

MORFOLOGIA CÀRSTICA I VEGETACIÓ A LA SERRA DE TRAMUNTANA. UNA APROXIMACIÓ ECOLÒGICA A LA DINÀMICA DE L'EXOCARST

per Àngel GINÉS ¹

Resumen

Se estudian las relaciones existentes entre la morfología exokárstica y la cubierta vegetal en la Serra de Tramuntana (Mallorca), describiéndose las principales características de las comunidades vegetales que pueblan los diversos hábitats resultantes de los procesos de karstificación: dolinas, entradas de cavidades, cañones, grandes depresiones kársticas y campos de lapiaz. Estos últimos concentran los principales objetivos de una investigación de carácter estadístico, efectuada sobre la base de más de 200 localidades, en la que se aborda la geoeología del lapiaz mediante dos aproximaciones complementarias que comportan diferentes métodos de muestreo y de tratamiento de datos. Por una parte, se analiza la información que puede ofrecer, con relación al contexto bioclimático, una sola microforma de características bien definidas: las estrías de lapiaz o *Rillenkarren*. Por otra parte, se emplean técnicas de análisis multifactorial a partir de una matriz de datos que integra información procedente de descriptores mixtos de lapiaz y vegetación. En ambas investigaciones el factor altitudinal y la dependencia del clima se ponen claramente de manifiesto. La asociación entre descriptores permite interpretar mejor el papel del sustrato geológico en la zonación de las comunidades vegetales, aportando información sobre la autoecología de ciertas especies relacionadas con el karst, muchas de ellas endémicas.

(Resumen de la Tesis Doctoral titulada "Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica").

Abstract

Exokarstic landforms are quite a common feature on the Serra de Tramuntana mountain range on Mallorca (Balearic Islands, Spain). Because of this, the nature of the existing relationships between vegetation cover and karst geomorphology has been chosen as the subject for a detailed study.

The starting point of this research was the description of the principal characteristics shown by the plant communities that are associated with specific karstic habitats, namely cave entrances, gorges, polje-like depressions, dolines and karrenfields. Because of their widespread occurrence on the Serra de Tramuntana, as well as their environmental interest, karrenfields were selected so as to be able to carry out various investigations on and along the topographic and climatic gradients of this limestone range, from the peripheral coastal areas to the summits of the highest mountains.

The main geoeological aspects concerned with the development of karren features were analysed and more than 200 bare-karst locations were sampled with a view to using two complementary statistical approaches. On one hand, a detailed study on the morphometry of rillenkarren (small solution flutes) demonstrated that several significant environmental factors can be inferred through a careful understanding of the measurements obtained from such a single well-defined karren feature. On the other hand, the karren assemblages and plant species found on the karstic terrains of the Serra de Tramuntana were the subject of a multifactorial analysis, starting with a data array that both incorporates karren and botanical descriptors, in order to explain the environmental setting on the sierra that is involved in the characterization of its main karrenfield types.

After processing the data, it was found that these quantitative approaches clearly emphasize altitudinal range and climatic gradients as the major determining factors of karren features and karrenfield types. Furthermore, the remarkably relationship found among several descriptors permits a better knowledge of the role played by the limestone ground on the altitudinal zonation of plant communities to be substantiated. Additional environmental information has been obtained about the autecology of various endemic species strongly associated with karst terrains.

(Abstract of the Ph D thesis entitled: "Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica".)

¹ Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears
Cra. de Valldemossa km 7.5, E-07071 Palma de Mallorca

Introducció

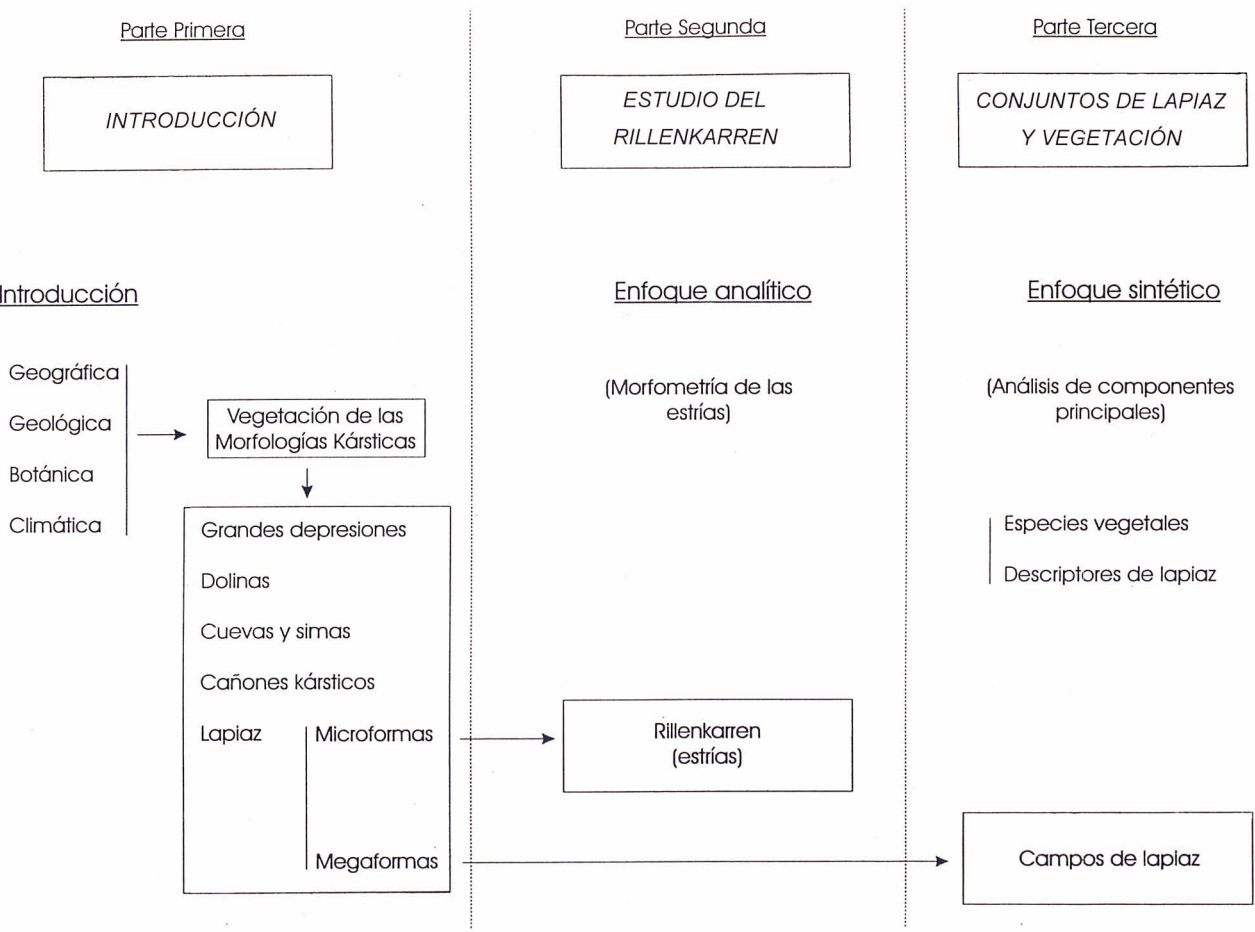
Aquest treball és una síntesi del contingut de la tesi doctoral presentada per l'autor a la Universitat de les Illes Balears, sota la codirecció del Dr. Miquel Morey (Laboratori d'Ecologia, Departament de Biologia) i del Dr. Joan J. Fornós (Departament de Ciències de la Terra). La dissertació en què es va defensar la Tesi va tenir lloc el dia 20 de juliol de 1999. El tribunal estava constituït per investigadors de reconegut prestigi en diversos camps de l'estudi del carst, de la botànica i de l'ecologia: presidit pel Dr. Vicenç M. Rosselló Verger (Departament de Geografia, Universitat de València), hi formaven part els Drs. Xavier Bellés (C.S.I.C., Barcelona), Francisco Díaz Pineda (Departamento de Ecología, Universidad Complutense de Madrid), Leonard Llorens (Departament de Biologia, Universitat de les Illes Balears) i Ugo Sauro (Dipartimento di Geografia, Università di Padova, Itàlia).

Índex de la tesi doctoral

La memòria, dipositada a la Universitat de les Illes Balears a finals del mes d'abril de 1999 amb el vist i plau dels Drs. Miquel Morey i Joan J. Fornós, codirectors de la tesi, constava de 581 pàgines a les quals s'hi afegia un annex fotogràfic amb 70 làmines a color.

A més dels exemplars dipositats a la Universitat de les Illes Balears, també es poden consultar diverses còpies d'aquesta tesi a les biblioteques de les següents institucions: Museu Balear de Ciències Naturals (Sóller), Federació Balear d'Espeleologia (Palma de Mallorca), Centre de documentation de l'Union Internationale de Spéléologie / Bibliothèque de la Société Suisse de Spéléologie (La Chaux-de-Fonds, Suïssa), Institut za Raziskovanje Krasa (Postojna, Eslovènia) i Jardí Botànic de Sóller.

L'estructura de la memòria presentada, amb la seva distribució en tres parts, apareix abreujada a la Taula I, on es reproduïx l'esquema que es va fer servir durant la dissertació de defensa de la tesi.



Taula 1: Diagrama conceptual que es va fer servir durant la presentació de la tesi.

Table 1: Conceptual diagram of the Ph D dissertation

L'índex de la memòria i la seva paginació original és la següent:

<u>INDICE</u>	
<i>Prólogo</i>	1
<i>Agradecimientos</i>	5
<u>PARTE PRIMERA:</u>	
GEOECOLOGÍA DEL EXOKARST DE LA SERRA DE TRAMUNTANA	
La Serra de Tramuntana como unidad geográfica	11
Aspectos geográficos de la Serra de Tramuntana	12
Generalidades	12
Orografía e hidrografía	14
Agricultura, karst y utilización tradicional del territorio	21
Aspectos geológicos de la Serra de Tramuntana	28
Generalidades	28
Estratigrafía y litología	30
Tectónica	42
Aspectos botánicos de la Serra de Tramuntana	49
Generalidades	49
Principales comunidades vegetales	51
Comunidades vegetales y morfologías kársticas	66
Aspectos climáticos de la Serra de Tramuntana	73
Generalidades	73
Precipitaciones	74
Humedad atmosférica	80
Temperaturas	84
Insolación y radiación	87
Viento	88
Evaporación, evapotranspiración y balance hídrico	92
Tipos de clima	94
Principales morfologías exokársticas de la Serra de Tramuntana y vegetación asociada	97
Introducción y características generales	97
Estado actual de los conocimientos	102
Las grandes depresiones kársticas	104
Sa Coma de Son Torrella	107
Es Clot d'Albarca	108
La vegetación de las grandes depresiones kársticas	110
Las dolinas	111
Ses Parades y Es Clots Carbons	114
La vegetación de las dolinas	118
Efectos de la actividad humana sobre las dolinas	129
Las cuevas y simas	134
Tipología de las entradas de cavidades	136
Gradientes y estratificación de los factores físicos	138
Zonación vegetal en el interior de las cavidades	148
La vegetación de las cuevas y simas	154
Los cañones kársticos	162
Es Torrent de Pareis	164
La vegetación de los cañones kársticos	166
Los campos de lapiaz	168
Tipología del lapiaz en la Serra de Tramuntana	172
Descripción cualitativa del lapiaz de 4 localidades típicas	178
Los "esquetjars" del Puig de Massanella	179
Es Pixarells de Lluc	181
El Rellar de Son Marc	185
El mirador d'El Colomer	187
El factor litológico en los campos de lapiaz de la Serra	191
La vegetación de los campos de lapiaz	195
Conclusiones: las morfologías exokársticas como factor geoecológico significativo	201
<u>PARTE SEGUNDA:</u>	
GEOECOLOGÍA DE LAS ACANALADURAS Y ESTRÍAS DE LAPIAZ	
Análisis morfométrico de las estrías de lapiaz	211
Observaciones morfométricas sobre las estrías de lapiaz	211
Introducción bibliográfica	214
Criterios y metodología de muestreo sobre el terreno	216
La longitud de las estrías de lapiaz	229
La profundidad de las estrías de lapiaz	242
	103

La anchura de las estrías de lapiaz	249
Acanaladuras y estrías de lapiaz	258
Comparaciones con estrías helvéticas e ibéricas	262
Observaciones efectuadas en el lapiaz de Suiza y de la Península Ibérica	262
Los campos de lapiaz de Suiza	263
Comparación entre los campos de lapiaz suizos y el lapiaz de la Serra de Tramuntana	265
Las estrías de lapiaz y los canalillos del Jura Vaudois	269
Las estrías de lapiaz de Sieben Hengste	271
Las estrías de lapiaz del Vallon des Morteys	272
Las estrías de lapiaz de Bödmeren	276
Las estrías de lapiaz del Lapis de Tsanfleuron, del Col du Sanetsch y del Lapi di Bou	279
Las estrías de lapiaz del valle de La Derbonne	281
Las estrías de lapiaz del Lapis des Grand' Gouilles	284
Discusión y conclusiones sobre el lapiaz de los Alpes calcáreos suizos	286
Los campos de lapiaz de la Península Ibérica	291
Las estrías de lapiaz del Mondúver	294
Las estrías de lapiaz del Mortero de Astrana	297
Las acanaladuras de lapiaz de la Serranía de Grazalema	304
Las estrías y acanaladuras de lapiaz de Larra	308
Discusión y conclusiones sobre el lapiaz de la Península Ibérica	312
Discusión de los resultados	315
Conclusiones sobre la morfometría y la génesis de las estrías de lapiaz	315
Conclusiones sobre la morfometría de las acanaladuras	345
Un tipo particular de acanaladuras: las estrías amplias	349
Un tipo particular de acanaladuras: los canalillos	352
Conclusiones: las acanaladuras y estrías de lapiaz como indicadores geoecológicos	357

PARTE TERCERA:

GEOECOLOGÍA DE LOS CONJUNTOS DE LAPIAZ Y VEGETACIÓN EN LA SERRA DE TRAMUNTANA

Los conjuntos de morfologías de lapiaz	365
El concepto de lapiaz	365
El concepto de Karrenfeld o campo de lapiaz	372
El concepto de criptolapiaz: relaciones entre el lapiaz subcutáneo y la cubierta edáfica	378
Deforestación y desarrollo evolutivo de los campos de lapiaz en la Serra de Tramuntana	382
Crisis bioclimáticas relacionadas con las glaciaciones	388
Deforestación y pérdida de suelo causada por el hombre	389
"Subsidencia" del bosque promovida por la karstificación	390
Metodología de muestreo de los conjuntos de lapiaz y vegetación	393
Criterios de selección de los descriptores de lapiaz en la Serra de Tramuntana	393
Enumeración de los 20 descriptores de lapiaz seleccionados para el muestreo	398
Formas longitudinales respecto a la pendiente, HYDRL, HL	399
Formas transversales respecto a la pendiente, HYDRT, HT	400
Formas irregulares de corrosión, ETCHL, ET	402
Lapiaz de diaclasas, KLUFT, KL	403
Criptolapiaz, lapiaz sub-edáfico, CRYPT, CR	405
Criptolapiaz en curso de transformación, TRANS, TF	408
Terrenos pedregosos, STONY, ST	409
Biokarst líquénico, BOKL, BK	410
Canalículos, MCRL, MR	412
Cubetas de corrosión, KAMEN, KA	414
Pocillos, RAINP, RP	416
Estrías de lapiaz, RILLK, RL	418
Estrías amplias, estrías anchas, WRILL, WL	420
Canales de lapiaz, RINN, RN	422
Canales paralelos, RGRNK, RG	424
Canales meandriformes, MAANK, MA	427
Canalillos, DFLUT, DF	428
Escalones, TRTTK, TR	431
Concavidades irregulares, ICPTT, CI	433
Concavidades horizontales, HCPTT, CH	435
Estrategias de muestreo de los conjuntos de lapiaz y vegetación	438
El muestreo de los descriptores de vegetación	444
El muestreo de los descriptores de lapiaz	447
Distribución altitudinal de los descriptores en la Serra de Tramuntana	451

Resultados obtenidos mediante el Análisis de Componentes Principales de los conjuntos de lapiaz y vegetación	467
Aplicación del análisis de componentes principales a los descriptores morfokársticos en los campos de lapiaz de la Serra de Tramuntana	467
A.C.P. completo: descriptores de lapiaz evaluados mediante 6 grados de abundancia	468
A.C.P. simplificado: descriptores de lapiaz evaluados mediante datos de presencia-ausencia	482
Aplicación del análisis de componentes principales a los descriptores vegetales en los campos de lapiaz de la Serra de Tramuntana	485
A.C.P. basado en 43 descriptores de vegetación: datos de presencia-ausencia de 43 especies	487
A.C.P. basado en 20 descriptores de vegetación: 11 descriptores individuales (especies) y 9 descriptores colectivos (agrupaciones de especies o comunidades vegetales)	488
Aplicación del análisis de componentes principales a los descriptores integrados de lapiaz y vegetación en los campos de lapiaz de la Serra de Tramuntana	492
Conclusiones: los conjuntos de lapiaz y vegetación como indicadores geoecológicos	504
BIBLIOGRAFÍA	511
ANEXO FOTOGRÁFICO (textos explicativos)	547
LÁMINAS	583

Principals conclusions

Els objectius prevists al començament de les prospeccions de camp que varen conduir a la realització d'aquest treball, consistien fonamentalment en: documentar les singularitats ecològiques que estan associades a les diferents formes exocàrstiques, estudiar amb criteris morfomètrics les estries de lapiaz i aplicar metodologies d'anàlisi multifactorial als conjunts de lapiaz-vegetació; tot i relacionant els esmentats aspectes de l'exocarst amb els factors geogràfics específics de la serra de Tramuntana i sobretot amb els gradients climàtics de la Serra.

Sens dubte, l'objecte d'investigació més rellevant al nostre àmbit eren els camps de lapiaz i sobretot la munió de microformes de dissolució presents a les grans extensions rocoses que els constitueixen. Per això, no es va aprofundir gaire en l'estudi d'altres formes de l'exocarst, com són ara les dolines, els canyons, les grans depressions càrstiques, etc. Només es varen fer unes aproximacions descriptives i merament qualitatives, que així i tot permeten copsar de seguida el gran interès de l'exocarst des del punt de vista de les nombroses singularitats ecològiques que conté.

Les microformes de lapiaz més elementals i els conjunts geoecològics que constitueixen els camps de lapiaz varen ser abordats mitjançant dues metodologies radicalment distintes. Per una banda, es va desenvolupar una aproximació quantitativa focalitzada en l'estudi estadístic d'una microforma de dissolució molt específica: les estries de lapiaz o *Rillenkarren*. D'altra banda, es varen elaborar uns criteris de mostreig semiquantitatiu adaptats als conjunts de lapiaz i vegetació amb la intenció d'obtenir una imatge global de les característiques dels camps de lapiaz, de manera que les dades numèriques permetessin analitzar els principals factors que intervenen en la configuració de les seves tipologies.

A grans trets, es pot afirmar que els resultats varen fer ben palesa la importància determinant dels gradients topogràfics i climàtics al carst de la serra de Tramuntana, tant pel que fa a les característiques de les microformes observades com pel que es refereix als conjunts geoecològics dels camps de lapiaz. La gran extensió i diversitat morfològica que presenten els camps de lapiaz (*Karrenfelder*, *karrenfields*, *champs de lapiaz*) a la principal serralada mallorquina i la complexa interrelació que es produeix amb les comunitats vegetals que habiten sobre el substrat carstificat, justifiquen una aproximació molt més detallada del que fins ara ha estat la pràctica habitual a les publicacions botàniques, fitosociològiques i ecològiques disponibles.

A continuació es fa una enumeració de les conclusions que apareixen a la fi de cadascuna de les tres parts en què ha estat dividida la tesi:

PRIMERA PART

- Es documenta, amb diversos exemples, de quina manera l'exocarst propicia el desenvolupament de singularitats geoecològiques, entre les quals cal destacar les singularitats topogràfiques (avencs, coves, escarpaments, encletxes de lapiaz, canyons), hidrològiques (grans depressions càrstiques, tàlvegs de canyons), edàfiques (dolines, camps de lapiaz), microclimàtiques (avencs, encletxes de lapiaz, superfícies de lapiaz) i biogeogràfiques (camps de lapiaz). Aquest enriquiment en biòtops i en refugis per a determinades espècies afavoreix la biodiversitat vegetal.
- L'associació *Teucrietum subspinosi*, rica en espècies endèmiques, està clarament relacionada amb les formes exocàrstiques pròpies del lapiaz. L'aliança *Hypericion balearici*, a la que pertany l'esmentada associació, també es pot relacionar

amb els efectes de la carstificació sobre els substrats calcaris.

- La intervenció humana sobre els camps de lapiaz ha produït l'expansió de comunitats vegetals en les quals hi predomina el carritjar d'*Ampelodesmos mauritanica*. La significació d'aquesta espècie dins el paisatge vegetal ha propiciat la descripció del *Smilaco balearici-Ampelodesmetum mauritanicae*, dins el qual quedaria inclosa bona part del lapiaz de mitjana altitud de la serra de Tramuntana.
- Els avencs, fondalades, esquerdes profundes i pous de lapiaz constitueixen bons refugis on poden romandre vestigis dels antics boscs caducifolis. La presència d'*Acer granatensis*, *Buxus balearica*, *Ilex aquifolium*, *Sorbus aria* i *Taxus baccata* a determinats indrets de la muntanya està generalment relacionada amb forats càrstics i substrats de lapiaz.
- Els abundants cingles, escarpaments i parets verticals que caracteritzen la topografia dels terrenys càrstics, afavoreixen l'expansió de comunitats rupícoles riques en endemismes. Entre d'altres espècies pròpies d'aquests hàbitats, cal esmentar *Crepis triasii* i *Galium crespianum*, que així mateix són freqüents a algunes entrades de cavitats verticals.
- La flora específica de les entrades verticals dels avencs destaca per l'abundància de briòfits i per la presència de diversos pteridòfits poc freqüents a l'exterior, com és el cas de *Dryopteris tyrrhena*, *Polystichum setiferum*, *Phyllitis sagittata* i *P. scolopendrium*. D'altra banda, la primera prospecció que es va efectuar als avencs de la Serra donà com a resultat la primera citació per a Balears de les següents espècies de briòfits: *Lophocolea bidentata*, *Solenostoma triste*, *Rhizomnium punctatum*, *Orthothecium intricatum* i *Taxiphyllum wissgrillii*. Els gradients de temperatura i humitat que es formen al llarg de la vertical dels avencs generen una interessant zonació d'espècies que reflecteix, junt amb l'extinció de la llum en profunditat, els forts controls microclimàtics que prevalen en aquestes condicions.
- Les entrades de coves horitzontals o subhoritzontals allotgen al llarg dels seus gradients d'il·luminació un seguit d'organismes vegetals: fanerògams, pteridòfits, briòfits, algues clorofícies i cianobacteris. Diverses coves que s'obren cap al nord-oest contenen una remarcable comunitat vegetal en la qual destaca un interessant grup d'endemismes tirrènics i balearics: *Pimpinella bicknellii*, *Urtica atrovirens* subsp. *bianorii*, *Cymbalaria aequitriloba*, *Sibthorpia africana* i *Soleirolia soleirolii*.
- Les comunitats de l'*Isoetion* estan molt poc representades a la Serra. Tanmateix les seves millors localitats es relacionen amb el fons de grans depressions càrstiques, com ara es Clot d'Albarca.
- Els migrats sòls de les dolines de mitjana altitud es caracteritzen per servir de substrat a la presència

d'algunes espècies calcífugues, com és el cas d'*Acarospora schleicheri*, *Phaeoceros laevis*, *Polytrichum juniperinum*, *Ophioglossum lusitanicum*, *Aira caryophyllea*, *Centaurium maritimum*, *Logfia gallica* i *Erica arborea* (la qual, junt amb *Ampelodesmos mauritanica*, és l'espècie més afavorida per la seva capacitat de rebrotament després dels incendis). Les dolines situades al cim del puig Major són l'únic hàbitat conegut de l'espècie endèmica *Ligusticum huteri*.

- La flora dels torrents i canyons càrstics conté elements molt heterogenis, entre els quals cal esmentar endemismes remarcables que habiten al jaç fresc i humit dels torrents o a les parets verticals que els envolten. És el cas de *Brimeura duvineaudii*, *Hypericum hircinum* subsp. *cambedesii*, *Viola jaubertiana* i *Digitalis minor*.
- Observacions efectuades sobre els processos bio-càrstics que intervenen a nivell de la superfície del lapiaz han demostrat la presència de cianobacteris, algues, fongs i líquens, els quals interactuen amb la roca de moltes maneres. Mentre el cianobacteri endolític *Chroococcus minutus* juga un paper molt important en la degradació de la superfície rocosa que s'esdevé prèviament a l'impacte de la pluja sobre la calcària, certs recobriments algals o líquenics pareixen protegir la roca. En qualsevol cas, la determinació taxonòmica d'aquests microorganismes i la seva eventual activitat com a agents de meteorització són difícils d'abordar.
- Es pot afirmar que el patrimoni paisatgístic de la Serra comprèn de manera indissociable tant les comunitats vegetals com les formes càrstiques. Els terrenys càrstics, moltes vegades aspres i fins i tot intransitables, contribueixen a proporcionar paratges agrests i formacions rocoses singulars, que interaccionen amb la vegetació configurant els trets més distintius del paisatge.
- A la serra de Tramuntana existeix una forta relació entre exocarst i espècies endèmiques. Especialment a les àmplies extensions ocupades pels camps de lapiaz, on per definició la coberta vegetal és esparsa ja que es tracta de terrenys rocallosos on manca sòl, es poden trobar amb abundància espècies endèmiques ben significatives, com ara *Hypericum balearicum*, *Teucrium marum* subsp. *occidentale*, *Astragalus balearicus*, *Pastinaca lucida* i *Cyclamen balearicum*.

SEGONA PART

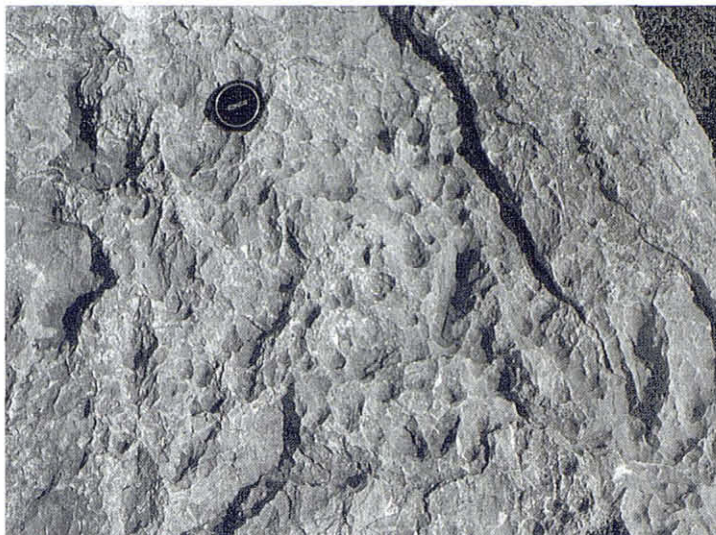
- Les **estries** i petites **canaletes** de lapiaz són indicadors geoecològics prou valuosos, ja que durant el seu desenvolupament incorporen informació sobre les condicions climàtiques, la litologia del substrat i l'estat de la coberta edàfica i vegetal. La potencialitat d'aquestes microformes com a indicadors geoecològics s'ha pogut comprovar mitjançant mètodes morfomètrics.

Foto 1:

Les superfícies irregulars i els pouets de corrosió són les formes dissolució que predominen als camps de lapiaz del Cap de Formentor, des de 0 fins a 200 metres sobre el nivell de la mar. El mostreig i posterior tractament estadístic de les dades han fet palesa la correlació negativa existent entre aquestes formes i *Quercus ilex*, així com la forta correlació positiva amb *Chamaerops humilis* i amb altres espècies relacionades amb la proximitat de la costa. Actualment la coberta vegetal està dominada per un bosc de pins bastant esclarissat. La tapa d'objectiu de càmera fotogràfica que serveix d'escala té 5,7 cm de diàmetre.

Photo 1:

Rough etched surfaces and solution pits are the prevalent solutional features on the Cap de Formentor karrenfields, from 0 to 200 meters a.s.l. After the sampling and statistical procedure, both karren microforms show clear negative correlations with *Quercus ilex* and strong positive correlations with *Chamaerops humilis*, as well as with near-shore related species. Present-day plant cover is dominated by sparse pine woods, cleared by the repeated fires caused by man. Scale: lens cap is 5.7-cm wide.



- Les **estries de lapiaz** o *Rillenkarren* només es poden formar sobre roques exposades directament a l'acció de la pluja. Per això, la presència d'estries i el grau de desenvolupament que presenten és un bon indicador de l'erosió i pèrdua de sòl en temps recents. En molts de casos el seu creixement pot produir-se simultàniament a la progressiva degradació de la coberta vegetal i a determinats processos de desforestació.
- L'anàlisi morfomètric de les estries, corresponents a localitats de la serra de Tramuntana on es registren més de 800 mm de precipitacions anuals, ha permès d'efectuar una calibració de les dimensions de longitud i profunditat en funció de l'altitud (i conseqüentment dels factors climàtics). Les eventuais desviacions respecte dels valors teòrics calculats poden ser interpretades com a evidències del poc temps transcorregut des de la denudació de la roca o bé com a resultat de perturbacions ambientals que han dificultat el desenvolupament òptim que correspondria al seu entorn climàtic.
- La forta correlació negativa que s'observa entre l'altitud sobre el nivell de la mar i la profunditat de les estries, permet d'extrapolar estimacions aproximades sobre la temperatura que va condicionar la seva formació.
- La forta correlació negativa que s'observa entre l'altitud sobre el nivell de la mar i la longitud de les estries, permet d'extrapolar estimacions aproximades sobre la temperatura que va condicionar la seva formació.
- L'absència d'estries de lapiaz sobre roques litològicament adequades i en condicions climàtiques favorables per al seu creixement pot estar relacionada amb canvis sobtats produïts per l'actuació humana, com és ara la ràpida retirada del sòl per erosió dels vessants o la descamació de la roca causada pels incendis.
- L'observació detallada de la micro i mesotopografia de les roques estriades, en la zona de contacte

amb la superfície del sòl, pot informar sobre la intensitat dels processos de denudació i pèrdua de sòl.

- L'observació detallada de les micro i nanomorfologies de meteorització, a nivell de les superfícies de roca del lapiaz, pot informar sobre les modalitats dels processos biocàrstics específics de cada microhàbitat i sobre la seva contribució a la formació d'estries. L'acció prèvia de cianobacteris endolítics s'ha mostrat fundamental en el creixement de les estries, en facilitar la fragmentació per les gotes de pluja de nanotopografies biocàrstiques molt fràgils.
- La presència d'**estries amples** (és a dir, d'estries d'amplària mitjana superior als 2 cm) pot indicar l'existència actual, o en temps relativament recents, d'un dosser de branques i fulles corresponent a estrats de vegetació situats per damunt del lapiaz. La intercepció de les gotes de pluja per part de la vegetació pot causar l'engrossiment de les gotes i l'augment de l'amplària mitjana de les estries.
- Els microhàbitats que condicionen el biocarst són molt sensibles a les modificacions de la coberta vegetal i especialment dels estrats arboris i arbustius. Les relacions de sobreposició entre organismes epilítics (especialment líquens i molses) i estries poden informar sobre canvis recents que han afectat els microclimes a nivell de la superfície de la roca, ja que la microflora epilítica inhibeix generalment el desenvolupament de les estries, mentre la invasió d'aquesta mena d'organismes va associada a una recuperació dels ambients ombrívols i humits propis del bosc.
- La presència de **canaletes** (és a dir, de riells d'amplària mitjana superior als 2,5 cm) pareix associada a localitats de climes relativament freds, poc favorables per al desenvolupament d'estries. Potser la disponibilitat d'un mínim de precipitacions en forma de neu justificaria les amplàries i caracte-



Foto 2:

Les formes de transició entre els **pouets de corrosió** i les **estries de lapiaz** anomenades *Rillenkarren* es poden observar molt bé a la localitat de Camp de Mar, situada al sud del municipi d'Andratx, a prop de la línia de costa. Diversos enfilalls de pouets de corrosió apareixen integrats amb un grup d'estries, curtes i poc desenvolupades. La presència de *Globularia alypum*, *Anthyllis cytisoides* i *Pinus halepensis* denota unes condicions ambientals semiàrides. La tapa d'objectiu de càmera fotogràfica que serveix d'escala té 5,7 cm de diàmetre.

Photo 2:

The transitional stage between the solution pits and the solution flutes called *rillenkarren* can be easily observed at the Camp de Mar site, located in the southwestern area of Andratx, near the coast line. Several strings of solution pits are well integrated with many poorly developed and short *rillenkarren* flutes. The presence of *Globularia alypum*, *Anthyllis cytisoides* and *Pinus halepensis*, indicates a semi-arid environment. Scale: lens cap is 5.7-cm wide.

rístiques anòmales que mostren aquestes canaletes.

- L'existència d'estries de lapiaz sobre afloraments de roca que romanen durant la major part de l'any coberts sota la neu, com és el cas d'algunes localitats suïsses d'alta muntanya, fa palesa la importància dels efectes de les tempestes d'estiu en la formació d'aquestes estries i suggereix un estricte control físic que justifiqui la constància dels valors d'amplària observats pertot arreu.
- La utilització de les gràfiques de distribució de freqüències, sobretot de les que representen l'amplària de les estries i canaletes, sembla un instrument útil i senzill per tal de treure informacions significatives de caire geocològic. És ben probable, segons mostren les dades morfomètriques obtingudes, que les condicions ambientals específiques en què es generen aquestes microformes del lapiaz (temperatures mínimes que permeten el seu creixement, intensitat de la pluja, mida de la gota, textura de la roca, màxim de coberta vegetal compatible amb el seu desenvolupament, efectes d'intercepció arbòria, interferència de les aportacions nivals, etc.) es puguin esbrinar a partir de l'anàlisi de la distribució de freqüències.

TERCERA PART

- S'ha elaborat una metodologia de recerca especialment adaptada a l'estudi de les característiques geocològiques dels **campes de lapiaz** de la serra de Tramuntana. Segons els resultats obtinguts en el seu primer assaig a l'exocarst de les muntanyes de Mallorca, aquesta metodologia sembla a bastament eficaç per a l'anàlisi dels conjunts de lapiaz i vegetació, i probablement es pot fer servir a altres àrees càrstiques del món mitjançant els oportuns reajustaments.
- La interpretació de l'estructura de les dades a partir de les anàlisis de components principals que han estat portades a terme ha permès de comprovar el predomini dels gradients altitudinals, tèrmics i plu-

viomètrics en la tipificació tant biòtica com abiòtica dels camps de lapiaz de la Serra.

- S'ha experimentat amb èxit un tractament estadístic de les matrius de dades mitjançant el qual es reunien, en una mateixa anàlisi factorial de components principals, 20 variables de caràcter morfocàrstic (conjunts de formes de lapiaz) junt amb 20 variables botàniques (espècies i comunitats vegetals).

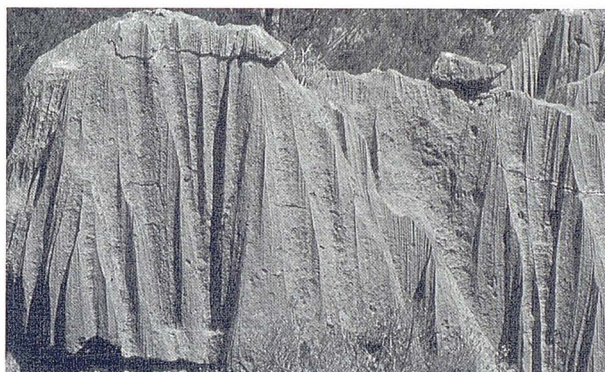


Foto 3:

Els intransitables camps de lapiaz formats per piràmides, cresteries i pinacles (*Spitzkarren* o *rellar*, segons la terminologia que proposam) són sens dubte les morfologies exocàrstiques més representatives de les altituds mitjanes de la serra de Tramuntana, entre 150 i 700 metres sobre el nivell de la mar. Les comunitats vegetals de l'*Oleo-Ceratonion*, en els nivells baixos, i del *Quercion ilicis* més a dalt, ocupen el sòl que resta entre les abruptes cresteries de roca calcària. Aquesta classe de "conjunt de lapiaz" mostra un clar predomini de determinades microformes, com ara les **estries**, les **canals paral·leles** i les **concavitats irregulars**, les quals només es desenvolupen aquí sobre els costats més verticalitzats dels pinacles. S'ha pogut comprovar estadísticament l'existència d'una forta correlació positiva entre *Pistacia lentiscus* i els típics rellars de pinacles i cresteries.

Photo 3:

Typical sharp pinnacle and ridge karrenfields are the major exokarstic landforms on the middle altitudes of Serra de Tramuntana, between 150 and 700 meters a.s.l. The *Oleo-Ceratonion*, in the lower stages, and the *Quercion ilicis* plant communities occupy the available soil between the ridges. This kind of karren assemblage shows the prevalence of several characteristic features, such as *rillenkarren*, solution flutes of the second order and irregular cockling patterns on the steeper slopes. A strong positive correlation was found between *Pistacia lentiscus* and the pinnacle and ridge karrenfield types.

- Les taules de correlacions entre descriptors, obtingudes amb les dades corresponents a 100 localitats distribuïdes al llarg de tota la serra de Tramuntana, han confirmat i quantificat certes afinitats previsibles com la que uneix les **estries amples** amb *Quercus ilex*; però també han evidenciat relacions fins fa poc ignorades. Per exemple, la correlació que associa el **lapiaz subedàfic o criptolapiaz** amb *Asphodelus aestivus* i *Pinus halepensis*, o la suggerent correlació positiva que s'observa entre *Hypericum balearicum* i el **lapiaz pedregós** i que es complementa amb una interessant correlació negativa envers el **lapiaz subedàfic**.
- El processament de les dades ha permès de realitzar una tipificació rigorosa dels camps de lapiaz de la Serra fonamentada en criteris semiquantitatius i en una metodologia de caràcter estadístic. Amb aquest procediment s'han pogut afinar millor les anteriors propostes de zonació dels camps de lapiaz, que havien estat basades fins ara en criteris descriptius i qualitius.
- Les anàlisis de components principals portades a terme a partir de les dades semiquantitatives d'abundància corresponents als 20 descriptors de lapiaz, han demostrat que la meso i macrotopografia del lapiaz constitueix el factor més important per a la seva classificació, tot seguit del clima. Es diferencien clarament dos tipus: el lapiaz de lloses i diàclasis (esquetjars) i el lapiaz de pinacles i cresteries (rellars). És ben probable que la característica topografia "en pinacles i cresteries" tenguí relació amb un remot origen subedàfic.
- Les anàlisis de components principals portades a terme a partir de les dades de vegetació són coherents amb les interpretacions fitosociològiques comunament acceptades, ja que les associacions vegetals presents als camps de lapiaz poden ser assignades respectivament al *Rosmarino-Ericion*, *Oleo-Ceratonion*, *Quercion ilicis* i *Hypericion balearici*, seguint un clar component altitudinal.
- L'anàlisi de components principals portada a terme a partir de les dades mixtes de lapiaz i vegetació permet de reconèixer tres classes ben diferenciades de camps de lapiaz: els de la zona culminar, associats als descriptors *Teucrietum subspinosi*, **lapiaz pedregós**, **concavitats irregulars**, **formes transversals**, *Smilaco-Ampelodesmetum*, *Hypericum balearicum*, **lapiaz de diàclasis**, **canaletes** i *Euphorbia characias*; els de les altituds mitjanes, associats a *Pistacia lentiscus*, **esglaons**, *Cneoro-Ceratonietum*, **canals paral·leles**, *Olea europaea*, espècies d'alzinar, *Urginea maritima* i **estries**; i els de la perifèria costera, associats a **pouets de corrosió**, *Chamaerops humilis*, espècies de costa rocosa calcària, **superfícies irregulars de corrosió** i **lapiaz subedàfic**.
- Les gràfiques que mostren l'abundància relativa de cada descriptor en funció de l'altitud, permeten



Foto 4: Exemples inequívocs de forats i tubs, típics del **lapiaz subedàfic o criptolapiaz**, es poden trobar al cim del puig de Ca, a més de 800 metres d'altitud sobre el nivell de la mar. La transformació i esmolament progressiu d'aquestes formes, inicialment rodones, sota els efectes de la pluja només va poder començar quan el sòl anava desapareixent com a conseqüència de l'erosió. Actualment el paisatge vegetal està per complet desforestat i tan sols s'observa la dominància del càrritx, *Ampelodesmos mauritanica*, junt amb diverses espècies pròpies de les comunitats de l'*Hypericion balearici*. La funda de càmera fotogràfica que serveix d'escala té 13 cm de llargada.

Photo 4: Unambiguous examples of subsoil karren holes and tubes appear at the summit of Puig de Ca mountain, over 800 meters a.s.l. The solutional sharpening of these features by the effect of rainfall only started after the soil was removed by erosion. At present, the landscape is completely devoid of woodland, being occupied by brush of *Ampelodesmos mauritanica* as well as by several plant species from the *Hypericion balearici* communities. Scale: camera case is 13-cm long.

comprovar la pauta molt semblant que presenten les **estries de lapiaz** i la típica espècie del lapiaz mallorquí *Ampelodesmos mauritanica*; ambdues caracteritzades per un màxim que correspon a les altituds mitjanes. Es torna a confirmar així l'òptim altitudinal que havien mostrat els estudis morfomètrics de les **estries**. En conseqüència, es pot afirmar que a les cotes més altes de la serra de Tramuntana les estries no tan sols esdevenen més curtes i menys profundes sinó que també es fan menys abundants.

- Les gràfiques de distribució altitudinal d'alguns descriptors mereixen en certs casos un comentari particular. És el cas de *Rosmarinus officinalis*, que presenta dos màxims, un a l'alt de les muntanyes i l'altre a zones de baixa altitud; tendència en la que coincideix sorprenentment amb les **cubetes de corrosió**. A més, la correlació positiva de *R. officinalis* amb els **canalicles**, així com la seva correlació negativa amb els **esglaons**, el **biocarst líquènic** i les **canals paral·leles**, semblen indicar una



Foto 5: Les superfícies de dissolució llises i ondulades, produïdes pel flux de làmines d'aigua, compten entre les formes que més es fan notar al cim de les muntanyes i es troben àmpliament representades als camps de lapiaz situats per damunt dels 800 metres sobre el nivell de la mar. Aquesta mena de **formes transversals al sentit del pendent**, com les que es poden observar a dalt del puig Major, inclouen concavitats, més o menys acanalades i horitzontals, però també ondes en forma de ripple i concavitats irregulars. Mostren una bona correlació positiva amb *Euphorbia characias*, una espècie típica de les comunitats de muntanya, i una forta correlació negativa amb *Chamaerops humilis*, el garballó, el qual està associat a ambients càlids i semiàrids. La tapa d'objectiu de càmera fotogràfica que serveix d'escala té 5,7 cm de diàmetre.

Photo 5: Smooth wave-like solutional surfaces, caused by sheet-flow waters, are a common feature at the top of the mountains, being widely present on karrenfields located over 800 meters a.s.l. Such kinds of transverse forms, as can be seen near the Puig Major peak, includes fluted scallops, irregular cockling and solutional ripples. Good positive correlation was found with *Euphorbia characias*, a typical mountain species, which is in accordance with the strong negative correlation found with the dwarf palm *Chamaerops humilis*, that occupies a semi-arid environment. Scale: lens cap is 5.7-cm wide.

preferència pels terrenys oberts, desproveïts de sòl i exposats a la insolació i a la intensa radiació nocturna.

- La prospecció de localitats de lapiaz de muntanya on s'estableix l'associació *Teucrietum subspinosi* suggereix la conveniència de fer observacions addicionals, per tal d'afinar millor les relacions de determinades espècies d'aquesta comunitat amb les diferents tipologies de l'exocarst. Un exemple d'aquestes matisacions que cal introduir quant a la dependència de les associacions i subassociacions de l'*Hypericion balearici* respecte de les classes de conjunts de lapiaz, es pot focalitzar amb l'espècie *Pastinaca lucida*, la qual no ha evidenciat cap correlació positiva amb el **lapiaz pedregós**, al menys a les localitats mostrejades en el decurs d'aquest estudi. Això contradiu la bibliografia disponible sobre el *Pastinacetum lucidae* i la seva relació amb els hàbitats de clapers i rossegueses de muntanya. També fa qüestionar els criteris de diferenciació entre *Teucrietum subspinosi* i *Pastinacetum lucidae* als camps de lapiaz culminals.



Foto 6: Els camps de lapiaz formats per lloses aplanades i diàclasis eixamplades (*Flachkarren* o *esquetjar*, segons la terminologia que proposam) són les morfologies exocàrstiques més representatives de les zones més altes de la muntanya mallorquina, per damunt dels 800 metres sobre el nivell de la mar. Aquesta classe de "conjunt de lapiaz" està caracteritzada per l'escassa presència de canals i estries, amb l'excepció de les **canals meandriformes**, i per l'abundància de **concavitats irregulars**, **ondes horitzontals** i **lapiaz de diàclasis**. Les comunitats del *Teucrietum subspinosi*, que inclouen un seguit d'espècies endèmiques, constitueixen la principal coberta vegetal que creix sobre els substrats intensament carstificats de dalt de les muntanyes. Fortes correlacions positives han estat trobades entre *Euphorbia characias*, *Pastinaca lucida*, *Helleborus foetidus* i *Teucrium asiaticum* i els típics esquetjars de lloses i diàclasis.

Photo 6: Typical flattened clint and grike karrenfields are the major exokarstic landforms in the higher altitudes of Serra de Tramuntana, over 800 meters a.s.l. This kind of karren assemblage is characterised by the scarcity of channel and flute features and the prevalence of irregular cockling patterns, horizontal solutional ripples and widened joints. The *Teucrietum subspinosi* communities, including many endemic species, are the main plant cover on these intensely karstified terrains. Strong positive correlations were found between clint and grike karrenfield types and several species like *Euphorbia characias*, *Pastinaca lucida*, *Helleborus foetidus* and *Teucrium asiaticum*.

- S'ha pogut demostrar la presència de formes inequívokes de **lapiaz subedàfic o criptolapiaz**, així com de **criptolapiaz transformat**, per damunt de l'actual línia de bosc; a més de 800 metres sobre el nivell de la mar, en terrenys ocupats per el denominat "estatge culminal baleàric". Aquestes troballes reforcen la hipòtesi segons la qual l'*Hypericion balearici* ha poblat amb èxit els cims de les muntanyes després que la degradació dels sòls fés impossible la recuperació dels boscs de l'*Aceri-buxetum* i del *Cyclamini-Quercetum ilicis*. És ben probable que la repetició de les crisis bioclimàtiques causades per les glaciacions hagi estat la causa del progressiu empobriment dels sòls i de la desaparició a llarg termini dels boscs per damunt dels 800 metres.

Agraïments

Vull agrair a l'amic Peter Watkinson la seva acurada supervisió i millora dels textos en anglès.