

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

Citar com: Oliva, M. (2008). *Reconstrucció paleoambiental holocena de Sierra Nevada a partir de registres sedimentaris*. Tesi doctoral. Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional, Universitat de Barcelona, 343 pp.

A mons pares, Lluís i Elsa,
a mon germà Jordi
i a la Ilaria

AGRAÏMENTS

La consecució d'òptims resultats en qualsevol tesi doctoral té una part important de mèrit de l'autor, lògicament, però l'encarrilament i guia durant els anys foscos de producció de dades i formació metodològica que la recerca requereix són un mèrit indestriable de la figura del director de tesi, en aquest cas, directors.

En efecte, celebro haver comptat amb el suport científic i personal del Dr. Antonio Gómez Ortiz i del Dr. Lothar Schulte en aquests anys de recerca, a qui agraeixo la seva confiança en acceptar la direcció de la present tesi doctoral i perseverança durant els anys de què he gaudit de la beca de Formació de Professorat Universitari (FPU). La llarga trajectòria de la recerca a Sierra Nevada per part del Dr. Antonio Gómez Ortiz i el seu coneixement escrupolós dels paratges de la Sierra, així com de la significació geogràfica que ofereixen, ha estat de gran interès i ajuda per a concretar l'abast dels processos geomorfològics freds i passats que han esdevingut en el massís; en la mateixa línia convinc en agrair-li la pacient labor de correcció i encarrilament en els diferents congressos i reunions en les quals he participat. El rigor i la precisió del Dr. Lothar Schulte, tant en el treball de camp com posteriorment en la interpretació de les dades en clau paleoambiental, ha permès una incipient formació en tècniques sedimentològiques que ha estat indispensable per a la reconstrucció paleoecològica holocena del paisatge nevandense; a més, vull agrair-li expressament la possibilitat que m'ha obert de treballar als Alps suïssos durant aquests anys en el marc del projecte Fluvalps-3000, on hem pogut compartit llargues hores de trinxeres de camp i d'altres de més relaxades i amenes.

Convé agrair, lògicament, el suport econòmic, logístic i laboral que han ofert les diferents institucions que han sufragat parcialment els costos de la recerca, molt especialment a la Universitat de Barcelona, i, en concret, al Departament de Geografia Física i Anàlisi Geogràfica Regional i al Grup de Recerca Consolidat "*Paisatge i paleoambients a la muntanya mediterrània*", que han emparat la present tesi doctoral. La investigació ha estat finançada per una beca predoctoral de la Generalitat de Catalunya, emmarcada en el programa *Formació de Personal Investigador* (FI) entre l'1-1-2005 i 31-3-2005, i una altra beca/contracte promoguda pel Ministeri de Ciència i Innovació acollida en el programa *Formació de Professorat Universitari* (FPU) entre l'1-4-2005 i 31-12-2008. A més, s'ha gaudit del paraigües financer dels projectes de recerca dirigits pels directors de tesi: "*Degradació de gel fòssil i permafrost i canvi climàtic a Sierra Nevada*" (018-2007) i "*Canvis en els sistemes fluvials alpins durant els últims 3000 anys i riscos d'avingudes associats a la variabilitat climàtica i usos del sòl*" (Fluvalps-3000, CGL2006-01111).

El contacte amb investigadors d'universitats estrangeres ha contribuït a enriquir-me personalment i acadèmica. Gràcies a l'estreta vinculació del Dr. Lothar Schulte amb el Dr. Heinz Veit, coordinador del grup d'investigació *Paläoökoökologie* de la Universitat de Berna (Suïssa), he pogut col·laborar amb el mencionat grup de treball tenint accés a un conjunt d'instal·lacions científiques imprescindibles per al desenvolupament de la present tesi doctoral. Les profitoses estades a la Universitat de Berna (Suïssa) durant la tardor de 2006 i 2007 van donar una empenta notable a la investigació. És de rebut agrair, doncs, l'ingent suport del Dr. Heinz Veit per facilitar-me la utilització dels potents laboratoris d'aquest centre suís i els seus consells sobre com enfocar la recerca relativa a la solifluxió. Agrair també l'amabilitat de la sempre atenta Dra. Daniela Fischer i del químic Basri Qerimi durant les meves llargues hores al laboratori. Mereixen un agraïment especial en Henne, Roland, Lucien i Matthias; certament, l'amistat establerta amb ells va fer més còmode i reconfortant l'estada.

Durant l'estiu de 2008, es va realitzar una estada de recerca de dos mesos a la Universitat d'Ottawa (Canadà) sota la tutela de l'incansable Dr. Antoni Lewkowitz, que em va acollir gentilment i em va oferir la possibilitat de conèixer els mètodes i tècniques punters que empren en el Yukon canadenc per controlar els processos geomorfològics en medis subàrtics. Les precaucions necessàries degut a la presència d'ossos en la zona de treball i els "incidents" associats resten com una experiència inesborrable per a qui no està avesat a la presència de grans plantígrads en la seva àrea d'estudi.

La producció de dades per a la tesi també ha comptat amb desplaçaments més puntuals a altres centres de recerca de fora de Catalunya. Agraeixo la disponibilitat de la Dra. Ursula Röhl (MARUM- Universitat de Bremen, Alemanya) i del Dr. Flavio Anselmetti (ETH Zurich, Suïssa) en el suport tècnic en l'anàlisi dels sediments lacustres de la Sierra. Així mateix, agraeixo la grata predisposició i amabilitat del Dr. Francesc Burjachs (Universitat Rovira i Virgili) en la preparació de les mostres de concentració pol·línica que han estat enviades a datar a l'Angström Laboratory de la Universitat d'Uppsala (Suècia).

Les campanyes de camp són, sens dubte, el pilar sobre el qual s'assenta una tesi que pretén la reconstrucció paleoambiental dels darrers mil·lennis. La comoditat trobada en l'Alberg Universitari de Sierra Nevada amb l'hospitalitat i afecte dels "Pacos" ha acompanyat sortosament les laborioses campanyes estivals. Un especial esment pels companys i amics que m'han acompanyat voluntàriament en el meu treball de camp i hi han perdut l'esma; en Jordi, en Lluís i en Paulo, m'han demostrat la seva amistat i m'han ofert un entusiasme

impagable. Agrair també el suport d'aquells amics, especialment als companys de la "Flota", al Jorge i a la Bea, amb qui he compartit tantes experiències al marge de la universitat durant aquests anys i que em transportaven a un món més real, on la recerca esdevé menys tangible i més banal.

Tothora, m'agradaria agrair l'ambient de convivència, treball i harmonia de què he gaudit aquests anys en el Servei de Gestió i Evolució del Paisatge de la Universitat de Barcelona, molt especialment als companys Dra. Maria de Bolós, Ferran Salvador, José Luis, Jordi, Encarna, Benedita i Rui Filipe. Una menció especial rep el suport que m'ha prestat ment en Nacho Moreno per a la laboriosa elaboració de diferents gràfics i figures. Convé donar les gràcies també a la resta de companys del Departament per facilitar la pròpia recerca, molt especialment a la directora, la inefable Dra. Montserrat Jardí, que m'ha recolzat sempre en qualsevol iniciativa, al Dr. Xavi Úbeda, per la seva amabilitat i predisposició incansable en el treball de laboratori i al Dr. Patricio Rubio, amb qui he mantingut entretingudes sobretaules.

Finalment, es fa difícil valorar el suport dels més pròxims. El rigor, la perseverança i imaginació que requereix la realització d'una tesi doctoral són valors que he après del meu avi, Francesc, possiblement la persona que més admiro i a qui agraeixo que m'hagi inculcat aquests valors. Tota la família sempre m'ha fet costat; mon pare, Lluís, ma mare, Elsa, i mon germà, Jordi, han viscut de primera mà les dificultats diàries que suposa la realització d'una recerca d'aquestes característiques, amb els maldecaps i petits triomfs que comporta, suportant estoicament moments més agredolços.

Acomplir la finalització de la tesi ha estat possible gràcies a la Ilaria, qui m'ha ajudat arreu i en qualsevol situació. El fet d'estar ambdós realitzant la tesi ens ha compenetrat més en les dificultats que entranya la recerca, amb disgustos i alegries, preocupacions i inquietuds per duplicat. Hom diu que les penes compartides, són menys penes, doncs les alegries compartides ho són el doble; la confiança que m'ha transmès i la fe en sí mateixa seran també la clau de l'èxit de la seva recerca.

A tots ells, moltes gràcies.

Marc Oliva i Franganillo

Fairbanks, Alaska, juliol 2008.

SUMARI

1. Introducció	17
2. L'àrea d'estudi	25
2.1 <i>Característiques generals de l'àmbit d'estudi</i>	28
2.1.1 Geologia i geomorfologia	28
2.1.2 Clima	31
2.1.3 Biogeografia	35
2.1.4 Hidrologia	39
2.1.5 Història: ocupació del territori	42
2.2 <i>Evolució ambiental de Sierra Nevada: estat de la qüestió</i>	47
2.2.1 Glaciacions pleistocenes	47
2.2.2 El <i>Last Glacial Maximum</i> (LGM)	48
2.2.3 La desglaciació: el trànsit cap a l'Holocè	52
2.2.4 Evolució holocena del paisatge nevadense	56
• Cronologia holocena global	
• Cronologia holocena de la variabilitat climàtica a la Península Ibèrica	
• Evolució ambiental holocena de Sierra Nevada: estat de la qüestió	
2.2.5 <i>Little Ice Age</i> (LIA)	62
• Context climàtic de la LIA a Europa i a la Península Ibèrica	
• Evidències de la LIA a Sierra Nevada	
2.2.6 Processos actuals	68

3. Metodologia emprada	71
3.1 <i>Metodologia emprada per a la caracterització dels lòbuls de solifluxió</i>	73
3.1.1 Treball de camp	74
• Monitoratge tèrmic	
• Monitoratge dinàmic	
• Cartografia i morfometria	
• Anàlisi edafològic-sedimentològic	
3.1.2 Treball de laboratori	77
• Concreció de la textura	
• Contingut de matèria orgànica	
• Fraccions del ferro (Fe _d i Fe _o)	
• Susceptibilitat magnètica	
• Fluorescència de raigs X (XRF)	
3.1.3 Datacions radiomètriques ¹⁴ C (AMS)	82
3.2 <i>Metodologia emprada per a la caracterització dels sediments lacustres</i>	86
3.2.1 Treball de camp	86
3.2.2 Treball de laboratori	87
• Descripció sedimentològica	
• Contingut d'aigua de les mostres	
• Susceptibilitat magnètica	
• Textura dels sediments	
• Geoquímica orgànica	
• Fluorescència de raigs X (XRF)	
• Anàlisis pol·líniques	
3.2.3 Datacions radiomètriques ¹⁴ C (AMS)	93

4. Els registres sedimentaris de Sierra Nevada: els lòbuls de solifluxió.

Distribució, morfometria i dinamisme actual. 97

4.1 Context geomorfològic 102

4.1.1 Capçalera del barranc de San Juan 104

4.1.2 Capçalera del barranc de Rio Seco 109

4.2 Anàlisi morfomètric dels lòbuls de solifluxió 113

4.2.1 Impacte antròpic en els *borreguiles* 128

4.3 Dinamisme actual dels lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada 131

4.3.1 Monitoratge tèrmic del sòl 141

4.3.2 Control dinàmic dels lòbuls 145

4.3.2 Dinàmica dels processos solifluidals a Sierra Nevada 148

5. Descripció, anàlisi i gènesi dels lòbuls de solifluxió 149

5.1 Vall de San Juan 154

- San Juan, sector A, lòbul 18
- San Juan, sector B, lòbul 3
- San Juan, sector B, lòbul 11
- San Juan, sector B, lòbul 22
- San Juan, sector B, lòbul 38
- San Juan, sector B, lòbul 42
- San Juan, sector C, lòbul 12
- San Juan, sector C, lòbul 39
- San Juan, sector C, lòbul 44
- San Juan, sector C, lòbul 54
- San Juan, sector C, lòbul 69

5.2	<i>Vall de Rio Seco</i>	182
	<ul style="list-style-type: none"> • Rio Seco, sector A, lòbul 7 • Rio Seco, sector A, lòbul 12 • Rio Seco, sector A, lòbul 20 • Rio Seco, sector A, lòbul 30 • Rio Seco, sector B, lòbul 1 • Rio Seco, sector B, lòbul 4 	
5.3	<i>Discussió dels registres</i>	194
6.	Les llacunes de Sierra Nevada	197
6.1	<i>Context geomorfològic de les llacunes de Sierra Nevada</i>	201
6.2	<i>Resultats dels registres sedimentaris</i>	207
6.2.1	Laguna de Aguas Verdes (AV-1, AV-2, AV-3)	208
6.2.2	Laguna de Rio Seco (RS-1, RS-2)	216
6.2.3	Lagunilla de Rio Seco (LRS-1)	223
6.2.4	Lagunilla de San Juan (LSJ-1)	226
6.3	<i>Discussió dels registres</i>	230
7.	Reconstrucció paleoambiental holocena de Sierra Nevada: discussió i interpretació de resultats	233
7.1	<i>Canvis ambientals inferits a partir dels lòbuls de solifluxió</i>	235
7.2	<i>Implicacions paleoambientals derivades dels sediments lacustres</i>	242
7.3	<i>Integració dels registres terrestres i lacustres</i>	249

7.4	<i>Cronologia ambiental a Sierra Nevada en relació amb proxies regionals, hemisfèrics i globals</i>	251
7.4.1	Cronologia de la solifluxió a Sierra Nevada comparada amb altres muntanyes de l'orla alpina	252
7.4.2	Cronologia de la inestabilització de vessants a Sierra Nevada en relació amb <i>proxies</i> regionals, hemisfèrics i globals	254
8.	Conclusions	259
8.1	<i>Distribució dels lòbuls de solifluxió a Sierra Nevada</i>	262
8.2	<i>Monitorització dinàmica i control tèrmic en lòbuls de solifluxió</i>	263
8.3	<i>Cronologia solifluidal holocena a Sierra Nevada</i>	267
8.4	<i>Dinàmica de vessants holocena inferida a partir dels sediments lacustres i integració amb els registres sedimentaris solifluidals</i>	272
8.5	<i>Sensitivitat dels processos geomorfològics dominants a l'evolució paleoclimàtica holocena</i>	276
8.6	<i>Seqüenciació d'esdeveniments ambientals i implicacions paleoclimàtiques a Sierra Nevada durant l'Holocè</i>	279
9.	Bibliografia	285
	Annex	305
•	Llistat taules i figures	307
•	Dades morfomètriques dels lòbuls de solifluxió	314
•	Dades corresponents a l'anàlisi dels lòbuls de solifluxió	322
•	Dades corresponents a l'anàlisi de les llacunes d'alçada	329
•	Morfometria i control topogràfic en els lòbuls de solifluxió matrius de correlacions per sectors (SJA-SJB, SJC i RS)	342

Acrònims

AD	<i>Annus Domini</i>	MARUM-UBr	<i>Marine Umweltwissenschaften, Universität de Bremen (Alemanya)</i>
AMS	<i>Accelerator Mass Spectrometry</i>	MM	<i>Minimum Maunder</i>
AV	Laguna d'Agua Verdes	MS	Susceptibilitat magnètica
BP	<i>Before Present</i>	MWP	<i>Medieval Warm Period</i>
CGA	Circulació General Atmosfèrica	NAO	<i>North Atlantic Oscillation</i>
C_{org}	Carboni orgànic	RS	Laguna de Rio Seco
cps	<i>Counts per second</i>	RWP	<i>Roman Warm Period</i>
DACP	<i>Dark Ages Cold Period</i>	UB	Universitat de Barcelona
D-O	<i>Daansgard-Oeschger</i>	UBe	Universitat de Berna (Suïssa)
ELA	<i>Equilibrium Line Altitude</i>	UFr	Universitat de Fribourg (Suïssa)
ETH	<i>Eidgenössische Technische Hochschule, Universität de Zürich (Suïssa)</i>	URV	Universitat Rovira i Virgili
Fe_d	Ferro <i>dithionite</i>	UTL	<i>Universal Temperature Logger</i>
Fe_o	Ferro <i>oxalat</i>	UU	Universitat d'Uppsala (Suècia)
H_{ev}	<i>Heinrich events</i>	WeMO	<i>Western Mediterranean Oscillation</i>
HWP	<i>Holocene Warm Period</i>	XRF	Fluorescència de raigs X
INM	<i>Instituto Nacional de Meteorología</i>	YD	<i>Younger Dryas</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>		
IRD	<i>Ice-rafted debris</i>		
LGM	<i>Last Glacial Maximum</i>		
LIA	<i>Little Ice Age</i>		
LOI	<i>Loss on Ignition</i>		
LRS	Lagunilla de Rio Seco		
LSJ	Lagunilla de San Juan		