

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 2

L'ÀREA D'ESTUDI

2. L'àrea d'estudi

Sierra Nevada forma part de l'apèndix sud-occidental de l'orla alpina que circumda el Mediterrani i acull les alçades més elevades de la Península Ibèrica. El Mulhacén (3.478 m) i el Veleta (3.398 m) esdevenen els punts culminants d'un massís que, per la seva ubicació a 37° N de latitud i 3° W de longitud, participa d'elements propis del món tropical àrid amb característiques comunes d'ambients d'alta muntanya de latituds mitges. Precisament, la seva ubicació frontissa entre aquests dos àmbits es pressuposa determinant durant l'Holocè, marc cronològic de la nostra recerca, ja que petits desplaçaments latitudinals dels grans centres d'acció rectors de la CGA a l'Atlàntic Nord devien ser decisoris en el clima del sud peninsular.



Figura 2.1. Localització de l'àrea d'estudi a Sierra Nevada (Península Ibèrica).

En el context del sud-est peninsular, Sierra Nevada ressaltava per les seves peculiars característiques geogràfiques. Els marcats desnivells altitudinals de la Sierra esberlen el marc regional en un conjunt de microclimes i doten al massís d'una originalitat climàtica i geomorfològica excepcional entre el conjunt de les muntanyes andaluses. Sierra Nevada és un referent geogràfic en l'imaginari col·lectiu del sud peninsular, un puntal inherent i indissociable de la idiosincràsia regional, amb crestes mitificades que esdevenen una fita a assolir pels seus habitants i un medi a preservar pel conjunt de la societat andalusa.

El primer apartat s'iniciarà amb una minuciosa ressenya de la importància dels elements que han configurat el paisatge actual de Sierra Nevada. El clima ha treballat les sòlides estructures litològiques nevadenses, deixant-hi la seva empremta i contribuint en un remodelat continu fins als nostres dies. La singularitat geogràfica de la Sierra queda palesa en la combinació entre la poca cobertura vegetal que la vesteix i la riquesa florística que s'hi desenvolupa. Sierra Nevada, a més, té una importància hidrogràfica cabdal en el marc andalús, ja que constitueix un dels pocs deus dels quals s'abasteix aquest territori. Es discutirà també el paper històric de l'ocupació del territori per part de l'home com a vertebrador entre les planes litorals obertes al Mediterrani i a l'Atlàntic i les terres interiors encarades a la Meseta castellana. Posteriorment, el capítol es focalitzarà en l'estat de la qüestió relatiu al coneixement de l'evolució ambiental de Sierra Nevada, sintetitzant els treballs previs i emmarcant-los amb la variabilitat climàtica esdevinguda a escala regional, hemisfèrica i global en diferents escales temporals: des dels copiosos treballs relatius a les glaciacions pleistocenes fins a la recerca centrada en els processos freds que esdevenen actualment a la Sierra.

2.1 Característiques generals de l'àmbit d'estudi

2.1.1 Geologia i geomorfologia

Les Serralades Bètiques són una unitat estructural de la Península Ibèrica instal·lada en el seu quadrant sud-oriental i s'estenen des del golf de Cadis fins a les Illes Balears, constituint així el nexa d'unió entre les planícies costeres del sud-est peninsular, la vall del Guadalquivir i la Meseta. Emmarcada en les anomenades Serres Internes de les Bètiques, s'alça Sierra Nevada, amb les cotes més prominents del conjunt ibèric.

Les Bètiques són una serralada rejuvenida durant l'orogènia alpina, contemporàniament a les grans serralades del món (Pirineus, Alps, Himàlaia, etc). A finals del Terciari, els materials acumulats en els fons abisals del mar Tethys van plegar-se i elevar-se degut a les pressions exercides per l'embat de la placa africana contra l'euroasiàtica i, amb especial èmfasi, contra la subplaca ibèrica. Testimoni d'aquesta joventut són dos afloraments d'edat neògena emplaçats a 1.755 i 1.830 m en el marge occidental del massís, evidenciant tasses d'emersió especialment elevades, de l'ordre de 0,4-0,6 mm/any (Sanz de Galdeano & López Garrido, 1999).

Sierra Nevada està bàsicament constituïda per micasquistos, que basteixen el complex Nevado-Filabres, principal unitat geològica de les Serres Internes de les Bètiques. Les altres unitats que conformen les Serres Internes (Alpujàrrides i Malàguides), si bé apareixen en els marges adjacents al nucli axial de Sierra Nevada, no ho fan en els nivells culminants. En el flanc occidental del massís, àrea del nostre estudi, els esquistos i micasquistos feldespàtics aflorants estan fortament tectonitzats i alterats per la crioclàstia, amb nul·la presència de materials carbonatats. Sierra Nevada és un anticlinal rebregat amb una nombrosa xarxa de falles disposades en direcció SW-NE i NW-SE, que esberlen l'edifici estructural nevadense (figura 2.2). Al llarg de milions d'anys, els agents modeladors de l'escorça terrestre han retocat el relleu del massís fins als nostres dies; la seva elevada altitud, compacitat i extensió han possibilitat un ampli ventall de processos dinàmics modificadors del relleu. A més, les successives fluctuacions climàtiques quaternàries desplacen verticalment l'àmbit d'afectació d'aquests processos, fent encara més complexa la reconstrucció de la història geològica del massís.

Gómez Ortiz (2002) esquematitza el relleu de la Sierra en tres grans subconjunts: les altes cimes i capçaleres de barrancs, els vessants o lloms i el sistema de barrancs. Les parts culminants del massís combinen *horns* i altiplanícies, ambdues intensament retreballades per l'acció glacial i periglacial, amb una clara dicotomia entre la cara nord i la sud; el mateix Mulhacén n'és un bon exemple. Les valls de Sierra Nevada fins als 2.200-2.300 m, tenen el clàssic perfil de vall glacial, estretes i recolzades en el context estructural dominant. Els desnivells de més de 3.000 m en escasses desenes de quilòmetres condicionen una jerarquització i encaixonament notable de la xarxa fluvial; a l'Alpujarra, a més, cal associar a la nuesa del terreny, alts índexs d'erosió i un caràcter torrencial de les precipitacions, que determinen un sistema de barrancs profund i molt incidit.

El relleu actual ve condicionat principalment per la darrera glaciació i la posterior recuperació tèrmica. Les glaceres poleixen i erosionen les capçaleres de barrancs, que actuen com a circs, buidant-los de material i transferint-lo cap a parts més baixes; la seva empenta crea cubetes de sobreexcavació per erosió diferencial i morrenes, que seran ocupades pels llacs durant la desglaciació. El retorn a condicions més càlides expandeix el periglaciàricisme a les parts antigament ocupades per les glaceres, entapissant els vessants de rocam i suavitzant els pendents.

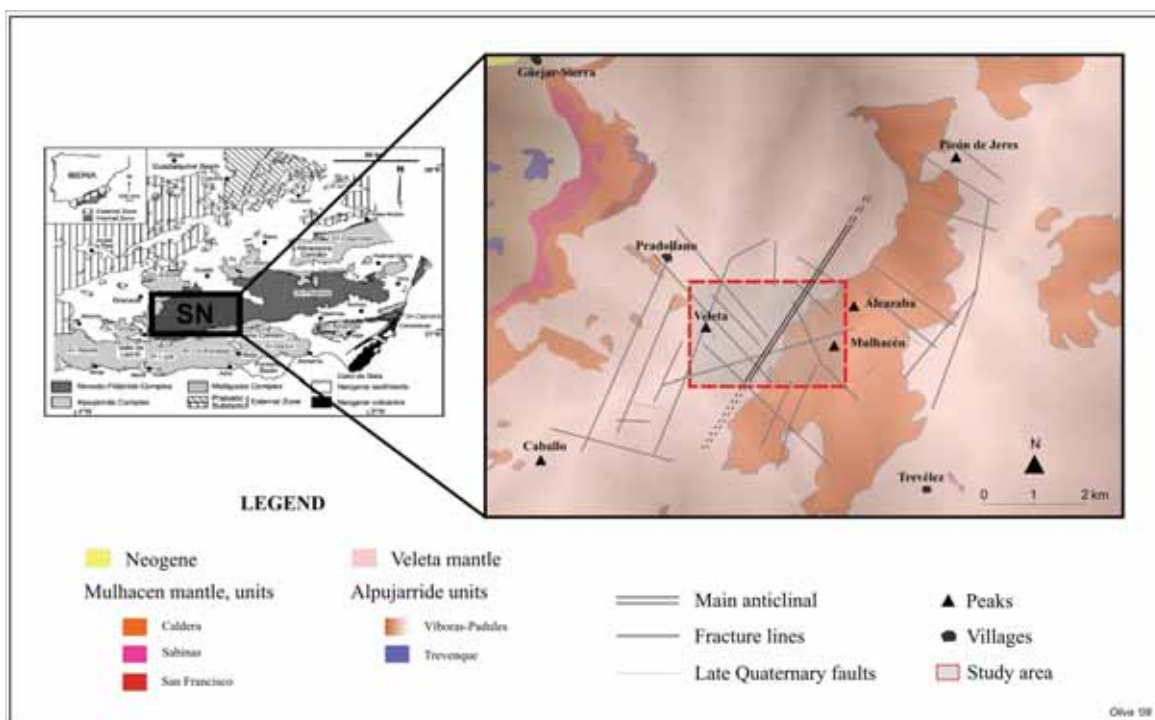


Figura 2.2. Esquema geològic de Sierra Nevada (a partir de Gómez Ortiz, 2002).

Les condicions climàtiques des del Tardiglaciari no són propícies per al desenvolupament del glaciariisme en el massís, essent principalment el periglaciariisme el motor dels canvis ambientals per sobre dels 2.500 m. Els processos periglaciars es manifesten en una profusió de morfologies que li són pròpies: glaceres rocoses, *debris flows*, sòls poligonals, *protalus ramparts*, tarteres, i un dels objectius del nostre estudi, els lòbuls de solifluxió.

Les característiques biofísiques de la Sierra no faciliten l'extensió de la coberta vegetal, excepte en enclavaments molt concrets. La nuesa del terreny en els nivells culminants incentiva la meteorització física del rocam, fet que, associat a les condicions climàtiques imperants (combinació d'aridesa i fred), impossibilita la formació de sòls i el recobriment d'un dens tapís vegetal. Per sobre dels 2.500 m, l'edafogènesis queda reclosa en sectors de fons de vall, de topografia planera, que frenen una escorrentia superficial ràpida i propicien la colonització vegetal. En aquestes àrees es desenvolupen histosòls amb elevades proporcions de matèria orgànica, mentre que en els vessants lliures de vegetació o amb espècies xeròfitas esclarissades hi dominen els mantells de pedres i les tarteres amb sòls molt incipients, entre els quals destaquen els cambisòls, inceptisòls i regosòls (Martín-García et al., 2004).

2.1.2 Clima

El sistema serralades Bètiques-Atles constitueix la porta d'entrada a la Mediterrània en el seu apèndix sud-occidental. La complexitat geogràfica de la conca mediterrània, amb el seu entramat d'illes, penínsules i altes serralades disposades a cavall del cinturó d'altres pressions subtropicals i el domini dels *westerlies* de mitges latituds, ha portat a considerar la relativa independència d'aquesta conca marina respecte de la CGA; s'ha tendit a contemplar la Mediterrània com una regió que presenta uns patrons climàtics relativament autònoms, amb una notable importància dels fenòmens mesoesacalars i interaccions menys marcades que d'altres zones del planeta amb el sistema climàtic global.

L'alçada, compacitat i extensió de Sierra Nevada en el sud de la Península Ibèrica, a 37° de latitud nord, dota al massís d'unes característiques climàtiques pròpies d'un ambient semiàrid de l'alta muntanya mediterrània. A més, la seva sinuosa orografia i disposició allargada en direcció W-E, determina un mosaic topoclimàtic no només en la mateixa serralada, sinó molt especialment en els marges adjacents.

Sierra Nevada s'emplaça entre l'anticicló subtropical de les Açores, que es plasma contundentment sobre el sud peninsular de maig a setembre, i la influència de les baixes pressions associades als *westerlies* de mitges latituds d'octubre a abril. En el marc andalús, Sierra Nevada juga un paper de frontissa climàtica entre un sector occidental d'influència atlàntica i un sector oriental de característiques mediterrànies i àmbits d'extrema aridesa; el clima del conjunt d'Andalusia Oriental es defineix segons la classificació de Köppen com a **BSk**, de precipitacions baixes i temperatures elevades durant bona part de l'any, amb una remarcable pluviositat d'octubre a abril i una suavització dels rigors tèrmics durant aquest semestre. El clima de la Sierra presenta una marcada dicotomia estació càlida-seca i estació freda-humida, a més d'una destacada variabilitat interanual i intraanual de les precipitacions. La coincidència entre sequedat i temperatures altes en el semestre càlid de l'any determina una evapotranspiració molt elevada, factor limitant clau en el desenvolupament vegetal a Sierra Nevada.

L'estudi climàtic de la Sierra es veu imperiosament dificultat per la manca d'una densa xarxa d'estacions meteorològiques, especialment escassa pel que fa referència a dades d'altura, amb l'única presència d'una sèrie climàtica contínua de 1965-1992 a l'Alberg

Universitari, a 2.507 m (figura 2.3). La temperatura mitjana anual és de 4,4°C, amb mitjanes mensuals negatives entre novembre i abril; les precipitacions anuals ronden els 702 mm, un 80% de les quals es concentren entre octubre i abril. L'aprofitament de Sierra Nevada com a reducte més meridional d'esports d'hivern del continent europeu es deu precisament a la interacció d'elevades precipitacions en els mesos més freds de l'any.

L'obertura de la vall del Guadalquivir als fluxos atlàntics canalitza les masses d'aire humides impulsades per les depressions atlàntiques que, en topar amb les estribacions de la Sierra, atien la condensació i posterior precipitació, especialment en el vessant de sobrevent. A la meitat occidental del massís, el règim de precipitacions presenta un màxim a l'hivern (HPTE), mentre que en el sector oriental es manifesta una component mediterrània en dos màxims de primavera i tardor (PTHE). Segons Pérez Raya et al. (1990), la precipitació és en forma de neu en un 30% del total per sobre dels 1.800 m de cota, percentatge que remunta a un 95% per sobre de 2.500 m. S'insinua, doncs, un canvi bruscat en la tipologia de les precipitacions entre els 1.800 m i els 2.500 m i una certa estabilitat de la cota de neu durant els mesos hivernals entorn als 2.000-2.200 m.

Taula 2.1. Càlcul dels gradients tèrmics verticals per vessants.

GRADIENTS TÈRMICS VERTICALS			
CARA NORD			
Estacions	Alçada (m)	Temp. mitjana (°C)	Gradient (°C/100 m)
Alberg Universitari (1965-1993)	2.507	4,4	
Illora (1973-1992)	1.592	10,4	0,66
Granada- La Cartuja (1941-2004)	774	15,6	0,64
CARA SUD			
Estacions	Alçada (m)	Temp. mitjana (°C)	Gradient (°C/100 m)
Láujar 1800 (1950-2005)	1.800	10,5	
Láujar 1280 (1950-2005)	1.280	13,1	0,50
Láujar 921 (1957-1992)	921	14,6	0,42
Orgiva (1973-2005)	450	16,8	0,47

Un altre element climàtic d'interès geomorfològic en la nostra zona d'estudi serà el vent. La seva intensitat i freqüència vindrà condicionada per la topografia local; els relleus més elevats, colls i pendents a sobrevent seran les zones on el vent hi bat amb més força, no sense menystenir aquelles valls estretes que canalitzen els fluxos atlàntics de W, SW i NW

(Lanjarón, Guarnón, San Juan, Poqueira) i n'augmenten la seva velocitat. És un factor d'especial incidència geomorfològica per la seva eficàcia en la redistribució de la neu i l'estabilització del mantell nival.

El clima actual no explica la varietat de modelats geomorfològics derivats de processos freds escampats per arreu a Sierra Nevada, la majoria dels quals són l'empremta de moments més freds. La isoterma de 0°C de mitjana anual pel conjunt del massís es calcula que actualment roman entre els 3.600 i 3.700 m. La manca de dades climàtiques en els nivells culminants s'intenta pal·liar amb el càlcul de gradients verticals de temperatura i precipitació a partir de les dades de la xarxa d'estacions de l'*Instituto Nacional de Meteorología* (INM) a l'entorn de la Sierra, que permet estimar així valors aproximats per la nostra àrea d'estudi. Els gradients tèrmics verticals de les temperatures mitjanes anuals assoleixen els 0,65°C/100 m a la cara nord del massís, vessant més exposada a la continentalitat; mentre, al vessant meridional, l'embat més continu de la radiació solar i la influència termorreguladora del mar, es manifesten en una disminució del gradient tèrmic a només 0,46°C/100 m (taula 2.1). Aquests valors estan en sintonia amb aquells calculats per Pérez Raya et al. (1990): 0,61°C/100 m a cara nord i 0,48°C/100 m a cara sud.

Taula 2.2. Càlcul dels gradients pluviomètrics verticals i horitzontals per vessants.

GRADIENTS PLUVIOMÈTRICS							
CARA NORD							
Àmbit	Oest			Est			W-E
	Estacions (m)	mm	mm/100 m	Estacions (m)	mm	mm/100 m	↓ mm/km
Plana	Granada (774)	466		Gergal (758)	260		2,21
Mitja muntanya	Dílar (990)	550	38,8	Abrucena (975)	387	58,3	4,93
Alta muntanya	Dúrcal (1.800)	686*	24,2	Dólar (1.550)	410	4,5	6,56
	Alberg (2.507)	703	2,0				
CARA SUD							
Àmbit	Oest			Est			W-E
	Estacions (m)	mm	mm/100 m	Estacions (m)	mm	mm/100 m	↓ mm/km
Plana	Orgiva (450)	489		Ugíjar (559)	402		2,64
Mitja muntanya	Cadiar (916)	582	19,9	Láujar (921)	518	32,0	2,37
Alta muntanya	Orgiva (1.842)	744	17,5	Láujar (1.800)	679	18,4	1,35

* Es recalcula el total pluviomètric per la cota 1.550 m a partir del gradient establert entre l'Alberg Universitari (2.507 m) i Granada-La Cartuja per facilitar la comparació amb Dólar, del sector oriental del massís.

La complexitat pluviomètrica de Sierra Nevada conjuga una pauta general caracteritzada per una disminució de les precipitacions anuals conforme ens desplaçem cap a l'est i uns gradients tèrmics verticals molt remarcables entre les planes circumdants i les zones de mitja muntanya: els primers esglaons orogràfics suposen un impuls notable per les masses d'aire que es va esmorteint a mesura que augmentem d'alçada. Prova d'això és l'escàs gradient existent entre l'estació meteorològica de la presa de Dúrcal, a 1.800 m d'alçada i d'orientació W-NW, i l'Alberg Universitari, emplaçat 700 m més amunt. Si bé a la cara nord del massís les diferències pluviomètriques entre el sector occidental i oriental es reforcen notablement a mesura que augmentem d'alçada, en el vessant meridional succeeix exactament el contrari: l'alçada tendeix a equilibrar aquestes diferències (taula 2.2). La dissimetria tèrmica i pluviomètrica entre ambdós vessants de la Sierra i entre els seus marges occidental i oriental cal contemplar-la en l'estudi de l'efectivitat dels processos geomorfològics freds actuals i passats. La nostra àrea de recerca roman en el sector occidental de Sierra Nevada, on les alçades són més elevades i els contrastos dels diferents paràmetres climàtics són més atenuats.

En relació amb el canvi global, els diferents informes i models climàtics presenten el Mediterrani i, en especial, el quadrant SE peninsular, com una zona d'especial vulnerabilitat. En la pràctica totalitat dels escenaris projectats per finals de segle XXI s'apunta una tendència decreixent de les precipitacions de fins al ~20% i un augment de temperatures entre 1,8-4°C (IPCC, 2007). Jiménez (1996) i Rodríguez et al. (1996) constaten durant les últimes dècades una disminució significativa de les precipitacions a Sierra Nevada durant l'hivern i tardor, i un lleuger increment a primavera i estiu, dada que no emmascara la pauta general a una menor pluviositat. Tanmateix, cal posar en relació aquestes dades amb la dinàmica atmosfèrica decadal dominant a l'Atlàntic Nord durant els anys '80 i inicis dels '90, amb fases positives dels patrons *Arctic Oscillation* i *North Atlantic Oscillation* (NAO), que comportaren menors precipitacions a Andalusia, i no concebre-les com una simple plasmació directe del canvi climàtic.

Tot i l'evident augment tèrmic registrat des de finals de segle XIX en àmplies regions del planeta, ben palpable en els processos dinàmics d'alçada a Sierra Nevada (desaparició de les últimes glaceres, degradació del *permafrost*, estabilització dels lòbuls de solifluxió, etc), cal més recerca encaminada a separar la possible responsabilitat humana i la

component natural d'aquest escalfament. La nostra recerca pretén ser una contribució més per entendre la dinàmica natural de les altes muntanyes mediterrànies i, a partir de l'evolució paleoambiental dels sectors elevats de Sierra Nevada, poder desxifrar la variabilitat climàtica a escala centenària i mil·lenària en el sud peninsular.

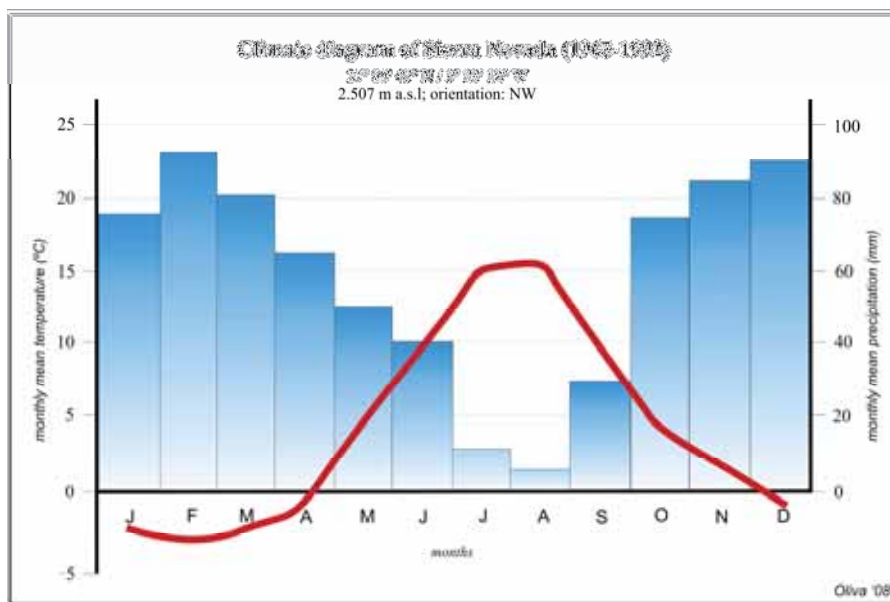


Figura 2.3. Climograma de l'Alberg Universitari a 2.507 m (1965-1992).

2.1.3 Biogeografia

Un dels principals valors paisatgístics de Sierra Nevada és la seva riquesa florística, element determinant per a la catalogació de les diferents figures de protecció de les quals gaudeix el massís (Reserva de la Biosfera, Parc Natural i Parc Nacional). Segons el catàleg del Ministeri de Medi Ambient, Sierra Nevada concentra fins a 65 espècies exclusives i 175 endemismes ibèrics, amb més de 2.100 espècies catalogades de les prop de 8.000 existents a la Península Ibèrica.

L'elevada altitud en la posició latitudinal en què s'ubica la Sierra, explica, en bona mesura, la seva riquesa florística. El sud del continent europeu, de relleu trencadís i orografia complexa, va exercir de magatzem genètic durant els moments freds quaternaris. Durant aquests períodes, les falques de Sierra Nevada van actuar com a refugi primari d'espècies vegetals que actualment es troben al nord del continent europeu i que escapaven dels rigors tèrmics de les altes latituds (Brewer et al., 2002). L'aïllament físic del massís va condicionar les espècies a adaptar-se a la sequedat estival imperant i

desenvolupar mecanismes propis de supervivència, derivant així en noves espècies vegetals. Posteriorment, amb la desglaciació de la Sierra, aquestes espècies remunten i s'acomoden en alçada.

Les singulars condicions climàtiques i l'escàs desenvolupament edàfic dels seus vessants priven a les comunitats vegetals d'un creixement esponerós, confinant el tapís vegetal a alçades inferiors i a enclavaments d'alçada molt concrets. Amb l'alçada, la disminució de temperatura s'uneix a una major durada del mantell nival i a l'embat continuat del vent; en aquelles àrees més desprotegides, com les carenes cimeres, planícies culminants o lloms a sobrevent, la persistència i intensitat del vent dificulta el creixement vegetal.

Les precipitacions relativament baixes, juntament amb el seu desigual repartiment intranual, determinen l'adaptació de les plantes a la poca humitat del sòl. Si l'hivern és l'estació en què la vegetació a Sierra Nevada necessita protegir-se de les baixes temperatures, l'estiu és el moment de l'any en què la flora ha de sobreviure a una manca de precipitacions contundent. Tot i el paper clau que la temperatura juga en la distribució de la vegetació, no gensmenys ho fa l'evapotranspiració¹, un dels factors limitants més notables a Sierra Nevada, ja que condiciona el període vegetatiu a escasses setmanes.

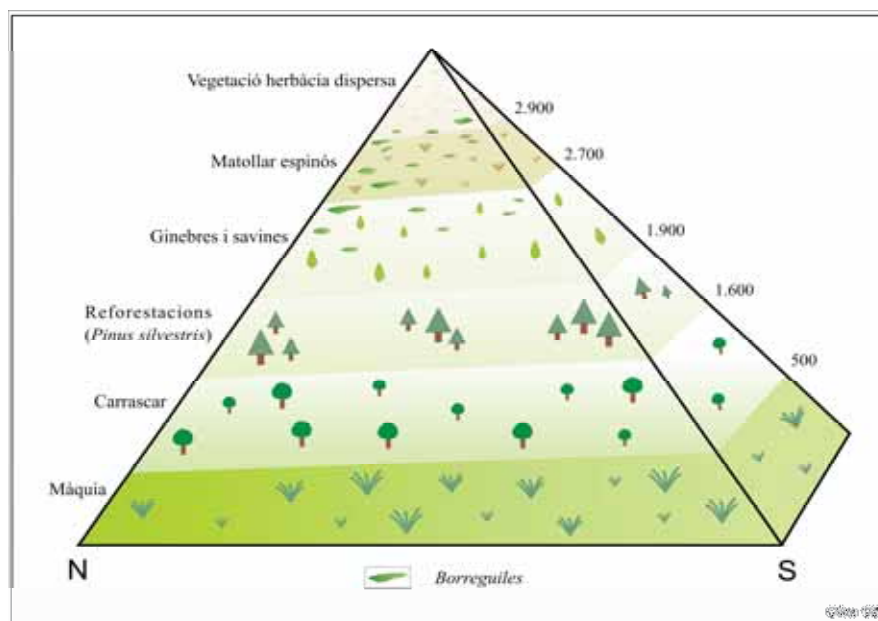


Figura 2.4. Pisos de vegetació a Sierra Nevada, a partir de Bolós (1978).

¹ A 2.500 m d'altura, els valors d'aquest paràmetre assoleixen els 105'4 mm durant el mes d'agost (Losa et al., 1986), mes en què només es recullen 10 mm de mitjana en aquest observatori.

En general, les serralades del sud-est peninsular es caracteritzen per un revestiment vegetal molt empobrit, on el substrat apareix sovint nu i desprotegit, malgrat l'existència d'un elevat nombre d'espècies amb un alt grau de diversitat i abundants endemismes. La proximitat al continent africà i el nexa peninsular amb el continent europeu contribueixen a explicar la riquesa de la flora nevadense; Molero Mesa & Pérez Raya (1987), només a la part granadina de la Sierra, han detectat un total de 1.996 taxons, corresponents a 115 famílies i 643 gèneres, fet que dóna idea de l'extraordinària varietat florística del massís. Les característiques climàtiques condicionen espacialment la distribució altitudinal d'aquestes espècies, determinant-ne els pisos de vegetació. En el cas de la Sierra s'han proposat diferents models explicatius (Bolós, 1978; Rivas Martínez, 1983; Molero Mesa & Pérez Raya, 1987); Bolós (1978) considera els pisos altitudinals següents (figura 2.4):

- Pis termomediterrani, fins als 500-600 m.
- Mesomediterrani, entre 600-1.600 m.
- Supramediterrani, entre 1.600-1.900 m.
- Oromediterrani, entre 1.900-2.900 m.
- Crioromediterrani, per sobre de 2.900 m.

El nostre àmbit d'estudi es circumscriu als estatges oromediterranis i crioromediterranis, on s'acomoden la majoria d'endemismes. Per sobre dels 2.900 m d'alçada hi domina el rocam i, en els pocs indrets a recer on el sòls incipients ho permeten, hi domina una sèrie crioromediterrània de pastures psicroxeròfil·les disperses conformades per *Festuca clementei*, *Erigeron frigidus*, *Artemisia granatensis*, *Ptilotrichum purpureum* i *Papaver lapeyrousianum*. En aquelles zones més exposades, aquestes espècies es veuen substituïdes per *Galium pyrenaicum* i *Trisetum glaciale*, mentre que en indrets molt assolellats deixen pas a la *Festuca pseudeskia*. A les tarteres², les espècies dominants són la *Viola crassiuscula*, *Linaria glacialis* i *Rhynchosinapis cheiranthos ssp. nevadensis* (Rivas Martínez, 1983). La franja entre els 2.700 i 2.900 m es caracteritza per un domini del matollar esclarissat constituït per espècies de tamany petit, arrodonides i força espinoses, com a adaptació a les condicions de fred, vent i aridesa estival. Per sota d'aquesta cota hi ha la presència d'algunes savines i ginebres (*Juniperus sabina* i *Juniperus communis ssp. hemisphaerica*), tot i ser formacions puntuals i de poca extensió, sense continuïtat espacial i de dimensions reduïdes.

² *Canchales* o *cascajares* en terminologia local.

Les pinedes de la Sierra (principalment *Pinus sylvestris*) corresponen a les replantacions iniciades l'any 1925 i potenciades a partir de 1941, a càrrec del Patrimoni Forestal de l'Estat per tal d'esmortear l'erosió a la Sierra i es caracteritzen per una distribució a manera de taca d'oli entre els 1.500-2.000 m, ocupant una extensió superior a 65.000 ha. En aquest pis destaca també la presència d'algunes rouredes de *Quercus pyrenaica* en ambdós vessants del massís: aprofitant la menor evapotranspiració de la cara nord i, alhora, la major humitat derivada de la influència marítima a la cara sud. En nivells inferiors, i seguint la tendència general d'escassa vegetació de la Sierra, hi trobem les comunitats vegetals pròpies de la mitja i baixa muntanya mediterrània, com la carrasca (*Quercus ilex rotundifolia*) i la màquia (*Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*).

Un apartat especial mereixen els **borreguiles**, que concentren els lòbuls de solifluxió, un dels puntals de la nostra recerca. El terme en qüestió és un localisme propi de l'alta muntanya semiàrida andalusa que evidencia un alt grau d'aprofitament ramader³ de les pastures humides d'alçada en un context regional mancat d'aigua. Tot i que la transhumància ha perdut el paper històric de sosteniment vital de la cabanya ramadera que tenia per les poblacions de la falda de Sierra Nevada, la seva rellevància encara és perceptible en l'àmplia xarxa de vies pecuàries que puguen a les fresques pastures dels *borreguiles* per alimentar el bestiar, vies que han esdevingut a la pràctica un reclam turístic, desnaturalitzant així el seu actiu original.

En el cas de Sierra Nevada, els *borreguiles* es desenvolupen en sectors per sobre dels 2.000 m d'alçada, preferentment a les capçaleres de barrancs i en zones enclotades de fons de circ. La constant presència d'aigua de fusió nival propicia un ambient reductor que tendeix a conservar la matèria orgànica, essent zones especialment útils per a l'estudi de la reconstrucció paleoambiental. Tanmateix, cal constatar que certes actuacions han malmès l'estat original d'alguns *borreguiles*: la proliferació de la ramaderia ha contribuït a una excessiva nitrificació dels sòls, mentre que la construcció i successives ampliacions de l'estació d'esquí han suposat la remobilització de la capa superficial del sòl en determinats sectors. *Borreguiles* tals com els de San Juan, Guarnón, Rio Seco i Siete Lagunas romanen encara ben conservats, amb una gran riquesa vegetal: un 35% de les espècies que s'hi desenvolupen són endèmiques (Molero Mesa & Pérez Raya, 1987).

³ Especialment per part del sector oví.

L'estructura vegetal dels *borreguiles* es caracteritza per un centre amb característiques torboses i espècies molt adaptades a un alt contingut d'aigua, mentre que els seus marges evolucionen cap a pastures d'espècies menys hidròfiles. Solen ser enclavaments de poca pendent que permeten un drenatge més lent durant el desgel i una major retenció i infiltració paulatina en el sòl, promovent així el desenvolupament edàfic. En zones de pendent entre 5 i 20° es desenvolupen els lòbuls de solifluxió, mentre que zones de pendent inferior a 5° seran més proclius a la formació de torba. Martínez Parras et al. (1987) distingeixen quatre associacions vegetals dominants en els *borreguiles*:

- *Nardo-Festucetum ibericae*, que és l'associació més abundant, responsable del tapís dens d'extenses àrees en els *borreguiles*. Hi destaquen les gramínies *Nardus stricta* i *Festuca alpina*.
- *Ranunculo-Vaccinietum uliginosi*, d'escassa presència tot i l'òptima adaptació a sòls hidromorfs. El sobrepasturatge en certes àrees ha tendit a afavorir l'associació *Nardo-Festucetum* en detriment d'aquesta.
- *Ranunculo-Caricetum intricatae*, comunitat que ocupa les zones de torba i on trobem endemismes tals com *Ranunculus alismoides*, *Festuca frigida* i *Pinguicula nevadensis*.
- *Sedo-saxifragetum alpigenae*, que es disposa en els marges dels cursos d'aigua. Espècies tals com la *Saxifraga stellaris ssp. alpigena*, *Veronica serpyllifolia ssp. langei* i *Festuca rivularis* es combinen amb certes espècies de briòfits.

2.1.4 Hidrologia

En un context regional tan escàs d'aigua com és Andalusia, la presència de Sierra Nevada suposa un deu d'extraordinària riquesa ecològica i, alhora, econòmica. El massís constitueix un veritable trencaaigües de disposició radial, que vertebrava la xarxa hidrogràfica que vessa a l'Atlàntic i la que desguassa les seves aigües al Mediterrani.

Des d'un punt de vista hidrològic, l'extensió geogràfica de la Sierra contempla uns 2.000 km², dels quals 1.300 pertanyen a la conca mediterrània i 700 a l'atlàntica (Castillo et al., 1996), proveint uns recursos anuals de 750 hm³/any. Entre els primers destaquen les xarxes hidrogràfiques del Guadalfeo, Adra i Andarax, mentre els segons tenen en el Genil i el Fardes, afluents del Guadalquivir, els cursos hídrics principals.

Els rius que baixen de la Sierra tenen un règim nivo-pluvial i presenten el seu màxim a la primavera, just en el moment del desgel, entre abril i juny. El cabal disminueix exponencialment durant els mesos estiuencs per la manca de pluges i repunta a la tardor per créixer de nou a l'hivern, amb la retenció d'aigua en estat sòlid en capçalera.

Tothora, cal tenir en compte també la litologia de Sierra Nevada, amb una profusió dels materials cristal·lins en el complex Nevado-Filàbrides (1.500 km²), nucli axial del massís, i materials carbonatats en el complex Alpujarrides (300 km²), en els marges adjacents. La litologia condiciona la hidrologia subterrània de la Sierra, que es desenvolupa amb especial eficàcia en el material carbonatat de l'Alpujarra, on arriba a drenar fins a un 45% dels recursos totals (Al-Alwani, 1997).

En el Nevado-Filàbrides la penetració d'aigua en profunditat esdevé en zones de capçalera amb una fracturació notable i en sectors on la profusió de derrubis que entapissen els vessants facilita la infiltració i percolació d'aigua. És especialment remarcable la falla de direcció W-E que separa el contacte entre les unitats Nevado-Filàbrides i Alpujarrides al llarg de l'Alpujarra, que permet la circulació i recàrrega d'aigües subsuperficials (Castillo et al., 1996). Aquesta aigua aflora, entre altres, a la vall de Lanjarón, on, a més del seu aprofitament comercial, l'elevat termalisme i la qualitat "picant" de les seves aigües han facilitat la proliferació de balnearis i centres termals.

Si actualment l'aigua té un paper econòmic indubtable, nogensmenys ho ha tingut al llarg de la història. Des de la dominació àrab, la regulació antròpica de l'aigua de la Sierra ha estat notable: l'home ha desviat i pres l'aigua dels cursos fluvials a través de sèquies i basses amb la finalitat de regar àmplies terres aptes pel conreu, principalment en el sector de l'Alpujarra i les *vegas* del Zenete (Martín Civantos, 2007). Les sèquies escampades per la Sierra tenien la finalitat de canalitzar les aigües del desgel cap als vessants i planícies adjacents, regant pastures i camps pel seu aprofitament agrícola i ramader; a més, durant la fusió nival es dispersen les aigües de les sèquies (*careos*) pels vessants per tal de recarregar els aqüífers i reaprofitar una aigua que brollarà durant l'estiatge. Sierra Nevada actua a manera de gran embassament natural sense comportes, que reté l'aigua en forma de neu i l'allibera gradualment durant el desgel.

Per sobre dels 2.000 m d'alçada, les surgències causades per la intensa tectonització i esquistositat del substrat, originen *borreguiles* en enclavaments de topografia favorable, com succeeix en el fons de vall del barranc de San Juan. La seva potencialitat per atreure els ramats de les àrees circumdants durant l'estació càlida de l'any, en què la manca de verdor tenyeix les parts baixes, va portar a derivar els cursos d'aigua en aquelles zones de menys pendent per tal d'estendre les àrees humides i ampliar així l'espai de pastura. Aquesta pràctica es continua realitzant en l'actualitat, tal i com es reflecteix en la fotografia adjunta d'un sector estudiat de la vall de San Juan (figura 2.5).

Durant les darreres tres dècades, en els marges de Sierra Nevada han proliferat la construcció d'embassaments per tal d'augmentar la capacitat d'aigua emmagatzemada. A més d'aquestes preses, existeix un nombrós grup d'obres menys ambicioses però puntualment significatives (assuts, dics, petites preses, etc) que tenen la finalitat de retenir aigua en sectors de gran pendent, laminar les crescudes i retenir càrrega sòlida. Sota aquest pretext cal emmarcar les reforestacions iniciades durant la primera meitat de segle XX⁴, que pretenien reduir la torrencialitat i augmentar la percolació i infiltració de l'aigua en el terreny, incentivant així el creixement vegetal, especialment a l'Alpujarra.



Figura 2.5. Derivació d'aigües a San Juan.

⁴ Veure pàg. 38.

2.1.5 Història: ocupació del territori

Les primeres traces de civilització en el sud peninsular corresponen al Paleolític Mitjà, moment de què daten les primeres restes de l'*Homo sapiens neanderhalensis* a la zona de la Cueva Genista (Gibraltar), que es van expandir posteriorment per la part oriental de la regió (Lacomba, 2001). El Paleolític, en general, es caracteritza per un progressiu i creixent poblament, amb comunitats assentades en nuclis dispersos especialment de la zona litoral, arrecerades en sectors climàticament més propicis, en especial, durant els rigors climàtics del LGM.

Durant l'inici del Neolític Antic (VI mil·lenni a.C.), concentracions isolades d'*Homo sapiens sapiens* basen la seva existència en la ramaderia i un desenvolupament primerenc de l'agricultura en les planes més fèrtils del sud peninsular, tot i que el seu impacte sobre el territori fou més aviat escàs per la reduïda pressió demogràfica de les comunitats humanes existents.

La florida de les primeres civilitzacions a la Península té lloc en el quadrant sud-oriental, en les actuals províncies d'Almeria i Granada oriental. La nostra recerca a Sierra Nevada coincideix precisament amb el marc temporal de la naixent colonització humana en aquest sector, fet que ens induirà a considerar l'impacte que va tenir la variabilitat climàtica en el seu desenvolupament. D'aquestes cultures primerenques, emperò, no han estat trobats jaciments en els relleus de Sierra Nevada, a diferència d'altres serres circumdants.

Durant l'Edat de Bronze (III mil·lenni a.C.) s'intensifica l'agricultura i comencen a desenvolupar-se els primers sistemes de defensa en el sud-est peninsular, bàsicament assentaments fortificats i torres de defensa circulars. L'arribada de població greco-micènica durant el II mil·lenni a.C. es tradueix en la introducció de noves tècniques de producció i estils de vida. Reflex d'aquesta evolució és el naixement de l'autòctona cultura argàrica, caracteritzada per l'extensió de la metal·lúrgia lligada a una puixant mineria, estandardització de la producció de ceràmica i difusió de l'agricultura amb la construcció d'incipients canals de regadiu. Els poblats argàrics estaven estratègicament disposats en una xarxa d'assentaments dependents que facilitaven el control sobre els terrenys de cultiu i l'aprofitament de matèries primeres.

El desenvolupament de la cultura argàrica té el seu punt àlgid entre 1400-1300 a.C.: s'ha afirmat que fou la *primera unitat suprarregional constatada en la història d'Andalusia* (Lacomba, 2001), evidenciant així el seu elevat grau d'organització social. El col·lapse de la cultura argàrica s'ha relacionat amb una causa climàtica, un repunt de l'aridesa va desembocar en la fragmentació territorial i trencament de la seva continuïtat espacial, amb l'aïllament progressiu i dispersió de les comunitats. Carrión et al. (2007) apunta a que la desforestació de grans extensions endegada a ampliar la superfície cultivable va contribuir al seu autoaniquilament durant el període del Bronze final (1100-700 a.C.).

La conjunció de l'empenta comercial fenícia i d'una punyent agricultura en les fèrtils planícies fluvials determina la cohesió i prosperitat dels assentaments tartessos. Es disposaren estratègicament en l'estreta franja costanera que uneix Gibraltar i Huelva, amb comunitats més disperses al llarg de la vall del Guadalquivir, canalitzador natural entre els poblats de la façana litoral i els nuclis trobats a Sierra Morena, sector de gran riquesa minera. La importància del comerç marítim relatiu a la producció d'objectes metàl·lics i ceràmica característics de la cultura fenícia, denota que els tartessos s'imposaren culturalment entorn a 900 a.C. La crisi econòmica de la segona meitat de segle VI a.C. propicia un declivi del comerç fenici amb la conseqüent decadència de la cultura tartèssica a la regió. S'esvaeix la unitat del regne i comunitats púniques sotmeten les principals colònies fenícies peninsulars. No serà fins al segle II a.C., amb l'arribada dels romans i el foragitament dels cartaginesos, que s'estabilitza la regió i s'imposa un sistema d'organització molt acurat.

Els romans creen en el sud peninsular la província Bètica de l'Imperi, amb capital a Còrdova i la seva presència es tradueix en una economia de subsistència basada en l'exportació de l'oli, la pesca i l'explotació dels recursos del subsòl. El domini romà s'allargarà durant sis segles fins a la caiguda de Roma (410 d.C.) i l'actual territori andalús es beneficiarà de les noves tècniques de conreu i formes d'explotació que hi introdueixen, especialment focalitzades en els jaciments de ferro, coure, plata i plom que Sierra Nevada i les serres circumdants oferien. Aquestes estructures socials, econòmiques i culturals van perdurar durant l'ocupació visigoda.

Tot i el pas de nombroses civilitzacions (tartessos, romans, visigots), la Sierra ha constituït durant mil·lennis un reducte inhòspit, poc procliu a l'ocupació humana; la poca riquesa en recursos naturals directes (fusta, carbó, extenses pastures) ha condicionat de ben segur el retard en l'aprofitament dels seus vessants i no serà fins a l'etapa musulmana que s'iniciarà l'explotació de Sierra Nevada. Una major pressió demogràfica i un sistema d'organització social més acurat possibiliten l'accés i aprofitament de la muntanya; la coincidència amb el *Medieval Warm Period* (MWP) facilita la colonització del vessant meridional de la Sierra. Martín Civantos (2007) emfatitza el paper de Sierra Nevada com a nexa de transició i no com a barrera geogràfica, destacant la recurrent utilització de passos, colls i carenes entre ambdós vessants des d'època històrica.

L'Alpujarra serà l'espai més intensament humanitzat, especialment pel que fa a l'agricultura, en què les obres més importants foren aquelles que facilitaven el transport d'aigües en un complex sistema de regadiu. Un seguit de preses, assuts i canals estratègicament disposats baixaven les aigües dels nivells superiors fins a les fèrtils planícies més baixes; a més, l'abancament dels vessants permetia guanyar nous espais aptes pel conreu i la ramaderia, tot i l'escàs nombre de caps de bestiar amb què comptaven (Carmen Trillo, comunicació personal, 2008).

Sierra Nevada era coneguda en època musulmana com la *montaña del sol* o *montaña de la neu* (Titos Martínez, 1997), en una clara referència a l'abundant insolació i llarga duració de la cobertura nival a la Sierra. Després de la Reconquesta, l'expulsió dels moriscos i l'establiment de la dominació castellana imposen un canvi en l'organització social, tot i que el pes demogràfic en les nuclis habitats de les immediacions del massís decau significativament i no serà fins al segle XVIII que assolirà la població que tenien durant l'apogeu dels segles XIII i XIV.

Els relats referents al comerç de la neu ens remetent als s. XVI i XVII i expliciten les rutes i camins que seguien els comerciants segons l'època de l'any i l'abundància de neu, estipulant així el preu corresponent (Rodrigo, 1994). La profusió de pous de gel en el massís fins a cotes relativament baixes, tal i com es veu a la carretera del Purche, suggereix també l'extensió de la indústria del gel en fases fredes de la *Little Ice Age* (LIA). Posteriorment, durant els segles XVIII i XIX, aventurers i intrèpids científics

il·lustrats i romàntics, penetren fins a les crestes virginals més accessibles de l'oest del massís i ens deixen escrits, relats i pintures del paisatge nevadense (Gómez Ortiz et al., 2008). L'interès geomorfològic de les seves narracions i gravats es desgranarà en el capítol dedicat a la LIA en l'apartat 2.2.4. Ja a finals de segle XIX trobem descripcions relatives a la importància de la transhumància i el seu extens abast espacial en el context d'Andalusia (Martín Civantos, 2007). La derivació d'aigües en els *borreguiles*, basant-nos en la manca d'evidències sedimentològiques i la major pressió demogràfica d'aquest període, deu tenir el seu origen en aquest context històric.

En el segle XX, Sierra Nevada pateix més transformacions que en tota la seva història, amb una evident revalorització dels actius que ofereix el massís. La metamorfosi experimentada per la muntanya arrenca amb les primeres replantacions de la dècada dels '20 en un primer intent per frenar l'erosió; l'aixecament faraònic de la carretera més alta d'Europa acabada l'any 1935, durant la Segona República, per l'enginyer Juan José de Santa Cruz, en l'irremissible afany d'obrir la muntanya al turisme; la rafegada construcció del ferrocarril i instal·lacions derivades des de Granada fins al barranc de San Juan, que va funcionar a batzegades entre 1925-1974 (Titos Martínez, 1995); l'extensió i massificació dels balnearis a l'Alpujarra que aprofiten el ressò de les propietats mineromedicinales de les seves aigües ja conegudes des de finals del segle XVIII; i, finalment, la segona meitat de segle XX suposa la colonització de Sierra Nevada, que en només unes dècades, deixa de ser un indret recòndit i es transforma en un centre d'oci amb la construcció de l'estació d'esports d'hivern més meridional d'Europa, la qual cosa ha comportat modificacions en el paisatge, en ocasions poc afortunades.



Figura 2.6. Tramvia de Sierra Nevada (www.agraft.es).

El 1964 neix *Centros Turísticos S.A.* (CETURSA), que és l'empresa encarregada de la gestió i explotació de l'estació d'esquí. L'entrada de la Junta d'Andalusia en l'accionariat el 1985 suposa una injecció econòmica definitiva en l'impuls de les instal·lacions hivernals de Sierra Nevada. Tanmateix, per tal de pal·liar l'abús antròpic, l'any següent, el 1986, la Sierra és declarada Reserva de la Biosfera per la UNESCO, el 1989 el Parlament d'Andalusia protegeix 171.829 ha amb la consideració de Parc Natural⁵ i, finalment, el 1999, l'Estat protegeix 86.210 ha amb la denominació de Parc Nacional⁶, restringint, i molt, l'accés i activitats que es poden realitzar en les altes cimes.

El principal repte que s'entreu de cara als propers anys a Sierra Nevada és saber conjugar de manera sostenible l'explotació de l'esport de la neu i dels atractius que ofereix el massís a l'estiu⁷ amb la preservació dels valors naturals, regulant l'entrada per tal d'evitar una massificació exagerada, però amb la imperiosa necessitat d'obrir la muntanya al públic. Només transmetent la singularitat del patrimoni natural de Sierra Nevada a la societat es podrà valorar en la justa mesura els valors naturals que els seus relleus contenen.



Figura 2.7. Vista parcial de les instal·lacions hivernals de Sierra Nevada.

⁵ Llei 2/1989, 18 de juliol de 1989.

⁶ Llei 3/1999, 1 de gener de 1999.

⁷ Visites controlades pel parc, senderisme, rutes en bicicleta, a cavall, xarxa de refugis de muntanya, etc.

2.2 Evolució ambiental de Sierra Nevada: estat de la qüestió

Les primeres referències escrites de Sierra Nevada es remunten a temps de l'ocupació romana i consistien en enumeracions purament descriptives dels territoris ocupats per l'Imperi; Plini el Vell, en el segle I, ja mencionava l'existència del mont *Solarius*, al·ludint a l'elevada insolació de què gaudeix la muntanya. Tanmateix, haurien de passar molts segles fins que l'altiva presència de Sierra Nevada en el context andalús suscités l'interès per incidir en el coneixement dels valors naturals que el massís acollia: geologia, botànica, hidrologia, paisatge, etc. Els naturalistes de la Il·lustració, imposant la lògica de la raó, s'endinsen més enllà de la retòrica descriptiva i aprofundeixen, des de finals del segle XVIII, en els diferents elements paisatgístics de Sierra Nevada.

D'aleshores ençà, s'han escrit moltes pàgines relatives a l'evolució ambiental de la Sierra i del seu context regional durant els darrers mil·lennis. L'àrea d'estudi seleccionada per a la recerca rau en un àmbit que, per la seva alçada, deu la seva morfologia bàsicament a l'acció glacial, que l'ha esculpit i modelat durant desenes de milers d'anys, i al periglaciari, que ha anat llaurant i retreballant el paisatge fins als nostres dies. Seguint una directriu cronològica, es pretén desglossar l'estat de la qüestió entorn al coneixement de l'evolució ambiental de Sierra Nevada des del Pleistocè, amb especial èmfasi a la darrera glaciació i posterior desglaciació, fins a l'Holocè, cos central de la recerca, que ens remetrà als processos geomorfològics actuals.

2.2.1 Glaciacions pleistocenes

El dinamisme dels processos d'erosió i acumulació glacial i periglacial que s'han succeït durant el Quaternari dificulta enormement l'estudi de glaciacions anteriors al LGM, ja que el limitat desenvolupament de les glaceres pleistocenes en combinació amb el desnivell respecte a la base d'erosió (nivell de mar a escassa distància) ha afavorit la dominància dels processos de vessant. Per tal de reconstruir glaciacions prèvies, els investigadors s'han fixat en blocs morrènics allunyats de l'àrea ocupada per les morrenes del LGM, terrasses de característiques fluvioglacials emplaçades a gran alçada, morrenes molt degradades o, més recentment, tècniques de datació cosmogènica; a la Península Ibèrica hi ha pocs estudis que es centrin en períodes glacials anteriors al LGM, essent els Pirineus la principal serralada analitzada, tal i com recullen Gómez Ortiz et al. (2001).

En el cas de Sierra Nevada, Messerli (1965) s'aventura a afirmar l'existència de restes morrèniques corresponents a una glaciació prèvia al LGM (l'antic *Riss*) a cotes molt baixes, d'entre 1.100 i 1.600 m, centenars de metres per sota dels dipòsits del LGM. Hempel (1960), Lhenaff (1977) i Sánchez Gómez (1990) també afirmen possibles restes morrèniques de glaciacions més antigues, admetent les dificultats que entranya la seva demostració. Gómez Ortiz et al. (2001) han dut a terme recentment una revisió sobre aquesta temàtica.

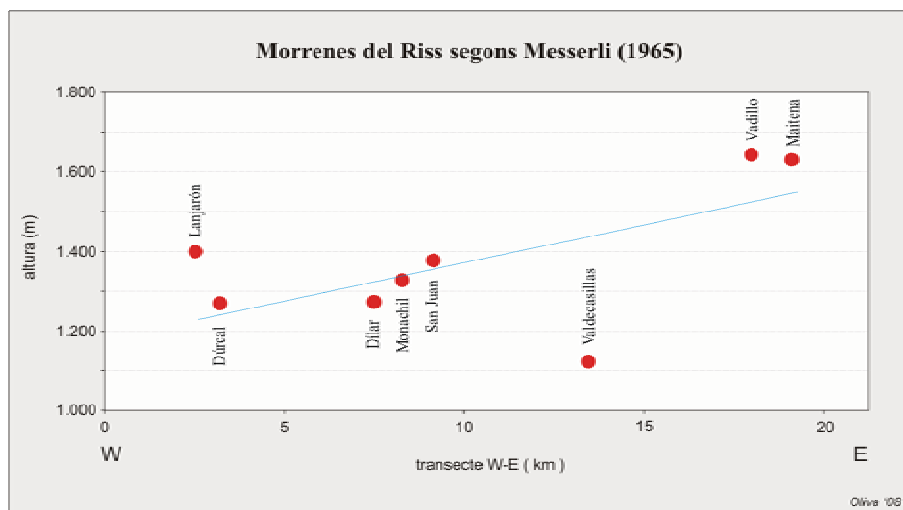


Figura 2.8. Localització de les morrenes del Riss a Sierra Nevada (Messerli, 1965).

2.2.2 El Last Glacial Maximum (LGM)

Diferents testimonis sedimentaris ens revelen, al llarg de la història geològica del planeta, una llarga successió de períodes glacials-interglacials durant els darrers milions d'anys. A partir de la inserció de la nomenclatura isotòpica, la darrera glaciació s'emmarca en els estadis isotòpics 2-4, amb un mínim tèrmic global detectat en els sediments marins entre els 18.000 i els 20.000 anys BP, que es correspon amb el LGM (CLIMAP, 1981; Moreno et al., 2005).

El modelat relíct de la darrera glaciació ha estat llargament estudiat a la Península Ibèrica, des de finals de segle XIX fins als nostres dies. Si bé la cronologia ibèrica de l'última glaciació encara roman certament desconeguda, l'abundant presència de geofomes i dipòsits deixats per les glaceres és un filó potencial que permetrà afinar més en la cronologia glacial de les muntanyes peninsulars. Gómez Ortiz & Pérez (2001) fan un extens recopilatori de la recerca relativa al LGM feta per diferents investigadors a la

Península Ibèrica, essent els Pirineus, per extensió i alçada, la serralada més estudiada. Pallàs et al. (2006) i Hughes & Woodward (2008) reconsideren la hipòtesi àmpliament acceptada de que la màxima empenta glacial a les muntanyes ibèriques antecedeix el mínim tèrmic global i sintetitzen una cronologia similar a altres muntanyes de l'orla alpina mediterrània. Al contrari que als Alps o, en menor mesura a Pirineus, les glaceres a Sierra Nevada van romandre confinades en àrees de muntanya, sense penetració a les planes adjacents. En aquesta direcció, pel que fa a Sierra Nevada, cal ressaltar la tesi doctoral de Messerli (1965) i la investigació duta a terme des de 1987 pel grup de recerca "*Paisatge i paleoambients a la muntanya mediterrània*" de la Universitat de Barcelona (Gómez Ortiz, 1987; Gómez Ortiz et al., 2005), tot i constatar que la manca de datacions absolutes en aquest massís priva d'establir-hi l'abast temporal del màxim avanç de les glaceres i la seva posterior desglaciació.

Els registres isotòpics terrestres i marins han considerat un descens de la temperatura mitjana global durant el LGM de l'ordre de $3,0 \pm 0,6^{\circ}\text{C}$ (Hoffert & Covey 1992). Estudis més recents admeten una disminució més lleugera als tròpics de $0-3^{\circ}\text{C}$, d'entorn a $6-11^{\circ}\text{C}$ a la Península Ibèrica, superior als 10°C al centre del continent europeu i de més de 20°C a altes latituds (Wu et al., 2007; Kuhle et al., 2008). A partir de dipòsits sedimentaris del sud-est peninsular, Schulte et al. (2000) amplien el descens tèrmic a un rang de $4,5-9^{\circ}\text{C}$ en aquesta zona.

La circulació atmosfèrica en el context peninsular durant el LGM venia caracteritzada per un desplaçament del front polar cap a latituds més meridionals, amb una intensificació dels *westerlies* a l'Atlàntic Nord degut al reforçat contrast tèrmic i baromètric entre els pols i l'Equador (Rogerson et al., 2004). Les pulsacions fredes i humides del LGM es caracteritzaven per un embat recurrent de profundes depressions de circulació més meridiana que escombraven la Península Ibèrica, fet que, juntament amb les temperatures més baixes, augmentaven les precipitacions nivoses a les serralades ibèriques. Tanmateix, cal ressaltar la darrera glaciació com un període de notables oscil·lacions, amb un altre mode de la CGA dominant durant les fases fredes i seques, determinat pel reforçament dels anticiclons hivernals tèrmics sobre Europa central i Escandinàvia, que conduïen aire sec i molt fred a la Península: el registre pol·línic de Padul dona fe d'aquestes condicions fredes i seques en els darrers estadis del LGM (Pons & Reille, 1988).

Si el fred és la variable transversal en un període glacial, els estadis isotòpics 2 i 4 es van caracteritzar per interrupcions o reforçaments sobtats de les condicions tèrmiques. Els cicles *Daansgard-Oeschger* (D-O; Daansgard et al., 1993), cicles de Bond (Bond et al., 1993, 2001) i els *Heinrich events* (H_{ev} ; Heinrich, 1988) van comportar escalfaments i refredaments de curta durada, tal i com ho denoten els sediments marins del mar d'Alboran (Cacho et al., 1999) i Mediterrani (Cacho et al., 2000) i els registres fluvials del sud-est ibèric (Schulte, 2002a; Schulte et al., 2009), que tindrien el seu reflex en les glaceres de Sierra Nevada, no estàtiques durant la darrera glaciació, amb continus avanços i retrocessos del gel. El massís es beneficiava nivològicament del desplaçament latitudinal dels *westerlies*, amb una alimentació nival major a les valls d'orientació W-SW respecte a aquelles d'influència més mediterrània. Unes precipitacions més elevades i unes temperatures sensiblement inferiors, van condicionar un glaciariisme d'importància cabdal en el paisatge actual de la Sierra. Els processos glacials van modelar les alçades superiors als 2.500-2.600 m (Gómez Ortiz & Salvador Franch 1992; Pérez Alberti et al., 2004), amb una evident dicotomia entre els dos vessants i una marcada component local atenent a les peculiaritats geogràfiques de cada vall. A les muntanyes ibèriques, l'evolució ambiental postglacial tendeix a ésser controlada per l'acció del periglaciariisme, que desnaturalitza i retreballa les formes glacials preexistents.

La ELA (*Equilibrium Line Altitude*) s'ha definit com aquella cota en la qual el balanç de la massa de la glacera és igual a zero, és a dir, on coincideixen acumulació i ablació (Meier & Post, 1962), essent doncs un indicador paleoclimàtic que ens dona informació no només de la temperatura, sinó també de les precipitacions. Messerli (1965) i Gómez Ortiz et al. (1993) han determinat les alçades dels dipòsits morrènics corresponents als màxims impulsos glacials de l'última glaciació i es constata que la ELA actual a Sierra Nevada (~3.600-3.700 m) roman entre 1.100-1.200 m per sobre de la ELA relativa a aquells impulsos. Schulte et al. (2002) també han reconstruït la localització altitudinal de les ELA's en el circ de Valdecasillas d'ençà el LGM.

S'ha reconstruït la ELA per a cada vall seguint la proposta de Höfer (1879), tot i la seva debilitat en circs de parets abruptes i pendents molt marcats (Porter, 2001), com el Corral del Veleta o la Hoya del Mulhacén. Es percep una variabilitat espacial molt irregular, on les condicions topogràfiques i morfològiques de cada vall (alçada de la capçalera, orientació, amplada) determinen les cotes mínimes assolides per les glaceres.

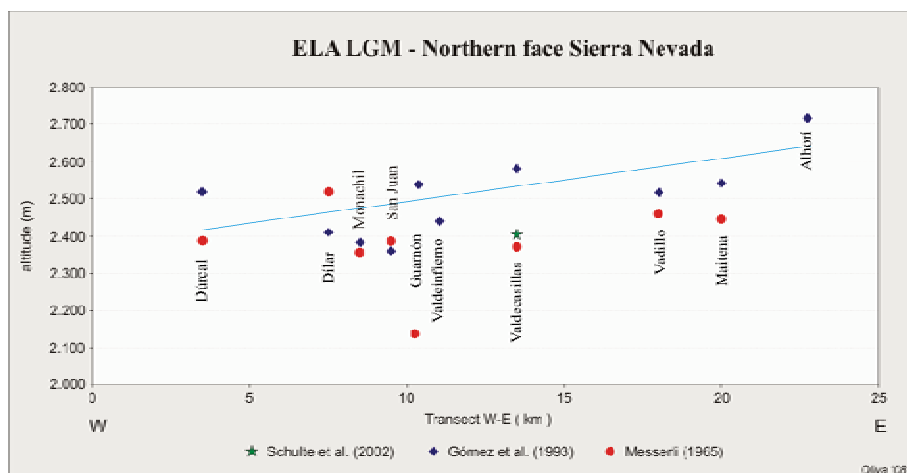


Figura 2.9. Reconstrucció de la ELA a partir de les restes morrèniques de cada vall situades a menor alçada, a partir de Höfer (1879), a la cara nord de Sierra Nevada.

S'endevina, però, una menor altura de la ELA a les valls septentrionals respecte de les meridionals, d'uns 150-200 m de diferència, degut a la seva major continentalitat (figura 2.9 i 2.10). Alhora, hi ha una component mediterrània evident a mesura que ens endinsem al sector oriental de Sierra Nevada, on les alçades inferiors i la conseqüent menor àrea d'acumulació, expliquen que les glaceres restessin més amunt. La influència càlida de la mar Mediterrània es tradueix en un augment de cota de les morrenes de la darrera glaciació entre l'oest i l'est, d'uns 300-400 m tant a cara nord com a cara sud. La longitud de les glaceres va ser reduïda, sobrepassant en pocs kilòmetres la caixa dels circs. Tot i l'aparent major desenvolupament del modelat glacial a la cara nord de Sierra Nevada, l'estretor i exposició de les valls de Lanjarón i Poqueira a les masses humides provinents de l'Atlàntic, van fer que aquestes canalitzessin les glaceres més llargues, d'uns 8 i 6,2 km respectivament. La resta d'aparells glacials devien assolir una longitud d'entre 3 i 5 km en els moments de més fred i precipitació (Gómez Ortiz, 2002), romanent a les pròpies valls, amb escassa transfluència de gel amb les unitats adjacents. Vessant els circs, on les glaceres tendien a una fusió ràpida, s'entrava en el domini del periglacialisme, que s'estenia en unes cotes sensiblement inferiors a les actuals i es manifesta en multitud de formes i dipòsits fins als 1.000-1.100 m (Gómez Ortiz & Salvador Franch, 1992). Alhora, per sobre del límit de neus permanents, en les planícies culminants on la topografia i el vent privaven el desenvolupament de casquets glacials, trobem terrasses de crioplanació i sòls estructurats amb macrofigures geomètriques que podrien correspondre a aquest període. En aquests sectors, Simón et al. (2000) també han detectat la successió de diferents fases climàtiques durant el Quaternari a partir de l'existència de paleosòls.

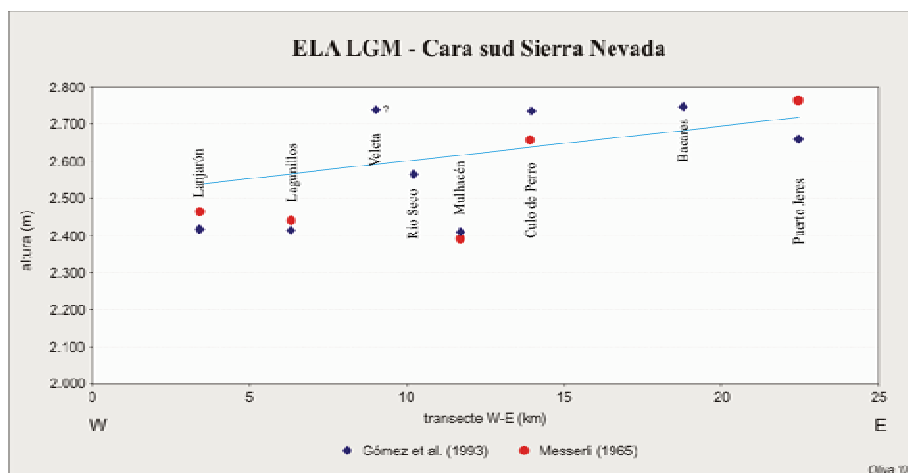


Figura 2.10. Reconstrucció de la ELA a partir de les restes morrèniques de cada vall situades a menor alçada, a partir de Höfer (1879), a la cara sud de Sierra Nevada.

2.2.3 La desglaciació: el trànsit cap a l'Holocè

La fi del LGM s'associa a importants canvis orbitals d'índole astronòmica que condicionen un augment global de la insolació a l'hemisferi nord i, en conseqüència, de la temperatura planetària en escassos mil·lennis, amb una reorganització de la CGA i de les corrents oceàniques, les quals retroalimentaran la inèrcia climàtica impulsada per factors externs.

Els registres isotòpics dels gels de Groenlàndia i l'Antàrtida mostren un patró similar respecte a l'evolució de la temperatura global des de l'últim interglacial, malgrat un desfasament d'entre 1.500-3.000 anys a manera de balança anomenat *bipolar See-Saw* (Blunier & Brook, 2001). Ambdós registres presenten una asincronia logarítmica entre l'arribada a un període glacial i l'inici d'un interglacial: mentre el refredament gradual del planeta s'allarga durant desenes de milers d'anys, l'escalfament planetari esdevé en uns pocs mil·lennis, realimentat per mecanismes de *feed-back* positiu.

Aquest mateix procés succeí en acabar el LGM: mentre s'iniciava l'escalfament a l'Antàrtida, Groenlàndia romaní estable o amb una lleugera tendència al refredament (Alley & Clark, 1999). Alley (2000) i Blunier & Brook (2001) ubiquen l'inici del sobtat escalfament a l'Antàrtida a 23 ka BP, amb cert retard a Groenlàndia, on s'accentua entorn als 19 ka BP, coincidint amb una major insolació. Una de les àrees clau en la dinàmica climàtica quaternària és, sens dubte, l'Atlàntic Nord, regió clau en la variabilitat climàtica d'escala mil·lenària i centenària de l'hemisferi septentrional.

Taula 2.3. Cronologia de la desglaciació a l'Atlàntic Nord (Yu & Wright, 2001).

CRONOLOGIA DE LA DESGLACIACIÓ A L' ATLÀNTIC NORD			
Cronozones Mangerud et al. (1974)	Edat radiocarboni (anys BP)	Estratigrafia GRIP Björck et al. (1998)	Anys BP calendari (inici)
<i>Oldest Dryas</i>	> 13.000	GS-2a	16.900
<i>Bølling</i>	13.000-12.000	GI-1e	14.700
<i>Older Dryas</i>	12.000-11.800	GI-1d	14.050
<i>Allerød</i>	11.800-11.000	GI-1c/1a	13.900
<i>Younger Dryas</i>	11.000-10.000	GS-1	12.650
Pre-Boreal	10.000-9.000	Holocè	11.500

GS (*Greenland Stadal*); GI (*Greenland Interstadial*).

L'escalfament gradual va arribar al seu punt àlgid durant el període Allerød, entorn a 14,7 ka BP a Groenlàndia (Hughes & Gramlich, 1996), paral·lelament al màxim tèrmic registrat als tròpics (Labeyrie et al., 2003). Tal i com es mostra en la taula adjunta, les successives crisis climàtiques que van caracteritzar el LGM van tenir continuïtat durant la desglaciació amb brusques oscil·lacions durant els D-O i els cicles H_{ev} -Bond. La inestabilitat dels *inlandsis* d'altres latituds, principalment el casquet Laurèntid, de recurrents i massives descàrregues d'*icebergs* a l'Atlàntic Nord, imposava una redistribució de masses oceàniques que induïa una atenuació en la intensitat de la circulació termohalina durant les pulsacions fredes i una reactivació durant les fases més càlides (Broecker et al., 1992). Segons Yu & Wright (2001), l'últim cicle de Bond transita des del màxim tèrmic de l'Allerød fins a l'entrada a l'Holocè i es reflecteix en un refredament progressiu esglaonat en 2 o 3 cicles D-O abans de l'abrupte escalfament holocènic; el moment més fred d'aquest cicle de Bond correspon al *Younger Dryas* (YD), el darrer H_{ev} (H_0 ; Andrews et al., 1994), i va propiciar el retorn de les condicions glacials a moltes àrees de muntanya recentment desglaçades i l'expansió dels encara existents *inlandsis* de l'hemisferi nord.

En aquest context general s'inscriu el trànsit entre el LGM i l'Holocè a la Península Ibèrica, escalfament gradual només interromput per breus i sobtades fases de recuada de les condicions climàtiques. La recuperació tèrmica, el retrocés dels *inlandsis* d'altres latituds i el restabliment de la circulació termohalina ens endinsen definitivament a l'actual interglacial, l'Holocè.

El context regional de Sierra Nevada, frontissa climàtica entre el clima temperat i el subtropical, es percep com un racó especialment sensible a les fluctuacions climàtiques. El ràpid augment tèrmic constatat en *proxies* regionals (Pons & Reille, 1988; Cacho et al., 2000; Ortiz et al., 2004; Abreu et al., 2003) i hemisfèrics (Bjorck et al., 1998; Moreno et al., 2002), juntament amb l'alta sensibilitat de la Sierra Nevada a la variabilitat climàtica, suggereix una ràpida desglaciació del massís en escassos mil·lennis. Els processos geomòrfics s'adapten a l'increment tèrmic: les condicions glacials dominants per sobre de 2.500 m van haver de remuntar alçada i instal·lar-se en cotes cada vegada més altes. Els processos crionivals s'instauren en aquelles àrees recentment desproveïdes de gel, l'acció mecànica del qual havia debilitat el rocam, reforçant així l'efectivitat del periglaciariisme.

Taula 2.4. Morfoestratigrafia del glaciariisme en els alts circs septentrionals (Schulte et al., 2002).

Cronologia		Estad isot.	Edad ka BP	Sierra Nevada	Valle Mulhacén-Valdecasillas	Valle Veleta-Guarnón
Holoceno		1	0	Glaciares rocosos y morrenas de glaciar de circo (Veleta)	Glaciares rocosos	glaciar de circo y glac. rocosos 1-2 morrenas de la P.E.H. 3-4 morrenas
Pleistoceno superior	Tardiglacial	2	14	Morrenas de glaciares de valle Morrenas de glaciares de valle conectados	4 Complejos de morrenas de glaciar de circo 5 Morrenas de glaciar de valle 1 Morrena de glaciares de valle conectados	4 Morrenas de glaciar de valle
		Pleniglacial	3	30	?	?
	4		61			
	5		70			
	Eemiense			110	Formación de suelos pardos en las morrenas antiguas	
Pleistoceno medio			128			
	Penúltima glaciación	6		Morrenas de glaciaciones antiguas	Valle en forma de U	Valle en forma de U depósitos glaciofluviales

S'han constatat diferents impulsos de les glaceres durant el Tardiglacial en els circs més elevats del vessant septentrional de Sierra Nevada (taula 2.4). En aquests sectors topogràficament més favorables a l'acumulació nival i posterior transformació en gel, el Tardiglacial es caracteritza per la construcció de morrenes de circ. En tenim exemples evidents a la Hoya del Mulhacén, una de les seqüències morrèniques més completes del sud d'Europa⁸ (Schulte et al., 2002), indicatives de diferents pulsacions d'avanç i retrocés de la glacera durant aquesta fase. El Corral del Veleta no acull una sèrie de morrenes tan completa, tot i que el Tardiglacial es manifesta en un cordó morrènic de notable potència allargat d'est a oest, evidenciant la tendència de la glacera a dibuixar un recorregut ESE-WNW, emmotllant-se a la topografia prèvia (Gómez Ortiz, 2002; Schulte, 2002a).

⁸ Fins a 27 cordons morrènics corresponents a 4 generacions en el mateix circ, entorn als 2.900 m.

Durant els sobtats retorns a condicions més fredes, a més d'una profusió de petites glaceres penjades a les capçaleres septentrionals i algun possible reducte a la cara sud del massís, el periglaciariisme s'estendria activament per la Sierra, desnaturalitzant i retreballant les formes glacials preexistents. Nombroses glaceres rocoses inactives en ambdues vessants de Sierra Nevada deuen la seva formació a aquesta pulsació freda, estabilitzant-se amb l'entrada a l'Holocè. Aquest és el cas de l'àrea d'estudi de San Juan sector B⁹, on nombrosos lòbuls de solifluxió s'acomoden actualment sobre una glacera rocosa inactiva desllorigada.

L'existència i abundància de glaceres rocoses que assignem al Tardiglaciari, relictos i fossilitzades per dipòsits de vessant, indueix a pensar en una extensió i intensificació dels processos solifluidals a l'interior dels circs durant aquesta fase. A la vegada, la desglaciació determina la formació dels cossos lacustres avui presents a Sierra Nevada. L'abandonament de les valls, confinament en circs i posterior enretirada de les glaceres cap a enclavaments topogràficament més arrecerats en el sí dels mateixos, facilita l'aparició de llacunes en cubetes de sobreexcavació i depressions barrades per obturació morrènica. A la cara sud del massís, on la desglaciació va ocórrer sense grans avanços ulteriors, els sediments lacustres deuen d'estendre's fins al darrer impuls del LGM; en canvi, la major sensibilitat dels alts circs septentrionals a les petites fluctuacions climàtiques permetria avanços relatius a l'interior dels circs durant l'Holocè i Tardiglaciari, fet que no permet deduir l'abast temporal dels arxius sedimentaris que acullen les llacunes.



Figura 2.11. Corral del Veleta i morrena tardiglaciari.

⁹ Veure mapa geomorfològic, pàg. 104.

2.2.4 Evolució holocena del paisatge nevadense

L'augment tèrmic experimentat amb l'entrada a l'Holocè¹⁰ suposa la marginació paulatina de les glaceres continentals a latituds polars i el ràpid confinament del gel en àmbits d'alta muntanya als tròpics i a latituds mitges. L'Holocè és el període de la història de la Terra més estudiat per la proximitat cronològica amb el present i la major disponibilitat de registres sedimentaris ben preservats, fet que facilita el seu estudi des d'una perspectiva *multiproxy*. El seu interès també recau en la seva rellevància per poder quantificar i emmarcar climàticament el tant esmentat canvi climàtic.

- ***Cronologia holocena global***

L'inici de l'Holocè es situa en l'escalfament sobtat posterior al YD a l'hemisferi nord com a conseqüència de les variacions en la radiació incident a la superfície terrestre per la conjunció de canvis orbitals i activitat solar. Si bé durant la primera meitat de l'Holocè, els factors orbitals externs eren diferents de les condicions presents, la segona meitat es caracteritza per un forçament radiatiu extern molt similar a l'actual, que s'ha mantingut més o menys estable al llarg dels darrers 6 ka BP. La relativa estabilitat de la radiació solar incident a escala holocena, amb variacions en la producció de C¹⁴ de l'ordre de $\pm 0,4\%$ respecte els nivells actuals (Mackay et al., 2003), amaga una variabilitat climàtica complexa i amb sensibles fluctuacions durant els darrers mil·lennis.

La temperatura reacciona en conseqüència als canvis de radiació global i experimenta una marcada tendència a l'augment en l'inici de l'actual interglacial, perfectament detectable en registres terrestres i marins. A partir de foraminífers, pel conjunt de l'Atlàntic Nord, aquest impàs s'ha estimat en aproximadament 1°C per segle (Austin & Kroon, 1996), assolint uns sorprenents 9°C en ~50 anys a altes latituds (Koç et al., 1993); aquest brutal increment tèrmic sembla que es va produir en menys d'una generació humana, en alguns decennis o, inclús, en escassos anys (Alley, 2000).

Cal tenir en compte l'estabilitat en la composició dels gasos d'efecte hivernacle al llarg de l'Holocè, estipulada entorn a 280 ± 20 ppmv pel CO₂ ($\pm 15\%$; Raynaud, et al., 2000; Sowers et al., 2003) i, més variable, entre 575-700 ppbv pel CH₄ ($\pm 20\%$; Chappellaz et al., 1997). L'interès per desxifrar les causes de la variabilitat climàtica holocena, que la

¹⁰ Es considera els darrers 10.000 anys ¹⁴C, és a dir, 11.554 anys cal BP. En endavant, es consideraran sempre edats calibrades.

recerca recent està demostrant més significativa del que es pregonava anys ençà, rau en el fet de que, tot i disposar d'unes concentracions de CO₂ i CH₄ relativament estables i semblants als índexs actuals, van esdevenir fluctuacions climàtiques que van tenir un impacte en molts casos crític sobre les civilitzacions humanes; l'Holocè és, doncs, un període d'especial importància en l'actual context d'incertesa climàtica per poder determinar la component natural del canvi global.

Després de la darrera pulsació freda corresponent al YD, l'escalfament planetari es va intensificar i, entorn a 9 ka BP, les altes latituds de l'Atlàntic Nord ja reflectien unes temperatures sensiblement superiors a les actuals, mentre que la resta del continent europeu encara romania més fred (Alverson et al., 2002). Entorn a 8,2 ka BP, l'alliberament sobtat de gran quantitat d'aigua dolça i fresca a l'extrem nord-occidental de l'oceà Atlàntic, propiciat per l'enretirada del casquet Laurèntid cap a latituds més septentrionals, va obrir un corredor lliure de gel cap a la badia Hudson i va permetre que l'immens llac proglacial Agassiz vessés les seves aigües a l'Atlàntic ($\sim 4,3-4,7 \cdot 10^{14} \text{ m}^3$; Wiersma & Renssen, 2006). La redistribució de masses oceàniques a l'Atlàntic Nord, punt neuràlgic de la CGA, va frenar la circulació termohalina condicionant un retorn de les condicions més fredes a Europa per espai d'uns 200 anys; s'ha estimat una caiguda tèrmica de 7'4°C a Groenlàndia (Long et al., 2006), $\sim 5^\circ\text{C}$ al mar del Nord, 1-2°C a Europa central i occidental (Masson-Delmotte et al., 2005) i entre 0'5-1°C en latituds subtropicals (Ramrath et al., 2000; Cacho et al., 2001; Allen et al., 2002 i Wiersma & Renssen, 2006). La precipitació va disminuir en el conjunt europeu durant aquesta fase, amb excepcions com els Alps, en què va augmentar lleugerament degut a una component purament regional (Magny et al., 2003).

Tot i el curt i brusc refredament que va suposar l'*event* 8,2, la tendència a l'escalfament va seguir els següents mil·lennis i, entorn a 6 ka BP, tot el continent europeu gaudia de valors superiors als presents. El *Holocene Warm Period* (HWP) és el màxim tèrmic del període Atlàntic¹¹; Alverson et al. (2002) contempen unes temperatures mitjanes de l'ordre de 1-3°C superiors a les actuals, arribant fins a 6°C en altes latituds (Koshkarova & Koshkarov, 2004). Les temperatures més càlides es conjuguen amb unes precipitacions més elevades en bona part del continent fins als 6 ka BP, moment en que s'inicia una aridificació progressiva (Huntley & Prentice, 1993); aquesta tendència s'intensifica al nord d'Àfrica,

¹¹ En la cronoestratigrafia holocena proposada per Mangerud et al. (1974), veure figura 2.12, pàg. 58.

sobretot en zones del Sàhara, on es passa d'unes condicions semiàrides a les desèrtiques actuals (Gasse, 2002) com a conseqüència de la disminució del monso nord-africà (Combourieu-Nebout et al., 2002; Rohling et al., 2008). La riba nord de la Mediterrània també es va veure afectada pel desplaçament septentrional de les altes pressions subtropicals, aguditzant-se l'aridesa en la meitat occidental de la conca (Jalut et al., 2000). A partir dels 6 ka, de manera paral·lela a una variabilitat climàtica més marcada (Mayewski et al., 2004), s'estén la petjada humana sobre el territori amb el floriment de les primeres civilitzacions en ambdós marges de la Mediterrània: l'ocupació sedentària del territori, la introducció de l'agricultura amb l'afavoriment de certes espècies i l'aprofitament forestal van comportar canvis en el medi biofísic immediat. D'aleshores ençà, l'empremta d'aquestes activitats sovint dificulta la interpretació dels *proxies* i emmascara la senyal climàtica.

Johnsen et al. (2001) denoten una nova disminució tèrmica a partir dels 4,5 ka BP en el registre isotòpic de Groenlàndia, alhora que Bond et al. (2001) detecten un augment sobtat dels *ice-rafted debris* a l'Atlàntic Nord; és la Neoglaciació, que com el seu nom indica, reactiva l'avenç de les glaceres, les quals frenen el seu retrocés i avancen després de mil·lennis reculant (Porter & Denton, 1967; Nesje & Dahl, 1993, 2000).

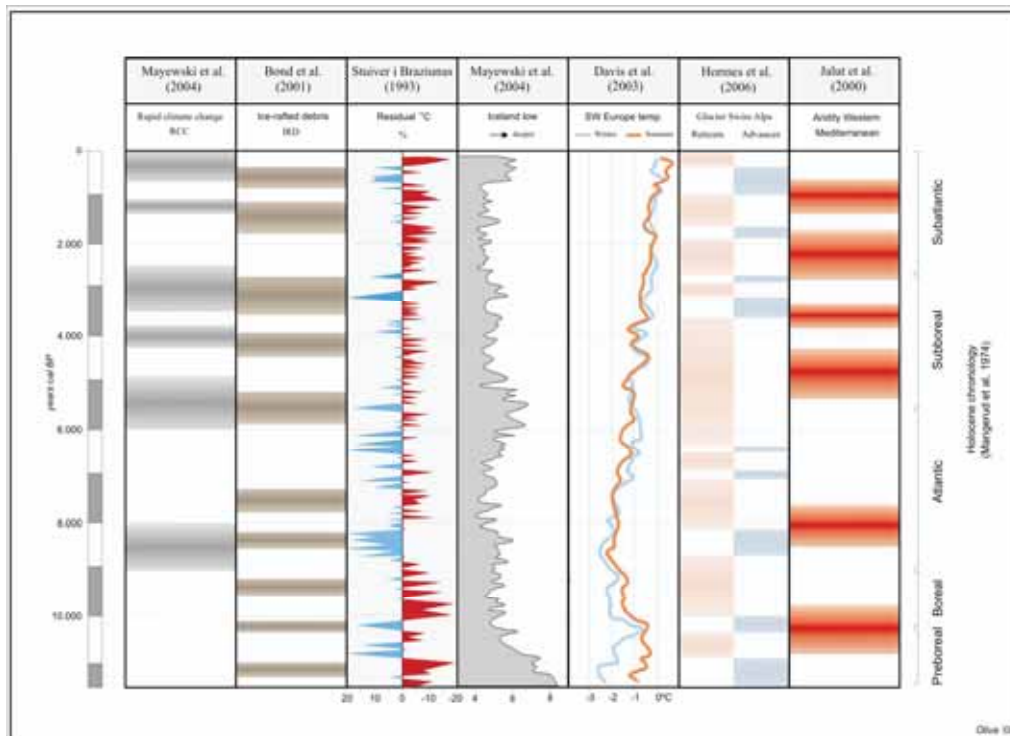


Figura 2.12. Comparació de diferents *proxies* globals, hemisfèrics i regionals durant l'Holocè.

Mentre el centre i nord d'Europa registraven condicions fredes i humides entorn a 4 ka BP, la regió mediterrània patia una marcada aridesa. Entre 3,5-2,5 ka BP, Meeker & Mayewski (2002) constaten un reforçament dels *westerlies* a l'Atlàntic Nord, període en què col·lapsen les civilitzacions més avançades del moment com a conseqüència del repunt d'aridesa ressenyat a latituds mitges-baixes (Nüzhet Dalfes et al., 1996; deMenocal, 2001). La pulsació *Löbben* es plasma als Alps i Escandinàvia amb avenços glacials entre 3,5-3,2 ka BP (Hormes et al., 2001), coincidents amb una disminució radiativa. Cheddadi et al. (1998) detecta una pulsació freda molt marcada entorn 3,3 ka BP a l'Atlas, acompanyat d'un augment de precipitació entre 4-3 ka BP. Bell & Walker (2005) situen el mínim tèrmic, juntament amb unes condicions més humides, entorn a 2,8-2,5 ka BP: nivells dels llacs més elevats, disminució dels *timberlines*, avenços glacials, abandonament de l'activitat agrícola en certs sectors i augment de la solifluxió en moltes àrees de muntanya.

Els darrers dos mil·lennis són els més ben estudiats de tots, ja que permeten la superposició, integració i contrastació de nombroses tècniques paleoclimàtiques. Durant el *Roman Warm Period* (RWP), Europa registra uns valors tèrmics sensiblement superiors, tot i una dicotomia entre el nord del continent més humit (Jiang et al., 2005) i, el sud, dominat per l'aridesa (Lamb, 1977; Jalut et al., 2000). En àrees de muntanya com els Alps, en alçades on actualment s'hi emplaça el cinturó periglacial, Gamper (1983) i Veit (1988) remarquen que el desenvolupament edàfic propiciat per unes temperatures més elevades atura els processos solifluidals. Hormes et al. (2001, 2006) i Holzhauser et al (2005) observen un retrocés de les glaceres alpines, mentre que Schulte et al. (2008, 2009) detecten una reducció de les inundacions a les valls alpines.

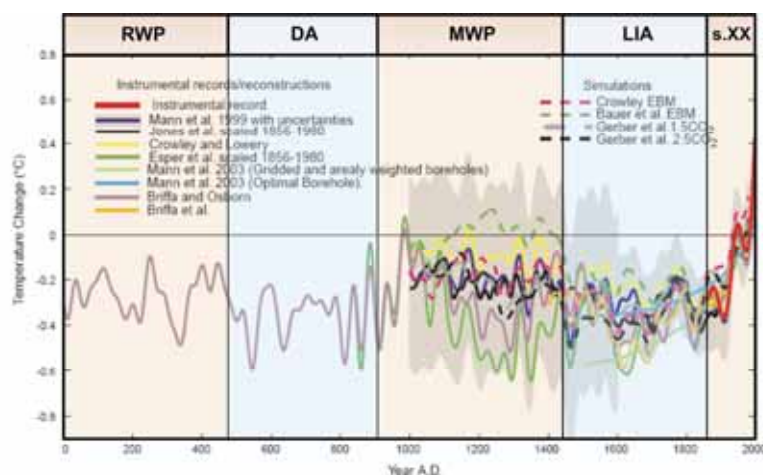


Figura 2.13. Temperatures globals durant els darrers 2.000 anys (a partir de Mann & Jones, 2003).

L'Avenç Glacial Medieval o DACP és una pulsació freda i seca que s'allarga entre els 400-900 AD, caracteritzada per una disminució relativa de la radiació incident sobre la superfície terrestre, que va causar un refredament sobtat associat a menors precipitacions en bona part del continent europeu (Desprat et al., 2003). Posteriorment, durant el MWP, període comprès entre els anys 900-1300 AD, la temperatura es va recuperar significativament, permetent inclús una incipient colonització vikinga de Groenlàndia. L'increment tèrmic es manifesta en una àmplia varietat de processos dinàmics: retrocés de les glaceres, remuntada en alçada dels *timberlines*, desenvolupament edàfic en el pis crionival, etc. Soon & Baliunas (2003) apunten el MWP com una anomalia tèrmica positiva de caire global, amb uns valors estimats en 1-2°C superiors als actuals.

- ***Cronologia holocena de la variabilitat climàtica a la Península Ibèrica***

La inèrcia tèrmica iniciada a l'Atlàntic Nord després del YD va continuar durant l'entrada a l'Holocè, projectant-se més moderadament a la Península Ibèrica. Entre els 9 i 8 ka BP, Julià et al. (1996) postulen un retorn a condicions fredes que tenen el seu mínim durant l'*event 8,2*, el qual es concep com una fase especialment àrida al sud-est peninsular (Carrión et al., 2001) i altrament humida a la façana nord-atlàntica ibèrica (Leira, 2005). A partir de l'anàlisi d'alquenones en sediments del mar d'Alboran, Cacho et al. (2001) xifren la disminució de temperatures en 0,5-1°C, també detectada en *cores off shore* de Portugal i Mauritània (Abrantes et al., 1998; deMenocal et al., 2001).

La torbera de Padul, a les estribacions occidentals de Sierra Nevada, a 720 m d'alçada i encarada als fluxos atlàntics, conté una de les seqüències torbooses més extenses i contínues d'Europa, englobant gairebé el darrer milió d'anys. El seu potencial paleoclimàtic s'ha explotat a través de la palinologia (Menéndez Amor & Florschütz, 1964; Florschütz et al., 1971; Pons & Reille, 1988) i, més recentment, amb la geoquímica (Ortiz et al., 2004). Padul mostra una expansió del pol·len arbori en el context regional a l'entrada de l'Holocè, tot i que durant el mil·lenni comprès entre els 9-8 ka BP decau considerablement. Posteriorment, les rouredes i suredes tornen a desenvolupar-se insinuant unes condicions climàtiques més benignes durant el HWP.

Aquesta torbera no s'allarga més enllà de l'Holocè mitjà perquè l'explotació iniciada a mitjans de segle XX va decapitar-ne els estrats superiors. L'aridificació progressiva del

sud peninsular, mateixa tendència registrada al nord d'Àfrica a partir dels 6 ka BP, indueix a un augment altitudinal dels pisos de vegetació, estenent-se així les màquies i carrasques en detriment de rouredes i pinedes, que s'instal·len en cotes més altes de la Sierra. L'augment d'insolació estival conduït per canvis orbitals va incrementar la radiació incident sobre la Península Ibèrica i, en conseqüència, les temperatures (Danmati, 2000; Gasse, 2000).

Jalut et al. (2000) apunten una intensificació de l'aridesa estival en el llevant peninsular entorn a 4,5 ka BP, fet que determina la translació de les pastures a muntanya i l'inici de la transhumància (Galop, 1997). Tanmateix, Carrión (2003) destaca unes condicions relativament humides entre els 5-3,5 ka BP a partir d'un dipòsit lacustre de la Sierra de Segura (Jaén), al sud-est ibèric, amb poca presència de vegetació xeròfita, recuperació del *Pinus Nigra* i abundància d'espècies adaptades a la humitat.

Les temperatures experimenten una sensible caiguda entorn a 4-3,5 ka BP, tot i un remarcable increment de l'aridesa, que, associat a l'activitat antròpica, s'ha apuntat com a causa del col·lapse de la cultura argàrica (Carrión et al., 2007). Pel NW peninsular, Martínez-Cortizas et al. (1999) estimen durant la Neoglaciació unes temperatures inferiors en 1,3°C respecte l'actualitat.

Entre els 3,5-2,1 ka BP les condicions àrides es generalitzen en el sud peninsular (De Beaulieu et al., 2005), fet que Álvarez et al. (2005) lliguen a una fase positiva de la NAO degut a una major plasmació de l'anticicló de les Açores sobre la Península Ibèrica. La segona meitat del RWP es caracteritza per un cert repunt de les precipitacions entre 2,1-1,7 ka BP, amb una major expansió de les espècies higròfites (Gil García et al., 2006). Per a la façana atlàntica peninsular, Martínez-Cortizas et al. (1999) xifren en 2,2°C l'escalfament registrat durant el màxim tèrmic del RWP respecte els valors actuals.

Després d'uns segles de temperatures relativament càlides hi ha un cert retorn a condicions fredes durant els DACP (400-900 AD), tot i que acompanyat d'estius càlids i secs (Lamb, 1977; Desprat et al., 2003; Gil García et al., 2006). El MWP (800-1300 AD), anomalia tèrmica global, també es manifesta més humit i càlid a la Península Ibèrica, amb augment tèrmic estipulat en 1,9°C pel NW ibèric (Martínez-Cortizas et al., 1999).

- ***Evolució ambiental holocena de Sierra Nevada: estat de la qüestió***

En el cas concret de Sierra Nevada, l'escassetat de registres sedimentaris útils per a la reconstrucció ambiental dels darrers mil·lennis ha desviat l'atenció de la comunitat científica. Només Esteban Amat (1995), en la seva tesi doctoral, fa un incipient intent d'endinsar-se en el coneixement de l'Holocè a Sierra Nevada a partir de la palinologia, tot i centrar-se únicament en el darrer mil·lenni. La bona predisposició del mètode per caracteritzar l'evolució ambiental de l'àmbit regional en qüestió presenta certes problemàtiques en el cas de la Sierra, d'on l'autor afirma que les mostres són extremadament pobres en pol·len i sovint, a més, el seu estat de degradació en dificulta la interpretació paleoclimàtica.

Esteban Amat (1995), a partir d'un lòbul de solifluxió del circ de Rio Seco, detecta un increment de la humitat en el massís durant l'inici del MWP, que es reflecteix amb una recuperació de les pinedes a l'Alpujarra entre 950-1250 AD. Durant els moments freds de la LIA hi ha una reculada de les espècies arbòries, tot i un increment substancial datat en 170 ± 120 anys BP, seguit d'un augment de la xericitat. Les característiques inherents als moviments solifluidals indueixen a considerar poc indicatives les anàlisis pol·líniques en aquests registres sedimentaris, ja que la pròpia dinàmica de vessants en períodes d'activitat geomòrfica tendeix a erosionar i remobilitzar el tapís superficial invalidant així la continuïtat cronostatigràfica. Esteban Amat (1995) situa l'increment de l'activitat antròpica a les culminacions del massís entre els segles XIII i XVII, fet que pot desvirtuar la interpretació pol·línica en clau paleoclimàtica.

2.2.5 *Little Ice Age (LIA)*

Des del segle XIV fins a la segona meitat del XIX, el clima europeu s'endinsa en les condicions fredes més intenses, com a mínim, dels darrers 2.000 anys. La LIA engloba centúries d'alta variabilitat climàtica de gran interès per a l'estudi del comportament natural del clima en un moment d'incertesa climàtica futura. El fet de que l'alta muntanya accentuï els gradients climàtics i reforci els processos dinàmics, els defineix com espais particularment fructífers per a l'estudi del canvi global (Wanner et al., 2000). Així doncs, l'estudi i caracterització de la LIA en un àmbit de muntanya com Sierra Nevada és especialment interessant de cara a la contextualització de la dinàmica climàtica actual.

- **Context climàtic de la LIA a Europa i a la Península Ibèrica**

El mateix terme Petita Edat de Gel (*Little Ice Age*, LIA) pretén reflectir un canvi en les condicions climàtiques dominants durant els s. XIV a XIX, que s'explicita contundentment en l'avanç de les glaceres alpines, les quals amenaçaven els pobles i llogarrets que s'havien escampat per arreu i remuntat alçada durant el MWP. En gairebé totes les muntanyes glaçades del planeta, les glaceres van avançar fins a posicions que no havien assolit en els darrers 10.000 anys (Bradley & Jones, 1992).

El principal motiu es troba en la disminució de la radiació solar incident sobre la superfície terrestre, amb tres mínims de taques solars esglaonats (Mínims de Dalton, Maunder i Spörer). S'ha associat aquest forçament radiatiu solar amb l'evolució climàtica global i, especialment, de l'hemisferi nord durant la Miniglaciació o LIA (Stuiver & Braziunas, 1992; Lean et al., 1995; Beer et al., 2000; Shindell et al., 2001; Bradley, 2003; Usoskin et al., 2004; Solanski et al., 2004), admetent sinergies amb un increment de l'activitat volcànica (Lamb, 1970; Porter, 1986; Bradley & Jones, 1992; Jacoby et al., 1999; Bradley, 2003; Prohom et al., 2003) i variacions de la circulació termohalina a l'Atlàntic Nord (Broecker, 2000). La pauta general en el continent europeu és una disminució de les temperatures calculades entorn a 0,6-1°C respecte l'actualitat des dels moments més freds del *Minimum Maunder* (MM; Lamb, 1977; Mann et al., 1998; Bradley, et al., 2003; Pauling et al., 2003; Zorita et al., 2004; Luterbacher et al., 2004). L'accentuada variabilitat espacial i temporal de les precipitacions durant la LIA ha estat àmpliament constatada per nombrosos autors (Lamb, 1977; Rodrigo et al., 1999; Alcoforado, et al., 2000; Wanner, et al., 2004; Jacobeit et al., 2002; Pauling et al., 2006).

A la Península Ibèrica són nombroses les temptatives que han focalitzat la seva escomesa a l'estudi de l'anomenada climatologia històrica, que es concreten en una disminució de les temperatures i, sobretot, en una intensificació de la variabilitat climàtica: sequeres, inundacions, onades de fred i calor, etc (Barriendos, 1994, 1997; Rodrigo, 1994; Barriendos & Martín Vide, 1998; Rodrigo et al., 1999, 2000; Barriendos & Llasat, 2003). L'empremta de la LIA a les muntanyes ibèriques es resumeix en una disminució d'altitud de les condicions fredes: les restringides glaceres peninsulars van augmentar el seu volum i el periglaciariisme es va activar a alçades menors de les actuals. Al NW peninsular, Martínez-Cortizas et al. (1999) contemplen la LIA com la pulsació més freda de l'Holocè

tardà, amb temperatures $\sim 1,7^{\circ}\text{C}$ inferiors a les actuals. Per a l'alt Pirineu, Lampre (1994) concreta l'augment tèrmic experimentat des de finals de la LIA en $0,5-0,8^{\circ}\text{C}$; Chueca et al. (1998) el situen en $0,9-0,95^{\circ}\text{C}$, López Moreno (2000) eleva la pujada tèrmica des del MM a $0,85-1^{\circ}\text{C}$ i González Trueba et al. (2008) a $0,9^{\circ}\text{C}$.

- ***Evidències de la LIA a Sierra Nevada***

Especialment interessants per Sierra Nevada són les evidències derivades de la tesi doctoral de Rodrigo (1994) en el seu estudi sobre la climatologia històrica d'Andalusia Oriental durant la LIA. L'autor indaga en nombroses variables directament o indirecta relacionades amb el clima; una d'aquestes és el comerç de la neu. Es constata la generalització d'aquest comerç a partir de l'última dècada del segle XVI, tot i que era una pràctica ja estesa des de l'època clàssica, assolint una extraordinària popularitat en totes les classes socials urbanes durant els segles XVII i XVIII. L'expansió del comerç de la neu i l'abaratiment del seu preu a inicis de segle XVII coincideixen amb l'inici de la màxima intensitat de la LIA a Andalusia (1590-1650). No només Sierra Nevada subministrà neu a les principals ciutats andaluses, sinó que d'altres serres de les Bètiques que volten els 1.500-2.000 m (Sierra Espuña, Sierra de las Nieves, Sierra de Filabres o Serranía de Ronda) també disposaven de pous de gel per tal de comerciar amb aquest element (Rodrigo, 1994). Les actuals condicions climàtiques imperants en aquests relleus no permeten l'acumulació de neu al llarg de l'any, amb només 3 o 4 episodis anuals de nevades significatives, fet que indueix a pensar en una major freqüència i acumulació de neu durant els segles XVII i XVIII.

Aquest augment de les precipitacions lligat a una disminució de les temperatures determinen una major profusió i permanència de l'element blanc en cotes altes de la Sierra. La primera i brusca pulsació de la LIA al sud peninsular va suposar, doncs, una major innivació i un retard en la fusió nival, fet de particular transcendència a l'hora d'analitzar l'activació dels lòbuls de solifluxió durant aquesta fase.

Una nova evidència que ens remet al paisatge nevadense d'aquestes centúries ve impulsada per la Il·lustració, moviment filosòfico-intel·lectual que, durant el segle de les Llums¹², va imbuir Europa d'un esperit crític i constructiu amb la raó de fonament

¹² S. XVIII.

transversal a les diferents branques del saber. Amb un nervi romàntic i una intrèpida vocació aventurera, a finals de segle XVIII i principis del XIX, un seguit de naturalistes majoritàriament centreeuropeus i espanyols s'endinsen a Sierra Nevada i deixen per escrit les seves observacions sobre el paisatge del massís. En aquesta línia, Gómez Ortiz (1997, 2006) recull un seguit de referències d'aquests viatjants respecte a la glacera que acollia el Corral del Veleta; Boissier (1839) en remarca que *"té la peculiaritat de ser l'únic en tota la Sierra i el més meridional d'Europa; deu la formació a la seva posició, en el fons d'un circ abrigat i dominat en totes les parts per altes cimes on les tempestes escombren la neu a l'hivern. La seva alçada mitjana és d'uns 9.000 peus i presenta en miniatura els caràcters de les glaceres alpines, esquerdes, gel impur, morrenes fangoses a la seva base i als seus laterals, per fi, rierols d'aigües tèrboles que s'escapen en la seva extremitat per cavernes excavades en el gel"*.



Figura 2.14. Gravat del Picacho i Corral del Veleta (Schrader & Bide, 1893).

Hellmann (1881) quantifica la glacera en 580 m d'est a oest i 250 m de nord a sud, reconeixent la seva tendència al retrocés. Rute (1889) en destaca la fesomia glacial de la mateixa, recalcant la profusió de diferents estrats i esquerdes que la revesteixen. Schulte (2002b, 2002c) corrobora aquestes descripcions amb la datació isotòpica dels dipòsits glacio-lacustres de la llacuna del Corral del Veleta pel mètode del Pb^{210} , amb una edat mínima d'alliberament del gel de 1908 ± 4 AD, admetent així el recobriment glacial de bona part del circ al llarg del segle XIX. L'autor constata l'existència de cinc generacions de morrenes en el Corral, dos de les quals pertanyents a la LIA, que podrien correspondre amb el màxim avanç al llarg del segle XVII, en plena Miniglaciació.

Durant la LIA, doncs, s'intensifiquen i estenen els processos periglacials no només en el Corral del Veleta, sinó en tot el massís: la dinàmica de vessants, les tarteres, *els debris flows* i les glaceres rocoses es dinamitzen. Alhora, els lòbuls de solifluxió es reactiven per sobre dels 2.500 m a la cara nord i 2.900 m a cara sud (Oliva et al., 2008).

Tres fases humides es detecten des de 1500 a partir de la sèrie de precipitació històrica de Rodrigo et al. (1999) pel conjunt d'Andalusia oriental: 1590-1650, 1780-1810 i 1850-1910. La reconstrucció del patró de teleconnexió *Western Mediterranean Oscillation* (WeMO) fins a 1500 permet deduir que la configuració sinòptica imperant durant les pulsacions de major pluviositat al sud-est peninsular en les darreres centúries es correspon amb la presència de baixes pressions al golf de Cadis (Oliva et al., 2006). Els índexs negatius de l'índex WeMO hivernal es correlacionen eficientment amb els totals anuals de pluviometria a Andalusia pel caràcter estacional de les precipitacions, essent doncs un indicador indirecte de la innivació a Sierra Nevada durant la LIA.

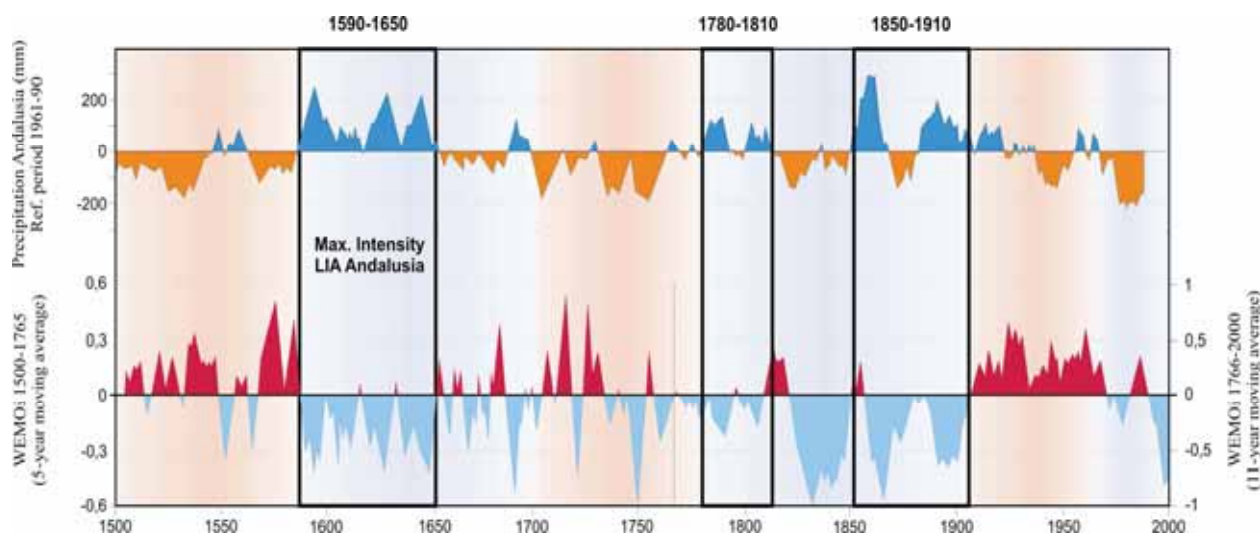


Figura 2.15. WeMOi i precipitació a Andalusia. El gràfic superior fa referència a la precipitació a Andalusia des de 1500 (Rodrigo et al., 1999) i el WeMOi està reconstruït a Oliva et al. (2006).

La LIA és un període no lineal, amb marcades oscil·lacions en breus espais de temps. A Andalusia les fases de major humitat comencen a inicis de segle XVII amb el període de la màxima intensitat de la LIA al sud ibèric, precedent el MM i que es correspon amb l'extensió del comerç de la neu. Aquest interval temporal es correspon amb el major avenç de la glacera que acollia el Corral del Veleta durant la LIA (Schulte, 2002a).

Durant l'Oscil·lació Maldà, a finals del segle XVIII, que mostra un increment pluviomètric a la façana mediterrània ibèrica (Barriendos, 1994), i, finalment, a la segona meitat del segle XIX, amb successius pics de precipitacions regits pel predomini de la circulació meridiana en el continent europeu, tot i percebre's ja una tendència a l'escalfament.

Les fases clarament negatives de la WeMO van comportar un augment de les precipitacions que, en el cas de les alçades nevadenses i en un context tèrmic més fred que l'actual, devien comportar un augment de la innivació i l'activació dels petits aparells glacials existents llavors al Corral del Veleta i Hoya del Mulhacén, principalment, així com una major profusió de les congestes de fusió tardana. Considerant l'augment tèrmic des de les fases més fredes de la LIA respecte l'actualitat en 0,8-1°C, i, admetent un gradient tèrmic vertical mitjà de 0,65°C/100 m, els potents dipòsits solifluidals d'època LIA i emplaçats en lòbuls fins a 2.500 m d'alçada, evidencien el paper primordial que va jugar la precipitació per activar una solifluxió avui inactiva o molt puntual en alçades de 3.000 m d'altura a Sierra Nevada (Oliva, 2008).

L'augment de temperatura estimat des de 1900 en ~0'6°C (IPCC, 2007) i la disminució de precipitacions conduïda per un índex WeMO molt positiu durant la primera meitat de segle XX, explica la paulatina reducció del gel del Corral del Veleta i l'actual degradació de les bosses de gel i permafrost alpí encara avui existents (Gómez Ortiz et al., 1999, 2001).



Figura 2.16. Darreres congestes de neu a finals d'estiu en el Corral del Veleta (agost 2004).

2.2.6 Processos actuals

Les últimes pulsacions de la LIA es detecten a mitjans de segle XIX i, de llavors ençà, domina la tendència a l'escalfament, que sembla haver-se reforçat des de finals de la dècada dels '70. L'IPCC (2001) ja constata que els anys '90 van ser la dècada més càlida del darrer mil·lenni, amb l'afegit, a més, que s'han anat encadenant nous rècords de temperatura mitjana global més elevada des de l'extensió dels registres instrumentals. Aquestes temperatures més altes han tingut el seu reflex en els processos geomorfològics que tenen lloc a Sierra Nevada. Els processos freds perden intensitat i remunten alçada, alhora que minva la seva eficàcia temporal. A la Península Ibèrica no només augmenten les temperatures, sinó que l'estació freda s'escurça, tal i com ho testimonien nombrosos registres fenològics: s'avança el dia de florida de certs fruiters, l'arribada de determinades espècies migratòries, la data d'aparició de les papallones, etc.

Des de finals de la LIA, l'augment gradual de temperatura ha liquidat les restes de glaciariisme que romanien en enclavaments aïllats de Sierra Nevada, proclius per alçada a un desenvolupament primerenc del glaciariisme quan les mínimes condicions climàtiques ho permeten. Al peu dels talussos verticals del Veleta i Mulhacén, en els seus vessants septentrionals, encara avui resten bosses de *permafrost* alpí i masses de gel fossilitzades pel dinamisme dels processos periglacials que hi han abocat una abundant massa de clastos al damunt, que les aïlla i prevé d'una fosa més accelerada. La ràpida degradació d'aquests vestigis del glaciariisme europeu més meridional es percep en els continus enfonsaments i esquerdes que assetgen els talussos detrítics que les recobreixen, demostrant la sensibilitat dels processos geomòrfics que esdevenen avui a Sierra Nevada a la senyal climàtica regional i global (Gómez Ortiz et al., 2002; Schulte et al., 2002).

El periglaciariisme és, actualment, el principal modificador del relleu de Sierra Nevada. Estimada la ELA entre els 3.600-3.700 m, tot el massís per sobre dels ~2.500 m, àrea de la nostra recerca, rau en el cinturó periglacial; a més, la poca coberta vegetal de la Sierra, acusada en els nivells culminants, i l'alt grau de tectonització dels esquistos, facilita la meteorització mecànica i l'acció del periglaciariisme.

El grup de recerca de la Universitat de Barcelona *Paisatge i paleoambients a la muntanya mediterrània* monitora els processos freds actuals a Sierra Nevada des de 1987. Entre ells, cal

destacar el control dinàmic de la glacera rocosa del Corral del Veleta, el seguiment del règim tèrmic del sòl (sòls poligonals, glaceres rocoses, lòbuls de solifluxió), l'evolució de la cobertura nival, la dinàmica dels *debris flows* i la presa de dades de temperatura en nivells cimers. La instal·lació de sensors tèrmics autònoms permet seguir l'evolució tèrmica en aquestes geoformes al llarg de tot l'any, de manera continuada, a alta resolució temporal i a diferents profunditats.

Només els sensors tèrmics ubicats en enclavaments específics dels circs septentrionals més elevats detecten *permafrost*. En els cims del massís rarament se n'ha constatat l'existència, tal i com evidencia el projecte PACE¹³ pel Picacho del Veleta i Allanada del Mulhacén, tot i que la incursió d'aigua en nivells profunds i la incidència directa de la radiació solar en les parets del circ d'Agua Verdes, d'orientació sud, són factors que poden desvirtuar els valors obtinguts (Gómez Ortiz et al., 2005). En la glacera rocosa del Corral sí que es registren temperatures negatives a 190 cm de profunditat durant tot l'any, malgrat detectar-se un enfonsament vertical superior (12,5-24,6 cm/any) al desplaçament horitzontal (3,5-13,3 cm/any), dada que reflecteix l'accelerada fusió del nucli de gel intern de la llengua rocallosa (Gómez Ortiz et al., 2004, 2008).

En el règim climàtic actual certes formes periglacial no es desenvolupen, essent forçosament heretades de fases més fredes, com els sòls poligonals amb macrofigures geomètriques del Cerro de los Machos i del Pandero del Mulhacén, tot i que actualment sí que es constaten camps de figures decimètriques actives per sobre dels 2.600 m (ex. Alto del Chorrillo, 2.700 m).

Taula 2.5. Estimació de dies amb temperatures entorn a 0°C (Gómez Ortiz et al., 2001). Ombrejat el rang altitudinal de l'àrea d'estudi.

ALÇADA I NOMBRE DE DIES AMB TEMPERATURES ENTORN A 0°C			
Alçades (m)	Sempre < 0°C	Sempre > 0°C	< 0°C >
2.600	62	154	149
2.800	91	141	133
3.000	129	128	108
3.200	170	114	81
3.400	193	101	71

¹³ El projecte europeu *Permafrost and Climate in Europe* (PACE, 2001) va escollir Sierra Nevada com a extrem meridional d'un transecte de diferents *boreholes* que unien aquest massís amb les illes Svalbard, a 78°N de latitud, i pretenia la monitorització tèrmica de sectors que, potencialment, podien acollir *permafrost*. En el cas de Sierra Nevada, la perforació es va realitzar al Picacho del Veleta, a 3.380 m, amb 30 UTL repartits al llarg de 114,5 m de profunditat.

Altres geofomes relatives a ambients periglacials heretades són les glaceres rocoses, que tenen el seu origen en el Tardiglaciari i resten esteses en ambdós vessants, on els crestalls cimers proveïen de clastos heteromètrics a aquestes llengües rocoses. Tot i que algunes presenten formes fresques, la majoria han quedat desdibuixades, emmascarades o fossilitzades pels dipòsits de vessant.

Els circs, recoberts de material alliberat de les crestes rocalloses sobrestants, presenten igualment una munió de *debris flows*, indicadors de degradació de les condicions fredes. El seu nítid recorregut i la frescor de rocam mobilitzat denoten un origen proper en el temps; a més, la comparació de fotografies aèries de diferents anys permet reconèixer *debris flows* de recent creació, tal i com ho constaten Palacios et al. (2000).

Les tarteres són ben actives i entapissen els vessants amb un continu alliberament de material tant en el vessant septentrional com en el meridional, mentre que les morrenes de nevé només dibuixen crestons detrítics a l'abric dels circs elevats de la cara nord, al peu de les darreres congestes de neu de la temporada.

Els lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada són inactius en la majoria de casos, amb una dinàmica molt puntual en enclavaments concrets determinats per una major disponibilitat d'aigua (Oliva et al., 2008), fet que mereixerà una primmirada discussió.

L'altra objecte de recerca de la present tesi doctoral són les llacunes d'alçada de Sierra Nevada, que s'ubiquen en l'interior dels circs a alçades properes als 3.000 m i romanen glaçades entre 6 i 8 mesos a l'any. Estan condicionades per una cobertura vegetal escassa, circumdades en el millor dels casos d'una discreta àrea de *borreguiles*. La innivació hivernal i posterior fusió determina la làmina d'aigua que contenen, més o menys estable en funció de la topografia on s'assenten.