

Estructures sedimentàries produïdes per plantes en el Permià de Mallorca (Mediterrània occidental)

Rafel MATAMALES-ANDREU

SHNB



SOCIETAT D'HISTÒRIA
NATURAL DE LES BALEARS

Matamales-Andreu, R. 2026. Estructures sedimentàries produïdes per plantes en el Permià de Mallorca (Mediterrània occidental). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 69: 129-146. ISSN 0212-260X. e-ISSN 2444-8192. Palma.

Es descriuen per primera vegada les principals estructures sedimentàries produïdes per plantes reconegudes al registre del Permià de Mallorca (Mediterrània occidental). A partir de l'estudi de diversos afloraments de les formacions Bec de s'Àguila, Port des Canonge i Pedra de s'Ase, s'han identificat vuit morfotips de rizòlits i dues estructures sedimentàries induïdes per la vegetació. Els diferents morfotips es distingeixen per la seva geometria, orientació, dimensions, grau de carbonatació i patrons de ramificació, i permeten d'inferir una gran diversitat de condicions paleoambientals i paleohidrològiques. Els rizòlits horitzontals s'associen principalment a sòls inundats o amb drenatge limitat, mentre que els sistemes radiculars de desenvolupament vertical indiquen sòls millor drenats i condicions més àrides, probablement estacionals. Alguns morfotips suggereixen la presència de plantes llenyoses arborescents, mentre que d'altres podrien correspondre a vegetació herbàcia amb rizomes extensos. També es documenten exemples de laminació centroclinal i de marques d'onetes desviades per la interferència de la vegetació amb els fluxos sedimentaris, constituint les primeres evidències d'aquest tipus d'estructures al Permià de Mallorca. Aquest conjunt de restes amplia de manera significativa el coneixement dels paleoecosistemes permians de les Balears i aporta noves dades sobre les relacions entre vegetació, sedimentació i desenvolupament dels paleosòls en ambients continentals de la Pangea equatorial.

Paraules clau: *Permià; Mallorca; rizòlits; paleosòls; estructures sedimentàries induïdes per la vegetació.*

VEGETATION-INDUCED SEDIMENTARY STRUCTURES IN THE PERMIAN OF MALLORCA (WESTERN MEDITERRANEAN). Plant-produced sedimentary structures from the Permian of Mallorca (western Mediterranean) are described for the first time. Based on the study of several outcrops from the Bec de s'Àguila, Port des Canonge and Pedra de s'Ase formations, eight rhizolith morphotypes and two vegetation-induced sedimentary structures have been identified. The different morphotypes are distinguished by their geometry, orientation, size, degree of carbonate cementation and branching patterns, and provide evidence for a wide range of palaeoenvironmental and palaeohydrological conditions. Horizontally de-

veloped rhizoliths are mainly associated with waterlogged soils or substrates with restricted drainage, whereas vertically developed root systems indicate better-drained soils and more arid, probably seasonal, conditions. Some morphotypes suggest the presence of woody arborescent plants, whereas others may correspond to herbaceous vegetation with extensive rhizome systems. Examples of centroclinal lamination and ripple marks deflected by vegetation interference with sediment-laden flows are also documented, representing the first record of such structures from the Permian of Mallorca. These findings expand current knowledge of the Permian ecosystems of the Balearic Islands and provide new insights into the interactions between vegetation, sedimentation and palaeosol development in continental environments of equatorial Pangaea.

Keywords: *Permian; Mallorca; rhizoliths; palaeosols; vegetation-induced sedimentary structures.*

Rafel MATAMALES-ANDREU: MUCBO | Museu Balear de Ciències Naturals, FJBS-MBCN, carretera Palma-Port de Sóller km 30,5. 07100 Sóller, Illes Balears. rmatamales@mucho.org

Recepció del manuscrit: 16-06-2026; revisió acceptada: 21-08-2026; publicació online: 22-08-2026.

Introducció i antecedents

Els rizòlits són estructures sedimentàries produïdes per l'activitat de sistemes radiculars de plantes, generades per processos de bioturbació, precipitació mineral (sovint carbonatada) al voltant de les rels o reblliment dels buits deixats per la seva descomposició (Klappa, 1980; Retallack, 1998). Juntament amb altres estructures sedimentàries induïdes per la vegetació, com la laminació centroclinal o la desviació de marques d'onetes al voltant de tiges, constitueixen una font d'informació directa sobre la interacció entre les plantes i el substrat. Permeten d'inferir, amb més o manco seguretat, aspectes com el grau de drenatge del sòl, la profunditat del nivell freàtic, l'estacionalitat hídrica i l'hàbit de creixement (herbaci o llenyós) de la vegetació productora (Rygel *et al.*, 2004; Kraus i Hasiotis, 2006).

Al registre continental del Permià, aquest tipus d'estructures s'han documentat de manera relativament dispersa. Per exemple, a la successió del «Tatarià

superior» de la conca del Sukhona i el Malaya Severnaya Dvina, a Rússia (Arefev i Naugolnykh, 1998), la Formació Moradi (Permià) de la conca de Tim Mersoï, al Níger (Tabor *et al.*, 2011), o les seqüències de paleosòls de planera d'inundació del Permià superior de la conca del Karoo, a Sud-àfrica (Smith, 1990), on s'han emprat criteris morfològics similars, com la orientació, geometria i grau de cimentació, per a inferir condicions paleohidrològiques i de drenatge del sòl. De vegades, s'han emprat els icnogèneres *Radicites*, *Radiculites* o *Rhadix* per a anomenar aquestes estructures (cf. Arefev i Naugolnykh, 1998). En un context més proper, també s'han documentat paleosòls en successions permianes i de transició Permià-Triàsic d'altres conques de la Mediterrània occidental, com el sud-est de França (Durand, 2006), el Pirineu català (Mujal *et al.*, 2017) o Sardenya (Sheldon, 2005).

El registre paleontològic del Permià de Mallorca s'ha estudiat amb gran detall durant els darrers set anys, descrivint amb detall els paleoecosistemes enregistats en

les roques d'aquest període geològic, incloent-hi espores, pol·len, restes macrobotàniques, icnofòssils d'invertebrats, potades de vertebrats, i ossos i esquelets de vertebrats (Matamales-Andreu *et al.*, 2019, 2021a, 2021b, 2021c, 2022, 2023a, 2023b, 2024a, 2024b, 2024c, 2025; Matamales-Andreu, 2022, 2023a, 2023b, 2025, 2026a, 2026b; Mujal *et al.*, 2023, García-Palou i Matamales-Andreu, 2025).

Durant el desenvolupament de tots aquests estudis, s'han anat trobant estructures sedimentàries associades a la presència de restes vegetals (principalment, en forma de rizocrecions), que mai no s'han descrit en detall. Al Permià de Menorca sí que s'estudiaren aquests tipus de restes amb un poc més d'esment (Bercovici *et al.*, 2009). S'hi descrigueren diversos tipus de paleosòls i estructures radiculars associades a ambients de planera d'inundació, incloent-hi rizòlits, horitzons pedogenètics i xarxes de traces de rels conservades *in situ*. Entre aquestes destaquen unes estructures verticals interpretades com a anàlogues als

pneumatòfors de les plantes actuals adaptades a substrats inundats, que foren considerades evidència d'una vegetació llenyosa desenvolupada en ambients inundats soms i pobres en oxigen.

La present nota és una primera passa cap a l'estudi de les estructures sedimentàries produïdes per plantes en el Permià de Mallorca, distingint i il·lustrant els morfotips principals localitzats. Per al context geogràfic i geològic, es recomana la consulta de Matamales-Andreu *et al.* (2022).

Material i mètode

S'han fotografiat, descrit i mesurat totes les estructures que s'ha considerat que podrien haver estat produïdes per plantes, procedents bàsicament de dues seccions estratigràfiques on afloren les formacions Bec de s'Àguila, Port des Canonge i Pedra de s'Ase: secció de Racó de s'Algar-Pedra de s'Ase i secció de Port des Canonge-Hort de sa Cova (Fig. 1). Cada estructura s'ha si-

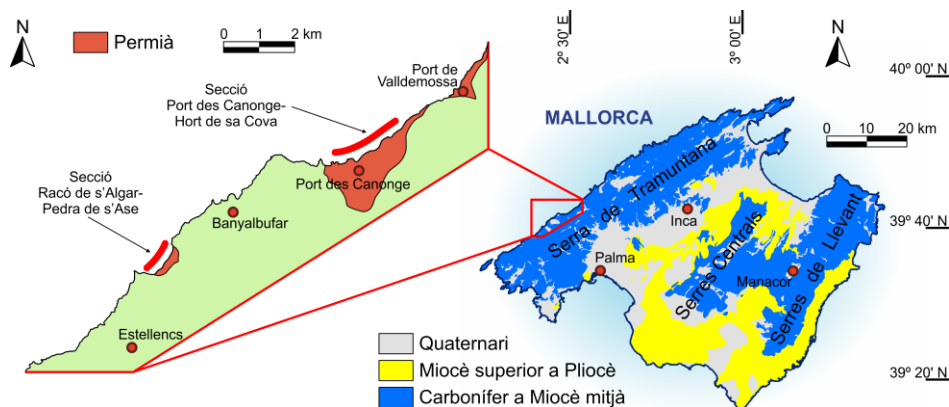


Fig. 1. Context geogràfic i geològic de les seccions estudiades del Permià de Mallorca. Per més informació, vegeu Matamales-Andreu *et al.* (2022). Figura modificada de Matamales-Andreu *et al.* (2021a).

Fig. 1. Geographical and geological context of the studied sections from the Permian of Mallorca. For more information, see Matamales-Andreu *et al.* (2022). Figure modified from Matamales-Andreu *et al.* (2021a).

tuat dins les columnes estratigràfiques de Matamales-Andreu *et al.* (2022), i se n'han enregistat la geometria, les dimensions (diàmetre i longitud), l'orientació respecte a l'estratificació, el patró i l'angle de ramificació, el grau de cimentació carbonatada, la coloració, el tipus de rebliment intern i la relació amb el sediment encaixant. Els morfotips s'han definit a partir de la combinació d'aquests criteris morfològics observables, i la seva delimitació és de naturalesa exclusivament morfològica i descriptiva: en la majoria dels casos no és possible identificar directament l'organisme productor, de manera que els morfotips no constitueixen unitats taxonòmiques.

Resultats

Rizòlits

Morfotip 1

[Fig. 2A-I]

Descripció. Formes tubulars i cilíndriques més o manco allargades, de desenvolupament horitzontal predominant. Els espècimens més grossos (diàmetre = c. 25 mm) tenen unes voreres de color ocre-groc, amb més abundància de carbonats, reblertes d'arena molt fina de color vermell. Aquestes segueixen un recorregut rectilini o lleugerament sinuós, amb una longitud màxima observada de 86 cm. A mesura que el diàmetre disminueix, els tubs esdevenen cilindres massissos de color ocre-groc, més carbonatats. Aquestes rels de segon ordre tenen un diàmetre de devers 1,5 mm, i es ramifiquen de manera lateral (no dicotòmica). La longitud màxima observada en aquests rizòlits més petits és de 40 mm en el pla horitzontal i 60 mm en el pla vertical.

Localitats. Racó de s'Algar i platja de son Bunyola, part baixa de la Formació Port des Canonge.

Observacions. El morfotip 1 és molt abundant a la part baixa dels dos afloraments de la Formació Port des Canonge, i es troba en gresos molt fins que corresponen a dipòsits de lòbuls de desbordament. Pot estar associat a la formació de crostes carbonatades (*hardpans*) especialment ben desenvolupades.

Morfotip 2

[Fig. 2J-K]

Descripció. Tubs cilíndrics allargats i horitzontals. Els espècimens més grossos, que poden arribar a un diàmetre de 17 mm i una longitud màxima d'1 m, són tubs massissos de color ocre-groc (carbonats) amb un recorregut pràcticament rectilini però ondulant, disminuint ràpidament de diàmetre. Associades a aquestes rels més grosses, hi ha petits tubs (diàmetre <1 mm) que formen un dens bolic en forma de crosta carbonatada. No s'han pogut entreveure-hi ramificacions.

Localitats. Platja de son Bunyola, part baixa de la Formació Port des Canonge.

Observacions. El morfotip 2 sols s'ha observat en un estrat, i per tant podria ésser una variació del morfotip 1, molt més carbonatada i, per tant, amb tots els rizòlits plens i massius.

Morfotip 3

[Figures 2L-O, 3A-I]

Descripció. Tubs cilíndrics allargats, de desenvolupament principalment vertical o oblic. Solen ésser de mida grossa, amb diàmetres de fins a 6,5 cm i longituds màximes d'1,2 m. Són rectilinis o lleugerament ondulats, i es ramifiquen de manera lateral formant angles de 90°. Presenten les vores gropellades de color ocre-groc (carbonats) amb taquetes vermelles, i un rebliment intern de gresos de gra molt fi o lutites vermelles. Rarament, el rebliment pot ésser de color gris fluix-blavós.



Fig. 2. Rizòlits dels morfotips 1, 2 i 3. **A:** Morfotip 1, bloc *ex situ* al camí de la platja de s'hort de sa Cova (Formació Pedra de s'Ase). **B:** Morfotip 1, metre 221,75 de la columna Port des Canonge (Formació Port des Canonge). **C:** Morfotip 1, metre 225,30 de la columna Port des Canonge (Formació Port des Canonge). **D:** Morfotip 1, metre 76,75 de la columna Port des Canonge (Formació Port des Canonge). **E-F:** Detalls de D, vegeu ramificacions assenyalades amb una fletxa negra. **G:** Morfotip 1 formant una crosta carbonatada i amb rizòlits verticalitzats, metre 71,40 de la columna Racó de s'Algar

(Formació Port des Canonge). **H:** Detall del mateix paleosòl que a G, vist des de dalt. **I:** Morfotip 1, metre 10,00 de la columna Port des Canonge (Formació Port des Canonge). **J:** Morfotip 2, metre 14,25 de la columna Port des Canonge (Formació Port des Canonge), rizòlit més gros assenyalat amb una fletxa negra. **K:** Detall de la fotografia J, on s'hi veu un bolic de rizòlits formant una crosta carbonatada. **L:** Morfotip 3, volta des General (Formació Bec de s'Àguila), rizòlit assenyalat amb una fletxa negra. **M:** Morfotip 3, aproximadament metre 6,50 de la columna Platja de sa Pedrera (Formació Bec de s'Àguila), sistemes de rizòlits assenyalats amb fletxes negres. **N:** Detall de la secció d'un rizòlit al mateix nivell que M. **O:** Morfotip 3, metre 13,00 de la columna Platja de sa Pedrera (Formació Bec de s'Àguila), rizòlit en secció assenyalat amb una fletxa negra. Longitud del cap del martell = 15 cm, excepte a M i N, on és = 18 cm. Fotografies G i H realitzades per Eudald Mujal. Per la posició a les columnes, consultau Matamales-Andreu *et al.* (2022).

Fig. 2. Rhizoliths of morphotypes 1, 2 and 3. **A:** Morphotype 1, ex situ block from the path to s'Hort de sa Cova beach (Pedra de s'Ase Formation). **B:** Morphotype 1, metre 221.75 of the Port des Canonge section (Port des Canonge Formation). **C:** Morphotype 1, metre 225.30 of the Port des Canonge section (Port des Canonge Formation). **D:** Morphotype 1, metre 76.75 of the Port des Canonge section (Port des Canonge Formation). **E–F:** Details of D; note the ramifications indicated by black arrows. **G:** Morphotype 1 forming a carbonate crust and displaying vertically oriented rhizoliths, metre 71.40 of the Racó de s'Algar section (Port des Canonge Formation). **H:** Detail of the same palaeosol shown in G, viewed from above. **I:** Morphotype 1, metre 10.00 of the Port des Canonge section (Port des Canonge Formation). **J:** Morphotype 2, metre 14.25 of the Port des Canonge section (Port des Canonge Formation), largest rhizolith indicated by a black arrow. **K:** Detail of photograph J, showing a dense cluster of rhizoliths forming a carbonate crust. **L:** Morphotype 3, Volta des General (Bec de s'Àguila Formation), rhizolith indicated by a black arrow. **M:** Morphotype 3, approximately metre 6.50 of the Platja de sa Pedrera section (Bec de s'Àguila Formation), rhizolith systems indicated by black arrows. **N:** Detail of a rhizolith cross-section from the same level as M. **O:** Morphotype 3, metre 13.00 of the Platja de sa Pedrera section (Bec de s'Àguila Formation), rhizolith in section indicated by a black arrow. Hammer head length = 15 cm, except for M and N, which is = 18 cm. Photographs G and H were taken by Eudald Mujal. For the position of the samples within the stratigraphic sections, see Matamales-Andreu *et al.* (2022).

Localitats. Racó de s'Algar, carregador de ses Garroves (=platja de sa Pedrera), volta des General, torrent de cas Batliu i puig des Moro, de la Formació Bec de s'Àguila a la part alta de la Formació Pedra de s'Ase.

Observacions. El morfotip 3 és un dels més extensament presents, des del punt de vista estratigràfic, a la seqüència del Permià de Mallorca. A diferència dels dos anteriors, aquest tipus de rizòlits sol aparèixer en nivells de lutites gresoses, i sols de vegades travessa estrats de gresos molt fins corresponents a dipòsits de desbordament.

Morfotip 4

[Fig. 3J-P]

Descripció. Tubs cilíndrics allargats de creixement vertical o oblic. Generalment són de mida grossa, amb diàmetres de 2 cm i longituds màximes de 2 m. Són rectilinis o bé lleugerament ondulats, i es ramifiquen lateralment en angles propers als 90°. Els tubs són d'aproximadament la mateixa litologia que el material encaixant, però d'un color diferent. Mentre que es troben sempre dins lutites arenoses o gresos de gra molt fi de color vermell, els rizòlits estan envoltats d'una zona de color gris fluix-blau. El centre del cilindre pot ésser vermell, tot i que de vegades és «massiu».

Localitats. Racó de s'Algar, platja de son Bunyola i platja de s'hort de sa Cova, de la

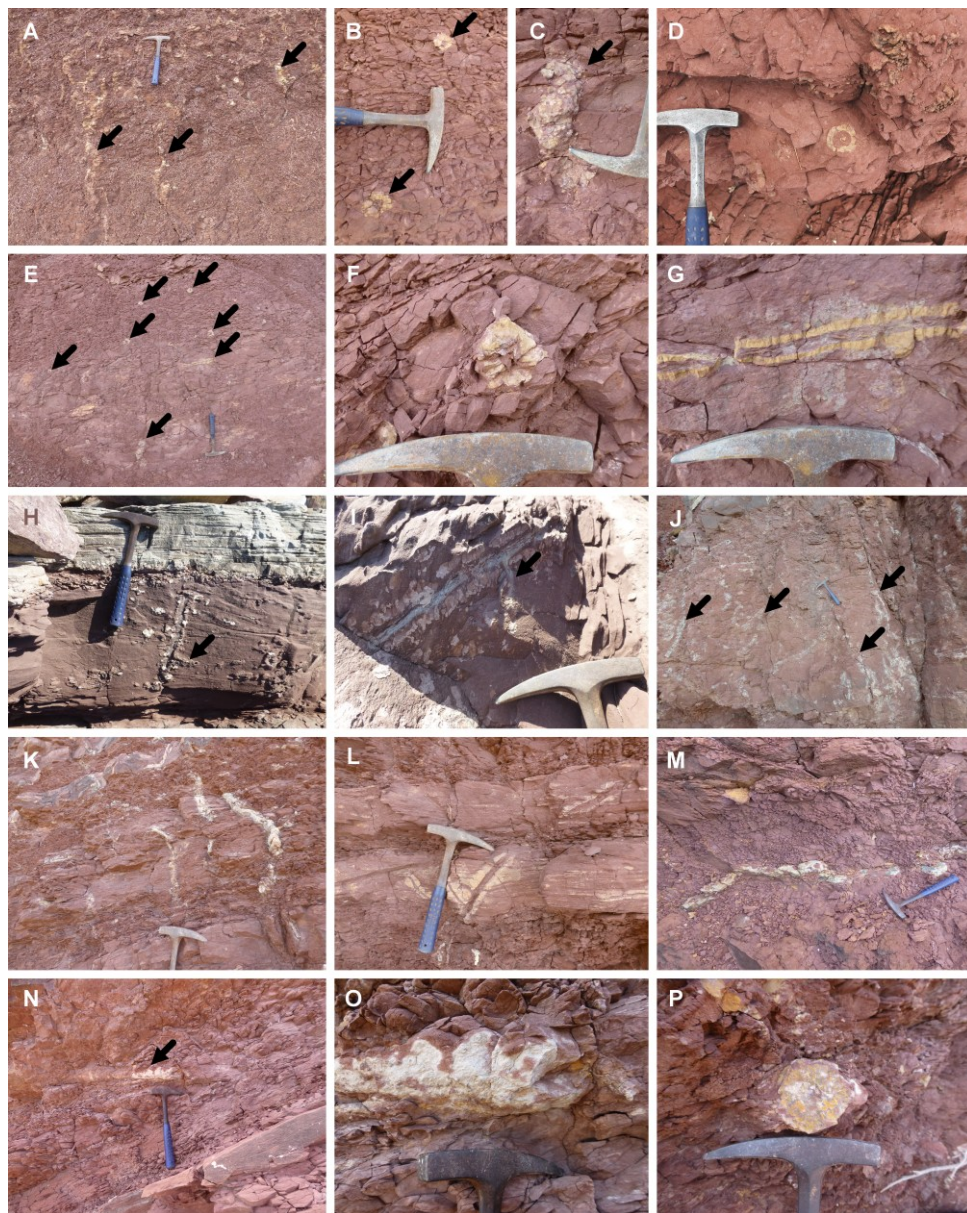


Fig. 3. Rizòlits dels morfotips 3 i 4. **A:** Morfotip 3, metre 24,00 de la columna Racó de s'Algar (Formació Port des Canonge), rizòlits assenyalats amb fletxes negres. **B:** Morfotip 3 en secció transversal (fletxes negres), aproximadament metre 394,00 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase). **C:** Morfotip 3 (fletxa negra), aproximadament metre 394,00 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase). **D:** Morfotip 3 en secció transversal, aproximadament metre 394,00 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase). **E:** Morfotip 3, aproximadament

metre 394,00 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase), rizòlits assenyalats amb fletxes negres. **F:** Morfotip 3 en secció transversal, aproximadament metre 394,00 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase). **G:** Morfotip 3 en secció longitudinal, aproximadament metre 394,00 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase). **H:** Morfotip 3 en secció longitudinal, metre 455,25 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase), ramificació assenyalada amb una fletxa negra. **I:** Morfotip 3 en secció longitudinal, metre 455,25 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase), ramificació assenyalada amb una fletxa negra. **J:** Morfotip 4, metre 525,00 de la columna Port des Canonge (Formació Pedra de s'Ase), rizòlits assenyalats amb fletxes negres. **K:** Morfotip 4, metre 20,00 de la columna Torrent de na Nadala (Formació Port des Canonge). **L:** Morfotip 4 en secció longitudinal, metre 18,00 de la columna Torrent de na Nadala (Formació Port des Canonge), vegeu les ramificacions. **M:** Morfotip 4 horitzontal, metre 15,00 de la columna Port des Canonge (Formació Port des Canonge). **N:** Morfotip 4 oblic (fletxa negra), metre 70,80 de la columna Racó de s'Algar (Formació Port des Canonge). **O:** Detall del mateix rizòlit que a N. **P:** Morfotip 4, secció transversal d'un altre rizòlit del mateix nivell que N. Longitud del cap del martell = 15 cm. Fotografia D realitzada per Eudald Mujal. Per la posició a les columnes, consultau Matamales-Andreu *et al.* (2022).

Fig. 3. Rhizoliths of morphotypes 3 and 4. **A:** Morphotype 3, metre 24.00 of the Racó de s'Algar section (Port des Canonge Formation), rhizoliths indicated by black arrows. **B:** Morphotype 3 in cross-section (black arrows), approximately metre 394.00 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation). **C:** Morphotype 3 (black arrow), approximately metre 394.00 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation). **D:** Morphotype 3 in cross-section, approximately metre 394.00 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation). **E:** Morphotype 3, approximately metre 394.00 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation), rhizoliths indicated by black arrows. **F:** Morphotype 3 in cross-section, approximately metre 394.00 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation). **G:** Morphotype 3 in longitudinal section, approximately metre 394.00 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation). **H:** Morphotype 3 in longitudinal section, metre 455.25 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation), branch indicated by a black arrow. **I:** Morphotype 3 in longitudinal section, metre 455.25 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation), branch indicated by a black arrow. **J:** Morphotype 4, metre 525.00 of the Port des Canonge section (Pedra de s'Ase Formation), rhizoliths indicated by black arrows. **K:** Morphotype 4, metre 20.00 of the Torrent de na Nadala section (Port des Canonge Formation). **L:** Morphotype 4 in longitudinal section, metre 18.00 of the Torrent de na Nadala section (Port des Canonge Formation); note the branching. **M:** Horizontal morphotype 4, metre 15.00 of the Port des Canonge section (Port des Canonge Formation). **N:** Oblique morphotype 4 (black arrow), metre 70.80 of the Racó de s'Algar section (Port des Canonge Formation). **O:** Detail of the same rhizolith shown in N. **P:** Morphotype 4 in cross-section, another rhizolith from the same level as N. Hammer head length = 15 cm. Photograph D was taken by Eudald Mujal. For the position of the samples within the stratigraphic sections, see Matamales-Andreu *et al.* (2022).

part baixa de la Formació Port des Canonge a la part alta de la Formació Pedra de s'Ase.

Observacions. En general, el morfotip 4 s'assembla molt al morfotip 3, tant pel que fa a la forma com pel que fa a les mides.

Morfotip 5

[Fig. 4A-B]

Descripció. Tubs cilíndrics allargats amb diàmetres de 9 mm i longituds horitzontals

màximes d'1 m. Es tracta de tubs buits amb una paret de color ocre-groc (carbonat), relativament homogènia. El creixement d'aquests sistemes radiculars consisteix en rizòlits primaris de creixement essencialment horitzontal i paral·lel als estrats, dels quals en surten rizòlits secundaris verticals en un angle d'aproximadament 90°. Aquests també són rectilinis, tot i que poden arribar a esser

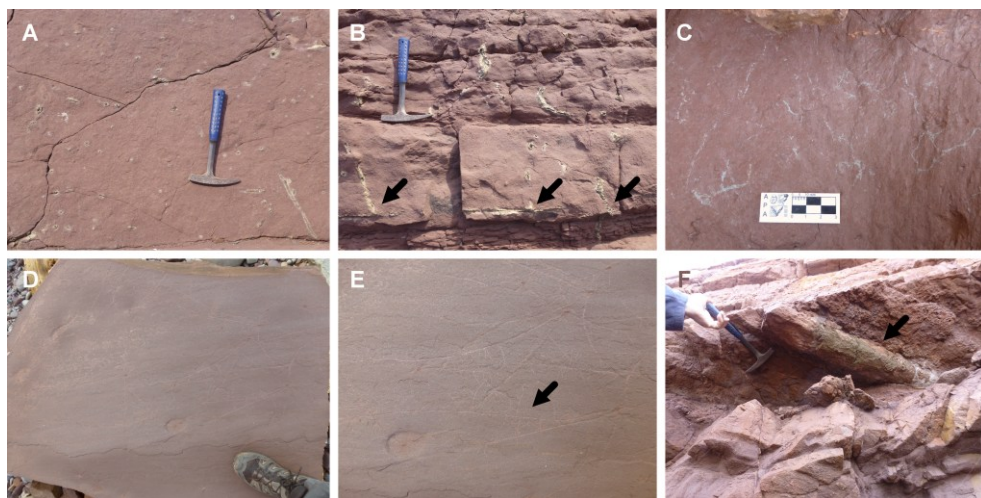


Fig. 4. Rizòlits dels morfotips 5, 6, 7 i 8. **A:** Morfotip 5 vist des de dalt (seccions majoritàriament transversals), metre 10,75 de la columna Torrent de na Nadala (Formació Port des Canonge). **B:** Morfotip 5 vist lateralment (seccions majoritàriament longitudinals), metre 12,00 de la columna Torrent de na Nadala (Formació Port des Canonge), ramificacions verticals dels rizòlits assenyalades amb fletxes negres. **C:** Morfotip 6 vist des de dalt, metre 31,55 de la columna Torrent de na Nadala (Formació Port des Canonge). **D-E:** Morfotip 7 vist des de dalt, bloc caigut *ex situ* al racó de s'Algar (Formació Port des Canonge), vegeu les ramificacions assenyalades amb una fletxa negra. **F:** Morfotip 8 vist des de baix (fletxa negra), metre 355,50 de la columna Torrent de na Nadala (Formació Port des Canonge). Longitud del cap del martell a A, B i F = 15 cm, rectangles de l'escala a C = 1 cm, amplada de la bota a D = 10,5 cm. Per la posició a les columnes, consultau Matamales-Andreu *et al.* (2022).

Fig. 4. Rhizoliths of morphotypes 5, 6, 7 and 8. **A:** Morphotype 5 viewed from above (mostly transverse sections), metre 10.75 of the Torrent de na Nadala section (Port des Canonge Formation). **B:** Morphotype 5 viewed laterally (mostly longitudinal sections), metre 12.00 of the Torrent de na Nadala section (Port des Canonge Formation), vertical ramifications of the rhizoliths indicated by black arrows. **C:** Morphotype 6 viewed from above, metre 31.55 of the Torrent de na Nadala section (Port des Canonge Formation). **D-E:** Morphotype 7 viewed from above, *ex situ* fallen block at Racó de s'Algar (Port des Canonge Formation); note the ramifications indicated by a black arrow. **F:** Morphotype 8 viewed from below (black arrow), metre 355.50 of the Torrent de na Nadala section (Port des Canonge Formation). Hammer head length in A, B and F = 15 cm, rectangles of the scale bar in C = 1 cm, boot width in D = 10.5 cm. For the position of the samples within the stratigraphic sections, see Matamales-Andreu *et al.* (2022).

lleugerament ondulats. Típicament, aquest morfotip es reconeix a la superfície de l'estrat gràcies a les seccions transversals d'aquests rizòlits secundaris.

Localitats. Racó de s'Algar, part mitjana de la Formació Port des Canonge.

Observacions. Aquest morfotip és idèntic al que descriueren Bercovici *et al.* (2009) per al Permià (P3) de Menorca, anomenant-lo

«pedotip D». Aquest tipus de rizòlits surt en un conjunt de nivells de gresos vermells massius i de gra molt fi, possiblement corresponent al marge d'un canal fluvial. La icnofàcies de *Mermia*, típica de basses permanents i descrita d'altres nivells de la Formació Port des Canonge (Matamales-Andreu *et al.*, 2022), no s'ha reconegut conjuntament amb el morfotip 5.

Morfotip 6

[Fig. 4C]

Descripció. Petits tubs cilíndrics llargs i prims (diàmetre 2 mm), semblants a fils, de desenvolupament horitzontal en gresos lutítics de gra molt fi. Tenen un centre de color vermell envoltat per un zona de color verd grisós. El seu recorregut és molt irregular i la ramificació és mala de discernir, tot i que sembla esser lateral.

Localitats. Torrent de na Nadala, part mitjana de la Formació Port des Canonge.

Observacions. Aquest morfotip consisteix en rizòlits molt petits i filamentosos que es desenvolupen dins lutites arenoses molt fines i homogènies. Concretament, es troben a la base de l'horitzó NA3 del jaciment de vertebrats del Torrent de na Nadala. Això és, específicament, a la base del nivell que contenia l'holòtip del rèptil captorrínid moradisaurí *Tramuntanasaurus tiai* Matamales-Andreu *et al.*, 2023 (Matamales-Andreu *et al.*, 2023a).

Morfotip 7

[Fig. 4D-E]

Descripció. Petits tubs cilíndrics, molt prims (diàmetre 1 mm) i llargs (longitud màxima observada 50 cm), rectilinis i densament ramificats lateralment (fins a quatre ordres de ramificació) formant angles propers als 90°. S'estenen horitzontalment i el seu color és gris pàl·lid-groguenc homogeni.

Localitats. Racó de s'Algar, part baixa de la Formació Port des Canonge.

Observacions. El morfotip 7 s'ha trobat sols en un bloc de gresos rosats de mida de gra mitjà caigut de la zona del racó de s'Algar.

Morfotip 8

[Fig. 4F]

Descripció. Semicilindre de grans dimensions (diàmetre 13,5 cm, longitud observada de 75 cm) que es troba a la base d'un nivell de gresos vermells de gra fi-

mitjà. La seva superfície es troba entapissada de microbretxes que inclouen nòduls carbonatats i còdols blans de gres i lutita.

Localitats. Port des Canonge, part mitjana de la Formació Port des Canonge.

Observacions. Podria esser que el morfotip 8 no fos un rizòlit, però s'ha afegit aquí perquè, en cas contrari, és una estructura d'origen desconegut. Podria esser també una estructura de base de canal (*furrow*) o fins i tot una llogiguera de tetràpode.

Estructures sedimentàries induïdes per la vegetació

Laminació centroclinal

[Fig. 5A]

Descripció. En secció, presenta una estructura cilíndrica buida i lineal (diàmetre 75 mm, longitud màxima observada 25 cm) que interfereix la sedimentació d'un estrat amb laminació de marques d'onetes remuntants (*climbing ripple marks*), en un gres de mida de gra molt fi-fi. Això es tradueix en el fet que, al voltant de l'estructura cilíndrica, les làmines experimenten un fort canvi de cabussament, que torna més pronunciat cap a aquesta estructura. En definitiva, les làmines formen un triangle invertit (que en tres dimensions seria un conus invertit) al voltant d'aquest eix central.

Localitats. Platjola des munt de Pedres, part mitjana-alta de la Formació Port des Canonge.

Observacions. Aquesta estructura és coneguda a la literatura com a laminació centroclinal, descrita al voltant de troncs d'arbres (Underwood i Lambert, 1974). Quan al voltant d'una estructura cilíndrica vertical s'hi depositen sediments transportats per un flux, hi ha tendència que es formi aquest conus còncav, que es va reblint de

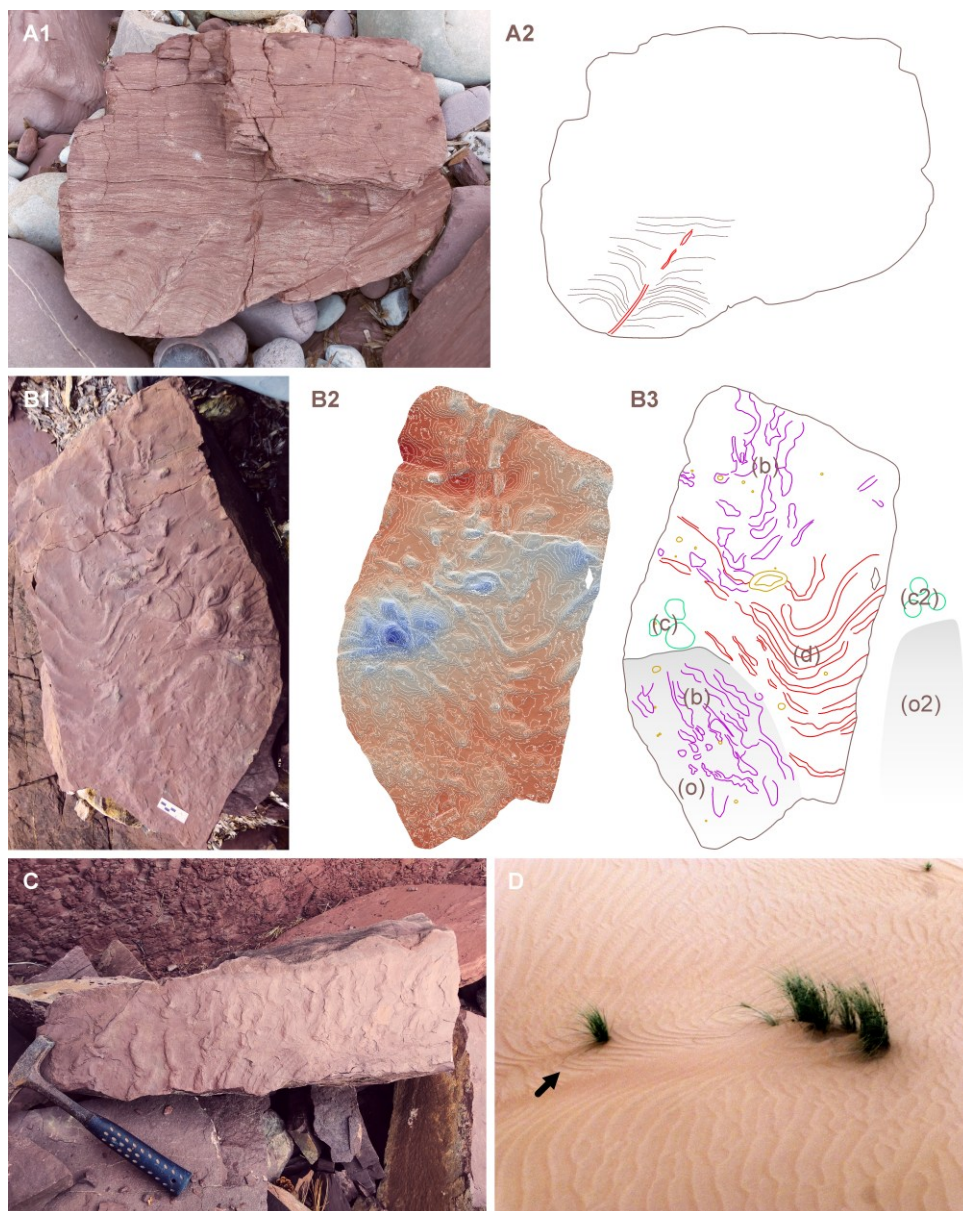


Fig. 5. Estructures sedimentàries induïdes per la vegetació. **A1:** Laminació centroclinal, bloc caigut *ex situ* a la platja de munt de Pedres (Formació Port des Canonge). **A2:** Representació esquemàtica d'A1 on es veu, en vermell, l'eix central que correspon al motlle de la tija i, en negre, el canvi bruscat de cabussament que pareixen les làmines que s'hi acosten. **B1:** Bloc amb marques d'onetes desviades per la interferència de vegetació (base de capa, motlle natural), metre 69,25 de la columna Racó de s'Algar (Formació Port des Canonge). **B2:** Mapa d'elevació en fals color (en vermell les zones relativament

elevades i en blau les deprimides) i corbes de nivell. És una imatge especular de B1 amb el mapa de colors invertit per a representar la superfície original que va donar lloc al motlle natural estudiat. **B3**: Representació esquemàtica de B1-2. Acrònims: (b), marques produïdes pel contacte de les parts aèries de la planta amb en terra; (c), concavitats probablement corresponents a laminació centroclinal al voltant d'unes plantes; (c2), suposició de l'existència d'un altre conjunt de plantes per a poder originar l'estructura; (d), marques d'onetes desviades i truncades; (o), ombra de vegetació amb una elevació especialment brusca just darrere les concavitats; (o2), ombra de vegetació suposada per a poder originar l'estructura. **C**: Possibles marques d'onetes truncades (base de capa, motlle natural), bloc caigut *ex situ* just al sud-oest del munt de Pedres (Formació Port des Canonge). **D**: Marques d'onetes eòliques actuals desviades per l'acció de la vegetació (*Cyperus conglomeratus* Rottb.), adquirint forma d'«U» (fletxa negra), a les arenes d'Al Wahiba (península Aràbiga). Amplada de la bota a A1 = 10,5 cm, rectangles de l'escala a B1 = 1 cm, longitud del cap del martell a C = 15 cm. Per la posició a les columnes de les mostres de Mallorca, consulta Matamales-Andreu *et al.* (2022).

Fig. 5. *Vegetation-induced sedimentary structures. A1: Centroclinal lamination, ex situ fallen block from the Platjola des Munt de Pedres (Port des Canonge Formation). A2: Schematic representation of A1 showing, in red, the central axis corresponding to the stem mould and, in black, the abrupt change in dip displayed by the laminae as they approach it. B1: Block showing ripple marks deflected by vegetation interference (base of layer, natural cast), metre 69.25 of the Racó de s'Algar section (Port des Canonge Formation). B2: False-colour elevation map (red = relatively elevated areas; blue = depressed areas) and contour lines. This is a mirrored image of B1 with the colour scale inverted to reconstruct the original surface that produced the natural cast studied. B3: Schematic representation of B1–B2. Abbreviations: (b) marks produced by contact between the aerial parts of the plant and the ground; (c) depressions probably corresponding to centroclinal lamination around plants; (c2) inferred presence of another group of plants required to generate the structure; (d) deflected and truncated ripple marks; (o) vegetation shadow with a particularly abrupt elevation immediately behind the depressions; (o2) inferred vegetation shadow required to generate the structure. C: Possible truncated ripple marks (base of layer, natural cast), ex situ fallen block immediately southwest of es Munt de Pedres (Port des Canonge Formation). D: Modern aeolian ripple marks deflected by vegetation (*Cyperus conglomeratus* Rottb.), acquiring a “U”-shape (black arrow), in the Al Wahiba Sands (Arabian Peninsula). Boot width in A1 = 10,5 cm, rectangles of the scale bar in B1 = 1 cm, hammer head length in C = 15 cm. For the position of the Mallorcan samples within the stratigraphic sections, see Matamales-Andreu *et al.* (2022).*

sediment seguint aquesta forma geomètrica quan baixa la força del flux (Underwood i Lambert, 1974; Rygel *et al.*, 2004; Durand *et al.*, 2011).

A Mallorca, sols se n'ha trobat un únic exemple clar en un bloc caigut. Això no obstant, s'ha pogut establir la polaritat original de la roca gràcies a la presència de les marques d'onetes remuntants, descartant que l'estructura sigui una deformació ascendent (*upturned beds*) generada també per la presència de vegetació (Rygel *et al.*, 2004).

Marques d'onetes desviades

[Fig. 5B]

Descripció. Motlle natural d'una estructura sedimentària consistent en una sèrie de marques d'onetes (*ripple marks*) truncades i que tenen forma d'«U» exageradament oberta, en un gres de gra fi. Aquestes marques d'onetes estan associades a tres depressions aproximadament circulars i altres marques més irregulars. A la superfície es veu qualche rizòlit del morfotip 3 definit en el present estudi. S'ha realitzat un motlle amb silicona d'aquesta superfície, que es conserva al MUCBO | Museu Balear de Ciències Naturals, Sóller (MBCN27442).

Localitats. Racó de s'Algar i possiblement torrent de na Nadala, part baixa-mitjana de la Formació Port des Canonge.

Observacions. Sols s'ha trobat un exemple clar d'aquesta estructura sedimentària, en un bloc caigut però de provenença totalment coneguda, ja que es trobava poc desplaçat. Es tracta d'un depòsit de desbordament damunt la planera d'inundació. Secundàriament, s'ha trobat un segon bloc caigut, el nivell original del qual es desconeix, que conserva parcialment unes estructures que recorden a les del primer bloc (Fig. 5C).

Discussió

Significació paleoambiental i paleohidrològica dels morfotips de rizòlits

Els vuit morfotips de rizòlits documentats es poden agrupar, de manera general, al llarg d'un gradient de condicions edàfiques i hidrològiques, des de sistemes radiculars de desenvolupament horitzontal, associats a sòls negats o amb drenatge restringit (morfotips 1, 2, 5 i 6), fins a sistemes de desenvolupament predominantment vertical, indicatius de sòls més ben drenats i possiblement estacionalment àrids (morfotips 3 i 4). Els morfotips 7 i 8, per la seva escassa representació, s'interpreten amb més cautela. A continuació es discuteixen les implicacions paleoambientals de cada morfotip o parell de morfotips:

En general, els rizòlits de desenvolupament horitzontal indiquen zones negades o sòls endurits on les rels no poden penetrar (Retallack, 1998). Per al morfotip 1, tant la litologia (gresos de gra molt fi) com l'ambient sedimentari (lòbuls de desbordament) fan pensar que es tractaria de zones inundades bona part de l'any, com basses i llacunes associades als rius meandriformes típics d'aquesta unitat

(Matamales-Andreu *et al.*, 2022). La coloració ocre-groga és compatible amb zones moderadament ben drenades (Kraus i Hasiotis, 2006), segurament durant les estacions més eixutes (Matamales-Andreu *et al.*, 2022). Es desconeix la planta que pot haver produït les rels que generaren aquest tipus de rizòlits. El morfotip 2, atès que sols s'ha observat en un estrat, podria ser una variació del morfotip 1, molt més carbonatada i, per tant, amb tots els rizòlits plens i massius; la interpretació paleoambiental que se'n desprèn és, en general, molt semblant a la d'aquest primer tipus.

Pel que fa al morfotip 3, la textura i la coloració s'interpreten com a indicis de sòls ben drenats en unes condicions recurrents d'aridesa (Kraus i Hasiotis, 2006), possiblement estacional. El fet de tenir rels de desenvolupament predominantment vertical reforça la hipòtesi que el sòl tengués un bon drenatge (Sarjeant, 1975). Per tant, aquests rizòlits es formaren en planeres d'inundació ja no tan properes als canals principals dels rius ni als cossos d'aigua associats. La planta productora d'aquestes rels possiblement era llenyosa, d'acord amb la mida i la profunditat que són capaces d'assolir; en nivells pròxims s'han trobat restes foliars de *?Feysia* i d'*Hermitia*, dues coníferes arborescents, i també pol·len d'altres grups de plantes llenyoses (Matamales-Andreu *et al.*, 2022), que donen suport a aquesta atribució. De manera similar als morfotips 1-2, és possible que el morfotip 4 fos generat pel mateix tipus de plantes que el morfotip 3, però en unes condicions sedimentològiques i hidrològiques lleugerament diferents (sòl més negat d'aigua). En tots dos casos (morfotips 1-2 i 3-4), la distinció és principalment morfològica i preservacional (grau de carbonatació, homogeneïtat del rebliment) i no implica necessàriament que els parells corresponguin a organismes productors

diferents. Part de la variabilitat observada podria estar relacionada amb processos tafonòmics o diagenètics (per exemple, diferències locals en la disponibilitat de carbonats durant la diagènesi primerenca) més que amb una diferència biològica real entre les plantes productores. Per aquest motiu, es modera la interpretació biològica d'aquesta distinció.

El morfotip 5 és idèntic al que descrigueren Bercovici *et al.* (2009) per al Permian (P3) de Menorca, on l'anomenaren «pedotip D». Aquests autors comentaren que la disposició del sistema radicular, amb una xarxa principal de rizòlits horitzontals dels quals n'emergixen de verticals, recorda al sistema de pneumatòfors dels actuals gèneres *Avicennia* i *Sonneratia*, típics d'ambients de manglar. La manca de les bases dels troncs, dels quals aquestes rels poguessin eixir, els va fer pensar que s'havia de tractar d'espècies suportades a l'aire pel sistema de rels verticals, com els gèneres actuals esmentats. A partir d'aquesta informació i altres dades, deduir que els estrats que contenen aquests fòssils corresponien a zones pantanoses, permanentment negades per una prima capa d'aigua.

Durant l'estudi dels materials de Menorca (Matamales-Andreu *et al.*, 2021d) i de Mallorca (Matamales-Andreu *et al.*, 2022), però, no s'han trobat evidències que indiquin que aquests nivells es formassin en uns cossos d'aigua permanents. La icnofàcies de *Mermia*, típica de basses permanents i descrita d'altres nivells de la Formació Port des Canonge (Matamales-Andreu *et al.*, 2022), no s'ha reconegut conjuntament amb el morfotip 5. A més, la carbonatació dels motlles de les rels indica uns medis amb un bon drenatge (almanco estacional), necessari per a precipitar les sals de calci. Aquest tipus de rizòlits surt en un conjunt de nivells de gresos vermells

massius i de gra molt fi, possiblement corresponent al marge d'un canal fluvial. Per això, es proposa que aquests sistemes fossin en realitat rizomes de plantes com les coes de cavall, de creixement més ràpid i que, de manera similar, poden formar rizomes subaquàtics que es ramifiquen en les tiges subaèries. S'han reconegut espores i troncs d'aquest tipus de plantes a la zona (Matamales-Andreu *et al.*, 2022).

El morfotip 6 apareix a la base de l'horitzó NA3 del Torrent de na Nadala, nivell que en un estudi previ es va interpretar com un interval on el sediment estava negat d'aigua, desencadenant el creixement horitzontal de les rels (Matamales-Andreu *et al.*, 2023a). El seu color, a més, indica un medi reductor. Tot això, juntament amb la geometria dels cossos sedimentaris i la pedogènesi rítmica del sediment, va permetre d'interpretar aquesta seqüència com una llacuna efímera que actuava d'abeurador temporal per la fauna de la zona (Matamales-Andreu *et al.*, 2023a).

Del morfotip 7, per la seva escassa representació (un únic bloc), no se'n pot interpretar gaire cosa més enllà que possiblement es desenvolupàs damunt les barres d'acreció lateral d'un riu meandriforme, encara saturades d'aigua.

Interpretació genètica de les estructures sedimentàries induïdes per la vegetació

A diferència dels rizòlits, la laminació centroclinal i les marques d'onetes desviades no registren directament l'arquitectura del sistema radicular, sinó la resposta del flux sedimentari a la presència d'obstacles vegetals (tiges, troncs o agrupacions de plantes) durant la deposició. La seva interpretació genètica es fonamenta, per tant, en comparacions amb estructures anàlogues descrites en altres registres fòssils i en anàlegs actuals.

Pel que fa a les estructures sedimentàries induïdes per la vegetació, val la pena remarcar que la laminació centroclinal ha estat sovint descrita al voltant de troncs gruixats, però no al voltant de brins relativament prims com el que es mostra en aquest estudi. Aquest tipus de laminació també s'ha vist en un bloc caigut de la Unitat P3 de Menorca (Permià mitjà-superior) (R. Matamalas-Andreu, obs. pers., 2026).

Les formes descrites a l'apartat de les marques d'onetes desviades es varen generar durant un flux (segurament aquós) que possiblement passava entre dues unitats de vegetació (similar, però a menor escala, als *scour-and-mound beds* de Rygel *et al.*, 2004). Així, les tres concavitats circulars (c) possiblement representen les laminacions centroclinals que envoltaven les bases de tres plantes. Posteriorment a aquestes, en el sentit del flux, s'hi desenvolupà una ombra de vegetació de molt poc relleu (o). Lateralment, aquesta ombra passava a una lleugera depressió, on es formà el grup de marques d'onetes desviades (d) seguint aquest relleu (relativament comparables als *diverted ripples* de Davies *et al.*, 2024). Per força, encara més lateralment hi havia d'haver un altre conjunt de plantes (c2, no conservades al bloc estudiat) que generaren una altra ombra de vegetació (o2, no conservada al bloc estudiat). Per aquest motiu, les onetes adquiriren forma d'«U», ja que s'adaptaven al microrelleu existent dels dos vessants. Posteriorment a la seva deposició, en la següent avinguda de sediment aquestes onetes es varen truncar, explicant les crestes quasi planes.

El mateix procés, però produït pel vent, s'ha observat per l'autor del present estudi a les dunes actuals de les arenes d'Al Wahiba (península Aràbiga), on les onetes que es troben entre dos grups de plantes adquireixen una forma d'«U» molt oberta, seguint les petites diferències del relleu (Fig.

5D); aquest anàleg actual dona suport a la interpretació genètica proposada per a l'exemple permià, tot i tractar-se d'un procés eòlic i no aquós.

Finalment, les altres estructures més irregulars que es conserven a la superfície d'interès (b) s'interpreten com a breus contactes de qualche part subaèria de la planta (per exemple, branques baixes) amb el terra quan era sacsada per l'aigua. Aquesta estructura s'ha observat també molt habitualment a les dunes actuals.

Conclusions

En conjunt, aquest estudi identifica per primera vegada al Permià de Mallorca un conjunt divers d'estructures sedimentàries induïdes per vegetació, amb vuit morfotips de rizòlits i dues estructures addicionals que reflecteixen una gran variabilitat d'ambients continentals. Les diferències morfològiques i sedimentològiques indiquen condicions paleoambientals diverses, des de zones embassades amb drenatge limitat fins a sòls més ben drenats estacionalment, suggerint una vegetació diversa i adaptada a un règim hidrològic fluctuant al llarg de la successió sedimentària. En conjunt, aquestes dades amplien el coneixement dels paleoecosistemes permians de les Balears i posen de manifest el paper clau de la vegetació en la configuració d'aquests ambients.

Agraïments

A Sebastià Matamalas per l'ajut en la feina de camp. Al Dr. Eudald Muijal (Staatliches Museum für Naturkunde Stuttgart), a dos revisors anònims i a l'editor, Guillem X. Pons, pels comentaris

que han contribuït a la millora del text original.

Referències

- Aref'ev, M.P. i Naugolnykh, S.V. 1998. Fossil roots from the Upper Tatarian deposits in the basin of the Sukhona and Malaya Severnaya Dvina rivers: Stratigraphy, taxonomy, and paleoecology. *Paleontological Journal*, 32(1): 82-97.
- Bercovici, A., Diez, J.B., Broutin, J., Bourquin, S., Linol, B., Villanueva-Amadoz, U., López-Gómez, J. i Durand, M. 2009. A palaeoenvironmental analysis of Permian sediments in Minorca (Balearic Islands, Spain) with new palynological and megafloral data. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 158: 14-28.
- Davies, N.S., McMahon, W.J. i Berry, C.M. 2024. Earth's earliest forest: fossilized trees and vegetation-induced sedimentary structures from the Middle Devonian (Eifelian) Hangman Sandstone Formation, Somerset and Devon, SW England. *Journal of the Geological Society*, 181(4): jgs2023-204.
- Durand, M. 2006. The problem of the transition from the Permian to the Triassic Series in southeastern France: comparison with other Peritethyan regions. *Geological Society, London, Special Publications*, 265: 281-296.
- Durand, M., Caron, J.-P. i Hagdorn, H. 2011. *Pan-European Correlation of the Triassic. 8th International Field Workshop. Triassic of Southeast France (Provence: Var & Alpes-Maritimes)*. Comité Français de Stratigraphie, Muschelkalkmuseum Hagdorn Stadt Ingelfingen, Association des Géologues du Permien et du Trias. 66 pp.
- García-Palou, J. i Matamales-Andreu, R. 2025. Taphonomy of the lower Permian Torrent de na Nadala site of Mallorca (western Mediterranean): a trampling case. In: Bassi, D. i De Curtis, O. (eds.). *Abstract book of the 10th International Meeting on Taphonomy and Fossilization, Taphos 2025, Comacchio (Ferrara), June 17th-19th, 2025*. *Annali online dell'Università di Ferrara, Sez. Fisica e Scienze della Terra*, 2. Università degli Studi di Ferrara. Ferrara. 61-62.
- Klappa, C.F. 1980. Rhizoliths in terrestrial carbonates: classification, recognition, genesis and significance. *Sedimentology*, 27(6): 613-629.
- Kraus, M.J. i Hasiotis, S.T. 2006. Significance of different modes of rhizolith preservation to interpreting paleoenvironmental and paleohydrologic settings: examples from Paleogene paleosols, Bighorn Basin, Wyoming, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 76(4): 633-646.
- Matamales-Andreu, R. 2022. Rèptils i avantpassats dels mamífers: registre fòssil del Permià de Mallorca. In: Pons, G.X., del Valle, L., McMinn, M., Pinya, S. i Vicens, D. (eds.). *Llibre de ponències i comunicacions de les VIII Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears*. Societat d'Història Natural de les Balears, Universitat de les Illes Balears. Palma. 83-86.
- Matamales-Andreu, R. 2023a. *Permian and Triassic ecosystems of the Gymnesic Islands (western Mediterranean)*. Tesi Doctoral. Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont, Universitat Autònoma de Barcelona. Barcelona. 752 pp.
- Matamales-Andreu, R. 2023b. Els fòssils més antics de Mallorca: valoració patrimonial dels jaciments paleontològics més excepcionals de la serra de Tramuntana. In: Consorci Serra de Tramuntana (ed.). *Premis Serra de Tramuntana Recerca i Investigació. Estudis sobre el Patrimoni Mundial de la Serra de Tramuntana*. Consell de Mallorca. Palma. 1-28.
- Matamales-Andreu, R. 2025. La posició estratigràfica i la identitat taxonòmica dels ossos de tetràpodes del Permià de Mallorca trobats a la dècada del 1980. In: Pons, G.X., del Valle, L., McMinn, M., Pinya, S. i Vicens, D. (eds.). *IX Jornades de Medi Ambient de les Illes Balears. Llibre de Ponències i Comunicacions*. Societat d'Història Natural de les Balears, Universitat de les Illes Balears. Palma. 94-97.
- Matamales-Andreu, R. 2026a. El registre paleontològic dels ecosistemes del Permià (fa

- ~270 milions d'anys) al terme de Banyalbufar. In: Vibot, T. (ed.). *Resum de les comunicacions de les II Jornades d'Estudis Locals de Banyalbufar*. Ajuntament de Banyalbufar. Banyalbufar. 6-7.
- Matamales-Andreu, R. 2026b. El registre paleontològic dels ecosistemes del Permià (fa ~270 milions d'anys) al terme de Banyalbufar. In: Vibot, T. (ed.). *Llibre de Resums de les II Jornades d'Estudis Locals de Banyalbufar*. Ajuntament de Banyalbufar. Banyalbufar. En premsa.
- Matamales-Andreu, R., Fortuny, J., Muijal, E. i Galobart, À. 2019. Tetrapod tracks from the Permian of Mallorca (western Mediterranean): preliminary data, biostratigraphic and biogeographic inferences. In: The Palaeontological Association (ed.). *The Palaeontological Association, 63rd Annual Meeting, 15th-21st December 2019*. The Palaeontological Association. València. p. 107.
- Matamales-Andreu, R., Oms, O. i Fortuny, J. 2021a. Paleoeosistemes del Permià i Triàsic continental de Mallorca (Illes Balears, Mediterrània occidental): síntesi i perspectives futures. In: Gómez-Pujol, L., Roig-Munar, F.X., Gelabert, B. i Martín, J.A. (eds.). *De la terra a la mar i de la mar a la terra. Homenatge a Antonio Rodríguez-Perea*. Monografies de la Societat d'Història Natural de les Balears, 34. Societat d'Història Natural de les Balears. Palma. 17-39.
- Matamales-Andreu, R., Muijal, E., Galobart, À. i Fortuny, J. 2021b. Insights on the evolution of synapsid locomotion based on tetrapod tracks from the lower Permian of Mallorca (Balearic Islands, western Mediterranean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 579: 110589.
- Matamales-Andreu, R., Galobart, À. i Fortuny, J. 2021c. New occurrences of small moradisaurine captorhinid eureptiles from the Permian of Mallorca (western Mediterranean). In: Belvedere, M., Díez Díaz, V., Mecozzi, B. i Sardella, R. (eds.). *Abstract book of the XVIII Annual Conference of the European Association of Vertebrate Palaeontologists, online, 5th-9th July 2021*. *Palaeovertebrata*, 44. p. 115.
- Matamales-Andreu, R., Roig-Munar, F.X., Oms, O., Galobart, À. i Fortuny, J. 2021d. A captorhinid-dominated assemblage from the palaeoequatorial Permian of Menorca (Balearic Islands, western Mediterranean). *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 112(2): 125-145.
- Matamales-Andreu, R., Muijal, E., Dinarès-Turell, J., Kustatscher, E., Roghi, G., Oms, O., Galobart, À. i Fortuny, J. 2022. Early-middle Permian ecosystems of equatorial Pangaea: Integrated multi-stratigraphic and palaeontological review of the Permian of Mallorca (Balearic Islands, western Mediterranean). *Earth-Science Reviews*, 228: 103948.
- Matamales-Andreu, R., Muijal, E., Galobart, À. i Fortuny, J. 2023a. A new medium-sized moradisaurine captorhinid eureptile from the Permian of Mallorca (Balearic Islands, western Mediterranean) and correlation with the co-occurring ichnogenus *Hyloidichnus*. *Papers in Palaeontology*, 9(3): e1498.
- Matamales-Andreu, R., Muijal, E., Galobart, À. i Fortuny, J. 2023b. Discovery of several medium-sized moradisaurine captorhinids (Reptilia) in the Permian of Mallorca (western Mediterranean). In: Alba, D.M., Marigó, J., Nacarino-Meneses, C. i Villa, A. (eds.). *Book of Abstracts of the 20th Annual Conference of the European Association of Vertebrate Palaeontologists, 26th June-1st July 2023*. *Palaeovertebrata*, Special Volume 1-23. Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont. Sabadell. p. 163.
- Matamales-Andreu, R., Kammerer, C.F., Angielczyk, K.D., Simões, T.R., Muijal, E., Galobart, À. i Fortuny, J. 2024a. Early-middle Permian Mediterranean gorgonopsian suggests an equatorial origin of therapsids. *Nature Communications*, 15: 10346.
- Matamales-Andreu, R., Kammerer, C.F., Angielczyk, K.D., Simões, T.R., Muijal, E., Galobart, À. i Fortuny, J. 2024b. First therapsid fossil from the Permian of the Mediterranean. In: Nakrem, H.A. (ed.). *21st*

- EAVP Conference 2024, 28.08-01.09.24 Longyearbyen, Svalbard. Abstracts and Proceedings of the Geological Society of Norway*, 1(2024). Norsk Geologisk Forening. Trondheim. p. 34.
- Matamales-Andreu, R., Kammerer, C.F., Angielczyk, K.D., Simões, T.R., Muijal, E., Galobart, A. i Fortuny, J. 2024c. A partial therapsid skeleton from the Permian of Mallorca (western Mediterranean). In: Rubidge, B., Rubidge, M., Abrahams, M., Van den Brandt, M. i Arnols, J. (eds.). *Abstract Book. The 22nd Biennial Meeting of the Palaeontological Society of Southern Africa. 8-13 September 2024, Graaff-Reinet, Eastern Cape*. Palaeontological Society of Southern Africa. Graaff-Reinet. p. 72.
- Matamales-Andreu, R., Muijal, E., Galobart, À. i Fortuny, J. 2025. Track-trackmaker correlation of co-occurring gorgonopsian bones and footprints from the early-?middle Permian of equatorial Pangaea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 667: 113174.
- Muijal, E., Fortuny, J., Pérez-Cano, J., Dinarès-Turell, J., Ibáñez-Insa, J., Oms, O., Vila, I., Bolet, A. i Anadón, P. 2017. Integrated multi-stratigraphic study of the Coll de Terrers late Permian–Early Triassic continental succession from the Catalan Pyrenees (NE Iberian Peninsula): a geologic reference record for equatorial Pangaea. *Global and Planetary Change*, 159: 46-60.
- Muijal, E., Matamales-Andreu, R., Galobart, À. i Fortuny, J. 2023. Co-occurrence of *Hyloidichnus* tracks and moradisaurine skeletons in the Permian of Mallorca (W Mediterranean). In: Vlachos, E., Crespo, V.D., Ríos Ibáñez, M., Arnal, F.A.M., Gamonal, A., Cruzado-Caballero, P., González-Dionis, J., Guerrero-Arenas, R. i Sánchez-García, A. (eds.). *Book of Abstracts of the 4th Palaeontological Virtual Congress*. Palaeontological Virtual Congress. p. 177.
- Retallack, G.J. 1998. Core concepts of paleopedology. *Quaternary International*, 51: 203-212.
- Rygel, M.C., Gibling, M.R. i Calder, J.H. 2004. Vegetation-induced sedimentary structures from fossil forests in the Pennsylvanian Joggins Formation, Nova Scotia. *Sedimentology*, 51(3): 531-552.
- Sarjeant, W.A.S. 1975. Plant trace fossils. In: Frey, R.W. (ed.). *The Study of Trace Fossils*. Springer Verlag. Nova York. 163-179.
- Sheldon, N.D. 2005. Do red beds indicate paleoclimatic conditions?: a Permian case study. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 228(3-4): 305-319.
- Smith, R.M.H. 1990. Alluvial Paleosols and pedofacies sequences in the Permian Lower Beaufort of the southwestern Karoo Basin, South Africa. *Journal of Sedimentary Research*, 60(2): 258-276.
- Tabor, N.J., Smith, R.M.H., Steyer, J.S., Sidor, C.A. i Poulsen, C.J. 2011. The Permian Moradi Formation of northern Niger: paleosol morphology, petrography and mineralogy. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299: 200-213.
- Underwood, J.R. Jr. i Lambert, W. 1974. Centrocinal cross strata, a distinctive sedimentary structure. *Journal of Sedimentary Petrology*, 44(4): 1111-1113.