

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 6

# **LES LLACUNES DE SIERRA NEVADA I LA SEVA INTERPRETACIÓ PALEOAMBIENTAL**



## **6. Les llacunes de Sierra Nevada i la seva interpretació paleoambiental**

La paleolimnologia és la disciplina científica que s'encarrega de l'estudi dels sediments lacustres amb la finalitat d'interpretar l'evolució ambiental de la conca de drenatge dels llacs. Engloba tots els processos que afecten als llacs i les seves xarxes hidrogràfiques, contemplant les influències que hi aporta el clima, la geologia, l'impacte antròpic, etc. (O'Sullivan, 2004), a partir de l'estudi de la informació física, química i biològica emmagatzemada en els dipòsits lacustres (Smol et al., 2001). La idea clau en paleolimnologia és entendre el llac com una trampa natural que actua de barrera; les seves aigües tranquil·les faciliten la decantació i sedimentació del material procedent del tram superior de la conca, acumulant-se de manera pausada però contínua en el fons del llac.

El fet de poder desxifrar la variabilitat climàtica dels darrers mil·lennis és un dels principals actius que ofereixen els sediments lacustres, ja que el clima condiona el comportament hidrològic del llac i l'ecologia ambiental de la seva conca. En el món mediterrani de la Península Ibèrica, per la pròpia inèrcia del seu clima, els factors climàtics encara juguen un paper més important. En medis d'alta muntanya semi-àrida com Sierra Nevada, les escasses precipitacions coincidents amb la fase càlida de l'any, és a dir, el moment en què l'escorrentia no està aturada per les temperatures negatives però la fusió nival ja s'ha acomplert, determinen tasses de sedimentació anual molt baixes, ja que hi ha molt poca mobilització de material en superfície. Climes més humits, com és el cas de Pirineus i Alps, faciliten més transport de sediments dissolts i en suspensió i, per tant, impliquen tasses de sedimentació més elevades. Lògicament, la major o menor durada i extensió de la neu està en funció de les temperatures i precipitacions, que serà una altra variable a considerar en la interpretació dels testimonis lacustres.

Les darrers dècades ha augmentat exponencialment la recerca paleoclimàtica centrada en arxius lacustres. L'aparició de noves tècniques i metodologies d'estudi ha obert les portes a una interpretació més afinada i acurada del significat ambiental derivat d'aquest tipus de registres. La potencialitat dels sediments lacustres en ambients continentals i a escala holocena és només comparable a la que ofereixen les glaceres polars i casquets de gel de muntanya. La capacitat d'assolir llargues escales temporals de manera continuada, precisa i a alta resolució ha atret l'atenció de la comunitat científica, essent actualment una de les especialitats més puixants en la reconstrucció de la variabilitat climàtica natural.

Si bé durant la primera meitat de segle XX, els llacs eren àrees concebudes per entendre els processos que s'hi donaven (eutrofització, bioproduktivitat, salinitat, etc), la segona meitat de centúria encimbellà els llacs i llacunes com enclavaments d'especial rellevància paleoclimàtica. Actualment, hi ha una multitud de programes i projectes internacionals basats en una perspectiva *multi-core*, *multi-site* i *multi-approach* dedicats exclusivament a aquesta escomesa (ELDP, 1995). Gradualment, la paleolimnologia s'ha anat focalitzant en l'estudi dels llacs que acullen registres sedimentaris holocens (particularment aquells d'alta muntanya, com en el nostre cas d'estudi), escala temporal que proporciona una informació més precisa a la modelització climàtica. Les tradicionals reconstruccions pol·líniques que descriuen la història vegetal de l'àmbit regional d'estudi s'han anat recolzant en altres tècniques per fer més consistents els seus resultats; només donant un cop d'ull als articles relatius a sedimentologia lacustre en les principals revistes d'impacte científic dels darrers anys, es percep l'extensió de l'ús de tècniques geoquímiques encaminades a caracteritzar un extens ventall d'elements relatius a la temàtica paleoambiental: reconstrucció de la CGA, composició isotòpica, patrons de teleconnexió, paleotemperatures, paleoprecipitacions, impacte antròpic, contaminació, etc.

A diferència de la recerca en lòbuls de solifluxió, els llacs i llacunes sí que han suscitat major interès en el conjunt de la comunitat científica espanyola. Cabrera & Anadón (2003) recullen l'evolució d'aquesta especialitat a l'Estat i desgranen els primers treballs relatius a la investigació lacustre (Royo Gómez, 1922; Margalef, 1947, 1957; Colom, 1967 i Julià, 1977). L'explosió de la sedimentologia a finals dels anys 70 i 80 propicia un notable increment de les publicacions, sorgeixen congressos, reunions i seminaris, i es promou el contacte amb investigadors estrangers. Actualment, entre els grups de recerca focalitzats en els sediments lacustres amb finalitats paleoambientals cal destacar el *Grup d'Ecologia dels Canvis Ambientals* (UB), centrat principalment en l'Alt Pirineu, i l'*Instituto Pirenaico de Ecología* (CSIC), amb un ampli ventall de projectes arreu de la Península.

Les llacunes de la Sierra han estat objecte d'alguns intents d'aproximació paleoambiental, tot ells de discrets resultats; Esteban Amat (1995) pretén un estudi pol·línic de la Laguna Seca poc afortunat a tenor de la mala preservació del pol·len analitzat. Sánchez et al. (1998) intenten elaborar una geocronologia relativa de la desglaciació a la mateixa llacuna a partir de prospeccions elèctriques i anàlisis edafològiques dels seus sediments, tot i que sense massa èxit.

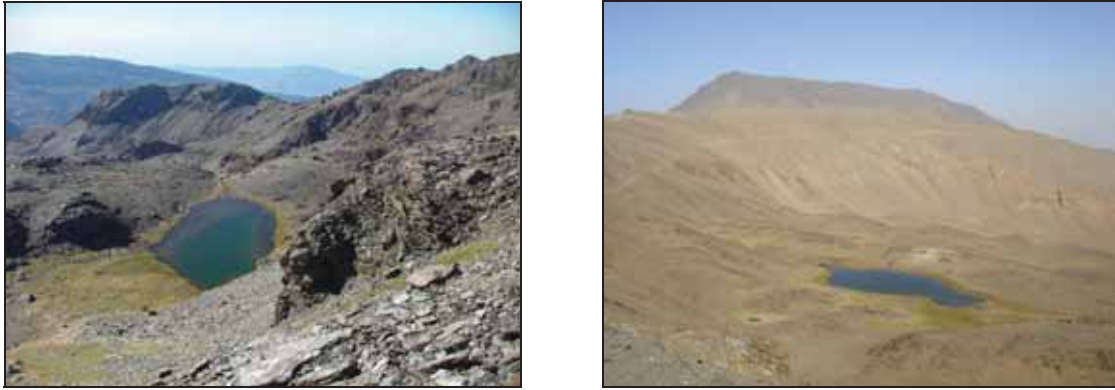


Figura 6.1. Dues de les llacunes sondejades a Sierra Nevada: Aguas Verdes (esquerra) i Rio Seco (dreta).

### **6.1 Context geomorfològic de les llacunes de Sierra Nevada**

La utilitat de l'estudi de les llacunes de Sierra Nevada rau en la seva posició geogràfica: les singulars característiques biofísiques del massís, derivades de la seva altitud i ubicació latitudinal a 37°N, expliquen l'elevat interès que suscita l'anàlisi dels sediments que contenen els seus cossos lacustres.

Els baixos índexs de pluviositat de la Sierra en relació amb la seva altitud (702 mm a 2.500 m) no faciliten l'abundància d'aigua ni la profusió de llacunes que no es dessequin durant els mesos estivals. Conseqüentment, són escassos els reductes on la topografia adient i el subministrament d'aigua continu es combinen per acollir llacunes permanents; l'elevada evaporació estival n'asseca moltes, que esdevenen depressions propícies per ser colonitzades per la vegetació higròfila. En conjunt, en el massís es compten una trentena de llacs, amb un seguit d'elements comuns en tots ells:

- **Context geomorfològic**

A la Península Ibèrica, els llacs d'alta muntanya tenen fonamentalment un origen lligat a la darrera glaciació; els més comuns seran els llacs que replenen conques de sobreexcavació glacial i aquells obturats per morrenes frontals o fronto-laterals dipositades per les glaceres en el seu enretirament cap a posicions més elevades. La majoria de les llacunes de Sierra Nevada combinen aquest origen dual, emplaçant-se sempre en l'interior dels circs, on la topografia més planera ho permet.

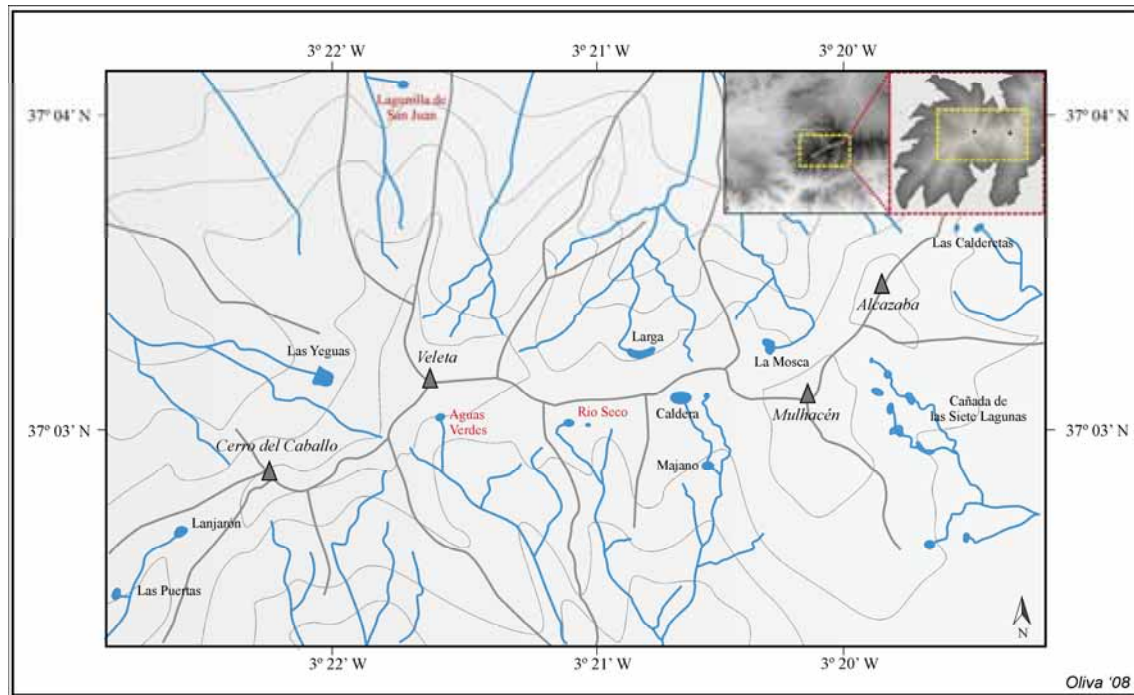


Figura 6.2. Localització de les principals llacunes a Sierra Nevada. En vermell, les llacunes sondrejades.

- **Alçada**

Les peculiaritats orogràfiques i topografia local de les valls de Sierra Nevada determinen l'alçada i característiques morfològiques de les llacunes nevadenses. Si en els Pirineus els llacs es disposen en alçades compreses entre els 2.100 i 2.700 m, a Sierra Nevada oscil·len entre els 2.700 i 3.100 m, conseqüència d'una empremta glacial aixoplugada centenars de metres més amunt (figura 6.2).

En el vessant septentrional, les llacunes s'emplanten en cotes més baixes respecte a les de la cara sud: el gel hi va llaurar unes parets molt verticals i profunds circs, on ara s'instal·len els cossos lacustres. Mentre, a la cara sud del massís, la menor incidència del glaciariisme en els seus relleus es tradueix en menors desnivells entre les crestes rocoses i les capçaleres de circs, com és el cas de Rio Seco, on dominen uns pendents molt suavitzats (figura 6.3).

Els vessants septentrionals, més empinats, propicien una dinàmica de *debris flows* superior, l'empremta de la qual queda reflectida en les variacions de granulometria i MS dels sediments lacustres del massís.

- **Escorrentia superficial**

Les llacunes de la Sierra es classifiquen en tres tipologies atenent a l'escorrentia superficial directe: aquelles amb una o més entrades directes permanents, llacunes amb rierols no permanents de dessecació ràpida després de la fusió nival i les endorreiques, sense torrenteres ni d'entrada ni de sortida, alimentant-se de recàrrega subsuperficial.

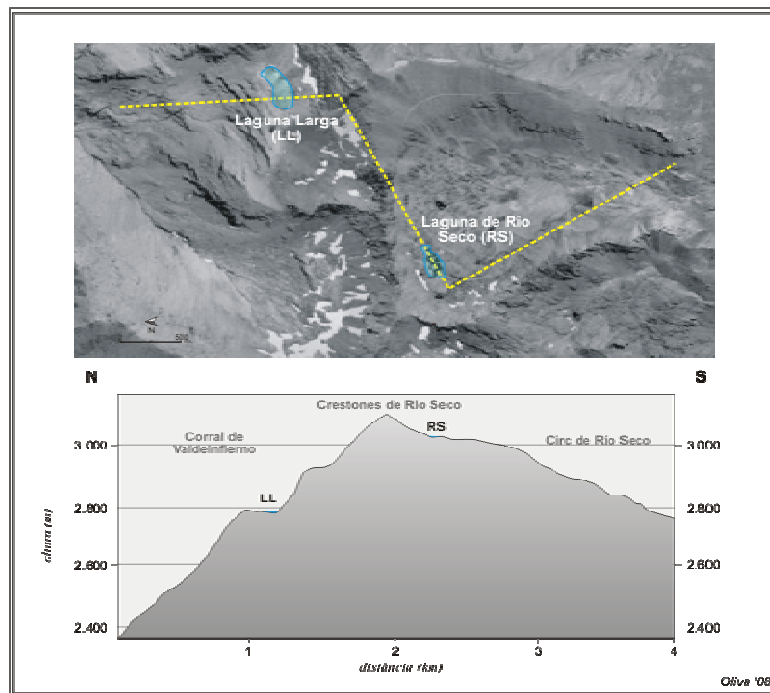


Figura 6.3. Perfil topogràfic entre el Corral de Valdeinfierno (cara nord) i el circ de Rio Seco (cara sud).

La làmina d'aigua que emmagatzemen és més o menys estable en funció de l'entrada líquida que arriba a les llacunes, amb fluctuacions imperceptibles en algunes (ex. la Mosca) i amb notables oscil·lacions en d'altres (ex. la Caldera<sup>64</sup>).

- **Cobertura vegetal**

La majoria de les llacunes s'emplacen en el cinturó periglacial actual, on les condicions climàtiques imperants determinen una cobertura vegetal extraordinàriament baixa, amb una vegetació dispersa < 5% de la conca. Envoltant la llacuna, i gràcies al subministrament extra d'humitat que aquesta suposa, poden disposar-se *borreguiles*, que arriben a constituir catifes denses aprofitades com a pastures per les espècies

<sup>64</sup> A finals d'agost del 2007, s'hi va mesurar una profunditat màxima de 4,8 m, amb una pèrdua neta del nivell d'aigua per evaporació calculada en uns 2,7 m respecte el nivell màxim assolit durant el desglaç.



animals de la Sierra (en especial, la *Capra pyrenaica*), que, alhora, venen a abeurar-se a les llacunes; en circs de parets abruptes i pendents més marcats no es desenvolupen, tal i com succeeix, per exemple, a la Caldera.

- **Bioproduktivitat**

Aquests llacs d'alta muntanya romanen per sobre del *timberline* i les seves conques presenten sòls pobres i escassa vegetació, essent majoritàriament oligotròfics, amb poques aportacions minerals i orgàniques. L'Institut de l'Aigua de la Universitat de Granada porta anys estudiant les singularitats de les diferents comunitats de fitoplàncton, bacterioplàncton i zooplàncton que colonitzen les llacunes (Medina-Sánchez et al., 1999; Pulido-Villena et al., 2005) així com la importància de l'aportació eòlica per a la composició bioquímica dels mateixos (Pulido-Villena, 2004; Morales Barquero et al., 2006; Pulido-Villena et al., 2006).

- **Morfometria**

Tendeixen a ser arrodonides, tot i que a vegades dibuixen formes més el·líptiques, com la Laguna Larga, de topònim ben expressiu. A Sierra Nevada, les seves dimensions són molt variables, si bé la denominació local de "*laguna*" ja indueix a pensar en un tamany més aviat reduït. Cal diferenciar entre aquelles temporals, que s'assequen a l'estiu, i les permanents, que sempre presenten una làmina d'aigua més o menys profunda. Les primeres solen ser més petites, amb radis de longitud mètrica, mentre les segones defineixen superfícies més grans, de radis decamètrics. En les pàgines successives<sup>65</sup> es presenten les dades batimètriques referents a les llacunes sondejades i, en general, es constata una profunditat que oscil·la entre els 2 i 4 m.

- **Litologia**

Els llacs de muntanya presenten l'avantatge de tenir conques relativament petites degut a la seva privilegiada posició a les capçaleres de les respectives conques de drenatge. La poca distància entre les crestes que delimiten els circs i els llacs evita sovint canvis en la litologia aflorant, tal i com succeeix a Sierra Nevada. Tanmateix, caldrà considerar, però, l'input eòlic, que subministra material procedent de zones properes (ex. Sàhara), la diferenciació geoquímica del qual s'utilitzarà com a *proxy* climàtic.

---

<sup>65</sup> Veure apartat 6.2.

- **Components biològics i matèria orgànica**

Els fragments de plantes i organismes que viuen en les llacunes i que trobem en els sediments lacustres seran susceptibles d'ésser datats radiomètricament per  $C^{14}$ . A més, la sedimentació tranquil·la que ofereixen les llacunes és òptima per a l'estudi del pol·len fòssil; la palinologia s'ha definit com la principal tècnica per a la reconstrucció paleoambiental que conjuga la història vegetal de la conca, el clima, l'impacte humà i la successió ambiental (Berglund, 1986). Les llacunes de diàmetre inferior als 100 m, profundes i amb poca o nul·la escorrentia directe són l'indret òptim per obtenir corbes pol·líniques representatives de l'evolució vegetal local (Benett & Willis, 2001). Per tant, les llacunes de Sierra Nevada es conceben com a refugis adients per a l'anàlisi pol·línica i la caracterització de l'evolució ambiental regional de la Sierra durant l'Holocè.

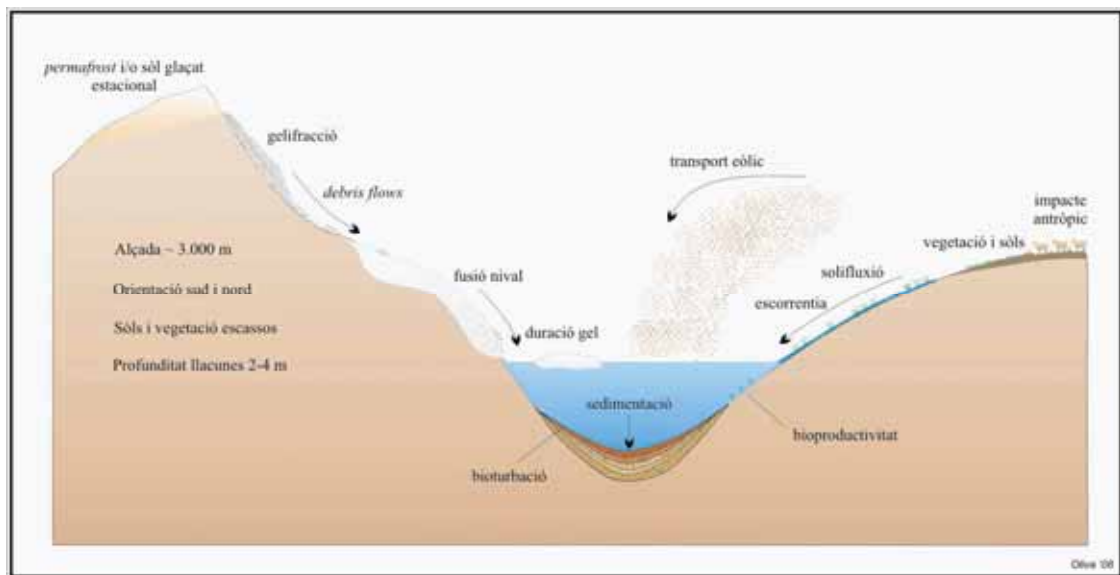


Figura 6.4. Processos que intervenen en la sedimentació lacustre a Sierra Nevada.

La figura 6.4 esquematitza els processos que intervenen en la sedimentació de les llacunes de Sierra Nevada. La llarga (i irregular) duració del mantell nival en els nivells culminants del massís, l'extensió del sòl glaçat i la duració d'entre 6-8 mesos de la capa de gel a les llacunes, propicien que els processos dinàmics romanguin pràcticament aturats durant bona part de l'any; la fusió nival i el desglaç del gel que recobreix els llacs acceleren els processos. Actualment, les bosses marginals de *permafrost* no semblen jugar un paper destacat en la sedimentació lacustre, tot i que en

fases més fredes de l'Holocè la seva major extensió i abast temporal sí que devia influir en el material transportat i dipositat en els fons dels llacs.

La gelifracció allibera material heterogeni que revesteix els vessants, el qual alhora pot sedimentar als fons de la columna d'aigua degut al seu lliscament sobre el mantell nival i la posterior fosa. L'escorrentia superficial aporta material tant dissolt com en suspensió, malgrat que nombroses llacunes de la Sierra no tenen una recàrrega directe d'aigua superficial, sinó que s'alimenten subterràniament. La solifluxió, amb la mobilització de material que comporta, pot suposar una mínima aportació extra de sediments. Finalment, l'acció eòlica diposita partícules fines (llims, argiles, pol·len) en tota la conca, ja sigui material provinent dels relleus circumdants com de zones més allunyades.

El recobriment vegetal, l'extensió ocupada pels sòls i el seu grau de desenvolupament, variables en funció de les condicions climàtiques dominants, determinen el material mobilitzat i dipositat en el fons dels llacs. A més, cal comptar que l'impacte antròpic, bàsicament focalitzat en una extensió de la ramaderia en els sectors cimers des del segle XIX (Martín Civantos, 2007), pot emmascarar la senyal climàtica dels sediments lacustres durant els darrers 150-200 anys.

Taula 6.1. Quadre resum de les principals característiques de les llacunes sondejades a Sierra Nevada.

CARACTERÍSTIQUES BÀSIQUES DE LES LLACUNES SONDEJADES								
Llac	Context*	Orientació	Hmàx (m)	Hmín (m)	Pendent (%)	Superfície conca (ha)	Vegetació conca (%)	Prof. màx (m)
San Juan	OM	NW	2.668	2.518	24,0	18,4	11,8	0,6
Aguas Verdes	CS	S	3.398	3.055	29,6	26,9	2,7	2,2
Rio Seco	CS	S	3.125	3.023	24,1	12,2	3,6	2,5
Lagunilla Rio Seco	CS	SSE	3.116	2.991	32,8	9,9	2,5	1,2

\* OM: obturació morrènica; CS: cubeta de sobreexcavació.

## 6.2 Resultats dels registres sedimentaris

Durant les campanyes de treball de camp de 2006 i 2007 es van extreure fins a 7 *cores* de les llacunes d'Agua Verdes (AV-1, AV-2 i AV-3), Rio Seco (RS-1 i RS-2), Lagunilla de Rio Seco (LRS-1) i Lagunilla de San Juan (LSJ-1). Les peculiaritats topogràfiques de cada llac i de les seves conques de drenatge impliquen una evolució ambiental sensiblement diferent en cada cas (taula 6.1).

Aquests *cores* es van estudiar a partir de la caracterització geoquímica i granulomètrica dels seus sediments seguint la metodologia detallada en el capítol 3. La taula 6.2 resumeix les datacions obtingudes de les mostres enviades a datar.

Cada llacuna sondejada s'acompanya d'una fitxa prèvia amb la seva localització en el conjunt de Sierra Nevada, les seves principals característiques topogràfiques, context geomorfològic, transecte respecte al punt més elevat de la conca i un mapa de batimetria i d'ubicació dels *cores* extrets. Posteriorment, s'acompanya el gràfic de les característiques geoquímiques i granulomètriques amb l'explicació dels registres sedimentaris recuperats de cada llacuna.

Taula 6.2. Datacions de les llacunes de Sierra Nevada. Edats calibrades amb el programa CALIB 5.0.2 (Reimer et al., 2004).

DATACIONS DELS SEDIMENTS LACUSTRES						
ID	Codi laboratori	Material	$\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ PDB	Profunditat (cm)	Rang edat ( $^{14}\text{C}$ anys BP)	Rang edat (anys cal BP)
AV-18,5	Ua-34877	Concentració pol·len	-25,7	18,5	2.920 ± 40	3.083 ± 128
AV-58	Ua-34878	Concentració pol·len	-26,0	58	3.225 ± 45	3.464 ± 95
AV2-25	Ua-36089	Restes vegetals ( <i>Sphagnum</i> sp.)	-23,0	25	105 ± 0,5 pm	-
RS1-26	Ua-36085	Restes vegetals ( <i>Sphagnum</i> sp.)	-25,1	26	4.695 ± 35	5.372 ± 53
RS1-40	Ua-36086	Restes vegetals ( <i>Sphagnum</i> sp.)	-25,9	40	4.435 ± 55	4.979 ± 110
RS1-55	Ua-36087	Restes vegetals ( <i>Sphagnum</i> sp.)	-26,0	55	4.270 ± 50	4.886 ± 87
LRS1-42,5	Ua-36088	Restes vegetals ( <i>Sphagnum</i> sp.)	-24,8	42,5	5.145 ± 45	5.924 ± 68
LSJ1-19	-	Charcoal		19	-	-

### 6.2.1 Laguna de Aguas Verdes

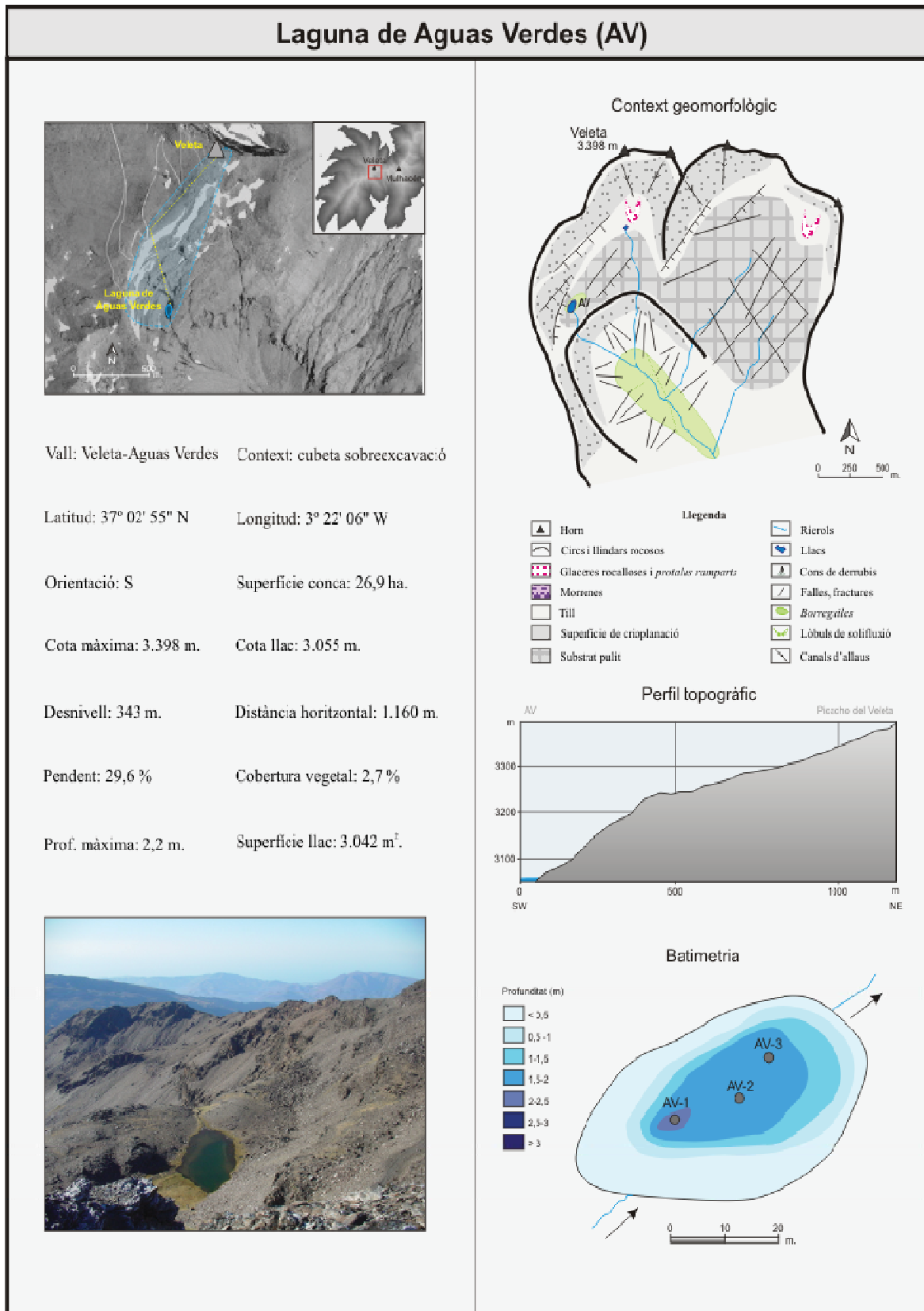


Figura 6.5. Característiques topogràfiques de la llacuna d'Aguas Verdes.

Aguas Verdes és una de les llacunes emplaçades a major alçada de la Sierra, concretament a 3.055 m i es tracta de la llacuna més alta sondejada a la Península Ibèrica i, en extensió, al sud d'Europa. S'inscriu en un circ glacial al vessant sud del massís, en una cubeta de sobreexcavació modelada per la glacera que acollia aquest circ. La seva conca fixa capçalera en el pic del Veleta, dibuixant un desnivell de 343 m en poc més d'1 km de longitud, salvant un notable pendent de fins a 29,7%.

La conca de drenatge és relativament petita i presenta una cobertura vegetal molt incipient, només arrecerada en els *borreguiles* que rodegen la llacuna i de manera dispersa en enclavaments on la microtopografia ho permet. La llacuna rep les aigües d'un emissari pel flanc septentrional que esdevé un fil d'aigua avançat l'agost. Els vessants que circumden la llacuna estan rodejats de material detrític no estabilitzat, erosionat i alliberat de les crestes rocalloses sobrestants, especialment en el marge nord-occidental de la llacuna, tot i que recurrentment aflora el substrat en superfície. La llacuna té forma el·líptica i la intensa evapotranspiració estival estabilitza el nivell de la llacuna entorn a 2-2,5 m de profunditat en la part central més pregona.

Durant les campanyes estivals de camp de 2006 i 2007 es van extreure de la llacuna tres *cores* de 64, 73 i 59 cm de llargària (AV-1, AV-2 i AV-3) dels sectors assenyalats a la figura 6.5. El *core* AV-3 és el més curt de tots però es va recollir del sector més profund, deduint-se així tasses de sedimentació més baixes respecte AV-1 i AV-2 (tot i no haver-se realitzat datacions en aquest *core*).

Per tal d'intercomparar els *cores* s'utilitza la susceptibilitat magnètica (MS)<sup>66</sup>. En general, les correlacions funcionen relativament bé; AV-1 mostra uns valors de MS més elevats per una posició més propera just a la boca de desguàs del rierol que entra a la llacuna, determinant un input mineral més constant en aquest sector. Per contra, AV-2 i AV-3, més allunyats de l'aportació del vessant, dibuixen majors variacions magnètiques i remarquen una major sensibilitat als canvis ambientals. Es constata, però, que el patró que dibuixa la MS en el *core* AV-1, a l'extrem sud-occidental de la llacuna, presenta un comportament més anàrquic entre els 30-45 cm, i no sembla tenir correspondència amb els altres dos *cores*.

---

<sup>66</sup> Veure pàg. 88.

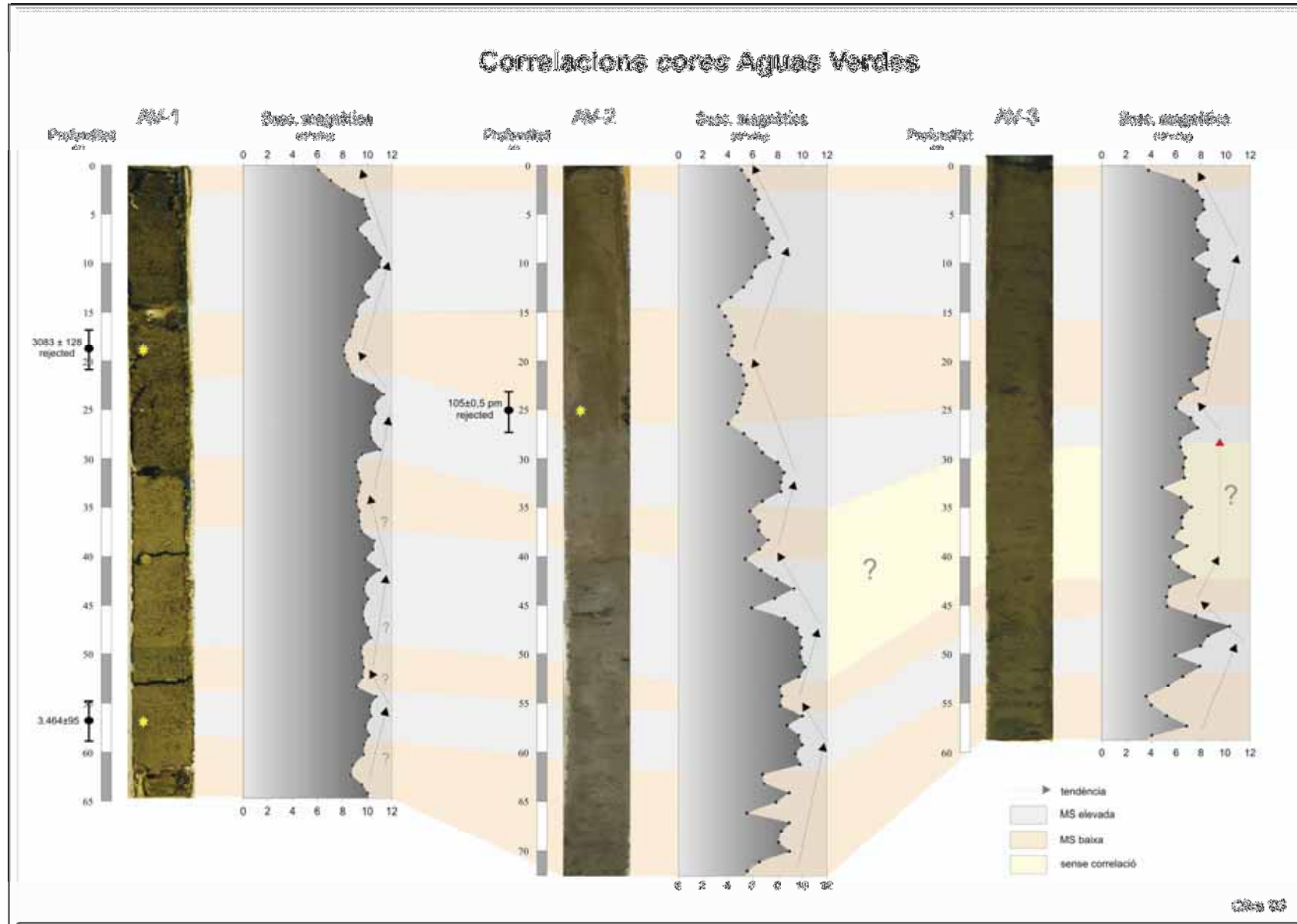


Figura 6.6. Correlacions dels diferents cores extrets d'Aguas Verdes.

Durant la campanya estival d'agost de 2006, es va extreure el *core* AV-1 de 64 cm de llargària en el marge septentrional de la llacuna d'Agua Verdes a una profunditat d'uns 2 m. Tot i la poca qualitat del testimoni fotogràfic extret, la descripció sedimentològica emfatitza una estructura certament homogènia, sense grans contrastos de color i textura (figura 6.7).

La unitat C, part inferior del *core* AV-1, es caracteritza per una tonalitat més fosca (2.5Y 2.5/1) que reflecteix l'augment de  $C_{org}$  (>5%) i C/N detectat en la base d'aquesta unitat a partir de 3,5 ka BP. Entre 3,5-3,3 ka BP es detecta una primera fase en la dinàmica de vessants ( $F_5$ ) caracteritzada per una disminució de la matèria orgànica conduïda per un input menor de  $C_{org}$ , increments de sorres i de MS; l'existència d'una datació de concentració pol·línica a 58 cm que va resultar en  $3.464 \pm 85$  anys BP permet controlar cronològicament aquesta fase.

La unitat B, caracteritzada per una tonalitat marronosa molt homogènia (5Y 3/1), s'inicia amb una certa estabilitat en la fracció mineral fina dipositada en el llac que es tradueix en una caiguda de la MS i uns valors de  $C_{org}$  i C/N moderats. Una nova activació dels vessants esdevé entre 3-2,7 ka BP ( $F_4$ ), explicitada en tres pics consecutius de sorres i paral·lela a un increment de  $C_{org}$  i C/N i a una estabilitat de la senyal magnètica, la qual suggereix un període d'intensa erosió que va dipositar restes de plantes terrestres de la conca en el fons del llac. Considerant una sedimentació constant al llarg de tot el *core*, deduïm que el RWP es caracteritza per una aportació estable de material fi (només ~10% de sorres), que determina els baixos valors de MS. Destaca també l'estabilitat de la proporció orgànica, que només remunta lleugerament precisament durant aquest període.

La tercera fase d'activitat geomòrfica ( $F_3$ ) esdevé possiblement a inicis del segon mil·lenni (DACP?), tot i que la datació superior no va resoldre una edat lògica i no permet afinar prou la cronologia. Aquest període mostra els màxims de sorres i de MS de tot el *core* i una disminució molt relativa de  $C_{org}$ . El MWP es caracteritza per una sensible caiguda de la MS conduïda per un tamany de gra més fi, bàsicament llims. Destaca un augment del  $C_{org}$  lligat a un decreixement del C/N, insinuant l'aportació terrestre i no lacustre de la fracció orgànica: el *core* evidencia un grau de cobertura vegetal superior durant l'època baixmedieval a la capçalera de la vall del Veleta.



La unitat B acaba durant la LIA amb la darrera fase important de mobilització mineral ( $F_1$ ) amb dues pulsacions d'aportació de sorres (~20%) que es tradueixen en elevats valors de MS i disminucions de  $C_{org}$  i C/N. La unitat A és la part superior del *core* de tonalitat fosca (5Y 2.5/1) i presenta una elevada proporció d'arrels i restes d'algues, que es tradueix en valors de  $C_{org}$  superiors al 6% i de C/N ~12. A més, en la interfície aigua-sediment es percep la bioturbació pròpia d'aquests medis. La inèrcia tèrmica iniciada d'ençà la LIA implica l'extensió dels *borreguiles* al voltant de la llacuna, el fre de la dinàmica de vessants i un transport i sedimentació de materials més fins al fons del llac.

En el *core* AV-2 la datació a 25 cm de profunditat va resultar en una edat no calibrada de  $105 \pm 0,5$  pm, és a dir, massa moderna, fet que constata la importància dels processos de remobilització i bioturbació en el fons del llac, dificultant així l'obtenció de datacions fiables. En aquest sentit, cal remarcar doncs el caràcter relatiu de la cronologia presentada i admetre la dificultat de correlacions temporals entre les fases de dinàmica de vessants discutides. Tanmateix, el comportament és similar al detectat a AV-1, amb 4 fases de major aportació mineral. Aquests períodes es detecten a partir de la contrastació en els diferents *cores* de la fracció mineral, la susceptibilitat i el contingut orgànic, que solen mostrar unes tendències antagòniques. La inestabilitat de vessants es plasma en increments de sorres, MS i una gradual tendència a una menor proporció de matèria orgànica conforme ens aproximem al present. Aquests criteris són més evidents a partir de  $F_3$ , amb tendències inclús contràries entre MS i sorres en la part inferior de AV-2. En aquest *core*, a més, disposem dels continguts dels diferents elements analitzats per XRF. Tant el Ti com el Fe mostren els màxims durant les fases amb activitat de vessants, en especial a  $F_1$ , tot i que aquesta pauta no es percep a  $F_5$ , on tenim la màxima aportació de sorres i aquests elements tenen un comportament indefinit. La relació de Ca/Ti sembla dibuixar una tímida evolució a l'alça fins a  $F_1$ , moment en què s'esberla aquesta tendència.

El *core* AV-3 també sembla mostrar les 4 fases d'inestabilitat de vessants identificades en els anteriors, tot i que la manca de dades de granulometria en aquest, criteri bàsic per definir les fases geomòrfiques en els *cores* anteriors, dificulta la seva concreció. Les tendències decreixents del contingut de Ti i Fe, paral·leles a un augment en Ca/Ti, suggereixen una menor aportació mineral a l'extrem sud-occidental d'aquesta llacuna, insinuant una certa estabilització del material que revesteix el vessant sobrestant.

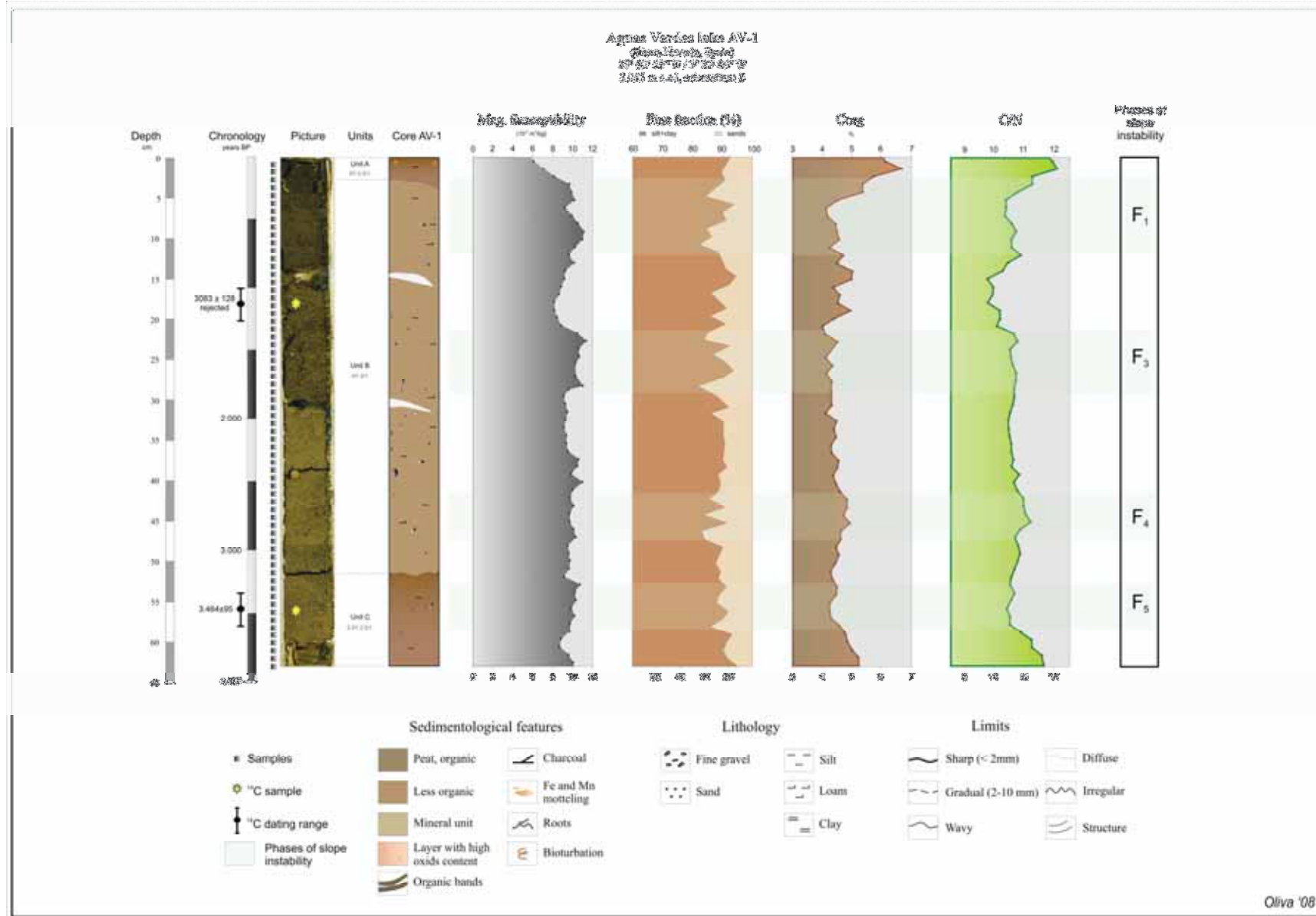


Figura 6.7. Cronostratigrafia i característiques geoquímiques-sedimentàries del core AV-1.

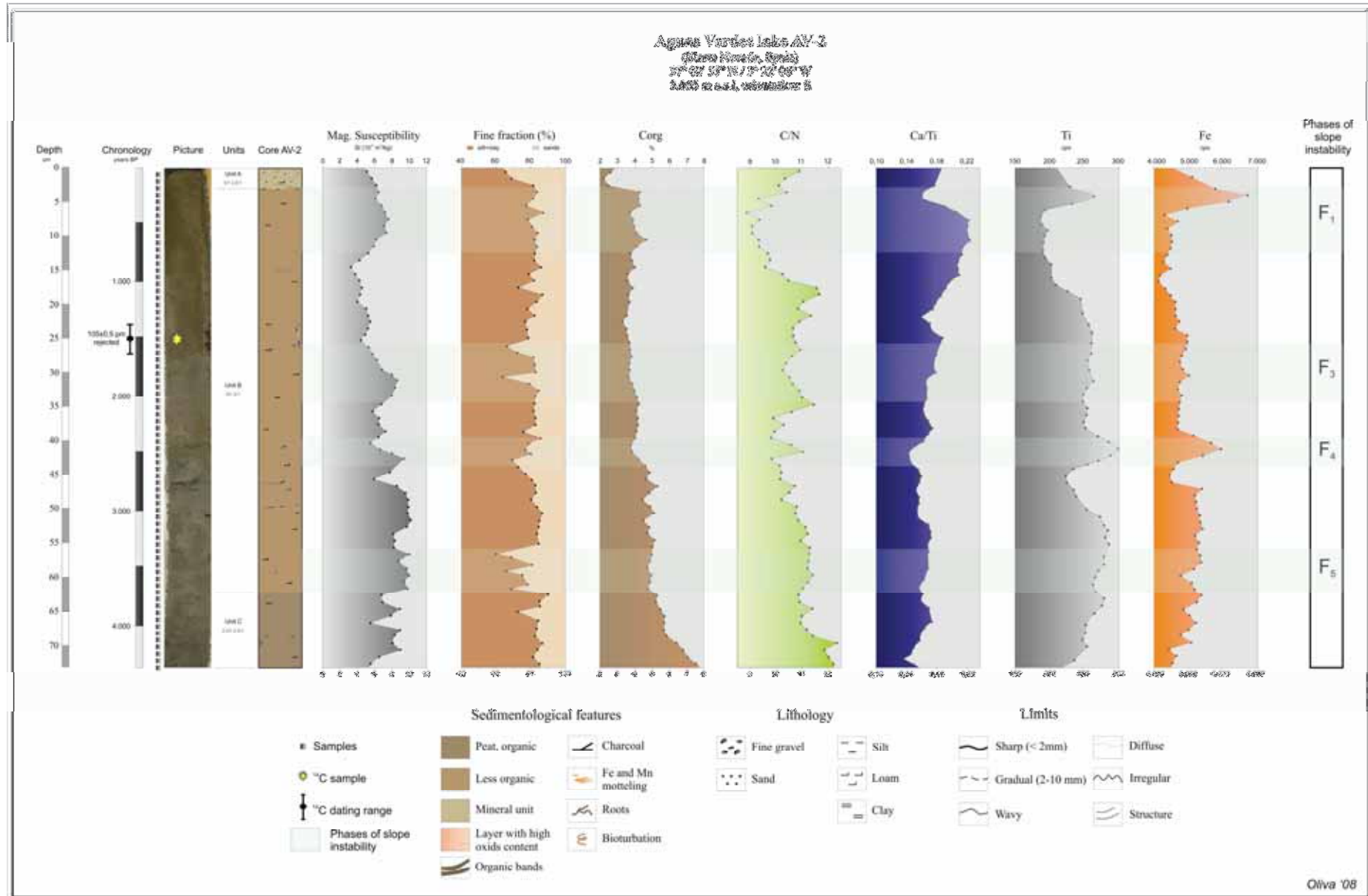


Figura 6.8. Cronostratigrafia i característiques geoquímiques-sedimentàries del core AV-2.

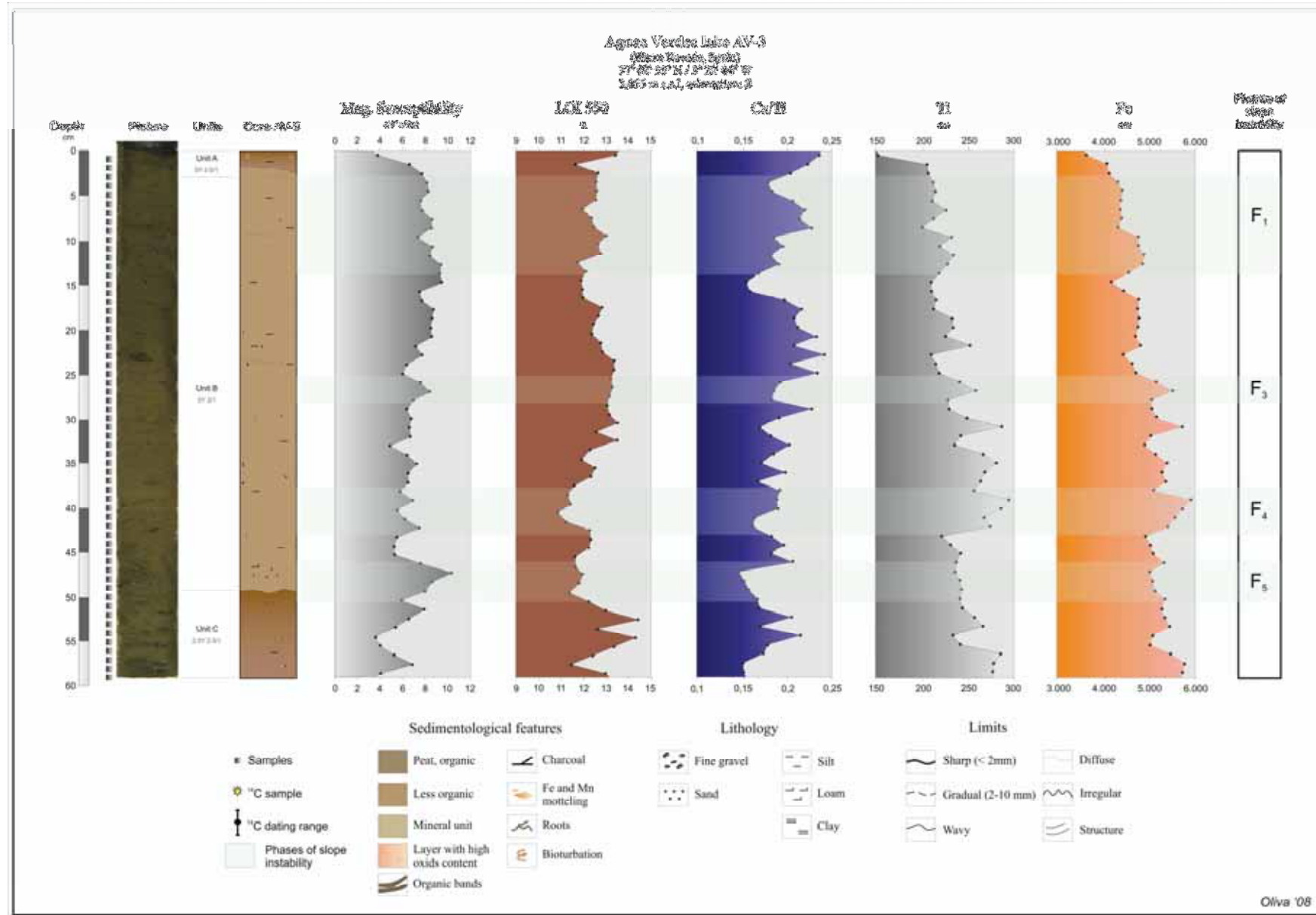


Figura 6.9. Cronostratigrafia i característiques geoquímiques-sedimentàries del core AV-3.

6.2.2 Laguna de Rio Seco

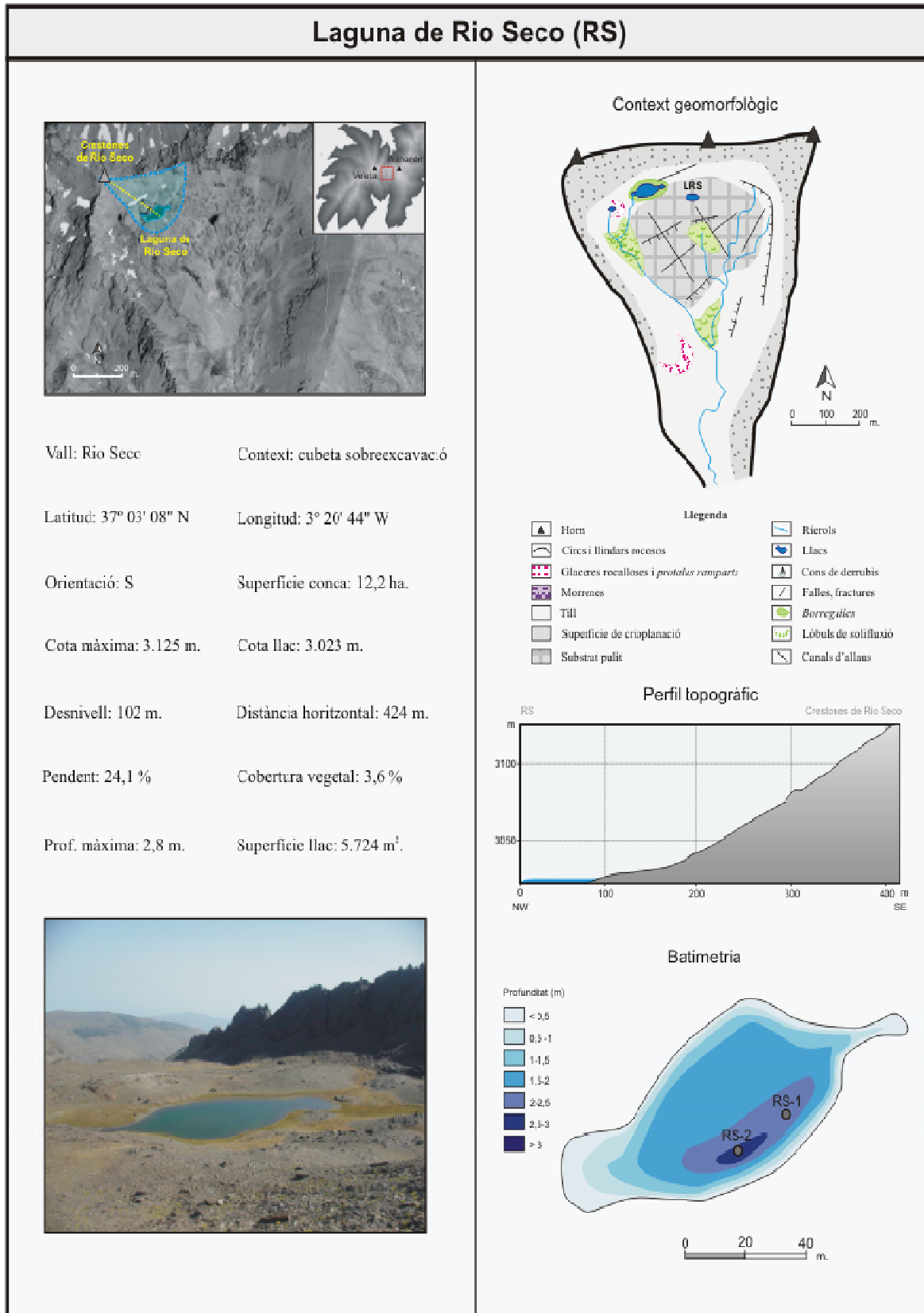


Figura 6.10. Característiques topogràfiques de la llacuna de Rio Seco.

La llacuna de Rio Seco s'insereix per sobre dels 3.000 m a la capçalera de la vall homònima en una cubeta de sobreexcavació modelada per la glacera en el seu flux en direcció NE-SW. La coberta vegetal d'aquest circ meridional és escassa, de l'ordre del 1,6% per sobre dels 2.800 m, bàsicament escorada en els *borreguiles* que circumden el llac. La poca distància entre els Crestones de Rio Seco, que coronen elegantment el circ crestejant els 3.100 m i la llacuna determina un pendent notable (~24%). Acabada la fosa nival, no té una escorrentia superficial directe, tot i que manté una làmina d'aigua estable entorn a 2,5 m de profunditat màxima. El flanc septentrional, més exposat a les aportacions detrítiques del vessant, presenta profunditats més escasses precisament per la sedimentació del material mobilitzat pendent avall; en canvi, el marge meridional, més allunyat del vessant i de majors profunditats, té una sedimentació més pausada, essent precisament el sector d'on s'han extret els *cores* RS-1 i RS-2.

El *core* RS-1 té una llargària de 69 cm i es va extreure a una profunditat de 2,4 m, mentre que el *core* 2 té 54 cm i es va recuperar de la zona més profunda del llac, a 2,8 m. Sobre el *core* RS-1 s'han realitzat tres datacions de restes vegetals (*Sphagnum* sp.), totes elles amb suficient quantitat de material per ser datades, malgrat que els resultats posen de manifest la dificultat de datar en aquestes llacunes. La datació a 26 cm de profunditat resulta en  $5.372 \pm 53$  anys BP, a 40 cm  $4.979 \pm 110$  anys BP i a 55 cm  $4.886 \pm 87$  anys BP. Considerem vàlida la datació més inferior i entenem que els processos erosius i diagenètics (bioturbació i resedimentació) dificulten l'obtenció de cronologies precises en aquests llacs amb tasses de sedimentació tan baixes. El fet de que les tres datacions de restes vegetals restin en un marc temporal comprès entre els 5,3-4,8 ka BP indueix a considerar la prevalença d'un període de formació torbosa durant el HWP a la capçalera de Rio Seco. La datació inferior insinua, doncs, una fase d'erosió lateral d'aquesta torba posteriorment a la seva formació i anterior a  $4.886 \pm 87$  anys BP. L'erosió pot ser conseqüència del mateix onatge que aportava restes de la torba a la llacuna, fet que explica que tinguin edats similars. Si bé en el *core* RS-2 no s'ha realitzat cap datació, les bones correlacions de la MS amb RS-1 permeten deduir patrons de resposta similars. RS-1 presenta dos cicles de vessants més que RS-2, amb augments i disminucions de la senyal magnètica que no es perceben en el segon. Aquest, però, detecta un esdeveniment a la base del *core* amb aportació de graves, pic en MS i caiguda de la part orgànica que no es percep tan marcat a RS-1, segurament degut a la seva posició més distal respecte del vessant.

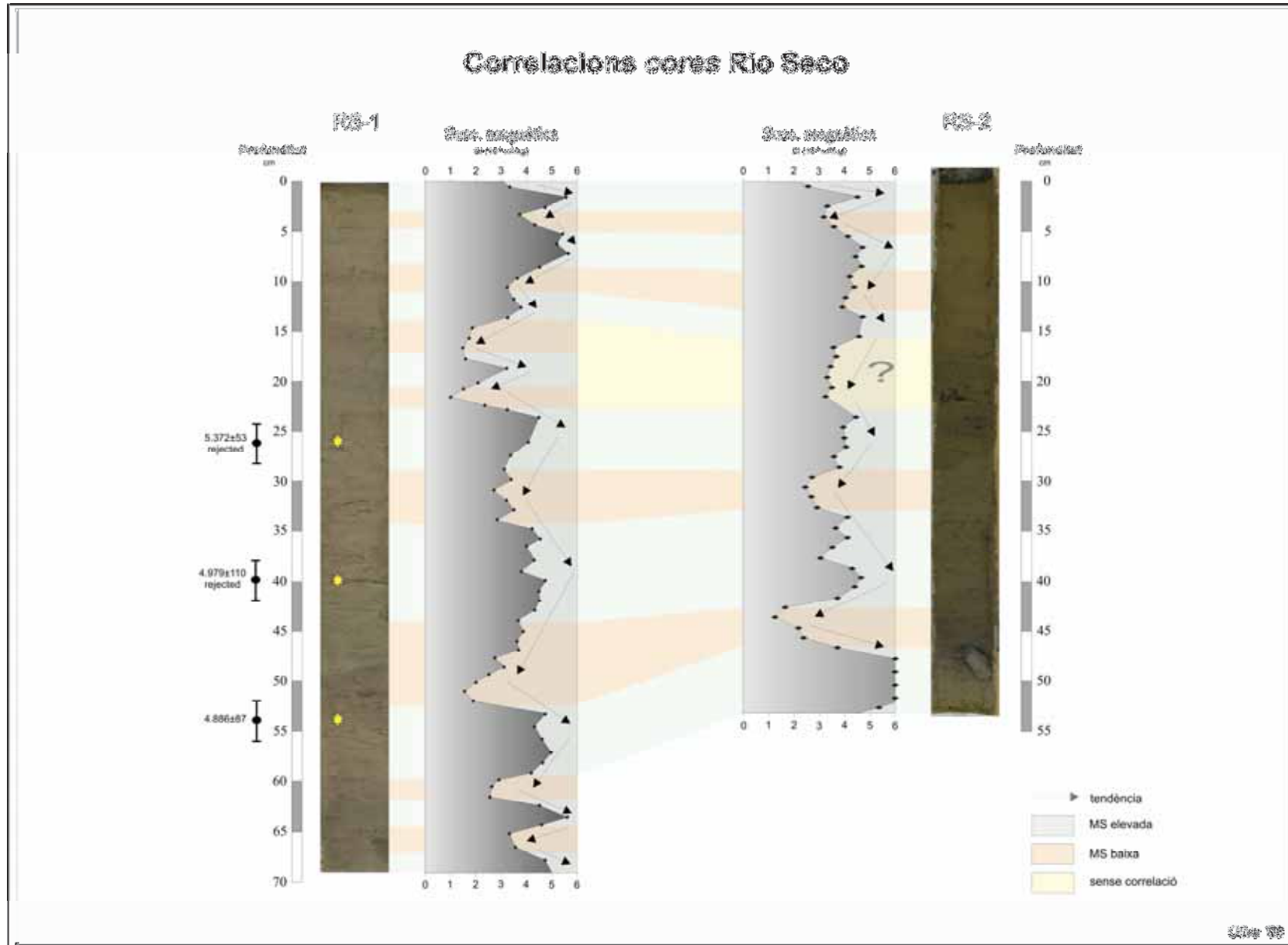


Figura 6.11. Correlacions dels diferents cores extrets de Rio Seco.

El *core* RS1 defineix dues parts diferenciades: les unitats K-I mostren uns contrastos molt marcats, amb alternances de color que reflecteixen notables variacions granulomètriques i geoquímiques, mentre les unitats H-A presenten unes característiques més homogènies i canvis menys bruscos entre sí, com l'evolució del  $C_{org}$  i C/N.

Tenint en compte les limitacions cronològiques explicitades, entenem que el *core* en qüestió engloba aproximadament els darrers 6 mil·lennis, mostrant una pauta decreixent de  $C_{org}$  i C/N, que suggereix un progressiu minvament del recobriment vegetal a la conca lacustre des de l'Holocè mig. Paral·lelament, però, es constata en aquest mateix interval temporal que hi ha una tendència a mobilitzar material més fi, insinuant una menor capacitat de transport: conforme disminueix el  $C_{org}$ , augmenten llims i argiles. A més, les corbes de  $C_{org}$  i C/N dibuixen una evolució similar, suggerint que la matèria orgànica que arriba al llac és bàsicament conseqüència de l'aportació terrestre, essent mínima la bioproduktivitat lacustre.

El *core* engloba fins a 8 diferents períodes d'activitat geomòrfica amb aportació de material detrític erosionat dels relleus circumdants, mostrant un comportament de la granulometria més dinàmic que a la llacuna d'Aguas Verdes, amb més variacions de textura. Les fases de dinàmica de vessants venen definides a partir de la granulometria, amb augments de sorres que solen anar paral·lels a valors elevats de MS, disminucions de  $C_{org}$  i C/N, pics de Ti i Fe i solen correlacionar-se amb mínims de Ca/Ti. Per contra, les fases en què aquests processos perden efectivitat es caracteritzen per mínims de senyal magnètica, menys presència de sorres, increments de  $C_{org}$  i C/N, caigudes de Ti i Fe i valors més elevats de Ca/Ti.

La base del *core* es correspon amb una activa fase de vessants ( $F_8$ ) que suposa la major aportació de sorres, Fe i Ti de tot el *core*, possiblement entorn a 6 ka BP. Un augment molt notable de  $C_{org}$  insinua unes condicions menys propícies per a la mobilització mineral; l'increment de la ràtio C/N també suggereix l'extensió de la cobertura vegetal en la capçalera de Rio Seco. La següent fase de vessants ( $F_7$ ) és una pulsació relativa amb una bioproduktivitat lacustre significativa confirmada per una caiguda orgànica paral·lela a valors elevats de C/N. Un nou augment orgànic amb valors propers al 14% de  $C_{org}$  ralentitza els processos de vessant, constatant-se una disminució de la proporció mineral.



La fase F<sub>6</sub> mostra també increments substancials de Ti i Fe que es tradueixen en un augment de la MS i una disminució del C<sub>org</sub> i C/N. La brusca recuperació orgànica posterior correlaciona amb els mínims de MS i màxims de Ti i Fe; a la vegada, el màxim de Ca/Ti insinua una major aportació de Ca a la conca, molt possiblement conduïda per una major predominança dels vents de sud. La nova inestabilitat de vessants (F<sub>5</sub>) és un impuls relatiu caracteritzat per una significativa proporció de sorres que es tradueix en augments de Ti i Fe i disminucions de Ca/Ti. La fracció orgànica, però, mostra certa estabilitat amb només petites disminucions.

Durant els darrers 2,5 ka BP s'incrementa la variabilitat, amb períodes més curts i canvis més relatius. Les fases F<sub>4</sub>, F<sub>3</sub> i F<sub>2</sub> reflecteixen petits canvis en el tamany de gra dipositat al fons del llac (amb variacions més marcades de MS) que es perceben en fluctuacions en el contingut de C<sub>org</sub> de l'ordre del ~2%.

La darrera fase de mobilització mineral important (F<sub>1</sub>) esdevé durant la LIA, quan les condicions climàtiques impliquen una menor vegetaltització de la conca i permeten un major transport de sorres, dipositant també més Ti i Fe. D'aleshores ençà es detecta una recuperació orgànica molt relativa i una menor proporció de sorres; l'increment de la relació Ca/Ti sembla insinuar una major recurrència de les adveccions de sud des de la LIA.

El *core* RS-2 presenta una estratigrafia menys diferenciada que RS-1, es distingeixen menys unitats sedimentàries, tot i que l'evolució dels *proxies* reflecteix un comportament paral·lel a RS-1. Considerant les corbes de matèria orgànica i MS, s'evidencien fins a 5 diferents fases de dinàmica de vessants (F<sub>6</sub> a F<sub>1</sub>), tot i que F<sub>3</sub> sembla que no apareix en aquest *core*.

Cal destacar F<sub>6</sub>, que suposa una fase molt més activa que a RS-1, amb aportació de graves de fins a 3 cm de diàmetre, una caiguda de la component orgànica molt marcada (el LOI passa de prop de 12,5% a 2,5%) i màxims de Ti i Fe. D'ençà la F<sub>1</sub>, que suposem va esdevenir durant la LIA, també destaca la recuperació orgànica possiblement deguda a la influència humana, amb una disminució de la senyal magnètica paral·lela a tendències decreixents de Ti i Fe i recuperació de la ràtio Ca/Ti.

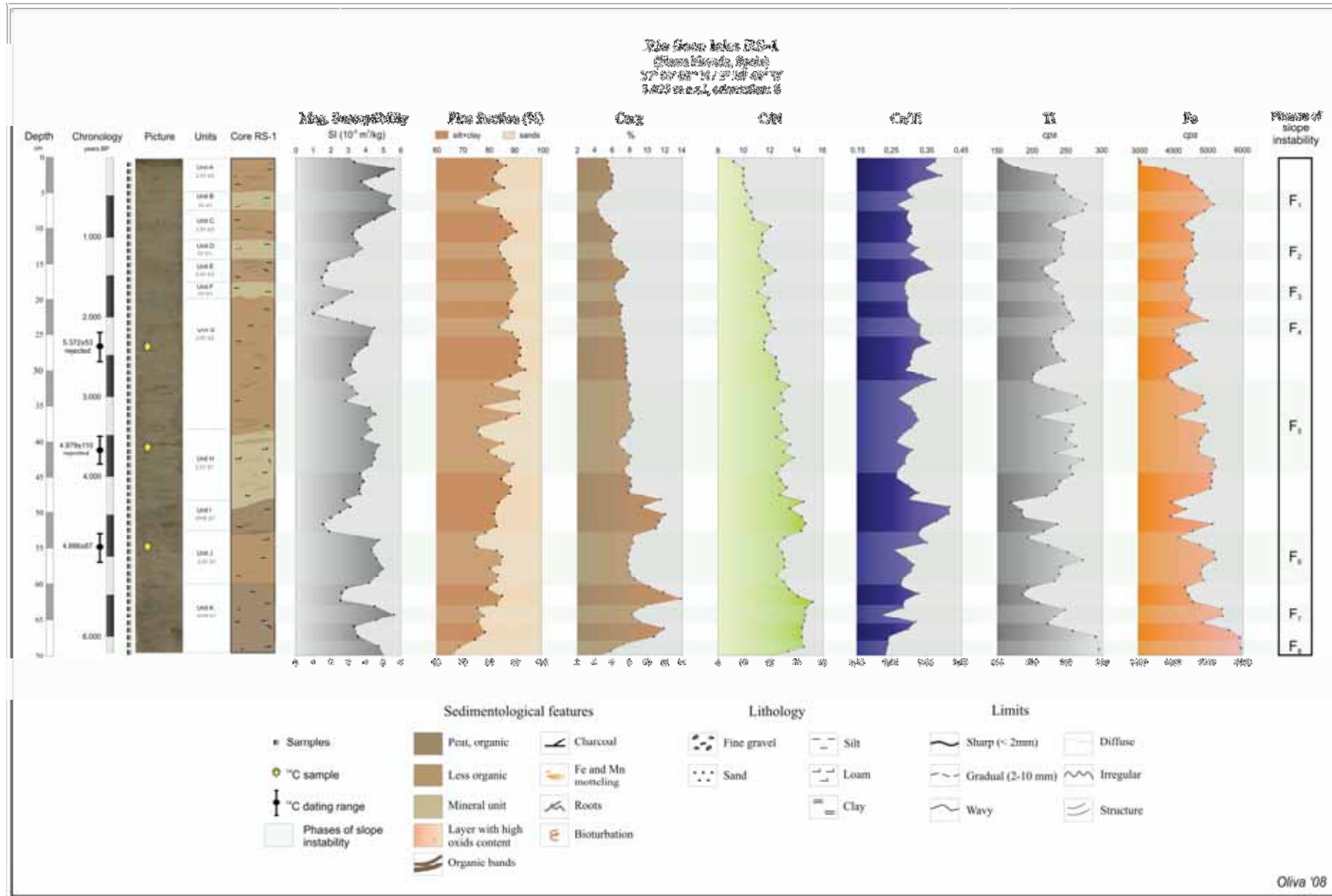


Figura 6.12. Cronostratigrafia i característiques geoquímiques-sedimentàries del core RS-1.

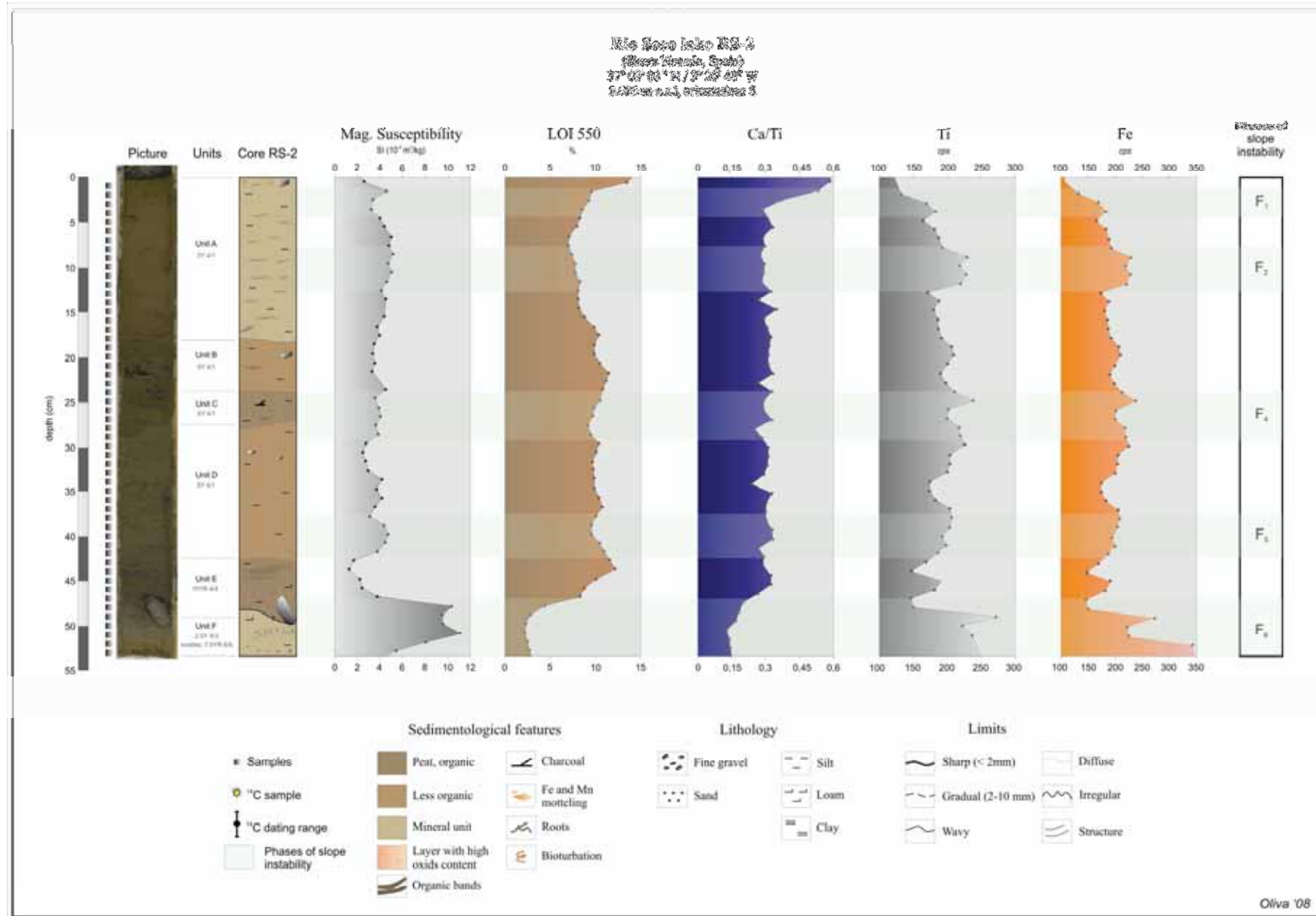


Figura 6.13. Cronostratigrafia i característiques geoquímiques-sedimentàries del core RS-2.

### 6.2.3 Lagunilla de Rio Seco

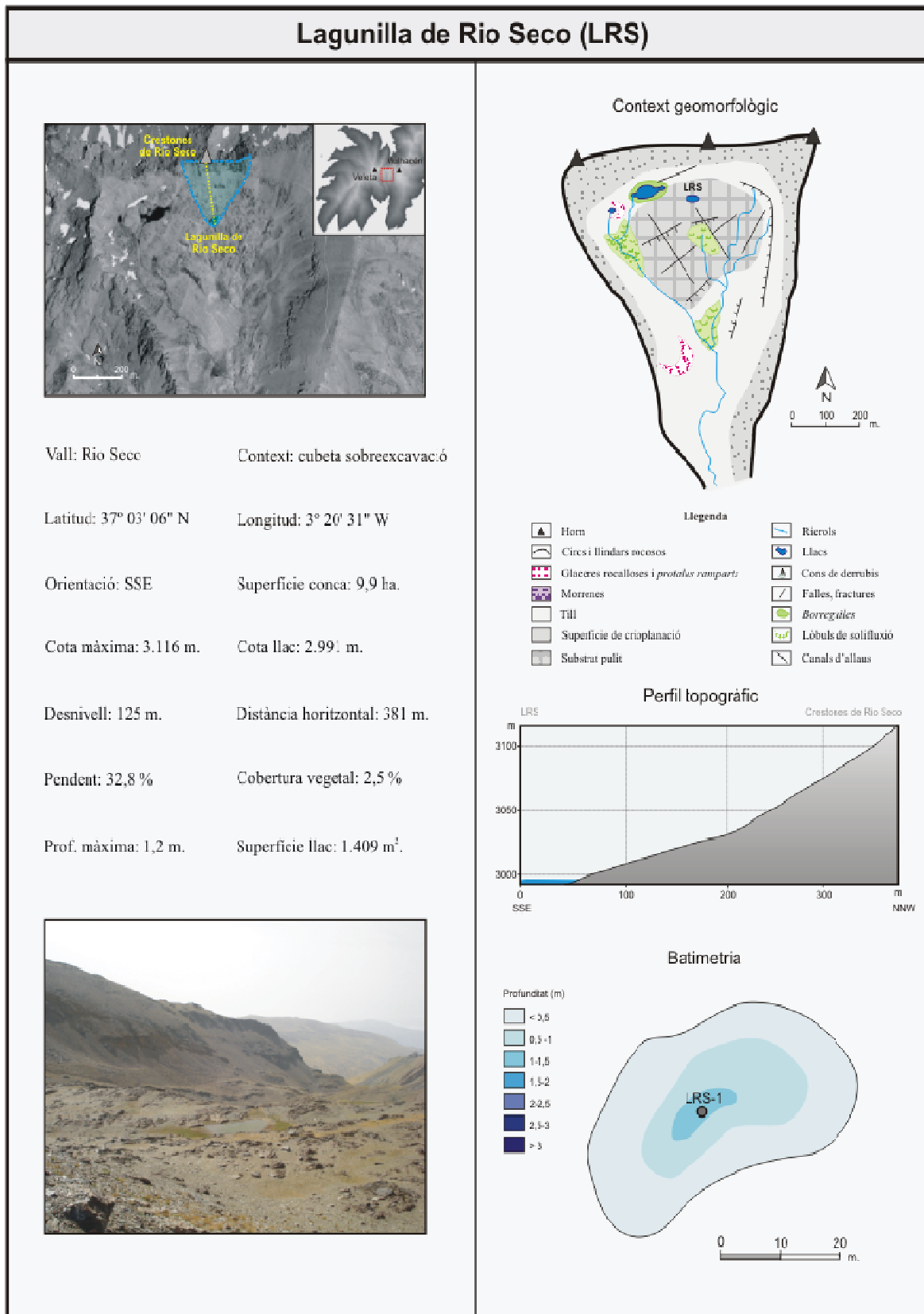


Figura 6.14. Característiques topogràfiques de la Lagunilla de Rio Seco.

La Lagunilla de Rio Seco ocupa un sector central en el circ homònim, una trentena de metres per sota de la llacuna principal, escorada més cap a l'est. S'emplaça en una cubeta de sobreexcavació buidada per l'acció glacial durant el LGM en una zona on el substrat apareix nu però intensament incidit, amb múltiples microformes glacials: canaletes, estries, roques pulides, etc. La conca de drenatge i dimensions de la Lagunilla són modestes, amb una profunditat màxima d'1,2 m en el sector més pregon. La seva ubicació en capçalera explica la poca distància entre la part més elevada del circ, els Crestones de Rio Seco, i la làmina d'aigua, amb un marcat pendent en el tram superior i una suavització del vessant que enllaça amb la llacuna. No presenta cap emissari continu i s'alimenta subsuperficialment, amb sensibles fluctuacions de la columna d'aigua. La cobertura vegetal és també pràcticament escassa, limitada a les pastures que voregen el llac.

En només 43 cm de llarg, el *core* LRS1-1 engloba els darrers 6 mil·lennis, segons la datació que a 42,5 cm de profunditat dona una edat de  $5.924 \pm 68$  anys BP, posant de relleu tasses de sedimentació molt baixes per sobre del *treeline* a Sierra Nevada. La base del *core* coincideix amb una tonalitat bruna (2.5Y 2.5/1), la unitat D, que representa una fase amb elevats valors de  $C_{org}$ , una textura llimosa amb poques sorres i baixos continguts de Ti i Fe, lligats segurament a un ambient més càlid i procliu a la vegetaltització de la conca; només esdevé un període amb una lleugera inestabilitat de vessants molt relativa (F<sub>7</sub>). La unitat C té un color més clar (5Y 3/1) símptoma d'una menor presència de matèria orgànica, que, en efecte, disminueix gradualment: de valors de  $C_{org}$  propers al 8% fins al 4%, estabilitzant-se en aquesta xifra, dada indicativa d'una producció lacustre baixa molt limitada pels nutrients (P i N). Es detecten dues fases amb aportació de vessant (F<sub>6</sub> i F<sub>5</sub>), essent especialment activa la primera d'elles, amb elevats continguts de sorres i valors alts de C/N, mentre el  $C_{org}$  no dibuixa oscil·lacions, només una gradual tendència decreixent, com en el cas de la Laguna de Rio Seco. Les unitats B i A es caracteritzen per sediments de color més clar (5Y 2.5/1), essent de gra més groller la unitat B. Destaca una successió de fases de vessants (F<sub>4</sub>, F<sub>3</sub> i F<sub>2</sub>) amb continguts de sorres de l'ordre del 30-40%, pics de MS, Ti i Fe i sobtats increments de C/N, tot i que la productivitat del llac roman baixa ( $C_{org}$  ~3-4%), lligat indefectiblement a una major entrada de material clàstic al llac. Finalment, la darrera pulsació no és tant marcada (F<sub>1</sub>), amb lleugers increments de sorres i de C/N. Des d'aleshores, la senyal magnètica, reflectida en caigudes de Ti i Fe, tendeix a minvar, tot i no apreciar-se una tendència clara respecte de la matèria orgànica.

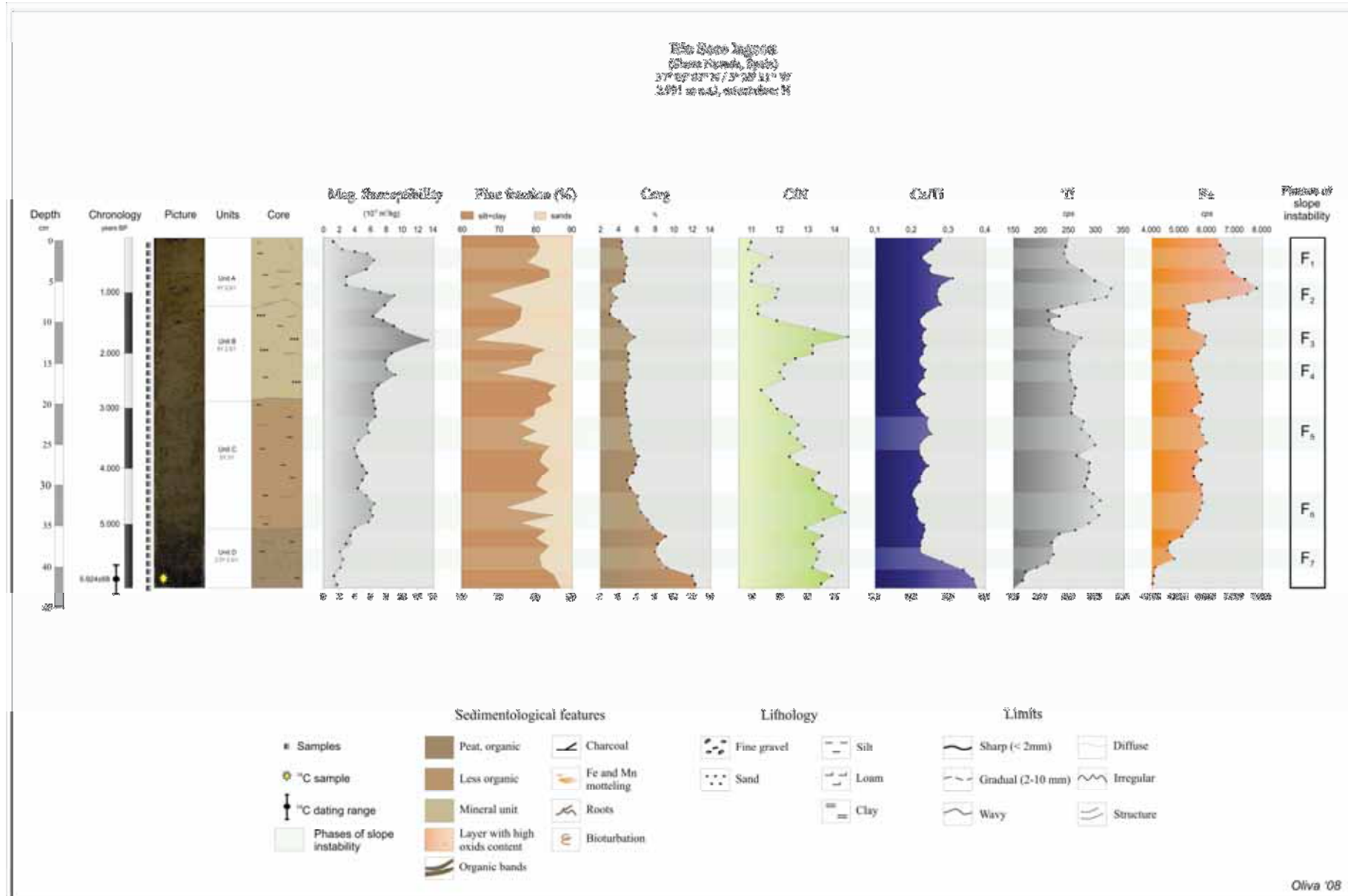


Figura 6.15. Cronostratigrafia i característiques geoquímiques-sedimentàries del core LRS-1.

### 6.2.4 Lagunilla de San Juan

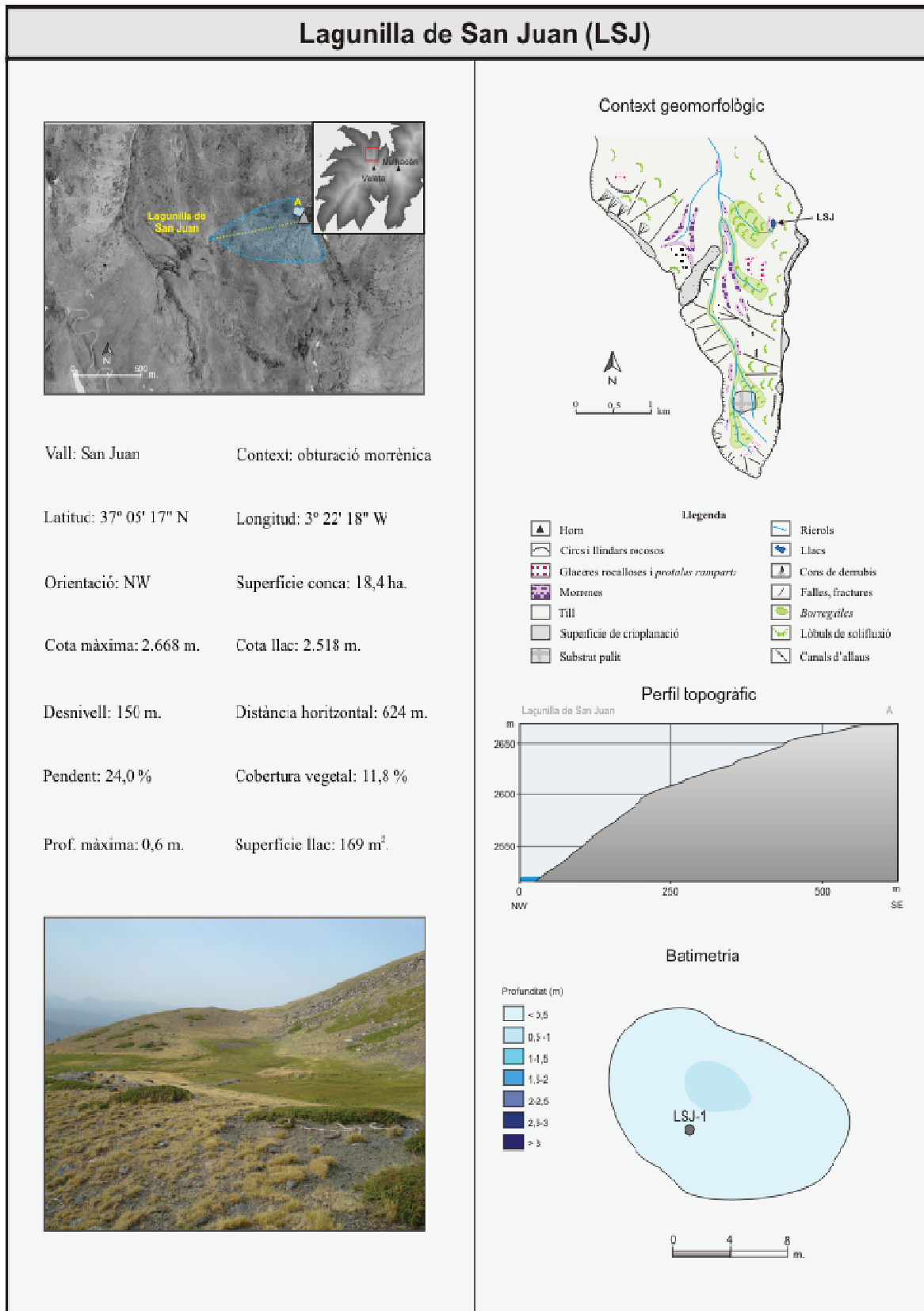


Figura 6.16. Característiques topogràfiques de la Lagunilla de San Juan.

En un sector elevat de SJC, ampli amfiteatre estructural que s'eixampla entre els 2.400-2.600 m a la vall de San Juan<sup>67</sup>, es disposa aquesta llacuna, que omple una depressió barrada per una morrena lateral, la qual crea unes condicions propícies per a l'estancament d'aigua i desenvolupament torbós. La llacuna té unes dimensions i profunditats molt modestes i es troba en procés de terraplenament, tot i que el *core* LSJ-1 reflexa que aquesta s'ha anat expandint i reduint cíclicament durant l'Holocè tardà. La Lagunilla de San Juan no s'emplaça en capçalera com les anteriors, sinó que s'ubica en una cota sensiblement inferior, just per sobre dels 2.500 m en el marge oriental de la vall, coronant SJC i proveint d'aigua els extensos *borreguiles* allà presents. La llacuna està connectada a un vessant amb una cobertura vegetal dispersa (11,8%), conformada per matolls espinosos de reduïdes dimensions (*Juniperus sp.*) que esmorteixen el flux de la potent coberta detrítica que entapissa el vessant, la qual s'organitza en formes pseudo-solifluidals.

Durant l'agost de 2007 es va extreure un testimoni sedimentari de 58 cm de llarg, que reflexa uns contrastos de color i granulometria molt marcats. Es va enviar a datar una mostra de *charcoal* a 18,5 cm, però el laboratori va constatar que no hi havia suficient material susceptible d'ésser datat, de manera que no disposem de cronologia absoluta i només podem intentar establir correlacions amb registres d'altres llacs per inferir fases d'inestabilitat de vessants. En aquest *core*, aquestes es defineixen a partir de les variacions de graves, que emmarquen clarament els períodes favorables a la dinàmica geomòrfica.

La base del *core* constitueix la unitat F, de color marró clar (2.5Y 4/3) amb nombroses taques d'òxids de ferro de color ataronjat (7.5YR 6/6) i dos nivells més oxidats (2.5Y 4/2). No es detecten canvis en la granulometria, amb uns valors de  $C_{org}$  molt baixos que fluctuen paral·lels a variacions de la ràtio C/N, la qual mostra relacions molt baixes fins al segon nivell caracteritzat per una elevada presència d'òxids. S'interpreta com una fase amb presència d'una làmina d'aigua poc profunda lligada a variacions en l'aquífer que, sobtadament inicia una tendència al terraplenament, inclús assecant-se en determinats períodes (Go). D'aleshores ençà hi domina un medi semblant a l'actual, tot i que les fluctuacions de C/N amb un  $C_{org}$  tan estable suggereix que la llacuna ha anat encongint-se i estirant-se atenent a les condicions climàtiques imperants, segons la major o menor productivitat de la conca, però els nutrients autòctons del llac romanien pràcticament

---

<sup>67</sup> Descripció detallada a les pàg. 102-108.



estables. Es detecta una primera fase d'activitat de vessants ( $F_3$ ), amb un augment notable de graves i sorres. La unitat E té una tonalitat rogenca (10YR 4/4), amb concrecions allargades d'òxids molt vermellores (5YR 4/6) i engloba la segona inestabilització de vessants ( $F_3$ ), amb un contingut significatiu de graves ( $\varnothing < 1$  cm) i de sorres, un augment de C/N i un pic molt considerable de Fe. Seguidament, la unitat D presenta un color grisós uniforme (5Y 4/1) amb poques taques en el marge inferior (7.5YR 6/6).

La unitat C, tot i presentar una coloració molt semblant (5Y 4/1) no presenta taques i es caracteritza per una bossa organitzada de graves que arriben a constituir prop del 75% del material dipositat en aquesta unitat, amb una escassa matriu limo-sorrenca ( $F_2$ ). Les graves no semblen respondre a un únic episodi, sinó que s'estructuren en graves fines ( $\varnothing < 1$  cm), graves mitges en el nucli de la unitat ( $\varnothing > 3$  cm) i finalitza la unitat amb una nova aportació de graves més fines ( $\varnothing < 1$  cm), fet que insinua unes condicions ambientals especialment propícies per a la mobilització mineral i erosió de la coberta vegetal existent, tal i com posa de manifest l'increment de la ràtio C/N. La unitat C mostra un període de recuada de les condicions ambientals respecte a D i B, les quals mostren unes característiques molt similars, tot i que la manca de datacions impossibilita precisar la cronologia d'aquest període de mobilització mineral.

En efecte, la unitat B (5Y 4/1) no conté graves, tot i mostrar lleugers impulsos de sorres, i es defineix per un gradual augment del  $C_{org}$  i una disminució de la ràtio C/N. La part superior de la unitat, en la interfície entre la torba i el sediment consolidat destaca per presentar un elevat contingut de graves, que podia relacionar-se amb l'última pulsació de la LIA a inicis del segle XIX<sup>68</sup> ( $F_1$ ). La tendència climàtica des de la LIA, que es reflecteix en altres *cores* amb un augment de la matèria orgànica, sembla refermar-se a la llacuna de San Juan amb un desenvolupament de la torba: condicions més càlides i seques propicien un progressiu dessecament de la llacuna que perd profunditat i es va terraplenant. L'entollament actual amb l'aquífer en superfície afavoreix la formació de la torba<sup>69</sup>.

<sup>68</sup> També es correspondria amb  $F_1$  en la nostra nomenclatura per la falta de cronologia que ho precisi, confirmant les dues pulsacions durant la LIA evidenciades en la cronologia de la solifluxió (veure pàg. 241) i detectades també per Schulte (2002c) en el contigu Corral del Veleta a partir de datacions de  $Pb^{210}$  en sediments glacio-lacustres.

<sup>69</sup> Admetent la nostra hipòtesi de treball, en uns 150 anys s'haurien desenvolupat uns 10 cm de torba.

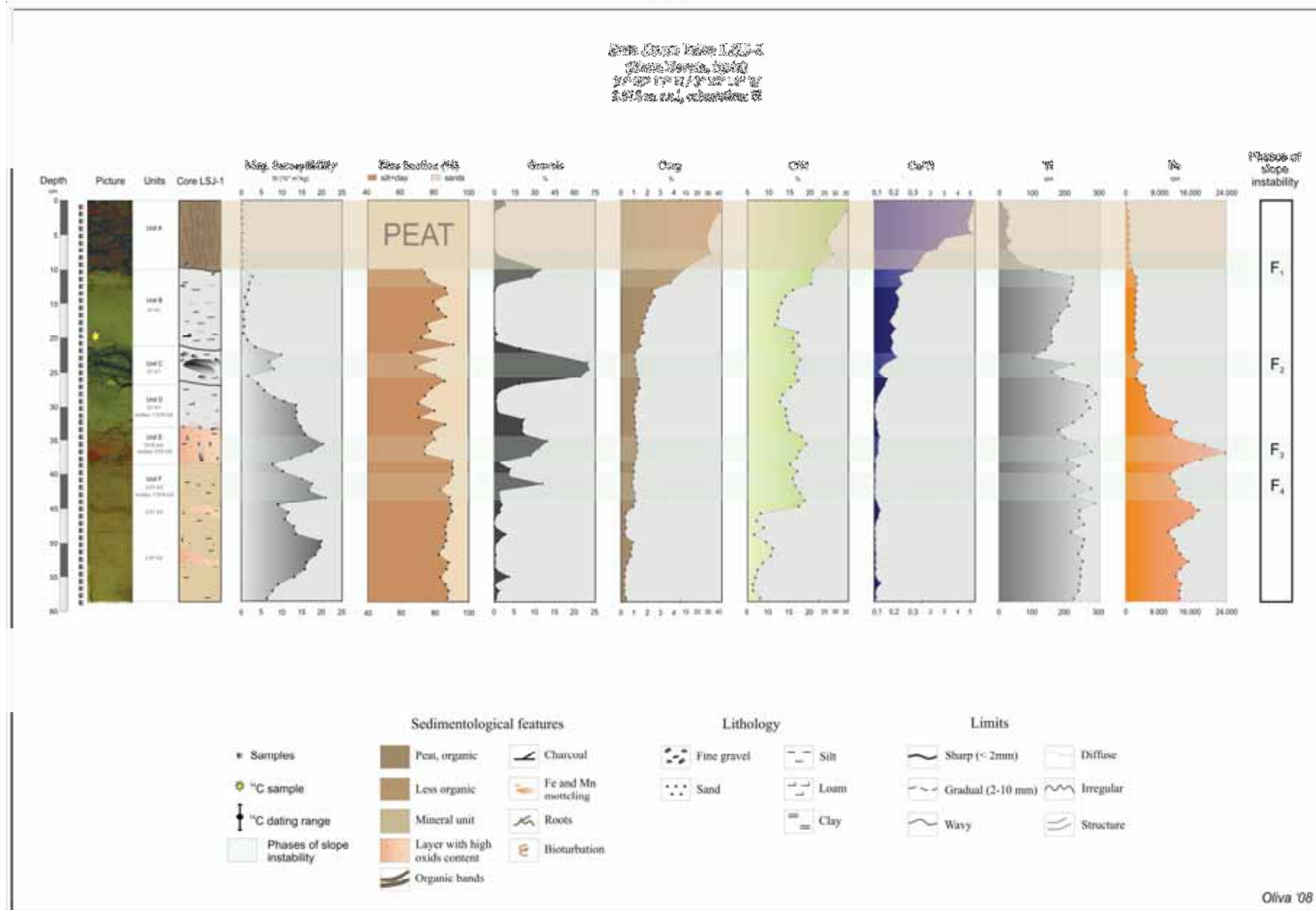


Figura 6.17. Cronoestratigrafia i característiques geoquímiques-sedimentàries del core LSJ-1.

### **6.3 Discussió dels registres**

Els *cores* extrets dels llacs de la Sierra mostren la seva potencialitat per reconstruir els canvis ambientals esdevinguts en el massís durant els darrers mil·lennis. Durant l'Holocè aquesta successió de canvis ambientals va venir conduïda per la variabilitat climàtica, tot i que durant els últims segles la petjada humana (bàsicament la ramaderia), tendeix a emmascarar la senyal climàtica.

En l'apartat 7.2 es resumeix la cronologia de la inestabilitat de vessants al massís i es discuteix a fons sobre la problemàtica de les datacions en aquests registres. Si bé en alguns casos s'ha optat per datar la concentració de pol·len (AV-1), en les altres s'ha processat directament la mostra que contenia restes vegetals que, en principi, eren susceptibles d'abocar òptims resultats. El significatiu nombre de datacions que han presentat resultats incongruents constata els problemes metodològics que suscita el control cronològic dels sediments lacustres de la Sierra.

Essent conscients de la poca quantitat de material que necessiten les datacions d'AMS i de la precisió que requereix la selecció de mostres per tal d'assolir una òptima cronologia, vam prendre especial cura en l'elecció de les macrorestes vegetals a datar. Els resultats de les datacions posen de relleu l'efectivitat dels processos diagenètics post-sedimentaris a les llacunes de la Sierra<sup>70</sup> i qüestionen la validesa de l'ús de restes vegetals i de la concentració de pol·len fòssil com a material datable en aquest massís. Cal considerar que la delimitació temporal de les fases geomòrfiques s'ha realitzat tenint en compte una sedimentació contínua lineal de les datacions considerades com a vàlides, fet que emmascara canvis en les tasses de sedimentació i, per tant, indueix errors en la cronologia. La seqüència de canvis ambientals deduïda dels sediments lacustres serà, doncs, orientativa.

---

<sup>70</sup> Lehman et al. (2002) demostren la importància dels canvis geoquímics que experimenta la matèria orgànica durant els anys immediats a la precipitació del sediments en els fons del llac en el Lago Lugano (Alps suïssos). El fet que aquest llac presenti tasses de sedimentació molt més elevades que els llacs de la Sierra, indueix a considerar que els processos diagenètics són especialment efectius en zones amb tasses de sedimentació baixes, ja que transcorren dècades (o segles) fins que el sediment queda enterrat sota la columna d'aigua i s'atura la degradació de la matèria orgànica. Caldria un estudi més acurat d'aquests processos a la Sierra per saber com enfocar la problemàtica suscitada amb les datacions en aquest indret.

A partir de la sedimentologia dels *cores* presentada en les pàgines anteriors distingim bàsicament unes fases en què imperava una activa dinàmica de vessants amb aportació de material detrític erosionat dels crestalls cimers, transportat i dipositat fins al fons de les llacunes, i unes altres en què dominava l'estabilitat geomòrfica, amb menys input extern i una major bioproduktivitat interna del llac i de la conca de drenatge. Les fases d'instabilitat geomòrfica solen correspondre's amb augments de MS, increments de sorres (amb una irregular presència de graves < 2 cm) i disminucions de la proporció de matèria orgànica<sup>71</sup>. La fluorescència de raigs X mostra una correlació d'aquests màxims de senyal magnètica amb pics de Ti i Fe, sovint acompanyats de caigudes en la proporció de Ca i de la ràtio Ca/Ti. Aquestes fases s'interpreten com períodes en què imperava la instabilitat de vessants, amb unes condicions climàtiques propícies per a una major erosió i transport de partícules minerals en suspensió/dissolució denudades de la conca que sedimentaven al fons del llac.

Per contra, les fases de major tranquil·litat geomòrfica es tradueixen en un menor transport i sedimentació de material mineral amb valors baixos de MS, increments de matèria orgànica i un tamany de gra dipositat més fi, degut a la menor capacitat de transport imperant. Les caigudes de Ti i Fe, responsables de la disminució en la intensitat de la senyal magnètica, són paral·leles a augments de Ca i Ca/Ti; el fet que no hi hagi carbonats al massís implica que el Ca mesurat ha d'ésser d'origen eòlic i provingui forçosament d'altres regions més o menys distants.

L'existència del Sàhara, una de les fonts d'aerosòls més importants del planeta i amb àmplies zones riques en carbonats a escassos centenars de kilòmetres (Löye-Pilot et al., 1986), ens porta a interpretar que el Ca dipositat pot tenir el seu origen al continent africà. El fet de que els augments de Ca vagin paral·lels a increments de la matèria orgànica pot ser indicatiu d'unes condicions més càlides possiblement conduïdes per una major dominància de vents de component sud que atenuaven les temperatures i implicaven més recurrència de *dust plumes*, que aportaven més Ca a les capçaleres de les valls nevadenses.

---

<sup>71</sup> Les disminucions de  $C_{org}$  i C/N no sempre són paral·leles. Certs períodes poden propiciar menys cobertura vegetal a la conca i determinar un augment de la ràtio C/N, ja que la productivitat interna de la llacuna pot no veure's afectada. Cal tenir en compte l'estacionalitat de la variabilitat climàtica holocena; per exemple, una disminució tèrmica a l'estiu devia tenir major afectació ambiental que una caiguda de temperatura hivernal.

