

EL MODELAT EXOCÀRSTIC DE LES BALEARS I ELS CAMPS DE LAPIAZ DE MITJANA MUNTANYA MEDITERRÀNIA A LA SERRA DE TRAMUNTANA DE MALLORCA

per Angel GINÉS ^{1,2} i Joaquín GINÉS ^{1,2}

Abstract

The geological setting of the Balearic archipelago, largely formed of limestone rocks, and its typical Mediterranean bioclimatic conditions produce distinctive karst landforms, including surface depressions, solutional karren features and fluvio-karstic canyons. Unquestionably the most outstanding karst region of the Balearic Islands, in what concerns exokarstic features, is the Serra de Tramuntana mountain range, in Mallorca Island. Karren landforms of this region gained the early interest of naturalists already in the XIXth century; afterwards, during the XXth century, some researchers from central Europe pointed out the spectacular nature and geomorphological richness of the exokarst in the Mallorcan mountains. In the last decades a lot of literature has been devoted to surface solutional features in Serra de Tramuntana, ranging from morphological and morphometrical aspects to genetic or evolutive ones. The exokarst in the studied area is characterized by a remarkable variety of solutional landforms, arranged in extensive and spectacular karrenfields, popularly designated as *esquetjars* or *rellars*. These are the result of a wide diversity of environmental situations, basically controlled by the climatic gradients linked to the altitude (ranging from sea level to above 1,400 m). The impacts of human activity over the last 5 millennia, together with other mechanisms of natural deforestation, have produced a complex evolutionary history of the existing karrenfields within a mediterranean mid-mountain framework. Among the most characteristic karst landscapes, the mid-mountain pinnacle karrenfields intensively sculptured by small scale solutional forms (basically *rillenkarren*, *rinnenkarren* and *trittkarren*) must be highlighted. On the other hand, the highest peaks of the Serra show karren assemblages influenced by present and past cold climate conditions.

Resum

Les característiques geològiques de l'arxipèlag balear, bàsicament constituït per roques calcàries, i les seves condicions bioclimàtiques típicament mediterrànies han originat paisatges exocàrstics destacables, que inclouen depressions superficials, formes de lapiaz i canyons fluvio-càrstics. Indubtablement la regió càrstica de les Illes Balears més remarcable pel que fa a la magnitud i varietat de les seves morfologies és la Serra de Tramuntana, a l'illa de Mallorca. Les morfologies de lapiaz d'aquesta regió varen atreure l'interès dels naturalistes i geògrafs ja en el segle XIX; posteriorment, durant el segle XX, alguns investigadors centroeuropeus destacaren el caràcter espectacular i la riquesa geomorfològica de l'exocàrst de les muntanyes mallorquines. Al llarg de les darreres dècades, una abundant bibliografia s'ha ocupat de les formes de dissolució superficial de la Serra de Tramuntana, abraçant des d'aspectes morfològics i morfomètrics a qüestions genètiques o evolutives. L'exocàrst de l'àrea estudiada es caracteritza per una notable diversitat de formes de dissolució, que configuren extensos i espectaculars camps de lapiaz coneguts popularment com a *esquetjars* o *rellars*. Aquests són el resultat d'una àmplia varietat de situacions ambientals, controlades fonamentalment per gradients climàtics lligats a l'altitud, la qual comprèn des del nivell marí fins a 1.400 m d'alçària. L'impacte de l'activitat humana al llarg dels 5 darrers mil·lennis, juntament amb d'altres mecanismes de desforestació natural, han produït una complexa història evolutiva dels camps de lapiaz existents emmarcada en un ambient bioclimàtic mediterrani. Entre els paisatges exocàrstics més espectaculars, destaquen els camps de lapiaz de pinacles de mitjana muntanya, intensament esculpits per formes de dissolució de petita escala (principalment *rillenkarren*, *rinnenkarren* i *trittkarren*). D'altra banda, els pics més alts de la serra mostren conjunts de lapiaz influenciats per condicions climàtiques fredes, actuals i pretèrites.

Resumen

Las características geológicas del archipiélago balear, básicamente constituido por rocas calizas, y sus condiciones bioclimáticas típicamente mediterráneas han originado paisajes exokársticos notables, que incluyen depresiones superficiales, formas de lapiaz y cañones fluvio-kársticos. Sin ninguna duda, entre las regiones kársticas de las Islas Baleares, la que más destaca en cuanto a riqueza de formas y singularidad paisajística es la Serra de Tramuntana, en la isla de Mallorca. Las espectaculares formas de lapiaz de esta área geográfica atrajeron el interés de naturalistas ya en el siglo XIX; posteriormente, durante el siglo XX, algunos investigadores centroeuropeos pusieron de manifiesto el carácter excepcional, desde el punto de vista geomorfológico, del exokarst de esta cordillera mallorquina. Durante las últimas décadas, una abundante bibliografía ha sido dedicada al relieve kárstico de la Serra de Tramuntana, abarcando desde aspectos morfológicos y morfométricos a cuestiones genéticas o evolutivas. El exokarst del área estudiada se caracteriza por una considerable variedad de formas de disolución, que configuran extensos y espectaculares campos de lapiaz, conocidos popularmente como *esquetjars* o *rellars*. Estos son el resultado de una amplia variedad de situaciones ambientales, controladas fundamentalmente por gradientes climáticos ligados a la altitud, la cual comprende desde el nivel marino hasta 1.400 m por encima de él. El impacto de la actividad humana a lo largo de los últimos 5 milenios, junto con la actuación de otros mecanismos de deforestación natural, han producido una compleja historia evolutiva que se manifiesta en el modelado de los campos de lapiaz existentes, dentro del marco de un ambiente bioclimático mediterráneo. Entre los paisajes exokársticos más espectaculares, destacan los campos de lapiaz de pináculos de media montaña, intensamente esculpidos por formas de disolución de pequeña escala (principalmente *rillenkarren*, *rinnenkarren* y *trittkarren*). Por otra parte, las cumbres más altas de la sierra muestran conjuntos de lapiaz influenciados por condiciones climáticas frías, tanto actuales como sobre todo pleistocénicas.

1 Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma.

2 Grup Espeleològic EST. Palma.

Introducció

El present treball té com a objectiu aportar una visió de conjunt de les morfologies que es troben representades a l'exocarst de les Illes Balears i donar compte dels principals trets que aquestes mostren a les distintes illes i regions càrstiques. Cal precisar que, en les pàgines que segueixen, no s'inclourà el modelat exocàrstic costaner –òbviament molt estès tot al llarg de l'arxipèlag–, ja que alguns dels seus aspectes més remarcables, com ara les cales i les microformes biocàrstiques que integren el lapiaz costaner, ocuparien una extensió excessiva i farien molt complicada l'estructuració d'aquest resum de l'exocarst balear; val a dir que el lapiaz litoral és objecte d'un treball específic en aquest mateix volum. També cal reconèixer que la importància de les formes exocàrstiques és força desigual als distintes carsts illencs, ja que només adquireix un nivell de rellevància certament excepcional en el cas de la Serra de Tramuntana mallorquina. Emperò, els afloraments de roques carstificables són tan extensos a les Illes Balears que necessàriament mereixen un tractament descriptiu bàsic que permeti avaluar les característiques més singulars que mostra l'exocarst a les distintes regions càrstiques. Per això, s'ha volgut fer, primer, una breu presentació general de l'exocarst balear des d'un punt de vista descriptiu, illa per illa i regió per regió. I, després, a la segona part –i més extensa– de l'article, s'ha focalitzat l'atenció exclusivament als camps de lapiaz de la Serra de Tramuntana, per tal de documentar un dels millors exemples de zonació bioclimàtica de formes de lapiaz que s'ha pogut estudiar fins ara arreu del món.

La primera referència bibliogràfica sobre formes exocàrstiques a les Balears correspon a LOZANO (1884), opuscle dedicat a la geologia de Mallorca, on es poden trobar uns comentaris molt encertats sobre els camps de lapiaz de Lluc i Cals Reis, al terme municipal d'Escorca, i Ariant, a Pollença. Posteriorment, les distintes morfologies de l'exocarst balear –i més particularment de la Serra de Tramuntana– varen copsar l'interès de prestigiosos naturalistes i geògrafs: MARTEL (1903), de BUEN (1905), FALLOT (1922), WINKLER (1926), DARDER (1930), MENSCHING (1955), VILÀ-VALENTÍ (1961) i BÖGLI (1976 i 1980). D'altra banda, les úniques publicacions que tracten, de manera molt abreujada, del conjunt de l'exocarst balear són les de RIBA *et al.* (1976) i GINÉS & GINÉS (1989).

El modelat exocàrstic a les Illes Balears

A la Taula I es presenta, de manera molt resumida i esquemàtica, una visió general de les distintes illes i de les principals regions càrstiques de les Balears en relació a la presència i grau d'abundància dels tipus de formes càrstiques de superfície més significatius: lapiaz, dolines, grans depressions càrstiques i canyons fluvio-càrstics. Les dades que apareixen a la Taula I són ne-



Figura 1: Els lapiaz dels costers de Sa Dragonera es caracteritzen pel predomini de petites formes de dissolució que estan clarament associades a condicions climàtiques semiàrides. Els pouets de dissolució (*rainpits*) esdevenen la forma predominant en aquestes localitats (amb precipitacions per davall dels 500 mm a l'any), mentre que les estries de lapiaz (*rillenkarren*) apareixen pobrament desenvolupades

Figure 1: Typical karren features of Sa Dragonera islet are characterized by small sculpturing forms related to semiarid climatic conditions. Whereas rillenkarren are badly developed, rainpits are the most distinctive feature in this kind of locations where precipitation amounts are lower than 500 mm per year.

cessàriament orientatives, però palesen una relativa pobresa de formes exocàrstiques remarcables, si es considera el conjunt dels carsts de les Balears i sempre que es faci excepció de la Serra de Tramuntana (que, ben al contrari, reuneix una gran diversitat de morfologies de tota mida i un impressionant repertori de camps de lapiaz). Només els carsts tabulars del Migjorn de Menorca i del Migjorn de Mallorca mostren una certa varietat de formes, però amb una incidència més aviat discreta en el paisatge i dins un context que recorda, a petita escala, al carst costaner de la península croata d'Istria. Com a tendència general per a tot l'arxipèlag, es constata que les formes de lapiaz són clarament dominants –incloent-hi les microformes de dissolució gens espectaculars dels carsts eogenètics i semiàrids– mentre que les dolines són, en canvi, poc abundants.

A les distintes regions càrstiques de Mallorca i a les petites illes que l'envolten, les formes exocàrstiques han estat objecte d'un tractament molt desigual i, a més, clarament esbiaixat en favor de la Serra de Tramuntana, que serà tractada a part en les pàgines següents. La regió que compta amb menys informació publicada és la constituïda per les Serres de Llevant, on GINÉS & GINÉS (1989) es limiten a deixar constància de la presència de lapiaz i dolines. La regió de Migjorn apareix documentada amb major extensió a DARDER (1930), ROSSELLÓ-VERGER (1964) i GINÉS & GINÉS (1995); en aquestes publicacions es reuneixen diverses dades sobre lapiaz, dolines, *barrancs* càrstics i fins i tot petits pòlies, com és el cas de Ses Comes de Son Granada. L'exocarst i el lapiaz del subarxipèlag de Cabrera, continuïtat natural de les Serres de Llevant, va ser estudiat a

GINÉS (1993). I els costers carstificats de Sa Dragonera han estat objecte més recentment d'una recerca (GINÉS, 2001) sobre la tipologia del lapiaz en condicions de clima semiàrid (Figura 1), per sota dels 500 mm de precipitació anual.

Pel que fa a l'illa de Menorca, la diferenciació entre les dues regions càrstiques, Tramuntana i Migjorn, es manifesta amb molta claredat. A la banda de Tramuntana, les calcàries i dolomies mesozoiques, que afloren principalment als voltants de la Badia de Fornells, mostren diversos exemples de dolines i lapiaz que ja varen ser documentats per MONTORIOL-POUS & ASSENS-CAPARRÓS (1957). En canvi, al Migjorn de Menorca la representació de formes exocàrstiques és més completa, i inclou, a més del lapiaz cavernós característic del carst eogenètic, dolines (GARCÍA-SENZ, 1985) i depressions càrstiques de mides molt diverses i una important sèrie de *barrancs* que es poden qualificar de canyons fluviocàrstics (GINÉS & FORNÓS, 2004). Men-

ció a part mereixen les anomenades *basses* (FRAGA et al., 2010), que quan es desenvolupen sobre substrats calcaris es poden considerar casos particulars –això sí, de grans dimensions– del que es coneixen com a *kamenitzas*, una modalitat de lapiaz ben coneguda a la bibliografia càrstica. També a distintes contrades del Migjorn mallorquí, especialment al terme municipal de Llucmajor, les *basses* constitueixen un interessant fenomen exocàrstic que encara no compta amb cap estudi de caire geomorfològic.

A les Pitiüses, el tret més destacable és l'existència de petits pòlies, com els de Corona i Albarca (Figura 2), al nord de l'illa d'Eivissa (THOMAS-CASAJUANA & MONTORIOL-POUS, 1953; VILÀ-VALENTÍ, 1961). Alguns altres treballs, de caràcter general (RIBA et al., 1976; PRATS, 2004), fan esment així mateix de lapiaz, dolines i pòlies a la major de les illes Pitiüses. Finalment, l'illa de Formentera no presenta formes exocàrstiques ressenyables.

Regions càrstiques		Marc geològic		Formes exocàrstiques			
		materials mesozoics plegats	Miocè postorogènic	lapiaz	dolines	grans depressions	canyons fluviocàrstics
Mallorca	Serra de Tramuntana						
	Serres de Llevant						
	Migjorn						
Cabrera							
Dragonera							
Menorca	Tramuntana						
	Migjorn						
Eivissa							
Formentera							

 *excepcional*  *abundant*  *freqüent*  *present*

Taula I: Distribució dels principals tipus de formes del carst de superfície a les distintes regions càrstiques de les Illes Balears. L'abundància relativa de cada tipologia a les regions càrstiques de l'arxipèlag apareix indicada amb diferents colors.

Table I: Distribution of the main types of exokarst landforms in the karst regions of the Balearic Islands. The relative abundance of the different landforms in the main karst regions of the archipelago is shown in the table.

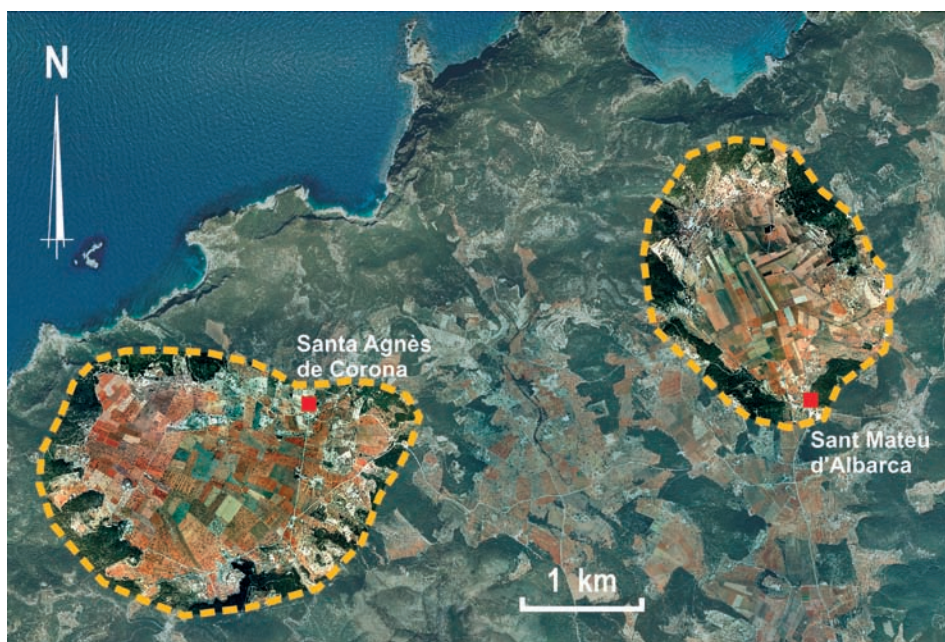


Figura 2: Les depressions càrstiques de Corona i Albarca destaquen com els millors exemples de pòlies dins el conjunt del carst balear. Ambdós pòlies es localitzen a Es Amunts, la part més septentrional de l'illa d'Eivissa. Aquesta imatge correspon al PNOA-2008.

Figure 2: The Corona and Albarca depressions stand out from the whole Balearic karst features as the best examples of polje landforms. Both are located at the northernmost part of Eivissa Island, called Es Amunts. This image corresponds to PNOA-2008.

La Serra de Tramuntana de Mallorca i els seus excepcionals exemples de lapiaz de mitjana muntanya

Condicionants geològics i bioclimàtics

La Serra de Tramuntana està situada al nord de l'illa de Mallorca i consisteix en una abrupta cadena muntanyosa, de 90 km de llarg i 15 km d'ample, allargada en direcció NE-SW (Figura 3). El seu punt més elevat és el Puig Major (1.445 m), comptant endemés amb altres catorze pics que superen els 1.000 m d'altitud. Des del punt de vista geològic està constituïda per un complex sistema de plecs i encavalcaments, originats per esforços compressius produïts des del SE cap al NW. Aquestes estructures foren el resultat d'un esdeveniment tectònic lligat a l'orogènia alpina —que tingué lloc entre l'Oligocè superior i el Miocè mitjà— de manera que involucrà un seguit de roques, la majoria d'elles carbonàtiques, que abracen des del final del Paleozoic fins al Miocè inferior (GELABERT, 1998). En termes generals, l'estructura de la serra consisteix en un conjunt de làmines encavalcants, apilades cap al NW i amb una orientació NE-SW, que integren la part emergida del que es coneix com a Promontori Baleàric, el qual és de fet una prolongació de les cadenes muntanyoses Bètiques. Les estructures compressives alpines estan cobertes discordantment per sediments postorogènics que van des del Miocè superior al Quaternari.

L'estructura geològica abans descrita, ha donat lloc a una successió d'alineacions muntanyoses, amb un relleu molt enèrgic, que presenta penya-segats en els seus vessants septentrionals i pendents relativament suaus als costers meridionals, degut al cabussament general de

les capes calcàries cap al SE. L'alternança repetitiva de calcàries i sediments margosos o argilosos subjacents, a causa dels successius encavalcaments, contribueix al característic perfil dentat asimètric que s'observa en les seccions transversals de la Serra de Tramuntana.

Els materials rocosos representats són bastant diversos (margues, argiles, gresos, guixos, roques volcàniques...) encara que, amb molt d'avantatge, el rocam calcari és la litologia dominant tot al llarg de la serra (FORNÓS & GELABERT, 1995). Específicament, els principals paisatges càrstics estan desenvolupats en calcàries micrítiques del Juràssic (Lias inferior) i en conglomerats calcaris i calcarenites del Miocè inferior (Burdigalià). Les roques d'ambdós estatges són molt semblants pel que fa a la litologia i notablement pures: el residu insoluble oscil·la entre l'1 i el 10% (generalment <2%) i el contingut en Mg és sempre <4%. Les úniques diferències entre elles són de caràcter textural; els dipòsits del Miocè inferior són molt grollers —però suportats per una matriu micrítica— en comparació amb les calcàries de gra fi del Juràssic. Les roques carstificables de la Serra de Tramuntana són mecànicament dures, presentant valors (obtinguts mitjançant el martell de Schmidt) que oscil·len entre 40 i 52.

Els materials margosos del Triàsic (Keuper) juguen un paper important en el desenvolupament del carst. En primer lloc, aquestes roques tenen una funcionalitat hidrogeològica rellevant donat que actuen com a substrat impermeable per a les circulacions hídriques subterrànies, a més de la contribució ja esmentada a la configuració estructural i topogràfica de la serra. Per altra banda, aquests dipòsits margosos subministren abundants

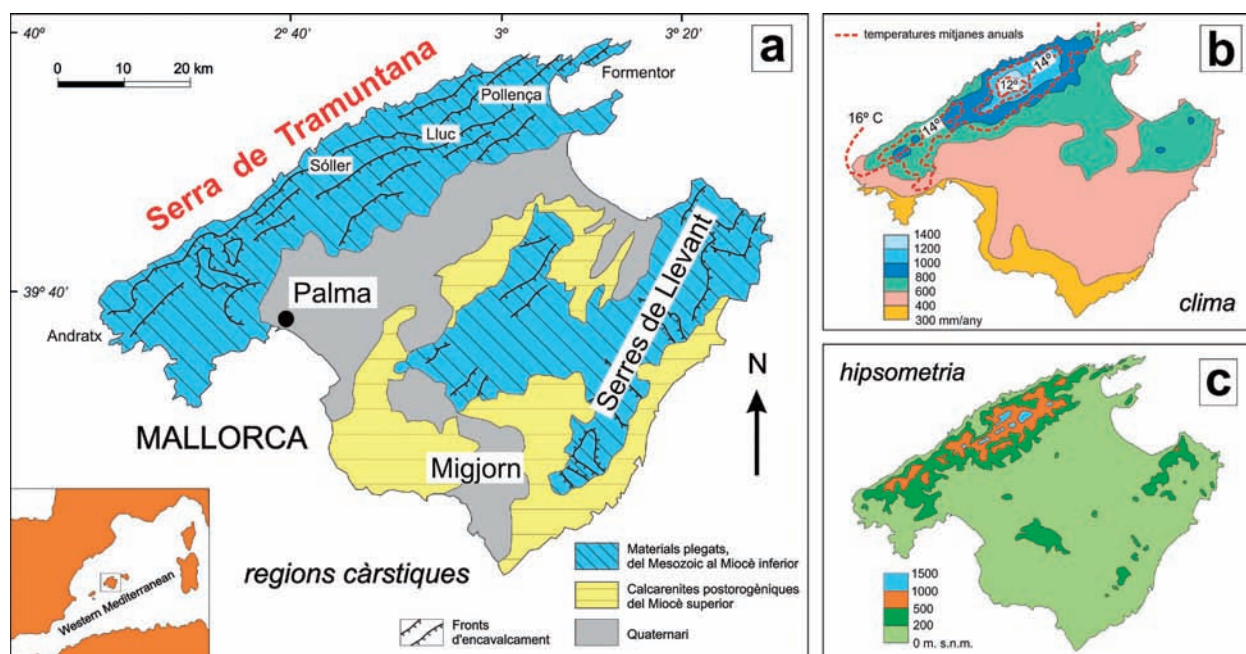


Figura 3: Informació geogràfica sobre l'illa de Mallorca.
a: principals unitats lito-estructurals i situació de les localitats citades en el text.
b: distribució dels valors mitjans anuals de precipitacions i temperatures.
c: mapa hipsomètric simplificat.

Figure 3: Geographical information on Mallorca island.
a: main Mallorcan litho-structural units and situation of sites referred to in the text.
b: distribution of the average annual rainfall and temperature values.
c: simplified altimetry map.

materials esmicolats i desagregats que contribueixen, amb les seves aportacions, al desenvolupament dels sòls i conseqüentment al modelat subedàfic de molts dels camps de lapiaz.

El clima de l'àrea és típicament mediterrani (GUIJARRO, 1995), caracteritzat per una important sequera estival que s'estén de juny a setembre. Les precipitacions assoleixen els 1.400 mm/any en la part central de la serra, que inclou les seves màximes altures, decreixent fortament cap a la perifèria on se situen, de manera gradual, les cotes més baixes de la cadena muntanyosa (<500 mm/any, als extrems SW i NE); amb aquesta disposició del relleu de la serra, les precipitacions mostren una distribució espacial coincident amb les cotes d'altitud (Figura 3). Les nevades són escasses i queden actualment limitades als pics més elevats, durant tan sols uns pocs dies cada hivern. Les pluges tempestuoses intenses (superiors als 250 mm en 24 hores) no són excepcionals, en particular als mesos de tardor, degudes a irrupcions sobtades de masses d'aire fred –en les parts superiors i mitjanes de la troposfera– que arriben a una mar Mediterrània molt calenta després dels mesos d'estiu.

Les temperatures mitjanes anuals van des dels 12° C, a les zones centrals de la serra, fins als 17° C d'indrets com Formentor i Andratx, situats als punts extrems de la seva perifèria. La variabilitat estacional és notable, amb temperatures mitjanes els mesos d'hivern inferiors als 10° C i temperatures mitjanes que s'apropen als 25° C durant l'estiu. En termes generals, el clima de la Serra de Tramuntana és temperat, tal i com cal esperar de la seva situació corresponent a una latitud mitjana, però modificat per l'anomalia azonal que suposa la presència de la mar Mediterrània. Dins d'aquest context, l'existèn-

cia de diferències notables en els valors de precipitacions i temperatures, lligades a l'altitud, determinen condicions microclimàtiques locals que van des d'ambients humits a semiàrids.

Els pisos de vegetació que es troben a la regió balear estan relacionats amb la variabilitat ambiental imposada pels controls macro i microclimàtics ja esmentats. Els boscos densos d'alzines (*Quercus ilex*) són la comunitat millor adaptada a les condicions relativament humides, emperò estacionalment àrides, que dominen en bona part de la serra. Els boscos discontinus de pi (*Pinus halepensis*) estan ben desenvolupats en els ambients més secs, corresponents a les altituds baixes i als indrets més perifèrics de l'àrea. Finalment, la línia de desaparició dels boscos se situa sobre els 800 m snm, cota a partir de la qual els arbres són reemplaçats, als cims carstificats, per formacions arbustives molt riques en espècies endèmiques, on hi predominen els pulvínuls espinosos del *Teucrietum subspinosi*: el denominat "pis culminal baleàric".

Les terres de cultiu queden restringides als afloraments no carstificables (principalment les margues triàsiques i cretàciques), encara que també hi destaquen les espectaculars extensions de marges de pedra seca que cobreixen els vessants calcaris per tal de facilitar el cultiu de l'olivera. Degut a la presència d'extensos camps de lapiaz a la Serra de Tramuntana, l'explotació agrícola d'aquests paratges càrstics resulta minimitzada per la manca de terres cultivables. Per aquesta raó, les principals activitats humanes primàries han estat històricament la ramaderia extensiva d'ovelles i cabres, combinada amb la crema periòdica dels arbustos per tal de promoure la renovació de les pastures (GINÉS, 1999b).

Formes elementals de lapiaz a la Serra de Tramuntana

Les morfologies de lapiaz són sens dubte les formes exocàrstiques més cridaneres i ubiqües a la Serra de Tramuntana mallorquina (GINÉS & GINÉS, 1995). Particularment, les calcàries que afloren en la meitat nord-oriental de l'àrea (entre les poblacions de Sóller i Pollença) constitueixen grans extensions de roques nues (Figura 4) en les quals s'estenen espectaculars camps de lapiaz de manera continua al llarg de bastants km². Aquestes àrees de lapiaz mostren els seus millors exemples a altituds moderades (entre 200 i 600 m snm), on donen lloc freqüentment a terrenys gairebé intransitables –localment coneguts com a *esquetjars* o *rellars*– esculpits en forma de crestes agudes i pinacles separats entre sí per esclatxes profundes. El ventall de micro i meso-formes és remarcable (BÄR, 1989; BÄR *et al.*, 1986; GINÉS, 1990a, 1998; GINÉS & GINÉS, 2009), moltes de les quals han atret l'atenció dels investigadors durant les darreres dècades, tal i com s'anirà veient a continuació.

ESTRIES DE DISSOLUCIÓ I ALTRES FORMES RELACIONADES

Començant per la més simple i conspícua morfologia de dissolució, sens dubte és el *rillenkarren* la microforma de lapiaz més investigada a les muntanyes de Mallorca, essent pràcticament ubiqüa en tota l'àrea (Figura 5). No obstant això, aquesta forma de lapiaz –tal i com ha estat definida per GINÉS (1996b, 2009)– té a la Serra de Tramuntana un clar límit altitudinal que se situa al voltant dels 800 m snm. El *rillenkarren* consisteix en conjunts d'estries o petits canals rectilinis, d'amplada centimètrica, que esculpeixen les crestes dels afloraments de roca nua. Una gran quantitat de publicacions s'han ocupat de la morfometria de les estries de dissolució en aquesta



Figura 4: Aspecte típic dels extensos camps de lapiaz existents en la part central de la Serra de Tramuntana. La dolina que apareix a la part inferior de la imatge és el Clot de l'Infern, situat a prop del Torrent de Pareis, al municipi d'Escorca.

Figure 4: Typical appearance of extensive karrenfields in the heart of Serra de Tramuntana. The doline at the bottom of the image is named Clot de l'Infern, being located near Torrent de Pareis, at Escorca municipality.



Figura 5: Estries de lapiaz (*rillenkarren*) ben desenvolupades sobre calcàries del Miocè inferior, a la localitat de mitjana muntanya de Mortitx (Escorca).

Figure 5: Well developed rillenkarren features in Lower Miocene rocks at the mid-mountain site of Mortitx (Escorca).

regió (BORDOY & GINÉS, 1990; CROWTHER, 1998; GINÉS, 1990a, 1996b, 1999a; MOTTERSHEAD, 1996; LUNDBERG & GINÉS, 2009), aportant abundants dades que permeten establir límits de referència pel que fa a la mida d'aquesta forma de lapiaz. Les mitjanes dels paràmetres morfomètrics establerts per aquests autors per al *rillenkarren* de diverses localitats de la serra són les següents: l'amplada oscil·la entre 1,4 i 2,1 cm, la seva llargada es mou entre 12 i 50 cm, mentre que la fondària de les estries se situa entre els 2,8 i 6,3 mm.

Alguns dels paràmetres esmentats més a dalt es mostren fortament dependents en relació a una variable molt simple: l'altitud, i la corresponent gradació climàtica que se'n deriva. Així, tant la llargada com la fondària del *rillenkarren* presenten una clara correlació negativa amb l'altitud (Figura 6), essent les estries de dissolució més curtes i menys profundes segons ens apropem al límit altitudinal dels boscos. Per altra banda, l'amplada és el paràmetre més estable (GINÉS, 1996b; LUNDBERG & GINÉS, 2009) donat que es mostra independent de l'altitud. És convenient mencionar, no obstant això, l'existència d'estries de dissolució més amples (de 2,5 a 4 cm) que el típic *rillenkarren*, les quals queden restringides als pics més alts de la serra, sempre a elevacions superiors als 800 m. Aquestes morfologies han estat interpretades com a estries de decantació (*decantation flutes*) relacionades amb les precipitacions de neu (GINÉS, 1996b), que òbviament foren més freqüents durant els esdeveniments freds del Pleistocè. En aquest treball també es fa referència a estries amples (amplada mitjana al voltant dels 2,5 cm) que es donen en condicions ambientals particulars, corresponents a boscos clarejats que presenten una coberta parcial d'alzines (*Quercus ilex*). En aquest darrer cas, la major mida de les gotes d'aigua ocasionada per la coberta forestal seria responsable d'aquesta anòmala amplada de les estries.

També han estat investigades altres propietats morfològiques i evolutives del *rillenkarren*, en particular a la molt coneguda localitat de Lluc, situada ben al cor de la Serra de Tramuntana (altitud: 520 m snm; precipitacions mitjanes anuals: >1.000 mm). Per exemple, MOTTERSHEAD (1996) estudià les variacions en la secció dels *rillenkarren* al llarg del seu perfil longitudinal, observant una correlació negativa entre la fondària de les estries i l'angle del pendent de les superfícies rocoses. Al mateix temps s'observà que la fondària s'incrementa ràpidament cap a baix a partir de les crestes de la roca –sobretot al llarg del terç superior de l'estria– decreixent després més suaument, mentre que l'amplada es manté constant en tot el perfil longitudinal; aquest fet suggereix que la taxa més elevada d'aprofundiment de l'estria es dona en la seva part superior. Per altra banda, CROWTHER (1998) va reportar una notable asimetria en les seccions transversals del *rillenkarren*, les quals semblen compostes per dues mitges seccions parabòliques independents. L'asimetria observada pot causar una migració lateral dels conjunts de *rillenkarren*, conservant malgrat això la seva forma i dimensions degut a una mena d'equilibri dinàmic.

El coneixement actual del *rillenkarren* a Mallorca posa de manifest que la seva morfometria és un indicador ambiental molt efectiu, que reflecteix de manera fidel gradients climàtics controlats per un factor merament

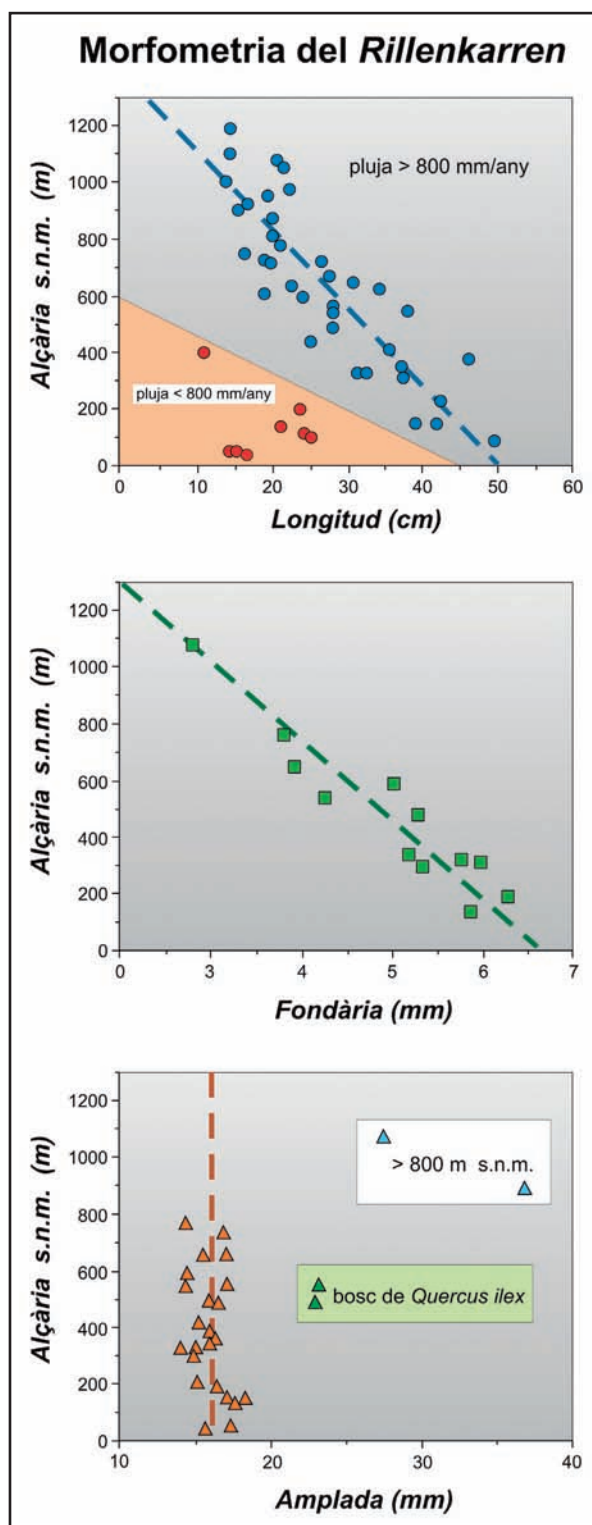


Figura 6: Paràmetres morfomètrics del *rillenkarren* a la Serra de Tramuntana, representats en relació amb l'altitud de les localitats mostrejades. Longitud: valors mitjans de les 10 estries més llargues a les 45 localitats mostrejades. Fondària: valors mitjans a 14 localitats diferents (n=100 estries/localitat). Amplada: valors mitjans a 26 localitats diferents (n=100 estries/localitat).

Figure 6: Morphometric parameters of *rillenkarren* in Serra de Tramuntana plotted against elevation of the sampled localities. Length: average values of the 10 longest flutes in 45 measured sites. Depth: average values from 14 different localities (n=100 flutes/site). Width: average values from 26 different localities (n=100 flutes/site).

altitudinal: l'increment de precipitacions i, molt especialment, la davallada de temperatura lligats a l'augment de l'alçària de la localitat sobre el nivell del mar (GINÉS, 1990a, 1996b, 1999a; LUNDBERG & GINÉS, 2009).

Un aspecte addicional interessant del *rillenkarren* és la participació de processos biocàrstics en el desenvolupament d'aquestes formes elementals. En aquest sentit, FIOU *et al.* (1992, 1996) demostraren que la desagregació mecànica de petites partícules de roca calcària, arrencades per l'impacte de les gotes de pluja, és un procés eficient que afecta el creixement del *rillenkarren*. Aquest mecanisme de meteorització resulta fortament afavorit per la presència d'algues que colonitzen —com a organismes endolífics— les superfícies rocoses, produint l'afebliment subseqüent de la seva estructura cristal·lina.

CANALS DE DISSOLUCIÓ I FORMES ASSOCIADES

Els canals de dissolució de diversos tipus i dimensions —generats pel flux de l'aigua sobre les superfícies calcàries, i de mida decimètrica a mètrica— són comuns allà on el lapiaz descobert configura el paisatge. La seva morfologia està fortament controlada per alguns efectes topogràfics a mitjana escala, com per exemple el pendent de les superfícies rocoses. Les morfologies més comunes són els canals que mostren seccions transversals en forma d'embut (un tipus de *rinnenkarren*), incisos en major o menor mesura en els flancs de formes majors de lapiaz com són els pinacles (Figura 7).

A la serra, els canals de dissolució que presenten un pendent superior als 35° al llarg del seu perfil longitudinal són els més comuns, assolint normalment alguns metres de llargària i fins a 0,5 m de fondària. Els *rinnenkarren* d'aquestes característiques tenen el perfil longitudinal interromput freqüentment per segments de pendent més suau (entre 5° i 20°) que poden tenir fins a 1 m² d'extensió, encara que el seu desenvolupament

en planta és relativament rectilini. Aquestes àrees més planeres dins el perfil dels canals s'assemblen bastant als *trittkarren* tal i com estan definits a la bibliografia germànica (BÄR *et al.*, 1986); no obstant això, alguns autors prefereixen parlar simplement d'esglaons o plans esglaonats, distribuïts al llarg del perfil longitudinal dels *rinnenkarren* (CROWTHER, 1997). En aquesta publicació se suggereix que petits esglaonaments evolucionen aleatòriament a partir d'irregularitats menors de les superfícies rocoses, degut a la dissolució més lenta que té lloc als segments horitzontals en comparació amb el major rebaixament que es dona als trams de major pendent. Aquest comportament és atribuït a la major gruixa de la làmina d'aigua que flueix per sobre dels esglaons horitzontals, fet que propicia un rebaixament més lent en comparació amb les parets subverticals dels canals, on la gruixa de la làmina d'aigua és menor i la dissolució més eficient.

Quan els pendents de les superfícies rocoses són menors de 30° els *rinnenkarren* estan també presents, però associats amb un increment en la sinuositat dels canals. En aquest sentit, HUTCHINSON (1996) va observar increments de 0,3 als índex de sinuositat per cada 5° de disminució del pendent dels canals; així, valors de sinuositat propers a 1,0 corresponen a canals de pendent elevada (>35°), donant-se valors al voltant d'1,5 en els *rinnenkarren* de pendents més suaus (~25°). En àrees encara més planes, HUTCHINSON (1996) descriu autèntics *mäanderkarren* en superfícies rocoses amb un pendent entre 7° i 14°.

En la gran majoria dels casos, els *rinnenkarren* observables avui en dia deriven de formes anteriors que s'iniciaren i evolucionaren parcialment sota una coberta de sòl. Aquest fet és generalitzable a l'evolució de la gran majoria de camps de lapiaz de la Serra de Tramuntana (GINÉS, 1990a, 1995; GINÉS & GINÉS, 1995, 2009), tal i com es veurà més endavant. En algunes localitats particulars (per exemple, a prop de les Basses



Figura 7: Típic paisatge càrstic de la Serra de Tramuntana (Muntanya, Escorca), que popularment és designat sota el terme d'esquetjar o rellar. Aquesta agrupació característica de formes de lapiaz és una combinació de *rillenkarren*, *trittkarren*, *rinnenkarren* i *regenrinnenkarren*, esculpides als flancs de pinacles (*spitzkarren*) que emergeixen per damunt d'un bosc clarejat d'alzines. L'altitud d'aquesta localitat és de 550 m snm, i les precipitacions ultrapassen els 1.000 mm/any.

Figure 7: Typical karst landscape in Serra de Tramuntana (Muntanya, Escorca), popularly designated as esquetjar or rellar. This characteristic karren assemblage is a combination of *rillenkarren*, *trittkarren*, *rinnenkarren* and *regenrinnenkarren* features, sculpturing the ridges of pinnacles (*spitzkarren*) which emerge over a cleared holm-oak forest. Elevation of this site is 550 m a.s.l., and rainfall values surpass 1,000 mm/yr.



Figura 8: Famos pinacle de lapiaz conegut popularment com Es Camell, localitzat a les rodalies del santuari de Lluc (Escorca). Les roques calcàries són del Miocè inferior.

Figure 8: Famous camel-like pinnacle –popularly known as Es Camell– existing in the karrenfields at the surroundings of Lluc monastery (Escorca). Carbonate rocks are Lower Miocene in age.

de Mortitx, Escorca) s'observen canals de morfologia completament arrodonida (*rundkarren*) separats per crestes arrodonides de mida mètrica, que gairebé no presenten la superposició de formes de lapiaz descobert tals com els *rillenkarren*. Finalment, cal assenyalar que les parets dels grans pinacles de lapiaz, i les esclatxes que els separen (*grikes*), estan intensament esculpides per diversos tipus de canals verticals i estries amples, tals com els *regenrinnenkarren* (estries de dissolució de segon ordre, segons BÖGLI, 1980) i els *wandkarren*; aquestes formes contribueixen de manera destacable a la individualització de grans piràmides o pinacles de lapiaz (*spitzkarren*).

En general, els canals estan ben desenvolupats a alçàries compreses entre els 200 i els 800 m snm, on es localitzen les millors localitats de lapiaz de la serra. A majors altituds, algunes localitats (per exemple al massís del Massanella) mostren *rinnenkarren* i *mäanderkarren*, que es desenvolupen pobrament sobre superfícies no gaire inclinades i en relació amb la fusió d'acumulacions locals de neu.

PINACLES, ESCLETXES I CAMPS DE LAPIAZ

Fora de tot dubte, els exemples de lapiaz més espectaculars de Mallorca es donen en les elevacions calcàries del municipi d'Escorca, a la part central de la Serra de Tramuntana (GINÉS, 1998; GINÉS & GINÉS, 2009). En aquesta àrea, els camps de lapiaz constitueixen paratges gairebé intransitables degut a que el desenvolupament d'un impressionant paisatge de pinacles rocosos o *spitzkarren* és la característica dominant (Figura 8). Algunes localitats destacables són, per exemple, la zona entre el santuari de Lluc i la possessió de Menut (dins un ambient d'alzinar clarejat) o d'altres indrets com Mortitx o sa Calobra (en condicions més aviat desforestades). Les localitats esmentades es localitzen sempre per davall dels 700 m snm, desenvolupant-se preferentment en els conglomerats i calcàries grolles del Miocè inferior.



Figura 9: Espectaculars canals verticals de dissolució en les calcàries juràsiques del massís d'Es Castellots (Escorca). L'altitud d'aquesta localitat és d'uns 500 m snm.

Figure 9: Spectacular vertical runnels in Jurassic limestones from Es Castellots massif (Escorca). Elevation of this locality is around 500 m a.s.l.

Les morfologies de dissolució que configuren aquests camps de lapiaz consisteixen en grans pinacles rocosos piramidals –freqüentment de més de 100 m² de superfície i més de 5 m d'alçada– separats per esclatxes profundes, o *grikes*, les parets de les quals estan esculpides per abundants canals verticals (Figura 9). Els flancs dels pinacles estan modelats per grans canals esglaonats, com els descrits a l'apartat anterior. En detall, les crestes dels pinacles (i les crestes rocoses en general) exhibeixen un extensiu modelat a petita escala on predominen els *rillenkarren* ben esmolats, que contribueixen a crear ambients extremadament agrests i inhòspits. L'eficiència hidrològica dels camps de lapiaz d'aquestes característiques és notable, ja que les precipitacions són infiltrades gairebé totalment mitjançant fissures eixamplades per dissolució (*grikes* o *kluftkarren*). El paratge conegut com Sa Mitjania –també al municipi d'Escorca– és un exemple típic de territori amb una escorrentia superficial minimitzada per mor del desenvolupament del lapiaz, que està representat per grans pinacles modelats per formes menors de dissolució i separats entre sí per dolines, esclatxes o *grikes*, i fins i tot avencs profunds (GINÉS, 1990b). Un recent treball sobre la morfometria dels pinacles de Sa Mitjania (GINÉS

et al., 2010) ha permès descriure amb criteris estadístics les seves característiques i ha fet palesa l'existència de grans pinacles, o *penyals*, que assoleixen superfícies superiors als 300 m² i altures per sobre dels 10 m.

D'altra banda, les morfologies individuals que conformen les extensions de pinacles de la Serra de Tramuntana mostren evidències clares de dissolució subedàfica (Figura 10), la qual va tenir lloc durant els estadis inicials de l'evolució d'aquests camps de lapiaz (GINÉS, 1990a, 1995, 1998; GINÉS & GINÉS, 2009). Aquesta herència subedàfica –corresponent al que també es denomina com a lapiaz subcutani o criptolapiaz– és ben evident en observar l'aparença arrodonida de les crestes que formen els pinacles emergents i, fins i tot, l'aspecte rodonenc i suauitzat de la majoria dels *rinnenkarren*. El modelat subcutani recent és encara observable al fons de les esclotxes que separen els pinacles. Aquestes herències subedàfiques resulten progressivament emmascarades, i en alguns casos s'esvaeixen gairebé del tot, en sobreimposar-se d'altres formes de dissolució pròpies de superfícies rocoses nues (*rainpits*, *kamenitzas*, *rillenkarren*, *rinnenkarren*...) tal i com ha estat descrit a la localitat de Son Marc –entre Lluc i Pollença– per part de SMART & WHITAKER (1996).



Figura 10: Formes de lapiaz remarcablement arrodonides i suaus (*rundkarren*) observables en roques del Miocè inferior a Ses Basses de Mortitx (Escorca).

Figure 10: Clearly smoothed and rounded karren features (*rundkarren*) observable in Lower Miocene rocks at Ses Basses de Mortitx (Escorca).

ALTRES FORMES MENORS DE LAPIAZ

Les formes no lineals de lapiaz estan representades per una àmplia varietat de tipologies, la distribució de les quals presenta patrons ben diferents als descrits fins ara. Per exemple, mentre la distribució geogràfica dels cocons de dissolució (*kamenitzas*) es caracteritza per la seva ubiqüitat en els afloraments rocosos relativament plans, els pouets o *rainpits* tenen una presència restringida als punts més àrids de la Serra de Tramuntana (GINÉS, 1999a; GINÉS & LUNDBERG, 2009). Concretament, els pouets centimètrics de dissolució són abundants a la perifèria de la serra (GINÉS & GINÉS, 2009), és a dir a les àrees situades a baixes altituds (<200 m snm; precipitacions anuals <700 mm) i, en particular, als seus extrems SW i NE, com és el cas del famós paratge turístic de Formentor.

Una altra microforma de lapiaz relacionada en certa mesura amb localitats àrides són els microcanals (*rillensteine* o *microrills*). Aquests canals molt fins, d'ordre mil·limètric, s'observen abundantment als extrems més secs de la serra, sovint relacionats amb l'esprai marí projectat durant les grans tempestes. No obstant això, els microcanals de dissolució (GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS, 2009) també estan presents en condicions de major humitat (camps de lapiaz situats entre 500 i 800 m snm), emperò associats amb aportaments hídrics en forma de rosada. A altituds majors, la forta colonització per líquens pot impedir la generació de microformes de lapiaz com són els microcanals (*rillensteine*), o fins i tot estries de major mida com el *rillenkarren* (GINÉS, 1999a). Als cims més elevats, les superfícies rocoses molt inclinades o subverticals apareixen esculpides per formes transversals al flux de l'aigua (*transversal cockling patterns*), que consisteixen en patrons ondulants que resemblessen els *ripples*. Aquestes darreres morfologies es localitzen per damunt dels 1.000 m, amb precipitacions mitjanes anuals que superen els 1.000 mm i inclouen nevades ocasionals.

Un aspecte interessant està relacionat amb la rugositat de les superfícies de roca, un tema que fou investigat en detall per CROWTHER (1996, 1997). Aquest autor mesurà –amb una resolució aproximada d'1 mm– el que anomenava *Mean Gradient Change* (canvi mitjà del gradient) de les superfícies rocoses, trobant els valors menors de rugositat (MGC = 6°) en les mor-

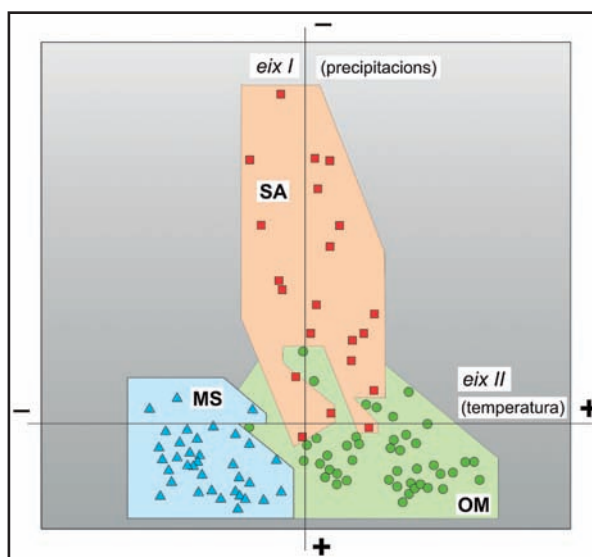


Figura 11: Resultats de l'anàlisi geoecològic factorial de les agrupacions de lapiaz de la Serra de Tramuntana, realitzat utilitzant 20 descriptors morfològics dels tipus de lapiaz, així com les espècies vegetals característiques, a 100 localitats mostrejades.

Les agrupacions que s'han pogut distingir són: **OM**: lapiaz mediterrani de mitjana muntanya; **MS**: lapiaz de la zona de cims; **SA**: lapiaz d'ambients semiàrids.

Figure 11: Results of the geo-ecological factorial analysis of karren assemblages, performed using 20 morphological karren-descriptors as well as the characteristic plant species from 100 sampled sites.

The distinguished assemblages are: **OM**: optimum Mediterranean mid-mountain karren; **MS**: mountain summits karren; **SA**: semi-arid karren.

Figura 12: Agrupació de formes de lapiaz pròpia dels cims més elevats de les muntanyes mallorquines (>800 m snm). En localitats com el Puig de Massanella (Escorca) les morfologies predominants corresponen a un tipus d'estries de lapiaz (*decantation flutes*) més amples que el *rillenkarren*, així com a esclètxes eixamplades per dissolució (*kluftkarren*).



Figure 12: Typical karren assemblage of the highest summits of Mallorcan mountains (>800 m a.s.l.). At localities such as Puig de Massanella (Escorca) the predominant forms are a type of solution flute wider than *rillenkarren* (similar in some cases to *decantation flutes*) as well as *kluftkarren*.

fologies suaus com els esglaons plans (*trittkarren*) que apareixen dins dels grans *rinnenkarren*. Per altra banda, la major rugositat es dona en les formes de *rillenkarren* i *rinnenkarren*, amb valors de MGC de 8,8° i 11° respectivament; aquests valors elevats són atribuïts al flux turbulent propi dels canals i estries de dissolució, en comparació amb el flux laminar que té lloc als pendents més planers. Finalment, superfícies fortament corroïdes i caracteritzades per una microtopografia molt aspra poden ser observades a les parts més àrides de la serra, juntament amb abundants pouets (*rainpits*). En alguns indrets, aquestes superfícies de forta aspror apareixen a la zona supralitoral, associades a l'esprai marí. No hi ha moltes dades disponibles sobre la rugositat en aquests ambients costaners específics, de notable aridesa, però CROWTHER (1996) fa referència a valors alts de MGC (entre 15° i 25°) en el lapiaz supralitoral de la costa oriental de l'illa.

Les agrupacions de formes i el seu significat geoecològic

L'observació dels paisatges càrstics de l'àrea estudiada permet reconèixer diverses agrupacions particulars de formes de lapiaz, la distribució de les quals exhibeix marcades regularitats (GINÉS, 1990a). Per exemple, ja ha estat assenyalat a l'abundant bibliografia existent que les morfologies de dissolució dels cims més alts de la serra són bastant diferents d'aquelles que es donen a elevacions menors, on s'assoleixen fins i tot condicions climàtiques semiàrides. En aquest sentit, qualsevol recorregut al llarg de la serra ens mostra que els camps de lapiaz millor desenvolupats es troben, en el cas de Mallorca, en unes condicions ambientals espe-

cífiques: precipitacions >800 mm/any, altitud compresa entre 200 i 700 m snm, així com d'altres factors com per exemple la presència de litologies adequades.

Una primera aproximació dirigida a definir les agrupacions de formes de lapiaz observables a la Serra de Tramuntana fou establerta per GINÉS (1996a, 1999a). L'esmentat autor va mostrejar 100 localitats, al llarg de tota la serra, utilitzant un mètode semiquantitatiu que té en consideració tant l'abundància de 20 tipus elementals de lapiaz com les espècies vegetals característiques trobades a cada localitat. Els descriptors de vegetació es varen basar en la presència/absència d'algunes espècies, considerades com a bons indicadors de la variabilitat ambiental. Les dades foren tractades mitjançant anàlisi factorial de components principals (Figura 11), i els resultats obtinguts donen suport a la distinció de les tres agrupacions principals de formes de lapiaz que es descriuen a continuació:

- 1- *Lapiaz d'ambient semiàrid*, caracteritzat per la presència de pouets de dissolució (*rainpits*), microcanals (*rillensteine*) i superfícies corroïdes irregularment; correspon a localitats que es troben als vessants exposats al sud, tot al voltant de la perifèria de la serra (normalment <200 m snm), on les precipitacions no assoleixen els 800 mm/any i les associacions de plantes xèriques són dominants.
- 2- *Lapiaz mediterrani de mitjana muntanya*, que destaca per les llargues estries i els abundants canals de dissolució (*rillenkarren* i *rinnenkarren*), juntament amb d'altres tipologies com són els *trittkarren*, *regenrinnenkarren*, etc; totes elles integrades en un espectacular lapiaz de pinacles o *spitzkarren* (Figura 7). Aquesta agrupació se situa a localitats de mitjana muntanya (200 a 800 m snm) amb precipitacions que oscil·len al voltant dels 800 a 1.000 mm/any, principalment en exposicions al sud i associada en bastants casos a boscos clarejats d'alzines.

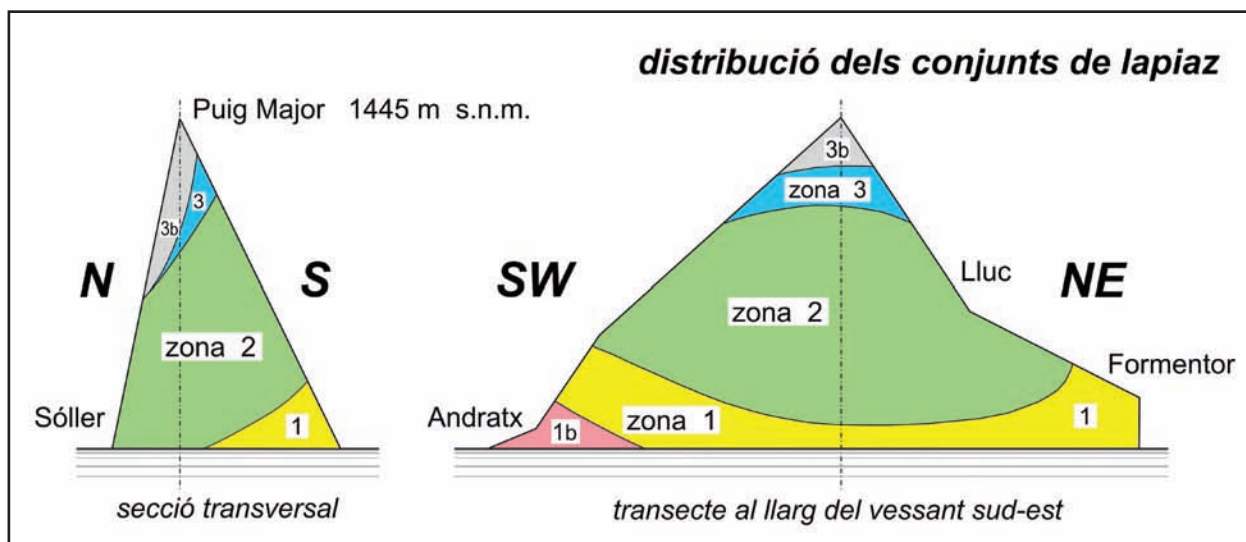


Figura 13: Distribució de les agrupacions de formes de lapiaz, representada sobre dos perfils idealitzats de la Serra de Tramuntana. 1: lapiaz semiàrid. 2: lapiaz mediterrani de mitjana muntanya. 3: lapiaz dels cims de les muntanyes. 1b: lapiaz biocàrstic semiàrid. 3b: lapiaz biocàrstic de muntanya humida.

Figure 13: Distribution of the existing karren assemblages, shown on two idealized profiles of Serra de Tramuntana.

1: semi-arid karren. 2: optimum Mediterranean mid-mountain karren. 3: mountain summits karren. 1b: semi-arid biokarstic karren. 3b: wet mountain biokarstic karren.

3- *Lapiaz de la zona culminal*, ben representat als cims de la serra (>800 m snm en exposicions nord, i >1.100 m en vessants orientades al sud), on les precipitacions assoleixen valors superiors als 1.000 mm/any incloent-hi algunes nevades hivernals. Aquesta agrupació està definida per la dominància d'estries de decantació (més amples que el *rillenkarren* típic), esclatxes eixamplades per dissolució (*kluftkarren*), formes transversal ondulants (*cockling patterns*), juntament amb uns pocs canals i exemplars de *mäanderkarren* (Figura 12). Des del punt de vista de la vegetació, aquesta agrupació de formes apareix lligada a una peculiar formació arbustiva: el que s'anomena "pis culminal balearic".

Les agrupacions enumerades més a dalt es complementen amb dues associacions relacionades amb la variabilitat climàtica a petita escala lligada, per exemple, a diferències de temperatura i humitat entre vessants solejats i ombrejats, o a la disponibilitat de superfícies rocoses que puguin ser colonitzades pels líquens. Per tant, cal distingir dues agrupacions addicionals de formes de lapiaz caracteritzades per la meteorització biocàrstica:

- 1b- *Lapiaz biocàrstic semiàrid*, present a localitats amb precipitacions anuals inferiors als 800 mm, on mostra formes de dissolució pobrament desenvolupades i superfícies de roca colonitzades de manera extensiva per líquens xèrics, tal i com succeeix a l'àrea d'Andratx en l'extrem SW de la serra.
- 3b- *Lapiaz biocàrstic de muntanya humida*, restringit als vessants humits i ombrejats, exposats al nord, dels cims més alts de la serra (precipitacions >800 mm/any), indrets on té lloc una intensa colonització de líquens.

La distribució espacial d'aquestes cinc agrupacions de formes de lapiaz està representada a la Figura 13 utilitzant dues seccions idealitzades de la Serra de Tramuntana. Aquest diagrama ens mostra com la localització dels camps de lapiaz més espectaculars (2) correspon a les zones de la serra d'altitud mitjana; també sembla evident que els gradients climàtics relacionats amb el relleu topogràfic estan controlant la distribució de les altres agrupacions de formes de lapiaz, tant al voltant de la perifèria de l'àrea (1, 1b) com als cims més elevats de la cadena muntanyosa (3, 3b).

Evolució dels camps de lapiaz de la Serra de Tramuntana

En descriure les diferents formes de dissolució representades a la Serra de Tramuntana, s'ha emfatitzat diverses vegades l'origen subedàfic de la major part dels camps de lapiaz. Aquest fet és inqüestionable en la pràctica totalitat de les situacions ambientals que es poden distingir a la serra; essent evident l'existència d'un primer estadi morfogenètic caracteritzat per un important desenvolupament de les formes de lapiaz subcutani, que s'haurien generat sota una pretèrita coberta vegetal adaptada a les condicions climàtiques regionals i locals (GINÉS, 1998, 1999a; GINÉS & GINÉS, 2009). Una fase subsegüent consistiria en l'exhumació progressiva de les morfologies de criptolapiaz, generades prèviament, com a resultat d'un balanç negatiu entre la generació i la pèrdua de sòl (GINÉS, 1995); aquest segon estadi inclou la sobreimposició d'una gran varietat de formes de dissolució desenvolupades sobre la roca nua (*rillenkarren*, *rainpits*, *kamenitzas*...).

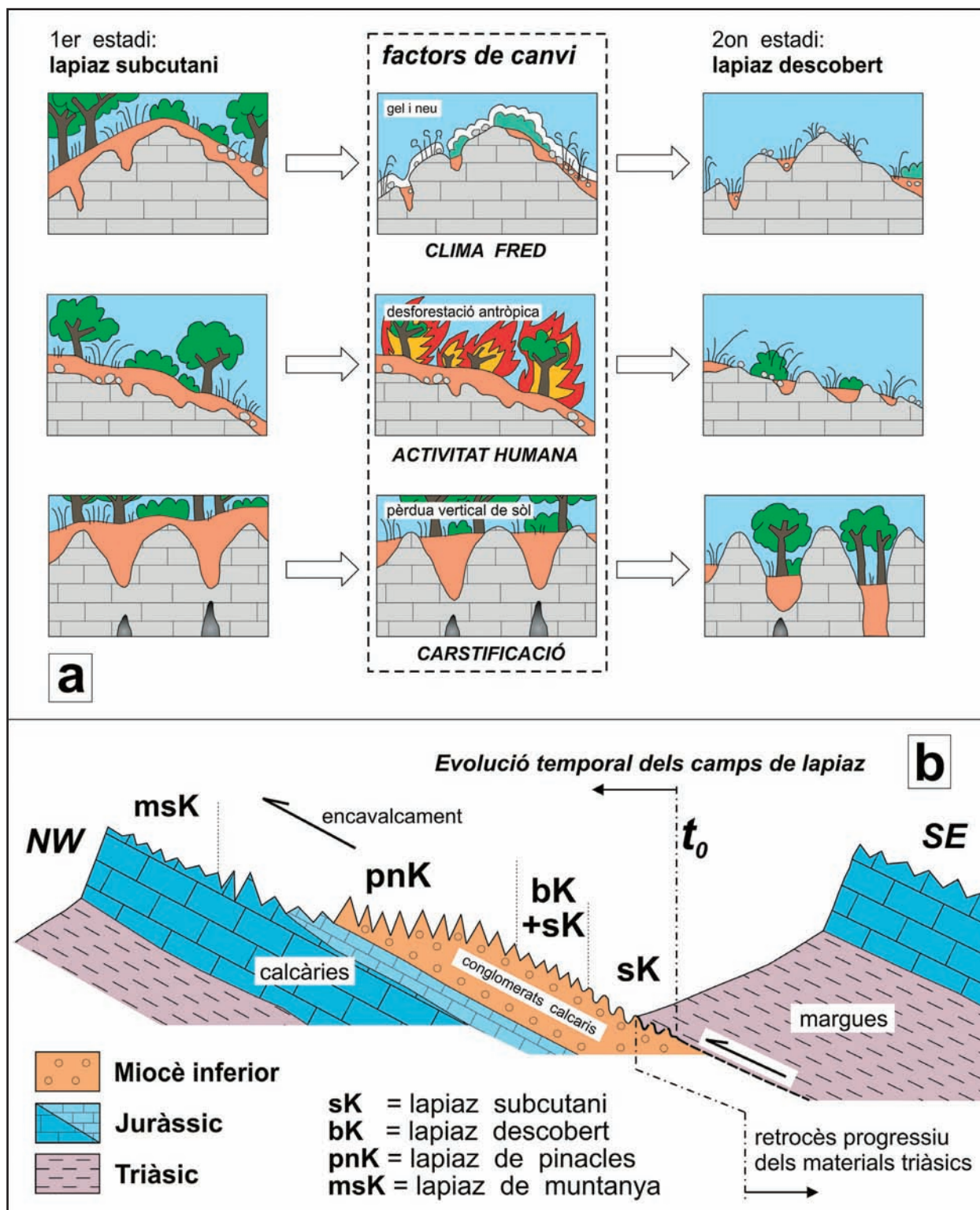


Figura 14: Patrons observats en l'evolució dels camps de lapiaz de la Serra de Tramuntana.

a: model evolutiu, en dos estadis, del desenvolupament dels camps de lapiaz i possibles factors responsables dels processos de desforestació i pèrdua de sòl.

b: distribució de les formes de lapiaz en relació amb l'erosió dels materials no carstificables del Triàsic, disposats per sobre de les calcàries en els fronts de les principals làmines encavalcants.

Figure 14: Patterns observed in the evolution of Serra de Tramuntana karrenfields.

a: two-stage model of karren development and possible factors responsible for deforestation and soil loss processes.

b: karren features distribution related to the retreat of Triassic non-karstifiable materials from above the limestone, occurring at the front of main thrust sheets.



Figura 15: Evolució dels camps de lapiaz associats als fronts de les estructures de làmines en-cavalcants. Ambdues imatges corresponen a la Coma de ses Truges (Escorca).

a: pinacles desenvolupats en roques del Miocè Inferior (costat esquerre de la foto) que emergeixen progressivament a mesura que augmenta la distància en relació al contacte amb els materials margosos suprajacents del Triàsic (vessants amb carritxeres al costat dret de la foto).

b: detall del paisatge de pinacles (*spitzkarren*), corresponent al quadrat vermell de la foto superior.

Figure 15: Karrenfield evolution associated with the fronts of thrust sheet structures. Both images are from Coma de ses Truges (Escorca).

a: pinnacle features in Lower Miocene rocks (left side of the photo) progressively emerging with increasing distance from the contact with overlying Triassic marly materials (grassy slopes at the right side of the image).

b: detail of the resulting spitzkarren landscape (red square in the upper photo).

SMART & WHITAKER (1996) empraren aquest tipus d'aproximació en estudiar les agrupacions de lapiaz existents a diferents elevacions sobre el fons de la vall de Son Marc, a prop de Pollença. En aquesta localitat, el desenvolupament de l'exocarst està caracteritzat pel rebaixament diferencial de les superfícies rocoses cobertes de sòl, el qual té lloc preferentment al llarg de diaclasis subverticals que separen les crestes rocoses allargades que emergeixen per sobre dels materials edàfics. Les pèrdues de sòl lligades a la incisió dels petits cursos hídrics superficials ocasionen l'exhumació gradual de les superfícies rocoses, amb la formació d'incipients estries (*rillenkarren*) i cocons de dissolució (*kamenitzas*). Posteriorment, els canals de major mida (*rinnenkarren*) es van desenvolupant de manera progressiva als flancs rocosos inclinats o subverticals, al mateix temps que es crea un relleu ben diferenciat entre les crestes rocoses i les es-cletxes (*grikes*) on s'acumulen els materials edàfics.

En relació amb aquest model evolutiu dels camps de lapiaz, que contempla dos estadis consecutius (dissolució subcutània inicial seguida per la sobreimposició de formes de lapiaz descobert), el problema principal consisteix en deduir els factors responsables del balanç negatiu del sistema edàfic, el qual ocasiona l'exhumació continuada de les formes de criptolapiaz prèviament generades. GINÉS (1995) proposà tres causes distintes –però no excloents entre elles– que poden produir camps de lapiaz complexos, els quals comencen la seva gènesi a partir de morfologies de lapiaz subcutani o criptolapiaz, que evolucionen gradualment cap a les grans extensions de roca nua presents avui en dia a la Serra de Tramuntana (Figura 14a). Els mecanismes proposats són:

- Els períodes freds del Pleistocè podrien haver propiciat la degradació de les comunitats vegetals existents, al temps que resultava també severament da-

nyada la cobertura edàfica. El reemplaçament dels boscos per comunitats arbustives i herbàcies varen estimular la degradació natural del perfil dels sòls, en particular a les parts més elevades de la serra.

- L'activitat humana durant els darrers cinc mil·lennis ha contribuït sens dubte a la regressió dels boscos d'alzines i de pins a l'illa. La pràctica tradicional de prendre foc als arbustos, per tal de renovar les pastures per a la ramaderia extensiva, ha estat una causa històrica molt important pel que fa a la reducció de la coberta vegetal en el carst de Mallorca.
- Els espectaculars paisatges de pinacles de la part central de la Serra de Tramuntana, es poden interpretar com a resultat d'un mecanisme de "subsidiència" de la coberta edàfica i del mantell forestal en el seu conjunt, sense que aquest procés es pugui qualificar d'autèntica desforestació. Més aviat es tractaria d'una tendència general de subsidiència del bosc promoguda pel mateix procés de carstificació, el qual produiria importants pèrdues verticals de sòl a través del propi massís càrstic. D'aquesta manera, el descens simultani del sòl i de la coberta vegetal hauria estat el causant de la progressiva elevació dels pinacles de lapiaz per damunt del nivell ocupat per l'estrat arbori. En relació amb aquest darrer punt cal assenyalar que els abundants residus insolubles, que es deriven de la meteorització dels materials margosos i argilosos del Triàsic superior, juguen un important paper subministrant material de partida per a l'evolució subedàfica dels camps de lapiaz durant el primer estadi de la seva formació (Figura 15). El retrocés de les capes del Triàsic superior –que freqüentment encavalquen les calcàries del Juràssic i/o del Miocè inferior– permet l'exhumació progressiva de les formes subcutànies de dissolució i la sobreimposició de morfologies característiques del lapiaz descobert. El final d'aquesta seqüència evolutiva correspon als camps de lapiaz de pinacles que se situen a les àrees més allunyades de la coberta Triàsica, els quals romanen exposats des de fa més temps a les condicions de dissolució superficial subaèria (Figura 14b).

Conclusions

Les Illes Balears constitueixen un arxipèlag ben representatiu dels bioclims mediterranis, on abunden les litologies carbonàtiques amb tot el ventall de formes de superfície pròpies del modelat càrstic: morfologies de lapiaz, dolines i depressions en general, canyons fluvio-càrstics, etc.

Més concretament, l'exocarst és un element primordial del paisatge en el cas de l'illa de Mallorca, que inclou una important alineació muntanyosa de mitjana altitud –la Serra de Tramuntana– realment notable pels seus espectaculars paisatges càrstics. Les calcàries del Juràssic i del Miocè inferior, plegades durant l'orogènia alpina, han experimentat un intens modelat exocàrstic que ha donat lloc a extensos camps de lapiaz (els *esquetjars* o *rellars*) caracteritzats per una gran riquesa en micro i mesoformes de dissolució. La distribució i morfometria dels dife-

rents tipus de lapiaz està controlada pels gradients climàtics que existeixen a la serra, els quals estan lligats al seu torn amb l'altitud, ja que les roques calcàries es disposen des del nivell marí fins a 1.445 m d'alçària. La incidència del biocarst és remarcable, sobretot en algunes situacions ecològiques específiques: la perifèria semiàrida de la serra i, particularment, els vessants exposats al nord de les muntanyes més elevades. Els camps de lapiaz actuals han evolucionat a partir de morfologies originades sota coberta edàfica, essent més tard exhumats mitjançant diversos processos de desforestació i pèrdua de sòl, fins a originar els espectaculars paisatges de pinacles de lapiaz característics de la part central de la serralada.

La Serra de Tramuntana és una excel·lent localitat per a la investigació del lapiaz de les latituds mitjanes, gràcies a la gran varietat de condicions ambientals que es donen, així com a l'important –encara que relativament recent– impacte humà a la nostra illa.

Bibliografia

- BÄR, W.F. (1989): Atlas Internacional del Karst. Hoja 5: Lluc / Sierra Norte (Mallorca). *Endins*, 14-15: 27-42. Palma.
- BÄR, W.F.; FUCHS, F. & NAGEL, G. (1986): Lluc / Sierra Norte (Mallorca) - Karst einer mediterranen Insel mit alpidischer Struktur (UIS International Atlas of Karst Phenomena, sheet 5). *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Suppl. 59: 27-48. Berlin.
- BÖGLI, A. (1976): Die wichtigsten Karrenformen der Kalkalpen. In: Gams, I. (ed.) *Karst processes and relevant landforms*. International Speleological Union, Symposium on karst denudation. 141-149. Ljubljana.
- BÖGLI, A. (1980): *Karst hydrology and physical speleology*. Springer-Verlag. 284 pp. Berlin.
- BORDOY, M. & GINÉS, A. (1990): Observaciones morfométricas sobre la profundidad de estrías de lapiaz (Rillenkarrén) en Mallorca. *Endins*, 16: 21-25. Palma.
- BUEN, O. de (1905): *Excursiones por Mallorca. Indicaciones generales*. Imprenta de Pedro Toll. 39 pàgs. València.
- CROWTHER, J. (1996): Roughness (mm-scale) of limestone surfaces: examples from coastal and sub-aerial karren features in Mallorca. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 149-159. Palma.
- CROWTHER, J. (1997): Surface roughness and the evolution of karren forms at Lluc, Serra de Tramuntana, Mallorca. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 41 (3): 393-407. Berlin.
- CROWTHER, J. (1998): New methodologies for investigating rillenkarrén cross-sections: a case study at Lluc, Mallorca. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 333-344. London.
- DARDER, B. (1930): Algunos fenómenos cársicos en la isla de Mallorca. *Ibérica*, 33 (818): 154-156. Barcelona.
- FALLOT, P. (1922): *Étude géologique de la Sierra de Majorque*. Impr. Béranger. 480 pàgs. París.
- FIOL, L.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (1992): El rillenkarrén: un tipus particular de biocarst? Primeres dades. *Endins*, 17-18: 43-49. Palma.
- FIOL, L.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (1996): Effects of biokarstic processes on the development of solutional rillenkarrén in limestone rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 447-452. London.
- FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (1995): Litologia i tectònica del carst de Mallorca / Lithology and tectonics of the Majorcan karst. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. *Endins*, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 27-43. Palma.

- FRAGA, P.; ESTAÚN, I. & CARDONA, E. eds. (2010): *Basses temporals mediterrànies. LIFE BASSES: gestió i conservació a Menorca*. Institut Menorquí d'Estudis, Col·lecció Recerca, 15. 679 pàgs. Maó.
- GARCÍA-SENZ, J.M. (1985): *Estudio geomorfológico del karst del Migjorn menorquín*. Tesis de Llicenciatura. Departament de Geodinàmica Externa i Hidrogeologia. Universitat Autònoma de Barcelona. 51 pàgs. Inèdit.
- GELABERT, B. (1998): *La estructura geològica de la mitad occidental de la isla de Mallorca*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Col. Memorias. 129 pp. Madrid.
- GINÉS, A. (1990a): Utilización de las morfologías de lapiaz como geoindicadores ecológicos en la Serra de Tramuntana (Mallorca). *Endins*, 16: 27-39. Palma.
- GINÉS, A. (1993): IX. Morfologies exocàrstiques. In: ALCOVER, J.A.; BALLESTEROS, E. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Història Natural de l'arxipèlag de Cabrera*. C.S.I.C. - Editorial Moll. 153-160. Palma de Mallorca.
- GINÉS, A. (1995): Deforestation and karren development in Mallorca, Spain. In: BÁRÁNY-KEVEI, I. (ed.) *Environmental effects on karst terrains*. Special issue of Acta Geographica Szegediensis. Homage to László Jakucs. 25-32. Szeged, Hongria.
- GINÉS, A. (1996a): An environmental approach to the typology of karren landform assemblages in a Mediterranean mid-mountain karst: the Serra de Tramuntana, Mallorca, Spain. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 163-176. Palma.
- GINÉS, A. (1996b): Quantitative data as a base for the morphometrical definition of rillenkarren features found on limestones. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 177-191. Palma.
- GINÉS, A. (1998): L'exocarst de la serra de Tramuntana de Mallorca. In: FORNÓS, J.J. (ed.) *Aspectes geològics de les Balears*. Universitat de les Illes Balears. 361-389. Palma.
- GINÉS, A. (1999a): *Morfología kárstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica*. Unpublished Ph D Thesis. Departament de Biologia Ambiental, Universitat de les Illes Balears. 581 pp + 70 làms. Palma.
- GINÉS, A. (1999b): Agriculture, grazing and land use changes at the Serra de Tramuntana karstic mountains. *Intern. Journal Speleol.*, 28 B (1/4): 5-14. Bologna.
- GINÉS, A. (2001): *Fenòmens càrstics i delimitació de biòtops singulars a l'illa de Sa Dragonera*. Memòria del projecte d'investigació, Parc Natural de Sa Dragonera. 27 pàgs + 60 fotos. Inèdit.
- GINÉS, A. (2009): Karrenfield landscapes and karren landforms. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 13-24. Ljubljana, Eslovènia.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1995): Les formes exocàrstiques de l'illa de Mallorca / The exokarstic landforms of Mallorca island. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 59-70. Palma.
- GINÉS, A. & LUNDBERG, J. (2009): Rainpits: an outline of their characteristics and genesis. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 169-183. Ljubljana, Eslovènia.
- GINÉS, A.; GINÉS, J. & MIRALLES, P.M. (2010): Anàlisi morfològica del karst de pinacles mediterrani de sa Mitjania (Escorca, Mallorca). *Endins*, 34: 109-124. Palma.
- GINÉS, J. (1990b): El modelat càrstic de sa Mitjania (Escorca, Mallorca). *Endins*, 16: 17-20. Palma.
- GINÉS, J. & FORNÓS, J.J. (2004): 16. Caracterització del karst del Migjorn: la seva contribució al modelat del territori. In: FORNÓS, J.J.; OBRADOR, A. & ROSSELLÓ, V.M. (eds.) *Història natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 11: 259-274. Palma de Mallorca.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (1989): El karst en las islas Baleares. In: DURÁN, J.J. & LÓPEZ, J. (eds.) *El karst en España*. Sociedad Española de Geomorfología, Monografía 4: 163-174. Madrid.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (2009): Mid-mountain karrenfields at Serra de Tramuntana in Mallorca Island. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 375-390. Ljubljana, Eslovènia.
- GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2009): Microrills. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 73-84. Ljubljana, Eslovènia.
- GUIJARRO, J.A. (1995): Aspectes bioclimàtics del karst de Mallorca / Bioclimatic aspects of karst in Mallorca. In: GINÉS, A. & GINÉS, J. (eds.) *El carst i les coves de Mallorca / Karst and caves in Mallorca*. Endins, 20 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 3: 17-26. Palma.
- HUTCHINSON, D.W. (1996): Rinnels, rinnenkarren and mäanderkarren: form, classification and relationships. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 209-223. Palma.
- LOZANO, R. (1884): *Anotaciones físicas y geológicas de la isla de Mallorca*. Excma. Diputación Provincial de Baleares. Imprenta de la Casa de Misericordia. 68 pp. Palma.
- LUNDBERG, J. & GINÉS, A. (2009): Rillenkarren. In: GINÉS, A.; KNEZ, M.; SLABE, T. & DREYBRODT, W. (eds.) *Karst rock features. Karren sculpturing*. Zalozba ZRC. Institut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, Postojna. Carsologica, 9: 185-210. Ljubljana, Eslovènia.
- MARTEL, E.A. (1903): Les cavernes de Majorque. *Spelunca*, 5 (32): 1-32. París.
- MENSCHING, H. (1955): Karst und Terra-Rossa auf Mallorca. *Erdkunde*, 9: 188-196. Bonn.
- MONTORIOL-POUS, J. & ASSENS-CAPARRÓS, J. (1957): Estudio geomorfológico e hidrogeológico del karst de la península de s'Albufereta (Fornells, Menorca). *Rass. Esp. Italiana*, 9 (1): 3-48. Como, Itàlia.
- MOTTERSHEAD, D.N. (1996): A study of solution flutes (Rillenkarren) at Lluc, Mallorca. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Suppl. 103: 215-241. Berlin.
- PRATS, J.A. (2004): Al nord, es Amunts: geografia física. In: MARÍ, M. (ed.) *Es Amunts d'Eivissa: vida, cultura i paisatge*. Grup d'Estudis de la Naturalesa - GOB Eivissa: 25-35. Eivissa.
- RIBA, O.; de BOLÒS, O.; PANAREDA, J.M.; NUET, J.M. & GOSÁLBEZ, J. (1976): *Geografia Física dels Països Catalans*. KETRES editora. 226 pàgs. Barcelona.
- ROSSELLÓ-VERGER, V.M. (1964): *Mallorca, El Sur y Suresste*. Cámara Oficial de Comercio Industria y Navegación de Palma de Mallorca. Gráficas Miramar. 553 pàgs. Palma de Mallorca.
- SMART, P.L. & WHITAKER, F.F. (1996): Development of karren landform assemblages - a case study from Son Marc, Mallorca. In: FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (eds.) *Karren Landforms*. Universitat de les Illes Balears. 111-122. Palma.
- THOMAS-CASAJUANA, J.M. & MONTORIOL-POUS, J. (1953): Resultados de una campaña geoespeleológica en la isla de Ibiza (Baleares). *Speleon*, 4 (3-4): 219-256. Oviedo.
- VILÀ-VALENTÍ, J. (1961): El polje de Santa Inés o Corona (Ibiza). *Speleon*, 12 (1-2): 55-65. Oviedo.
- WINKLER, A. (1926): Morphologisch-Geologische Beobachtungen auf Mallorca. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 2: 171-183. Leipzig, Alemania.