectiva en ralentir els moviments solifluidals.

---

<sup>77</sup> Possiblement, amb condicions de *permafrost* esteses en els circs més septentrionals fins a alçades de 2.800-2.900 m.

### **8.1 Distribució dels lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada**

A les capçaleres de les valls de San Juan i Rio Seco s'ha cartografiat un nombre significatiu de lòbuls de solifluxió. La seva distribució queda reclosa en els sectors de fons de vall i capçaleres de barrancs on la coberta vegetal s'ha pogut desenvolupar, classificant els lòbuls atenent a les seves característiques pedològiques i morfomètriques<sup>78</sup>. Bàsicament trobem dos grups de lòbuls: aquells en què hi ha predominança de la cobertura vegetal (71,8%) i aquells amb un elevat recobriment de clastos i blocs heteromètrics (28,2%).

La topografia més favorable per a la presència de lòbuls de solifluxió ve definida per vessants suaus amb pendents compresos entre els 5 i 15°, una orientació preferiblement septentrional i un rang d'alçades que oscil·la entre els 2.500 i 3.000 m. El grau de vegetatització dels lòbuls és, en la majoria de casos, molt elevat: no gensmenys, un 65% dels lòbuls tenen una superfície vegetatitzada superior al 80%, un 24% tenen una cobertura vegetal entre el 60 i 80% i només un 11% presenten un recobriment inferior al 60%. L'anàlisi morfomètric dels lòbuls de solifluxió posa de manifest unes dimensions moderades; la longitud i amplada dels lòbuls solen estar compreses entre els 2 i 6 m (64 i 70%), mentre que la potència fluctua entre els 20 i 60 cm (60%), amb només un 4% d'unitats de més d'1 m de front.

La topografia local és un dels factors que controla la geometria dels lòbuls de solifluxió. L'alçada presenta correlacions molt lleugeres amb la longitud ( $r = -0,17$ ), amplada ( $r = -0,22$ ), potència ( $r = -0,19$ ) i recobriment vegetal ( $r = -0,27$ ) dels lòbuls, insinuant que aquests tendeixen a tenir unes dimensions i coberta vegetal menors conforme remuntem alçada. L'orientació no presenta correlacions significatives amb cap variable, mentre que el pendent, correlacionat negativament amb l'alçada ( $r = -0,20$ ), és el paràmetre més decisiu en la morfometria dels lòbuls, ja que controla la longitud ( $r = 0,46$ ), la potència ( $r = 0,34$ ) i l'amplada ( $r = 0,23$ ) dels mateixos. Conforme augmenta el pendent, els lòbuls tendeixen a ser més llargs, amples i potents; a més, el drenatge superficial és més ràpid, amb una menor capacitat de retenció d'aigua en el sòl que condiciona un recobriment vegetal inferior ( $r = -0,17$ ).

---

<sup>78</sup> Veure taula 4.2, pàg. 114.

Les nombroses variables que intervenen en el mecanisme de desplaçament solifluidal fan difícil de controlar quins factors són decisius en la seva dinàmica. A més, l'impacte antròpic en els *borreguiles*, enclavaments de vegetació higròfila on s'assenten els lòbuls de solifluxió, pot induir canvis en el dinamisme natural d'aquests lents moviments de massa propis del cinturó periglacial de Sierra Nevada. L'actuació humana secular, desviant i reconduint les aigües de fusió a fi i efecte d'ampliar la superfície de pastures en els *borreguiles*, ha malmès i incidit canaletes en la coberta d'un 20% dels lòbuls de solifluxió cartografiats, molt especialment a la vall de San Juan.

La distribució altitudinal dels *borreguiles* mostra un patró clarament natural, amb major superfície de pastures higròfiles al vessant septentrional i en alçades compreses entre els 2.400-2.800 m. A més, la manca de traces d'origen antròpic en l'estructura interna dels lòbuls analitzats a Sierra Nevada i els relats d'historiadors que suggereixen una major pressió demogràfica i extensió de la transhumància als *borreguiles* d'alta muntanya a finals del segle XIX (Martín Civantos, 2007), ens porten a considerar que aquestes actuacions antròpiques tinguin un origen relativament recent, posteriors a les últimes recruades climàtiques de la LIA. Els *borreguiles*, doncs, són formacions naturals puntualment més esteses per la gestió de l'home.

Si bé l'obertura de canaletes excavades per l'home comporta la creació de micromodelats nous, com la formació de pseudolòbuls i microventalls al·luvials en el seu desguàs, l'impacte que aquestes accions tenen sobre la dinàmica solifluidal actual roman incert. L'extensió de la vegetació que comporta la dispersió d'aigües pot suposar un *feed-back* que ralentitzi o, fins i tot,aturi els processos solifluidals en aquests sectors.

## **8.2 Monitorització dinàmica i control tèrmic en lòbuls de solifluxió**

Si bé s'ha monitorat el dinamisme gelisolifluidal present de glaceres rocoses tant a Sierra Nevada (Gómez Ortiz et al., 2005) com a Pirineus (Serrano et al., 2006), aquesta recerca esdevé el primer intent d'esbrinar el dinamisme actual dels lòbuls de solifluxió i la reconstrucció de la seva activitat a escala holocena en el context peninsular.

La solifluxió a Sierra Nevada ve determinada per un ventall de variables estructurals (pendent, cobertura vegetal, textura) i d'altres externes més fluctuants a escala anual (règim tèrmic del sòl, duració i espessor del mantell nival, subministrament líquid), que dificulten la concreció dels factors clau en el seu moviment actual i passat.

Els lòbuls de la Sierra es situen en pendents compresos entre els 4 i 26°, amb prop d'un 88% d'unitats concentrades en un rang entre els 5 i 15°, valors òptims per a la solifluxió (Ballantyne & Harris, 1994). La cobertura vegetal, com ja s'ha comentat anteriorment, és decisiva per activar la solifluxió i està en funció de la topografia i de les condicions climàtiques regnants en cada període. El tamany del material mobilitzable per la solifluxió està condicionat per la capacitat de transport determinada per les condicions climàtiques

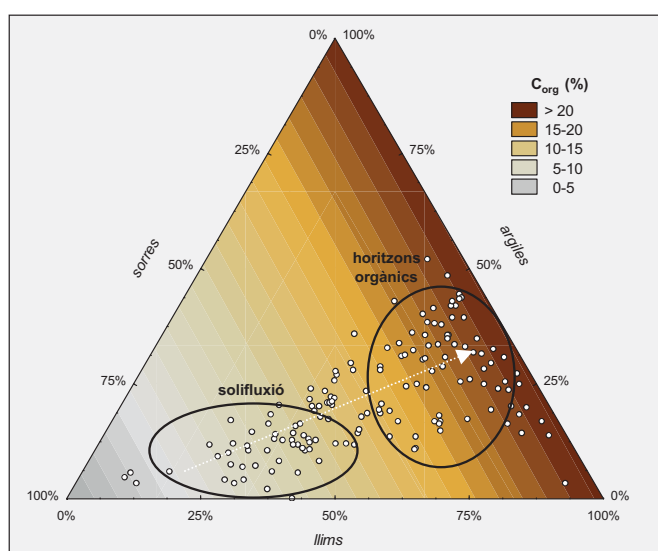


Figura 8.1. Relació entre  $C_{org}$  i textura en els horitzons orgànics i dipòsits solifluidals.

de cada moment i mostra una clara correlació amb el contingut de matèria orgànica<sup>79</sup>: períodes que es corresponen amb dipòsits de graves i sorres mostren fraccions orgàniques reduïdes, mentre que fases que s'expliciten en horitzons més orgànics es caracteritzen per una fracció fina bàsicament constituïda per llims i argiles (figura 8.1).

El subministrament líquid en els lòbuls depèn molt especialment de la cobertura nival; en el cas de Sierra Nevada, períodes amb precipitacions nivoses elevades seran els més favorables per a la solifluxió, ja que suposen una major romanència de congestes de neu en alçada a principis d'estiu en presència encara d'un horitzó glaçat en profunditat. Aquest mateix mecanisme ja ha estat descrit en àmbits d'altres latituds septentrionals (Seppälä, 1993; Ulfstedt, 1993).

<sup>79</sup> Són significatives les correlacions entre el  $C_{org}$  i: graves ( $r = -0,59$ ), gS ( $r = -0,65$ ), mS ( $r = -0,67$ ) i fS ( $r = -0,65$ ), gU ( $r = 0,39$ ), mU ( $r = 0,65$ ) i fU ( $r = 0,71$ ) i T ( $r = 0,26$ ). Destaca el canvi de signe de la correlació entre sorres fines i llims grans, insinuant un límit nítid en el binomi solifluxió-desenvolupament edàfic. La notorietat de les correlacions explicitades validen, a més, la quantificació de la textura i el contingut de matèria orgànica com a mètodes especialment útils per a estudis de reconstrucció dels processos solifluidals.

Avui en dia, però, les condicions climàtiques no són propícies per a una solifluxió activa. La monitorització dinàmica que s'ha portat a terme des d'agost de 2005 fins agost de 2008 en lòbuls de Rio Seco i San Juan constata una activitat solifluidal molt dèbil actualment en el massís.

Només es van detectar desplaçaments en un 30% de les estaquetes instal·lades en unitats del circ de Rio Seco registrant moviments  $\sim 0,3$  cm/any, mentre que en un 80% de les estaquetes de San Juan les tasses de desplaçament anual assolien  $\sim 0,5$  cm/any. L'orientació nord d'aquesta vall es tradueix en una major existència de congestes de fusió tardana i un nivell glaçat més profund que expliquen una solifluxió lleugerament més activa (figura 8.2).

Els petits desplaçaments detectats són molt similars a l'*uplift* derivat de l'expulsió de les estaquetes per efecte dels cicles de gel-desgel, essent en tots els casos inferior a 0,5 cm/any. A més, en aquells lòbuls amb major subministrament líquid entre un 4-21% de les estaquetes posen de manifest enfonsaments relatius, és a dir, sobresurten menys respecte a les mesures preses l'any anterior; aquest fet es pot explicar pel creixement vertical de la vegetació, conseqüència de la bioconstrucció torbosa del lòbul durant un període favorable a l'edafogènesi i/o per l'assentament de les estaquetes per efecte del desgel del terreny (Oliva et al., *accepted*).

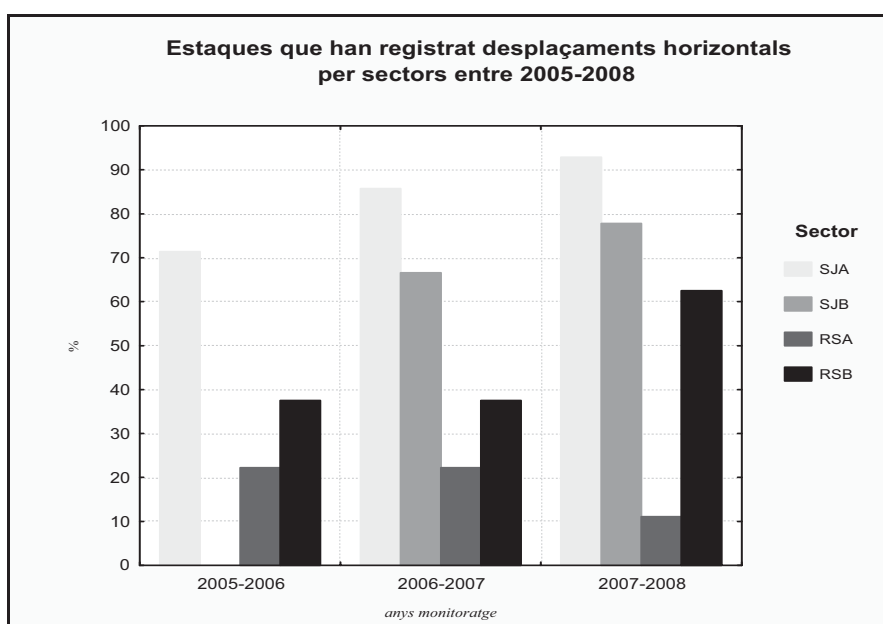


Figura 8.2. Moviment dels lòbuls per sectors entre 2005-2008.



El control tèrmic realitzat en un lòbul de Rio Seco entre 2006-2008 i un altre de San Juan entre 2007-2008 mostra l'existència d'una capa glaçada estacionalment (entre 6-8 mesos) d'uns 70-100 cm de profunditat. Les condicions climàtiques anuals determinen la profunditat i durada d'aquesta capa glaçada, que s'ha mostrat determinant en l'efectivitat dels processos solifluidals (Matsuoka, 2001). A la vall de Rio Seco els sensors detecten un horitzó glaçat d'uns 70 cm de profunditat a finals d'hivern i inicis de primavera de 2007 i 2008, mentre que a San Juan aquesta capa glaçada arriba a assolir més d'un metre d'espessor (taula 8.1). El desglaçament dels lòbuls, tot i retardar-se unes setmanes per nevades tardanes d'abril i maig, esdevé tan bon punt la superfície roman lliure de l'element blanc.

Taula 8.1. Síntesi del monitoratge tèrmic dut a terme en els lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada.

RÈGIM TÈRMIC DEL SÒL EN ELS LÒBULS MONITORATS								
ID	H	P	D <sub>e</sub>	D <sub>s</sub>	D <sub>p</sub>	P <sub>màx</sub> (cm)	Moviment cm/any	Cicles G-D T/P
RSA.7	3.005	Set'06 a ago'07	24-11	09-05	07-06	~70	0	2/5
		Ago'07 a ago'08	29-11	01-06	12-06	~70	0	0/6
SJB.38	2.817	Ago'07 a ago'08	31-10	01-05	04-06	> 100	~0,5	1/4

ID: lòbul; H: alçada; P: període; D<sub>e</sub>: data englaçament; D<sub>s</sub>: data desglaçament en superfície; D<sub>p</sub>: data desglaçament en profunditat; P<sub>màx</sub>: màxima profunditat glaçada; Cicles G-D T/P: cicles de gel-desgel a -10 cm de profunditat, tardor/primavera.

Les escasses setmanes que transcorren entre els primers dies que es registren valors positius en la superfície del lòbul i el seu complet desglaçament és el període idoni per a la solifluxió a Sierra Nevada (taula 8.1). La fusió nival, a més de permetre l'embat directe de la radiació solar sobre l'edifici lobular, suposa una aportació d'aigua en el sòl. El nivell glaçat existent en profunditat, impermeable, acumula l'aigua de fusió i facilita petits lliscaments del paquet superficial superior. A més, la repetició de cicles de gel-desgel durant aquests dies, molt més freqüents que a la tardor (on, a més, la humitat en el sòl és inferior), possibilita la translocació i crioreptació de les partícules més superficials, augmentant així teòricament l'eficàcia de la solifluxió. Tanmateix, a la pràctica no es van constatar desplaçaments significatius en cap dels lòbuls monitorats.

En el lòbul de Rio Seco, malgrat registrar-se un nivell glaçat de fins a 70 cm de profunditat en els dos anys de mesura, les estakes no van detectar cap desplaçament. El lòbul de San Juan, tot i estar situat més de 180 m per sota, la capa glaçada arriba a superar el metre més superficial, mostrant un ràpid desglaçament per la base en tallar-se el subministrament de fred en superfície. Durant el període de control, el desplaçament detectat fou de només 0,5 cm/any. Les dades tèrmiques i les referents al monitoratge dinàmic dels lòbuls induïxen a considerar que la temperatura no és el factor crucial per activar la solifluxió a Sierra Nevada, sinó molt especialment la humitat en el sòl.

### **8.3 Cronologia solifluidal holocena a Sierra Nevada**

Els lòbuls de solifluxió són registres sedimentaris presents en el cinturó periglacial actual de Sierra Nevada que engloben en la seva estructura una seqüenciació de dipòsits solifluidals i horitzons edàfics. El fet de que aquestes geoformes siguin molt poc actives o pràcticament inactives sota el present règim climàtic induïx a considerar que es van desenvolupar durant unes condicions climàtiques més propícies per a la inestabilització dels vessants nevadenses. Així, l'alt grau de vegetaltzació dels lòbuls és una prova evident del paper clau que juga la disponibilitat d'aigua com a factor limitant de la solifluxió. Els lòbuls es van desenvolupar en aquells sectors on, a més de la topografia adient, un elevat subministrament líquid permetia l'activitat solifluidal. Les morfologies lobulars, aleshores actives i de cobertura vegetal escassa, es van anar colonitzant d'un incipient recobriment herbaci conforme les temperatures van anar augmentant; la progressiva vegetaltzació dels lòbuls es veu retroalimentada per altres mecanismes (menys congestes de fusió tardana, sòl glaçat menys profund i de previ desglaçament, menor disponibilitat hídrica durant el desglaç, etc) que apaivagaven els processos periglacials al massís (figura 8.3).

Matthews (1993) ja adverteixen de la dificultat d'obtenir cronologies amb una precisió de  $\pm 200$  anys en ambients sota la dominància de processos solifluidals. En el cas de Sierra Nevada, la inexistència de diferents tipologies de sòls fossilitzats per la solifluxió que permetin el seu control temporal com en el cas dels Alps austríacs (Veit, 1988) o la manca d'un potent *dataset* de datacions com en el cas dels Alps suïssos (Gamper, 1983), limiten la precisió dels resultats obtinguts.

Els lòbuls estudiats evidencien fins a nou fases solifluidals i edàfiques diferents a les capçaleres de les valls durant l'Holocè, denotant així l'elevada sensibilitat dels processos geomorfològics freds a Sierra Nevada i la proximitat dels seus límits climàtics. Els lòbuls de la vall de San Juan presenten un abast cronològic major, assolint els darrers 7 ka BP; en canvi, els lòbuls de Rio Seco, menys nombrosos i emplaçats a major alçada, presenten un origen més proper en el temps, englobant, tot just, els dos últims mil·lennis.

La tendència observada respecte de la dinàmica climàtica constata que períodes més freds i/o humits que l'actual tendeixen a promoure desplaçaments solifluidals, mentre que períodes més càlids indueixen l'extensió del tapís vegetal i el desenvolupament edàfic per sobre dels 2.500 m a la Sierra. Condicions més fredes lligades a índexs d'humitat més elevats permeten una major durada del mantell nival conduïda per l'increment de les precipitacions nivoses a l'hivern i una fusió més tardana a primavera, fet que també posposa i allarga l'extensió de l'horitzó glaçat (malgrat que un mantell nival més espès priva la formació d'un pregon nivell glaçat). El cicle vegetal de la cobertura herbàcia que recobreix els lòbuls durant fases més càlides propícies per a l'edafogènesi es veu escurçat i la coberta vegetal disminueix, inhibint el relatiu aïllament tèrmic que suposa la vegetació per a la penetració de l'ona tèrmica en profunditat a la tardor. Si bé la vegetació suposa un fre per a la solifluxió, la seva mancança l'incentiva. El règim de temperatures que activa la solifluxió ve determinat especialment per valors tèrmics més baixos durant l'estació de desglaç, que propicien una fosa més prolongada i una major persistència de la superfície glaçada en profunditat, la qual facilita el lliscament dels primers centímetres de sòl per gelifluxió. No es contempla que registres tèrmics superiors puguin implicar solifluxió.

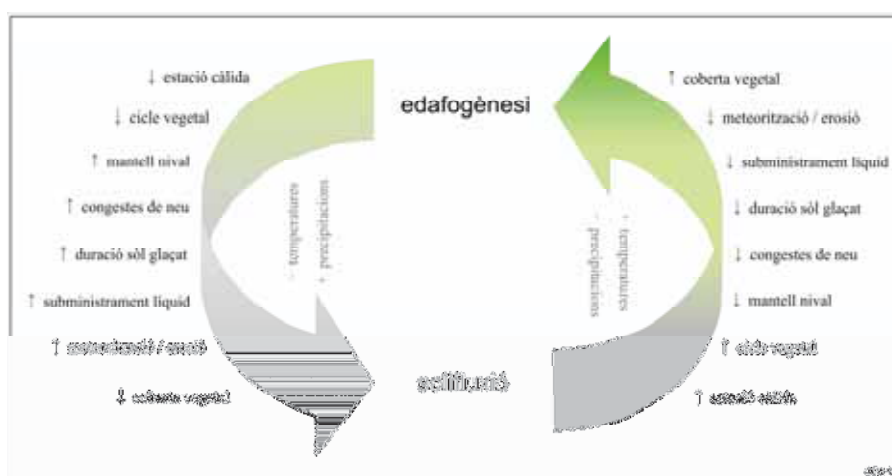


Figura 8.3. Esquema de les variables que intervenen en la solifluxió-edafogènesi.

El desenvolupament edàfic es veu intensificat per elevades temperatures primaverals i estivals, mentre a l'hivern, inclús en períodes més càlids que l'actual, les temperatures a l'àrea d'estudi són prou baixes com per propiciar l'englaçament del sòl. La combinació d'una major coberta nival i unes temperatures més elevades pot facilitar també la formació d'un horitzó glaçat menys profund i propiciar més disponibilitat d'aigua durant el desglaç: s'allarga l'estació càlida amb més humitat en el sòl, incentivant-se així l'edafogènesi.

El *timing* de les precipitacions més favorable per a la solifluxió es correspon amb un increment de les precipitacions hivernals-primaverals que comportin més neu i determinin un subministrament líquid més elevat en capçalera durant el desglaç, proporcionant així aigua efectiva per al moviment dels lòbuls. Un augment de les precipitacions líquides durant l'estació càlida, quan la fusió nival ja ha esdevingut i els lòbuls romanen lliures de sòl glaçat en profunditat, no tendria a créixer la solifluxió en el massís; ans al contrari, l'edafogènesi es beneficiaria d'increments d'humitat en el sòl, especialment a l'estiu, els quals intensificarien el desenvolupament orgànic (figura 8.6).

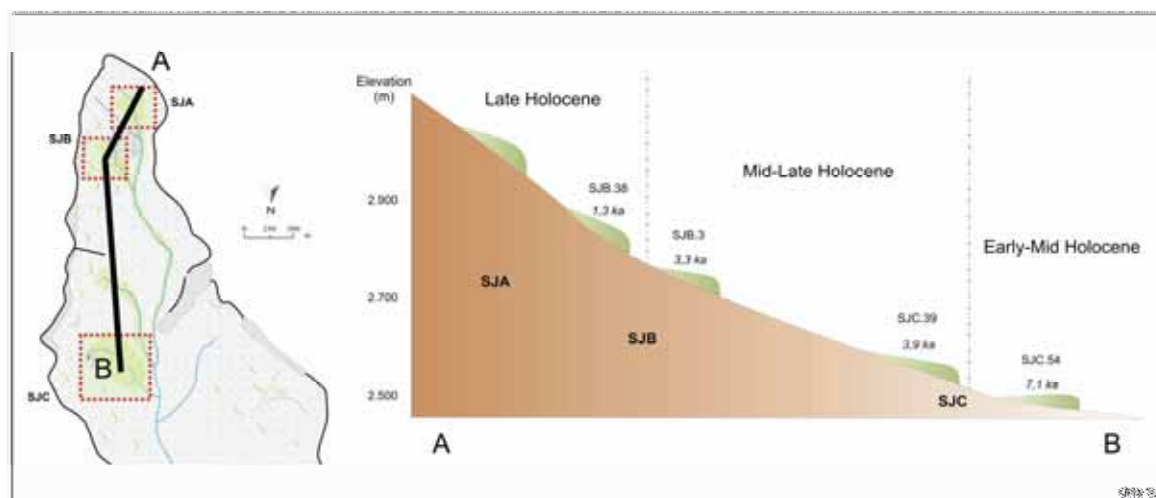


Figura 8.4. Edats dels sòls més antics desenvolupats sobre dipòsits solifluidals al barranc de San Juan.

La cronologia de la solifluxió a Sierra Nevada suggereix que els lòbuls més antics s'emplacen en els sectors situats a menor altura de la cara nord<sup>80</sup>, lleugerament per sota dels 2.500 m, on es constaten dipòsits solifluidals corresponents a l'Holocè inferior i mitjà (SJC). Remuntant de cota trobem evidències d'activitat solifluidal durant l'Holocè mitjà i

<sup>80</sup> La inexistència de lòbuls a diferents altures a Rio Seco, on tots ells estan concentrats entre els 2.900 i 3.000 m, impossibilita constatar la mateixa seqüència altitudinal que a San Juan.

superior al voltant dels 2.800 m en la mateixa vall de San Juan (SJB), denotant que la solifluxió s'ha anat instal·lant progressivament en cotes superiors durant l'Holocè, acomodant-se a les condicions climàtiques imperants, dominades per una tendència a l'aridesa des de l'Holocè Mitjà, tal i com testimonien els sediments lacustres del vessant sud.

Cal considerar també la possibilitat de que la successió cronològica en relació amb l'alçada que evidencia la figura 8.4 sigui conseqüència de que la solifluxió, en arrecerar-se en cotes cada vegada més elevades durant l'Holocè, hagi erosionat possibles dipòsits de vessant d'edats més antigues, mentre que en no activar-se en cotes més baixes hagin romàs intactes els registres d'edats més antigues. Durant la LIA es trenca aquest esquema i la solifluxió s'activa per sota dels 2.500 m a San Juan, posant de manifest un retorn a condicions marcadament fredes i humides.

Les dues fases de major activitat solifluidal dels nostres registres semblen constatar-se durant la Neoglaciació ( $S_6$ ) i la LIA ( $S_2$  i  $S_1$ ). La remobilització de sorres i graves durant aquests períodes indueix a considerar un increment de la capacitat de rodatge i transport de la fracció mineral per efecte d'una major disponibilitat líquida que, lligada a unes temperatures més baixes, facilita el lliscament de la superfície saturada d'aigua sobre el sòl glaçat profund.

L'existència de potents dipòsits solifluidals corresponents a la LIA en alçades inferiors a 2.500 m, quan actualment la solifluxió és molt puntual a cotes de 2.900-3.000 m, porta a considerar unes condicions sensiblement més fredes i humides durant aquest període. Xifrant-se l'augment tèrmic registrat a la Península Ibèrica des de les fases més fredes de la LIA respecte l'actualitat en 0,8-1,7°C (Martínez-Cortizas et al., 1999; López Moreno, 2000; González Trueba et al., 2008), i considerant el gradient tèrmic vertical mitjà de 0,65°C/100 m, els processos geomorfològics remunten uns 150-200 m d'ençà la LIA: la temperatura no explica per sí sola l'augment de més de 450-500 m entre els processos solifluidals dominants a cotes de 2.470 m durant la LIA i l'actualitat, en que són marginals fins a alçades de 3.000 m (figura 8.5).

La precipitació va jugar un paper clau per activar la solifluxió fins a cotes inferiors a 2.500 m durant la pulsació freda S<sub>1</sub> (Oliva, 2008). A partir de fonts documentals, Rodrigo et al. (1999) determinen la màxima intensitat de la LIA a Andalusia entre 1590-1650, amb temperatures sensiblement més baixes i precipitacions notablement superiors conduïdes per la recurrència de baixes pressions en el golf de Cadis (Oliva et al., 2006), que molt possiblement es reflecteixen en els processos geomorfològics de la Sierra amb la fase solifluidal S<sub>1</sub>. En aquest sentit, la figura 8.5 exemplifica i confirma la proposta de Gómez Ortiz et al. (2004) en relació amb els ambients morfogenètics dominants des de la LIA a la Sierra.

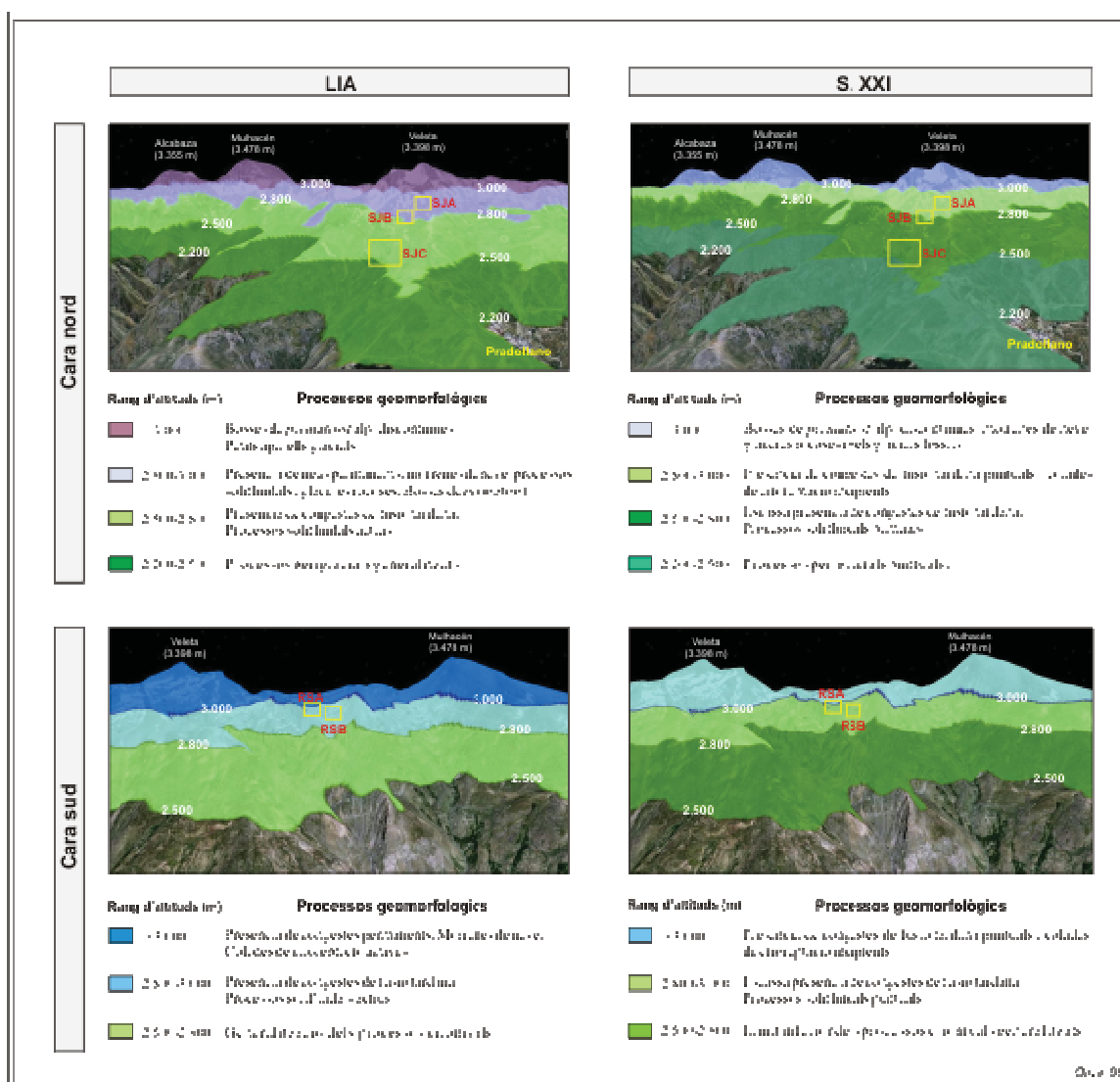


Figura 8.5. Variacions altitudinals dels processos geomorfològics dominants durant la LIA i l'actualitat en ambdós vessants del massís.

A partir de l'estudi de la sedimentologia dels lòbuls considerats podem deduir fins a quatre fases solifluidals que comportaren una menor activitat de vessants ( $S_7$ ,  $S_5$ ,  $S_4$  i  $S_3$ ), amb menys capacitat de mobilització de graves i sorres. Aquestes fases no devien anar acompanyades d'unes condicions climàtiques tan favorables per a la solifluxió, tot i que deuen correspondre's amb caigudes relatives de la temperatura i lleugers increments de la precipitació.

En canvi, la progressiva atenuació de les temperatures disminuiria l'efectivitat dels processos periglacial i la solifluxió tendria a decreïxer o, fins i tot, a remetre. A la nostra àrea d'estudi, en alçades superiors als 2.500 m, sembla constatar-se que fases més càlides, tot i anar acompanyades de moments amb menor humitat com durant el RWP o el MWP (Jalut et al., 2000), tendeixen a incentivar el desenvolupament de sòls. A mesura que augmenten les precipitacions es detecta una evolució des de sòls poc estructurats, que només suportaven una vegetació dispersa i clapejada colonitzant els dipòsits de vessant (regosòls), fins a potents nivells edàfics ben desenvolupats que arribaven a assolir continguts orgànics torbosos (histosòls). L'aridesa dominant durant els dos períodes que han originat regosòls ( $E_6$  i  $E_2$ ) roman ben caracteritzada pel més recent dels quals a partir de la reconstrucció de la precipitació històrica de Rodrigo et al. (1999) que detecta precipitacions inferiors a les actuals en el context regional<sup>81</sup>. Els períodes més càlids i humits, i les fases amb règims d'humitat més modestos però temperatures elevades persistents, han promogut la formació d'histosòls més o menys desenvolupats durant l'Holocè ( $E_9$ ,  $E_8$ ,  $E_7$ ,  $E_5$ ,  $E_4$ ,  $E_3$  i  $E_1$ ).

#### **8.4 Dinàmica de vessants holocena inferida a partir dels sediments lacustres i integració amb els registres sedimentaris solifluidals**

L'estudi dels sediments que acullen les nombroses llacunes existents a les capçaleres dels principals circs glacials del sector occidental de Sierra Nevada permet una fidedigne reconstrucció de l'evolució ambiental a les culminacions del massís. Les llacunes nevadenses, ubicades en alçades superiors als 3.000 m, constitueixen els cossos d'aigua dolça localitzats a major alçada no només de la Península Ibèrica, sinó de tot el sud europeu. Actualment, s'emplacen en l'estatge alpí en cotes on els processos periglacial es

---

<sup>81</sup> Veure figura 2.15, pàg. 66.

veuen reforçats per la nuesa vegetal existent; es troben, per tant, immediatament per sobre dels lòbuls de solifluxió i poden servir per contextualitzar climàticament la inestabilitat de vessants durant l'Holocè i la seva correspondència amb l'activació de la solifluxió en el massís.

En parlar d'inestabilitat o activitat de vessants es pretén posar de relleu aquelles condicions climàtiques que es reflecteixen en els processos geomorfològics de la Sierra en un augment de la meteorització física del rocam, ja debilitat per l'acció mecànica de les glaciacions quaternàries i del periglaciariisme durant l'Holocè, un increment de l'erosió i de la mobilització del material denudat. La translocació de les partícules alliberades es veu acreixentada per la major escorrentia superficial, que és capaç d'arrossegar-les en suspensió i/o dissolució, depenent de les condicions climàtiques i de l'època de l'any. Els sediments lacustres també mostren mecanismes de sedimentació mineral vinculats a la dinàmica de *debris flows*, els quals es veuen afavorits en capçalera pels elevats pendents entre les crestes dels circs i els llacs: la saturació del sòl en la zona de ruptura i l'energia potencial canalitzen la deposició de material més groller cap al fons dels llacs.

Certament, tal i com s'ha detallat en l'apartat 7.3, es constata una lògica sincronia entre períodes amb domini de la solifluxió i moments de major aportació mineral als llacs. De la mateixa manera, les fases amb condicions favorables per a l'edafogènesi en el pis periglacial actual es correlacionen amb episodis de més vegetació a la conca i menor activitat de vessants. Les fases caracteritzades per elevades precipitacions i baixes temperatures suposen una caiguda de la cobertura herbàcia dispersa que s'escampa pel pis periglacial durant períodes d'estabilitat geomòrfica. S'inhibeix així el fre vegetal als processos de vessant i s'incentiva la mobilització superficial de partícules minerals i restes de plantes incapaces d'adaptar-se a la combinació de més fred i humitat, veient sensiblement reduïda l'estació efectiva per al seu cicle vital. A més, les noves condicions ambientals es caracteritzen per una cobertura nival superior i més duradora, major persistència del sòl glaçat estacional, una reducció del període lliure de gel a les llacunes i una profusió de congestes de neu durant l'estació càlida que allarguen el subministrament líquid a les llacunes: es redueix la bioproduktivitat aquàtica i terrestre, minvant la cobertura vegetal herbàcia de la conca de drenatge i augmentant la fracció mineral dipositada. Aquest conjunt de canvis paleoecològics que esdevenen a la Sierra es perceben



en sengles arxius sedimentaris estudiats: els sediments lacustres detecten impulsos de major activitat geomòrfica a les capçaleres dels barrancs i els lòbuls constaten, de manera paral·lela, una activació de la solifluxió a Sierra Nevada.

L'atenuament d'aquestes condicions fredes inicia una tendència gradual a la recuperació de la productivitat lacustre i de la cobertura vegetal (en funció dels índexs d'humitat associats), la qual tendeix a frenar els processos solifluidals anteriorment dominants. En períodes càlids amb menor disponibilitat d'aigua, destaca el domini de la rexiàstia, amb estabilització dels vessants i una incipient edafogènesi (regosòls) en aquells sectors de major subministrament líquid; valors tèrmics elevats lligats a increments dels índexs de precipitació comportaven el reforçament del desenvolupament edàfic en els fons de vall i capçaleres de torrents (histosòls), de manera paral·lela a augments en l'activitat biològica en els llacs.

La recerca es va dur a terme en quatre llacunes d'altura: tres emplaçades en el vessant meridional amb existència de datacions en els *cores* extrets d'elles (Laguna de Aguas Verdes, Laguna de Rio Seco i Lagunilla de Rio Seco) i només una en el septentrional sense datacions (Lagunilla de San Juan). La cronologia paleoambiental derivada dels sediments lacustres de la Sierra es veu imperiosament dificultada pels problemes metodològics posats de manifest pels resultats obtinguts de les mostres enviades a datar, que es resumeixen bàsicament en l'efectivitat del conjunt de processos erosius post-sedimentaris a les llacunes de Sierra Nevada, on, alhora, les baixes tasses de sedimentació per sobre del *treeline*, dificulten l'obtenció de cronologies precises. El minuciós estudi sedimentari a precisió centimètrica dels 7 *cores* extrets de Sierra Nevada constata una interessant successió d'esdeveniments ambientals, tot i que la cronologia d'aquestes variacions paleoecològiques que han tingut lloc en el massís durant l'Holocè, resulta, doncs, orientativa. Tanmateix, la millor precisió geocronològica que emana de la recerca relativa als lòbuls de solifluxió permet contrastar sengles patrons de resposta geomorfològica en ambdós registres.

La taula 7.1 resumeix la informació paleoambiental relativa a cada llacuna. Els *cores* semblen evidenciar un major dinamisme dels processos geomorfològics en el vessant nord de la Sierra, mentre que a la cara sud del massís, si bé es detecten notables variacions

paleoecològiques prolongades durant l'Holocè mitjà, aquestes esdevenen més breus i relatives durant els darrers 4 mil·lennis. La correlació dels avenços solifluidals i fases de major aportació mineral a les llacunes mostra una correspondència més evident durant els darrers 4 ka BP, degut al major nombre de datacions existent (figura 7.7). L'Holocè mitjà es manifesta en els lòbuls amb un domini dels processos edàfics i es plasma en els sediments lacustres amb una prevalença de valors molt elevats de matèria orgànica<sup>82</sup> durant un període caracteritzat per unes temperatures més elevades que les actuals (HWP), que emmascara, però, dues sensibles pulsacions de vessants (F<sub>8</sub> i F<sub>7</sub>).

Entre 5-4 ka BP esdevé la fase solifluidal S<sub>7</sub> que es correspon amb un increment de l'activitat de vessants detectada en els sediments lacustres (F<sub>6</sub>), seguit d'un període d'estabilitat geomorfològica entre 4-3,7 ka BP (E<sub>7</sub>), el qual coincideix amb un increment de l'aridesa (Jalut et al., 2000). La Neoglaciació és un període fred en el continent europeu que es reflecteix en nivells dels llacs més elevats, disminució de l'alçada dels *timberlines*, avenços glacials, abandonament de l'agricultura en certes regions i augment de la solifluxió en les àrees de muntanya (Bell & Walker, 2005) i es percep en dos avenços solifluidals a Sierra Nevada (S<sub>6</sub> i S<sub>5</sub>) de manera paral·lela a un increment de l'erosió i la mobilització mineral a les capçaleres de les llacunes (F<sub>5</sub>).

La disminució de les precipitacions i uns valors tèrmics generalment superiors dominen entre 2,8-0,8 ka BP, amb prevalença de desenvolupament de sòls en els sectors culminants de Sierra Nevada (E<sub>5</sub>-E<sub>3</sub>) i un major contingut orgànic a les llacunes, les quals denoten un minvament en l'efectivitat dels processos de vessant. Cal esmentar, però, dos períodes que trunquen temporalment aquesta pauta (F<sub>4</sub>-S<sub>4</sub> i F<sub>3</sub>-S<sub>3</sub>), on la major humitat va derivar en una relativa inestabilització dels pendents cimers i breus impulsos solifluidals. El canvi gradual de condicions àrides a més humides a tombant de l'últim mil·lenni i una disminució tèrmica que es manifesta eficaçment en els vessants de l'estatge alpí de la Sierra entre 850-700 anys BP determinen la fase solifluidal S<sub>2</sub>, que correlaciona amb el període actiu de vessants F<sub>2</sub>, en una pulsació inicial de la LIA. Cal destacar un breu període de condicions menys fredes i un retorn a menors precipitacions en el sud peninsular entre 700-400 anys BP, amb un desenvolupament edàfic incipient constatat en

---

<sup>82</sup> Especialment evidents en els llacs de Rio Seco, amb un C<sub>org</sub> que assoleix el 14% a la Laguna i al 12% a la Lagunilla homònima.

la formació de regosòls en aquells sectors d'altura amb major presència d'aigua ( $E_2$ ). La fase més humida i freda de la LIA a la Sierra esdevé a cavall dels segles XVI i XVII (Rodrigo, 1994) i determina una notable inestabilització dels vessants ( $F_1-S_1$ ): s'estenen i intensifiquen els processos solifluidals i l'aportació de material als llacs. D'aleshores ençà, la inèrcia tèrmica a l'alça es combina amb un increment de la transhumància a la Sierra (Martín Civantos, 2007)<sup>83</sup>, explicitant-se ambdós en un augment de la cobertura vegetal al cinturó periglacial, una extensió i intensificació de l'edafogènesi i una reducció de l'activitat de vessants ( $E_1$ ).

### **8.5 Sensitivitat dels processos geomorfològics dominants a l'evolució paleoclimàtica holocena**

Els nombrosos canvis sedimentològics que testimonien els arxius naturals de Sierra Nevada, tant els terrestres (lòbuls de solifluxió) com els aquàtics (llacunes d'alçada), posen de manifest la proximitat dels processos geomorfològics del massís dels seus límits climàtics i l'escàs rang climàtic necessari per implicar un canvi de condicions ambientals. Aquesta variabilitat es deu a les singulars característiques del massís, que ultrapassa els 3.000 m d'alçada, a 37°N, en l'apèndix sud-occidental del continent europeu, i a la seva posició frontissa en un trànsit d'influències geogràfiques (continent europeu-continent africà), marítimes (oceà Atlàntic-mar Mediterrani), climàtiques (cinturó d'altres pressions subtropicals-*westerlies* mitges latituds). Sierra Nevada ha actuat durant l'Holocè a manera d'altaveu natural de la dinàmica climàtica holocena a l'Atlàntic Nord: petits canvis en la CGA han determinat variacions en la resposta geomorfològica dels processos dominants en les culminacions de la Sierra.

La cronologia holocena de la solifluxió, i, en extensió, de l'activitat de vessants a Sierra Nevada, ha constatat que els períodes climàticament més favorables per a la inestabilitat geomòrfica són aquells que combinen temperatures estivals baixes i elevades precipitacions nivoses durant el semestre fred de l'any. Es constata, però, que pot haver-hi una lleugera dinàmica de vessants amb temperatures càlides durant l'estació lliure de neu que vagin associades a règims d'humitat superiors. L'activitat de vessants també es pot veure reforçada per una brusca disminució tèrmica i majors precipitacions que, inclús,

<sup>83</sup> Veure els apartats 2.1.5 (pàg. 45) i 4.2.1 (pàg. 128).

arribin a comportar un retorn a condicions glacials i de *permafrost* en el nivell de cims de Sierra Nevada, tot i que tal situació, durant l'Holocè, només s'ha constatat puntualment en el vessant septentrional.

L'edafogènesi, per la seva part, es veu potenciada per precipitacions d'estiu i d'hivern superiors i valors tèrmics més elevats d'estiu; un increment relatiu d'humitat suposaria un desenvolupament edàfic incipient (regosòls), mentre una major persistència i intensitat d'aquesta tendència incentivaria la formació de sòls ben estructurats amb continguts orgànics torbosos (histosòls).

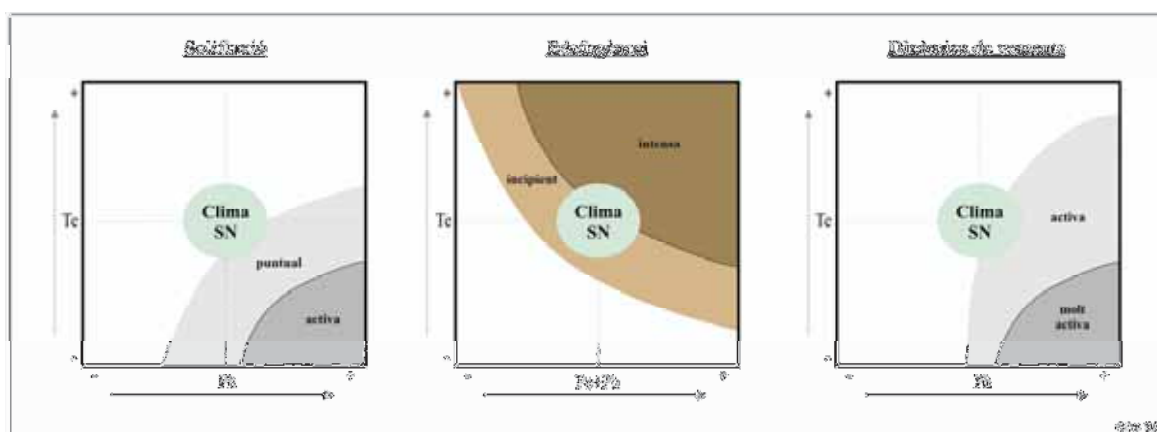


Figura 8.6. Model teòric de les condicions climàtiques propícies per a la solifluxió, edafogènesi i dinàmica de vessants a Sierra Nevada ( $T_e$ : temperatura estiu;  $P_e$ : precipitació estiu;  $P_h$ : precipitació hivern).

L'activitat dels vessants de Sierra Nevada ve determinada per una conjunció de factors climàtics determinats per un solapament de variables de diferents escales geogràfiques:

- **Globals**, com les variacions en la intensitat de la radiació solar incident durant l'Holocè (Stuiver et al., 1997). La sensibilitat dels medis alpins a les anomalies de radiocarboni ja s'ha posat de manifest en el *timing* dels processos geomorfològics en sectors de fons de vall com en els Alps suïssos, per exemple, on les múltiples fases de major dinamisme geomòrfic coincideixen amb períodes freds i el domini de l'estabilitat preval sota règims climàtics més càlids (Schulte et al., 2008). La resposta de la dinàmica de vessants en el cinturó alpi de Sierra Nevada suggereix un comportament similar a resolució més baixa:

- Fases fredes, relatives a mínims de radiació solar incident, inestabilitzen els pendents, activen la remobilització de les partícules i la solifluxió.
  - Períodes més càlids, de més flux energètic envers la superfície terrestre, impliquen un retorn a una certa estabilitat geomòrfica, estenent-se el recobriment vegetal dispers i el domini de la biostàsia.
- **Hemisfèriques**, realçant el paper clau de l'Atlàntic Nord i molt especialment de l'*inlandsis* groenlandès en la CGA holocena. Les fases de major o menor descàrrega d'aigua dolça a altes latituds de l'hemisferi septentrional han comportat una redistribució de les masses oceàniques atlàntiques determinant variacions en les condicions climàtiques imperants a l'Europa occidental i, en extensió, al marc ibèric peninsular. Els centres d'acció no han romàs estables durant l'Holocè, i s'han desplaçat, reforçat i debilitat en funció de la dinàmica general del sistema climàtic. Destaca una relativa sincronia entre la inestabilitat de vessants a Sierra Nevada i aquelles fases amb descàrregues massives d'*icebergs* a l'Atlàntic nord (cicles de Bond; Bond et al., 2001), que comportaven un refredament de l'oceà i de les àrees adjacents, desplaçant el front polar cap a posicions més meridianes.

Atès el caràcter predominantment hivernal de la precipitació a la Sierra, amb correlacions pluviositat-índex NAO  $r < -0,6$  a la façana occidental del massís pel semestre fred de l'any (Oliva & Moreno, 2008) i considerant que la solifluxió a Sierra Nevada està lligada a fases més humides lligades molt especialment a les precipitacions hivernals (figura 8.6), s'intueix que la reconstrucció de la solifluxió a Sierra Nevada deu anar lligat a règims de la NAO negatius durant els darrers mil·lennis. En aquesta línia, però, caldria aprofundir la recerca entorn a la dinàmica de vessants al massís, la seva relació amb la NAO a escala holocena i el seu calibratge amb el present.

- **Regionals**, apuntant la Península Ibèrica com un marc especialment sensible a les fluctuacions climàtiques holocenes. La contrastació amb *proxies* de zones properes (Alps, Mediterrani Occidental) posa de manifest una relativa anarquia en el comportament climàtic imperant en el conjunt de l'occident europeu. Cal admetre certa correlació entre aquells períodes més humits i fases d'augment de la inestabilitat de vessants a Sierra Nevada i la reactivació del desenvolupament

glacial als Alps (Jonasson, 1993; Jalut et al. 2000; Hormes et al., 2006); així succeeix durant la fase freda coneguda com a Neoglaciació, que es correspon amb el període de màxima precipitació al nord d'Àfrica (Cheddadi et al., 1998), de manera paral·lela a un increment de la solifluxió a Sierra. En general, les reiterades i persistents fases de sequera al Mediterrani Occidental (Jalut et al., 2000) es correlacionen amb períodes d'estabilitat geomòrfica a la Sierra, sense activitat solifluidal i repunt incipient de l'edafogènesi, coincidint amb episodis de retrocés de les masses glaçades dels Alps (Hormes et al., 2006).

- **Locals**, denotant que la compartimentació espacial i microclimàtica que imposa el complex relleu circummediterrani, propicia diferents respostes ambientals per a tendències de senyal climàtica regional. La contrastació dels períodes de solifluxió i de desenvolupament de sòls durant l'Holocè en tres sectors dels Alps n'és un exemple evident, emfatitzant-se notables diferències entre ells (figura 7.8). La seva comparació amb Sierra Nevada, a 2.000 km de distància, posa de relleu que només aquelles fases d'extrems climàtics més definits tenen respostes similars, ja sigui durant períodes freds (ex. Neoglaciació, LIA) com càlids (ex. RWP, MWP).

### **8.6 Seqüenciació d'esdeveniments ambientals i implicacions paleoclimàtiques a Sierra Nevada durant l'Holocè**

El principal objectiu de la present tesi doctoral és la reconstrucció paleoecològica dels sectors més elevats de Sierra Nevada en un interval temporal que emmarquem en l'actual període interglacial, és a dir, a l'Holocè. Els registres sedimentaris seleccionats per a tal escomesa, lòbuls de solifluxió i llacunes d'alçada, han resolt una complexa successió de canvis ambientals holocens a les culminacions de la Sierra. La taula 8.2 resumeix la cronologia dels canvis esdevinguts en el paisatge nevadense a partir de la informació detallada de lòbuls i llacunes, les tendències inferides de precipitació i temperatura i la resposta ambiental del paisatge cimer de Sierra Nevada a aquesta variabilitat climàtica.

L'absència de talls o tiges vegetals corresponents a espècies arbòries o arbustives en els registres sedimentaris estudiats constata que les condicions climàtiques holocenes no han permès l'expansió forestal fins a la zona d'estudi. Els registres solifluidals emplaçats a

menor alçada de SJC conclouen que, com a mínim, durant els darrers 8 ka BP, el límit superior del bosc no deu haver superat els 2.500 m<sup>84</sup>, deduint així que la temperatura no ha estat superior en ~2-2,5°C respecte a l'actual. Els registres també determinen que la LIA ha estat la fase més freda i humida, pel cap baix, de l'Holocè mitjà i superior, amb unes condicions especialment dures entre 1590 i 1650 (Rodrigo et al., 1999). En el sud peninsular aquesta pulsació freda és, per tant, anterior al MM (1675-1715), amb unes temperatures pel conjunt ibèric que oscil·len entre 0,8-1,7°C inferiors a les actuals (Martínez-Cortizas et al., 1999; López Moreno, 2000; González Trueba et al., 2008).

Per tant, el rang tèrmic que ha conduït notables canvis paleoecològics holocens en alçades compreses entre 2.500-3.000 m a Sierra Nevada s'ha mogut aproximadament en només  $\pm 2^\circ\text{C}$ . La llunyania d'aquests valors respecte de la disminució de 4-5°C de la temperatura mitjana experimentada durant el LGM (CLIMAP, 1981), que sotmetia les culminacions del massís a unes condicions plenament glacials, explica el domini dels processos periglacials més o menys intensos dominants durant l'Holocè a la Sierra. La variabilitat climàtica holocena ha desplaçat verticalment el cinturó periglacial en el massís: la nostra àrea d'estudi s'emplaçava en la meitat superior d'aquest pis altitudinal durant períodes freds i humits, on l'escassa cobertura vegetal reforçava l'erosió i mobilització mineral, i immediatament per sota en moments més càlids, on l'edafogènesi s'intensificava en sectors topogràficament favorables d'elevat contingut hídric i la cobertura vegetal dispersa i clapejada s'escampava minvant l'eficàcia dels processos de vessant.

En el vessant meridional, les llacunes constaten una disminució progressiva de la cobertura vegetal i de la productivitat lacustre paral·lela al descens tèrmic registrat des de l'Holocè mitjà ençà i a la tendència a l'aridesa iniciada entre 6-5 ka BP al nord d'Àfrica, que determina el règim desèrtic del Sàhara actual (Gasse, 2000). La figura 8.7 evidencia com aquesta mateixa tendència en el sud-est peninsular condiciona un gradual decreixement de l'escassa coberta arbòria existent i una extensió de les espècies arbustives (Burjachs et al., 1996, 2007).

---

<sup>84</sup> Actualment, el *timberline* es disposa entorn als 2.100-2.200 m.

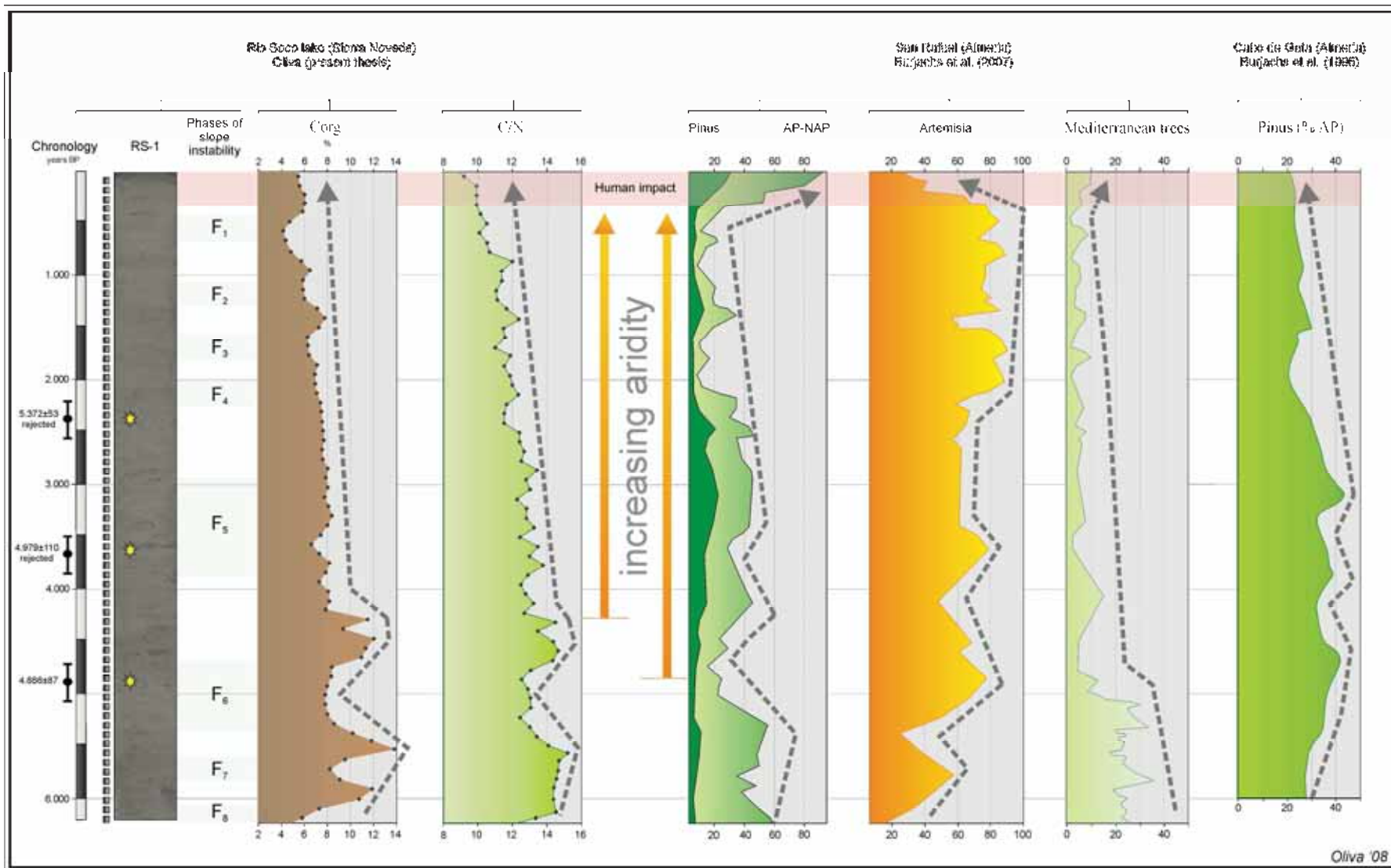


Figura 8.7. Correlacions entre dos diagrames pol·línics del sud-est peninsular (Burjachs et al., 1996, 2007) i els nostres registres lacustres a Sierra Nevada. A partir de l'Holocè mitjà, entre 4-5 ka BP, es detecten en ambdós arxius sedimentaris una sincrònica tendència cap a una major aridesa.



Taula 8.2. Quadre resum de les condicions climàtiques i paleoambientals derivades de la recerca en lòbuls i llacunes pels darrers dos mil·lennis.

FASES DE DINÀMICA DE VESSANTS EN LÒBULS I LLACUNES, CONDICIONS CLIMÀTIQUES I PALEOECOLOGIA HOLOCENA						
ka BP / anys BP	Registres sedimentaris				Condicions climàtiques	Reconstrucció paleoambiental
	Lòbuls de solifluxió		Llacunes			
	Solifluxió	Sòls	Activitat	Estabilitat		
1,8-1,6	S <sub>3</sub> : ↑		F <sub>3</sub> : ↑		~↑ P, ~↓ T	~↑ erosió / ~↑ input clàstic, solifluxió, ↓ cobertura vegetal
1,6-0,85		E <sub>3</sub> : ↑ (histosòl)		estabilitat	↓↓ P, ↑↑ T, aridesa	↓↓ erosió, ↑↑ productivitat llacs, estabilitat geomòrfica, ↑ vegetaltització
850-700	S <sub>2</sub> : ↑↑		F <sub>2</sub> : ↑		↑ P, ↓ T	↑ erosió / ↑ input clàstic, solifluxió, ↓ cobertura vegetal
700-400		E <sub>2</sub> : ~↑ (regosòl)		estabilitat	↓ P, ~↑ T	↓ erosió, ↑ productivitat llacs, estabilitat geomòrfica, ↑ vegetaltització
400-150	S <sub>1</sub> : ↑↑		F <sub>1</sub> : ↑↑		↑↑ P, ↓↓ T	↑↑ erosió / ↑↑ input clàstic, solifluxió, ↓ cobertura vegetal
150-s. XXI		E <sub>1</sub> : ↑ (histosòl)		estabilitat	~↓ P, ↑↑ T	↓↓ erosió, ↑↑ productivitat llacs, estabilitat geomòrfica, ↑ vegetaltització impacte humà, transhumància

S: fase solifluidal; E: fase de domini edàfic; F: fase d'inestabilitat de vessants

P: precipitacions; T: temperatures

~ estabilitat; ~↑ lleuger increment; ↑ increment; ↑↑ increment notable; ~↓ lleugera disminució; ↓ disminució; ↓↓ disminució notable

Les condicions entre 6-5 ka BP semblen refermar una notable vegetaltització a Sierra Nevada durant l'Holocè mitjà, amb una major aportació eòlica de carbonats que insinuen la persistència dels vents de component sud. L'aprofundiment de la baixa d'Islàndia durant aquest període sembla congruent amb una intensificació dels *westerlies* que, desplaçats a latituds més meridionals, propiciarien una entrada més recurrent de depressions pel golf de Cadis, comportant més precipitacions i major injecció de partícules saharianes aportades pels vents de sud i sud-oest associats.

Les condicions poc favorables a la solifluxió i a una activa dinàmica de vessants es tradueixen en una major vegetaltització dels circs meridionals fins a l'Holocè tardà. En efecte, els registres solifluidals de Rio Seco semblen iniciar la seva activitat durant els darrers 1.500-2.000 anys, no s'han trobat evidències d'activitat solifluidal prèvia durant l'Holocè. La datació d'un paleosòl (Go) d'edat Tardiglacial en el sector RSA evidencia, però, processos solifluidals durant les darreres crisis fredes de la desglaciació, que semblen aturar-se fins a l'Holocè tardà en el vessant meridional del massís.

L'augment de la variabilitat climàtica dels últims mil·lennis es tradueix a la cara sud de Sierra Nevada en una successió encadenada de fases de predomini de la solifluxió i de l'activitat de vessants i d'altres amb una certa recuperació vegetal i estabilitat geomòrfica. L'orientació meridional sembla clau per explicar una major comoditat de l'estabilitat de vessants, tot i el domini d'una cobertura vegetal manifestament escassa en el conjunt del circ de Rio Seco. Els vessants septentrionals han experimentat un major dinamisme que es constata tant en les llacunes com en els lòbuls. La vall de San Juan posa de relleu fins a vuit cicles d'alternança de la solifluxió i del desenvolupament edàfic durant els últims 7 ka BP. L'exposició septentrional esdevé clau per explicar els canvis ambientals, en què la major romanència de neu durant períodes freds i humits encendria un procés de *feed-back* positiu (subministrament líquid, sòl glaçat, reducció temporal del cicle vegetal) que alimentaria la inestabilització dels vessants de Sierra Nevada, disminuint la cobertura herbàcia que s'estén pels fons de vall sota el règim climàtic actual i activant la solifluxió. Aquestes condicions propiciarien també l'aparició de petits focus glacials en els circs més elevats de la cara nord. Pel contrari, les condicions tèrmiques més càlides tendrien a minvar l'efectivitat dels processos periglacials i a incentivar la formació de sòls incipients durant fases àrides (regosòls) i més desenvolupats durant períodes humits (histosòls).

