



Departament de Geologia dinàmica, Geofísica i Paleontologia
UNIVERSITAT DE BARCELONA

**ICNOLOGIA
DE LES CONQUES MARINES PLIOCENES DEL MARGE
NORD-OCCIDENTAL DE LA MEDITERRÀNIA**

Memòria realitzada per JORDI MARIA DE GIBERT ATIENZA al
Departament de Geologia Dinàmica, Geofísica i Paleontologia de la
Universitat de Barcelona sota la direcció del Dr. Jordi Martinell Callicó
per optar al grau de Doctor en Geologia.

Barcelona, Novembre de 1995

El Doctorant, Jordi M. de Gibert

El Director, Jordi Martinell

Aquest treball ha estat finançat per una beca de Formació de Professorat Universitari
del Ministeri d'Educació i Ciència emmarcada dintre dels projectes PB 90-0489 i PB 94-0946
de la DGICYT.

1.5.1.3. Consistència del substrat

Aquest paràmetre ja ha estat tractat anteriorment com un control important des del punt de vista tafonòmic. Però aquest factor a més de controlar el potencial de preservació de les traces, també controla el tipus d'organismes que poden ocupar el substrat i el seu comportament. Així, alguns organismes estan adaptats a viure en substrats fluïds, altres prefereixen substrats prou tous per bioturbar però prou fermes per mantenir caus oberts, mentre que alguns s'han especialitzat a perforar substrats durs. El mecanisme d'excavació ha de ser diferent en cada cas, en substrats tous la simple penetració (doble àncora, p. e.) pot ser suficient, mentre que en substrats més consistents l'acció de determinades parts anatòmiques (mandíbules, radioles, potes, etc.) és necessària. En substrats durs poden combinar-se mecanismes mecànics amb dissolució química.

1.5.1.4. Salinitat

La salinitat és un element important en el control de la distribució dels organismes especialment en zones marginals de transició entre medis marins i continentals (estuaris, deltes, badies, etc.) on es produeix la barreja de les aigües marines (salinitat normal, 35‰) i continentals (salinitat 0‰). Emery & Stevenson (1957) van representar gràficament la diversitat específica en un ambient de transició en funció de la salinitat, mostrant que la diversitat mínima es dóna en aigües salobres. Aquesta diversitat mínima està fortament influenciada no només per les salinitats intermèdies sinó també per les condicions normalment cambiables i inestables de la salinitat en aquestes àrees.

Des del punt de vista icnològic, són especialment destacables els estudis en els estuaris de l'actual costa de Georgia (Herweck 1972a, b, Hertweck & Little-Gadow 1975). Aquests autors van poder observar com la diversitat augmenta cap al mar des de condicions d'aigua dolça fins a salinitat normal, però la taxa total de bioturbació és més important en zones més internes (Dörjes & Howard 1975). En el registre fòssil, és destacable el treball de Archer & Maples (1984) que estudien l'icnologia en dipòsits transicionals del Carbonífer d'Amèrica del Nord, constatant un patró de distribució molt comparable al gràfic de Hedgpeth: diversitat moderada en medis fluvials, baixa o absent en ambients salobres i molt alta en dipòsits clarament marins.

1.5.1.5. Oxigenació

L'oxigen és indispensable per a la vida dels animals encara que alguns poden viure amb nivells d'oxigen més baixos que altres. Rhoads & Morse (1971) utilitzen tres termes per les condicions d'oxigenació de les aigües marines:

- aeròbiques (més d'1 ml O₂/l H₂O) que poden suportar una abundant i diversa fauna amb esquelet calcari.

- disaeròbiques (0.1-1 ml O₂/l H₂O) on els organismes amb conquilla desapareixen i els animals que hi viuen són fonamentalment de cos tou, poc abundants i diversos però que poden donar lloc a associacions de traces característiques.

-anaeròbiques (menys de 0.1 ml O₂/l H₂O) que no permeten cap mena de forma de vida, encara que alguns organismes infàunics poden sobreviure en aquestes condicions sempre que mantinguin contacte amb aigües més oxigenades mitjançant algun pou o galeria.

Bromley & Ekdale (1984) mostren com en una comunitat estructurada verticalment el contingut en oxigen decreix cap a les capes més profundes i proposen la sèrie *Planolites-Thalassinoides-Zoophycos-Chondrites* com indicadora de menor oxigenació progressiva en la vertical. També van comprovar com en fons progressivament menys oxigenats els nivells ecològics més sots van desapareixent sent *Chondrites* la forma més tolerant.

Savrda (1992) fa una revisió de la influència de l'oxigen sobre les traces fòssils. Constata que com més pobre en oxigen és un sediment menor és la diversitat icnològica, menor la penetració vertical de la bioturbació i menor el diàmetre de les excavacions. Això permet establir diferents estadis d'oxigenació entre uns sediments laminats anòxics i altres amb abundant i diversa bioturbació corresponents a fons ben oxigenats i estudiar possibles ciclicitats (Savrda & Bottjer 1989 p.e.).

1.5.1.6. Energia hidrodinàmica

Condicions d'energia elevada provoquen que gran part de l'aliment es trobi en suspensió, això afavoreix la presència d'organismes suspensívors que poden ocupar estructures de tipus Domichnia. A més, les condicions inestables de la superfície afavoreixen la construcció de caus profunds i verticals. En condicions d'energia baixa, en canvi, l'aliment es troba al sediment afavorint la presència de sedimentívors que donen lloc a estructures de tipus Fodinichnia i Pascichnia. Aquest simple esquema pot ser alterat en determinades situacions extremes, ja que una excésiva turbulència en un medi molt agitat pot dificultar la proliferació d'organismes suspensívors, mentre que, per altra banda, una excésiva acumulació de matèria orgànica en un medi tranquil pot consumir l'oxigen intersticial i inhibir l'activitat dels sedimentívors.

1.5.1.7. Aliment al sediment

La quantitat d'aliment present en el sediment, bé sigui en forma de detritus aprofitables o de meiofauna, està força relacionada amb altres factors com són la granulometria, l'oxigenació o l'energia ambiental. És per això que la seva influència sobre el tipus i quantitat de bioturbació ja ha estat parcialment comentada. Evidentment la presència d'aliment afavoreix la presència de sedimentívors que desenvoluparan diferents estratègies de comportament en funció de la seva abundància i distribució. Algunes traces d'alimentació (típicament *Chondrites*) es presenten en densitats importants en zones especialment riques, com poden ser determinats nivells sedimentaris o el reblliment d'altres caus.

1.5.1.8. Estil de sedimentació

El diferent tipus de sedimentació condiona en gran mesura el tipus de bioturbació que s'hi trobarà associada ja que condiona el tipus de comunitat bentònica que pot ocupar el substrat, el seu grau de maduresa i el tipus d'activitats que desenvoluparan els seus membres. Aquí analitzarem alguns contextos sedimentaris diferents tal com han fet altres autors (Howard 1978, García Ramos *et al.* 1989).

• Sedimentació contínua lenta

Una sedimentació continuada i lenta, que es pot donar en contextos profunds, zones d'*offshore*, o zones protegides, pot donar lloc a fàbriques totalment bioturbades si les condicions són favorables. La deposició tranquil·la permet el desenvolupament de comunitats madures sovint estratificades que donen lloc a associacions de traces fòssils on dominen les estructures més profundes que es sobreimposen totalment o parcial a les més superficials. Un exemple d'aquest tipus de context és la *chalk* del Cretaci superior del Noroest d'Europa i Nord-Amèrica (Frey & Bromley 1985 p.e.).

• Sedimentació contínua ràpida

Aquest tipus de deposició es dona en contextos d'energia elevada continuada com per exemple dunes, zones de foreshore, canals mareals, etc. La fàbrica és dominada per estructures físiques sent la bioturbació en general dispersa i dominada per caus d'habitació, generalment verticals i profunds, i estructures d'ajustament. Exemples clars són algunes de les icnofàbriques d'*Ophiomorpha* presentades per Pollard *et al.* (1993).

- **Sedimentació alternant lenta i ràpida**

Aquest tipus de deposició es dona en zones amb sedimentació tranquil·la que es veu alterada per dipòsits ràpids més grollers de caràcter episòdic com ara tempestífics o turbidífics. En aquests contextes es dona la presència de dues associacions de traces fòssils diferenciades. El sediment més fi pot presentar una bioturbació total o parcial amb associacions de traces fòssils similars a les del primer cas aquí exposat. Malgrat tot la preservació d'aquesta comunitat predeposicional pot ser controlada en gran part per la sedimentació del nivell groller, especialment en el cas de les turbidites (veure apartat 2.4.1.4). L'associació post-episòdica es resultat de la colonització del nou substrat i inclou traces d'organismes oportunistes i també estructures d'escapament. Exemples d'aquestes associacions són donats per Frey (1990) i Frey & Goldring (1992).

- **Sedimentació lenta amb aturades**

Aquesta situació es pot donar en situacions de plataforma distal i també en situacions marginals on es donen condicions subaèrees esporàdicament. En aquests contextes els moments d'aturada poden produir l'enduriment del sediment i el desenvolupament de associacions típiques de *firmgrounds* i *hardgrounds* (Ekdale & Bromley 1984 p.e.).

- **Sedimentació ràpida intermitent i erosió**

Aquest tipus de deposició es dona en zones de *shoreface*. Els dipòsits acumulats episòdicament són colonitzats i bioturbats per organismes oportunistes, malgrat això si la bioturbació no és pou profunda aquesta pot ser eliminada per l'erosió associada a la deposició del següent nivell. Així doncs el conjunt és una superposició de nivells amalgamats on dominen les estructures físiques i on les estructures biogèniques són escasses i poc diverses.

1.5.1.9. Alteració biològica

L'activitat dels organismes bentònics pot provocar canvis en el substrat que ocupen que alhora pot causar la modificació de la comunitat inicial. Això es conegut com l'efecte *feedback* (Driscoll 1975). Un exemple molt conegut és el presentat per Rhoads *et al.* (1978) en ambients estuarins en que la progressiva colonització d'un substrat nou comença amb la ocupació per part d'uns organismes oportunistes que afavoreixen la progressiva oxigenació del sediment a nivells més profunds permetent la instal·lació d'una comunitat cada cop més complexa. Un altre cas molt

freqüent és l'alteració de la textura del sediment per organismes sedimentívors que poden transformar un sediment de gra fi en un de gra groller per pel·letització.

1.5.1.10. Batimetria

La profunditat no és un control en sí mateixa sinó indirectament, ja que gran part dels paràmetres ecològics importants (temperatura, llum, energia, taxa de sedimentació, matèria orgànica) segueixen, en molts casos, un gradient batimètric. La batimetria va ser el fonament de les icnofàcies proposades per Seilacher (1964) i serà més àmpliament discutida més endavant (apartat 1.5.2).

1.5.2. Les icnofàcies

Al 1964 (a), Seilacher adverteix, a partir de l'estudi de nombrosos casos fòssils, l'existència de tres associacions de traces fòssils recurrents pel que fa als grups etològics que hi són representats. Les anomena icnofàcies universals * i les relaciona amb determinades condicions paleobatimètriques. Aquestes icnofàcies són fàcies de *Cruziana* (litoral a sublitoral amb domini de *Cubichnia*, *Domichnia* i *Fodinichnia*), fàcies de *Zoophycos* (sublitoral a batial, amb domini de *Fodinichnia*) i fàcies de *Nereites* (batial amb sedimentació turbidítica amb domini de *Pascichnia*). A més assenyala la presència a l'Ordovicià de l'Irak d'una quarta icnofàcies, fàcies de *Scolithus*, amb domini de *Domichnia* verticals. Tres anys més tard, aquest mateix autor (Seilacher 1967) proposa dues icnofàcies més: fàcies de *Scoyenia* (per materials clàstics no marins) i fàcies de *Glossifungites* (per sediments semiconsolidats). Al 1978, Seilacher fa una presentació completa del seu model batimètric amb les sis icnofàcies.

L'èxit del model va portar a la definició de noves icnofàcies. Frey & Seilacher (1980) defineixen la icnofàcies de *Trypanites* per associacions de traces en superfícies endurides i Bromley *et al.* (1984) proposen l'icnofàcies de *Teredolites* per a substrats llenyosos que contenen perforacions de bivalves. Aquestes vuit icnofàcies poden ser considerades com les icnofàcies "clàssiques" pel seu ús i són les que generalment són recollides als tractats generals. Dues més han estat proposades posteriorment, *Psilonichnus* (Frey & Pemberton (1987) i *Arenicolites* (Bromley & Asgaard 1991), que fins ara han estat molt poc utilitzades i de les que més endavant discutirem la seva validesa.

* Després han esta anomenades simplement icnofàcies, icnofàcies seilacherianes (*Seilacherian ichnofacies*, Bromley 1990) o icnofàcies arquetípiques (*archetypal ichnofacies*, Frey *et al.* 1990, Goldring 1993)

Dintre de tot aquest conjunt d'icnofàcies podem diferenciar dos grans grups (Ekdale *et al.* 1984, Goldring 1993):

- Aquelles controlades pel tipus de substrat: Trypanites, Glossifungites i Teredolites*.
- Aquelles controlades per factors ecològics en substrats tous: Scoyenia, Skolithos, Cruziana, Zoophycos, Nereites, Pylonichnus i Arenicolites.

1.5.2.1. Icnofàcies amb control del substrat (fig. 8)

Tres icnofàcies queden dintre d'aquest grup: Trypanites (substrats rígids minerals), Glossifungites (substrats semiconsolidats) i Teredolites (substrats rígids vegetals).

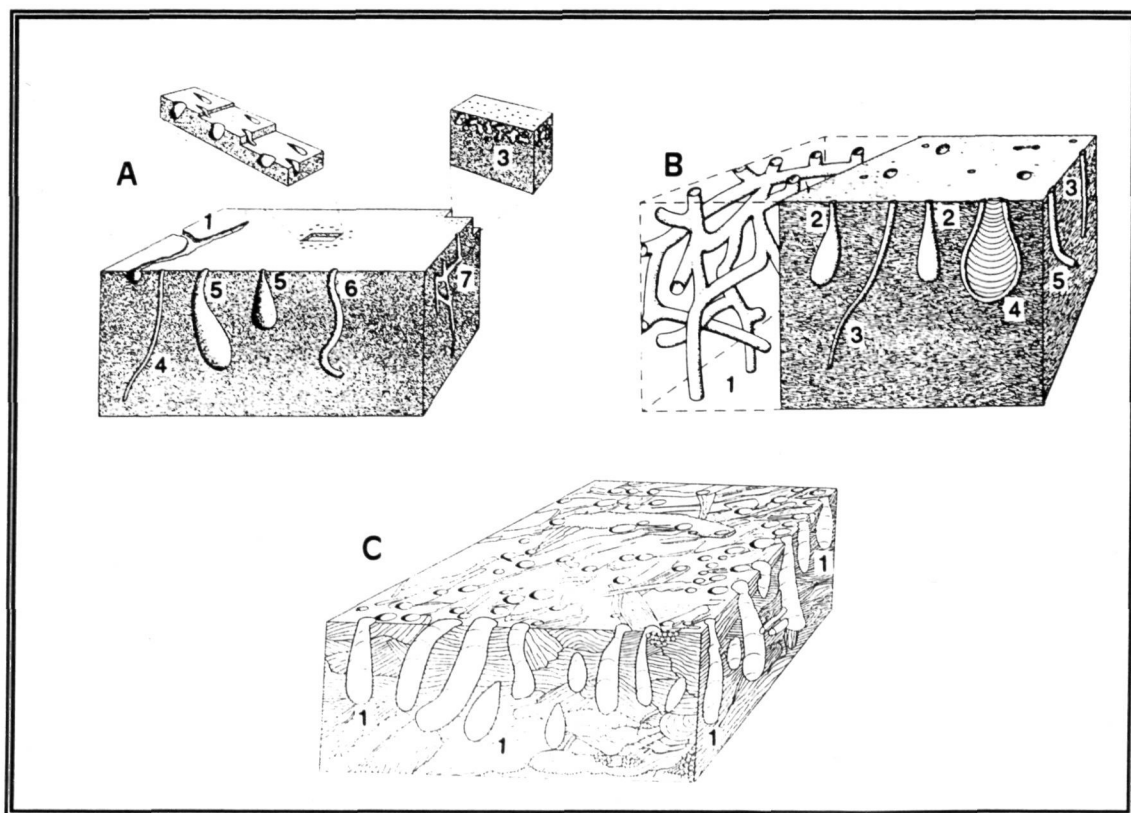


Figura 8. Les tres icnofàcies amb control del substrat. A. Icnofàcies de Trypanites, amb rascadures d'equínids (1), *Rogerella* (2), *Entobia* (3), *Trypanites* (4, 6), *Gastrochaenolites* (5) i una perforació de poliquet (7). B. Icnofàcies de Glossifungites amb *Thalassinoides* (1), *Gastrochaenolites* (2), *Skolithos* o *Trypanites* (3), *Diplocraterion* o *Rhizocorallium* (4) i *Pylonichnus* (5). C. Icnofàcies de Teredolites amb *Teredolites* (1). A i B de Frey & Pemberton (1984), C de Pemberton *et al.* (1992a).

Figure 8. The three substrate-controlled ichnofacies. A. *Trypanites* ichnofacies with echinoid grooves (1), *Rogerella* (2), *Entobia* (3), *Trypanites* (4, 6), *Gastrochaenolites* (5) and a polychaete boring (7). B. *Glossifungites* ichnofacies with *Thalassinoides* (1), *Gastrochaenolites* (2), *Skolithos* or *Trypanites* (3), *Diplocraterion* or *Rhizocorallium* (4) and *Pylonichnus* (5). C. *Teredolites* ichnofacies with *Teredolites* (1). A and B from Frey & Pemberton (1984), C from Pemberton *et al.* (1992a).

* Amb caràcters normals perquè el taxó no ha de ser necessàriament present

- **Iconofàcies de Trypanites** (fig. 8A)

Va ser proposada per Frey & Seilacher (1980) per a associacions en substrats totalment litificats en ambients marins. Són associacions que inclouen estructures de perforació, predominantment Domichnia (*Gastrochaenolites*, *Entobia*, *Trypanites*, *Maeandropolydora*) i també Pascichnia (*Radulichnus*, *Gnatichnus*). Es dóna en costes rocoses, superfícies d'enduriment submarines, conglomerats submarins, nivells de conques i esculls. També pot en alguns casos aparèixer en ambients no marins (Bromley & Asgaard 1991). Les associacions de perforacions en conques o clastes aïllats no poden ser considerats, segons Bromley & Asgaard (1991), com a iconofàcies de Trypanites, sinó que s'han d'incloure com a part de les iconofàcies de substrat tou en que es troben.

- **Iconofàcies de Glossifungites** (fig. 8B)

Va ser inicialment proposada per Seilacher (1967) i redefinida per Frey & Seilacher (1980) per a substrats consistents però no cimentats resultat de la pèrdua d'aigua de sediments argilosos. Es pot donar en condicions subaèrees supra o intermareals i també en llocs on l'erosió exhuma nivells de sediment que han estat compactats com canals o canons submarins (Seilacher 1978, Frey *et al.* 1990). També pot donar-se en ambients continentals. Els components acostumen a ser Domichnia com *Thalassinoides*, *Skolithos*, *Glyphichnus*, sovint amb marques d'excavació a les parets, en alguns casos incloent estructures de perforació com *Gastrochaenolites*.

- **Iconofàcies de Teredolites** (fig. 8C)

Va ser proposada per Bromley *et al.* (1984) per separar associacions de perforacions en substrats llenyosos de l'iconofàcies de Trypanites. Aquesta separació estava justificada per les diferents característiques de la fusta en front dels substrats minerals que implica uns mecanismes de perforació diferents. L'iconofòsil típic és *Teredolites*, una perforació de bivalves marins. En ambients continentals les perforacions predominantment d'insectes en substrats vegetals, tant fulles com fusta, són comunes. Aquestes no poden ser incloses dintre d'aquesta iconofàcies si considerem el tipus de traces i d'ambient sedimentari, però caldria considerar-les com a tal si restringim el criteri al tipus de substrat.

1.5.2.2. Icnofàcies en substrat tou (fig. 9)

• Icnofàcies de *Scoyenia* (fig. 9A)

Aquesta icnofàcies va ser proposada per Seilacher (1967) per a capes vermelles continentals. L'ús posterior que se'n va fer la va anar extenent fins a incloure totes les associacions clàstiques no marines (Ekdale *et al.* 1984, Frey *et al.* 1984). Al 1984 Frey *et al.* redefeixen l'icnofàcies incloent associacions amb relativament baixa diversitat, que contenen pocs icnogèneres únics, i similars en aspectes generals a altres associacions d'ambients marins. Aquesta definició conferia a l'icnofàcies un valor molt limitat. Estudis més exhaustius de traces fòssils en dipòsits continentals (Bromley & Asgaard 1979, Pollard 1988) van mostrar l'àmplia varietat d'associacions presents en ambients no marins. Moltes d'elles són comparables a les icnofàcies de *Skolithos*, *Cruziana* o *Glossifungites* (Bromley & Asgaard 1991) encara que en general més pobres. Per tant la barrera de la salinitat no sembla suficient per mantenir una icnofàcies separada i l'icnofàcies de *Scoyenia* hauria de ser abandonada com suggereixen Bromley & Asgaard (1991). Recentment, Buatois & Mangano (1995) han proposat l'existència de, al menys, tres icnofàcies per a dipòsits continentals: *Termitichnus* per ambients permanent emergits, *Scoyenia* per ambients només temporalment submergits i *Mermia* per ambients subaquàtics. Aquesta proposta pot dur una nova visió més clara a l'icnologia en medis continentals.

• Les quatre icnofàcies originals. Importància de la batimetria

Al 1964 (a) Seilacher proposa les quatre primeres icnofàcies (*Skolithos*, *Cruziana*, *Zoophycos* i *Nereites*) com un model batimètric per a la interpretació de dipòsits antics. Aquest model es ben acceptat i en alguns casos és utilitzat de manera massa rígida, malgrat que el propi Seilacher (1978) adverteix que és un model generalista amb excepcions i que cal analitzar cada cas. Seilacher (1978) fa notar que la profunditat és només un control indirecte sobre la distribució de les traces fòssils i que són altres paràmetres que normalment presenten gradients batimètrics els veritables responsables.

Byers (1982) fa una crítica exhaustiva al model batimètric exposant com altres factors ecològics que no sempre segueixen gradients batimètrics són molt importants en la distribució de les icnofàcies. Mostra com en ambients somers l'icnofàcies de *Skolithos* no sempre és més soma que la de *Cruziana* i com la de *Zoophycos* i la de *Nereites* poden ser diferents variants preservacionals d'una mateixa associació. A més a més crítica el paradigma de l'alimentació (segons el qual a més profunditat, menys matèria orgànica i per tant més complexitat en les

estructures produïdes per pasturadors per esdevenir més efectives) a partir de l'estudi en oceans actuals.

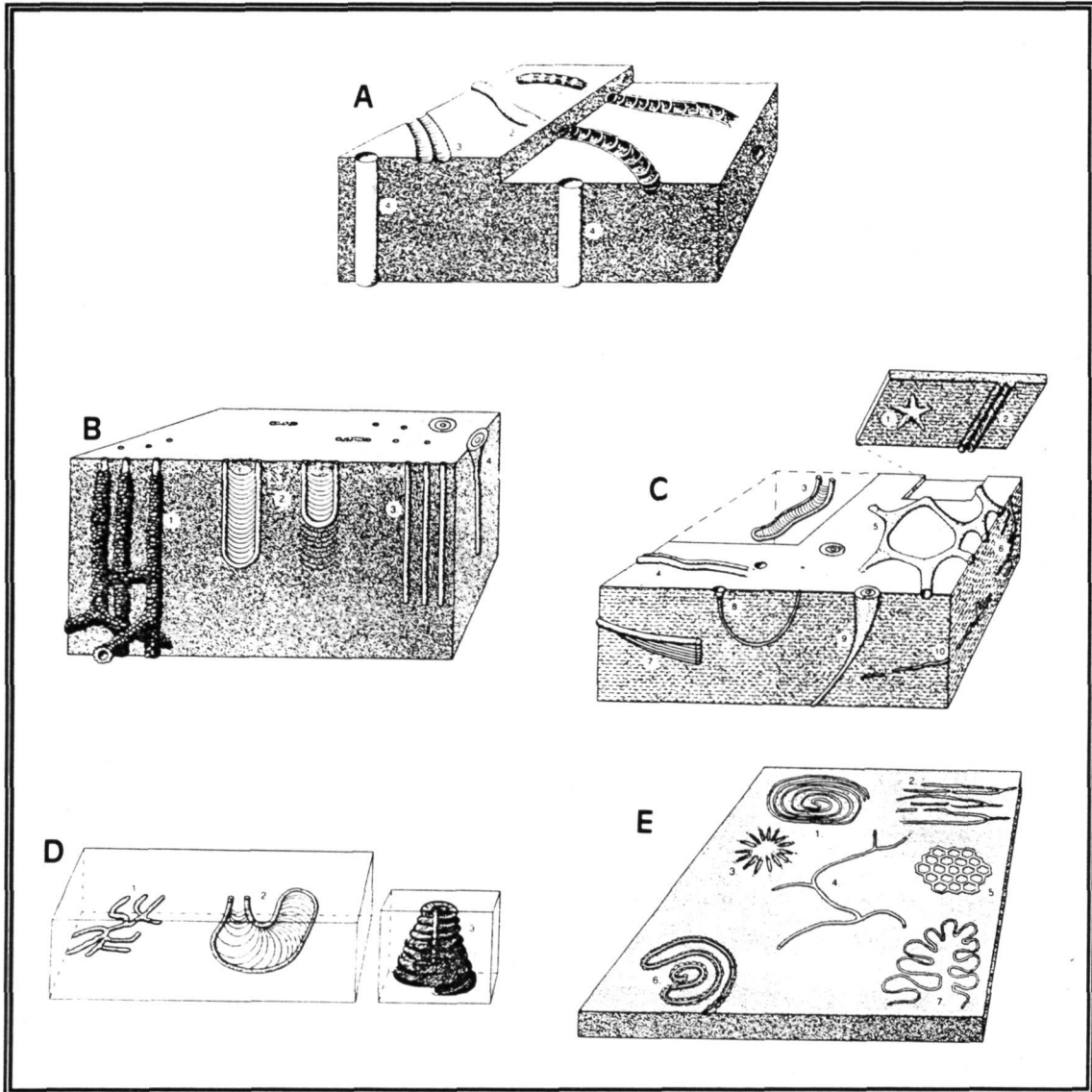


Figura 9. Icnofàcies en substrat tou. A. Icnofàcies de *Scoyenia* amb *Scoyenia* (1), *Ancorichnus* (2), *Cruziana* (3) i *Skolithos* (4). B. Icnofàcies de *Skolithos* amb *Ophiomorpha* (1), *Diplocraterion* (2), *Skolithos* (3) i *Monocraterion* (4). C. Icnofàcies de *Cruziana* amb *Asteriacites* (1), *Cruziana* (2), *Rhizocorallium* (3), *Aulichnites* (4), *Thalassinoides* (5), *Chondrites* (6), *Teichichnus* (7), *Arenicolites* (8), *Rosselia* (9) i *Planolites* (10). D. Icnofàcies de *Zoophycos* amb *Phycosiphon* (1), *Zoophycos* (2) i *Spyrophyton* (3). E. Icnofàcies de *Nereites* amb *Spiroraphe* (1), *Urohelminthoidea* (2), *Lorenzina* (3), *Megagraption* (4), *Palaeodictyon* (5), *Nereites* (6) i *Cosmoraphe* (7). Segons Frey & Pemberton (1984).

Figure 9. Softground ichnofacies. A. *Scoyenia* ichnofacies with *Scoyenia* (1), *Ancorichnus* (2), *Cruziana* (3) and *Skolithos* (4). B. *Skolithos* ichnofacies with *Ophiomorpha* (1), *Diplocraterion* (2), *Skolithos* (3) and *Monocraterion* (4). C. *Cruziana* ichnofacies with *Asteriacites* (1), *Cruziana* (2), *Rhizocorallium* (3), *Aulichnites* (4), *Thalassinoides* (5), *Chondrites* (6), *Teichichnus* (7), *Arenicolites* (8), *Rosselia* (9) and *Planolites* (10). D. *Zoophycos* ichnofacies with *Phycosiphon* (1), *Zoophycos* (2) and *Spyrophyton* (3). E. *Nereites* ichnofacies with *Spiroraphe* (1), *Urohelminthoidea* (2), *Lorenzina* (3), *Megagraption* (4), *Palaeodictyon* (5), *Nereites* (6) and *Cosmoraphe* (7). Segons Frey & Pemberton (1984).

Posteriorment, diversos autors (Ekdale 1988, Bromley 1990, Frey *et al.* 1990, Bromley & Asgaard 1991, Goldring 1993) han contribuït a que el model de les icnofàcies fos reevaluat, lluny de la rigidesa inicial, per considerar-les com a controlades per un conjunt de factors ecològics (lligats o no amb la batimetria) i també tafonòmics. Així per exemple el model bidimensional clàssic de distribució de les icnofàcies ha estat substituït per models tridimensionals molt més complexes (Frey *et al.* 1990, Pemberton *et al.* 1990, Bromley & Asgaard 1990) (fig. 10).

L'icnofàcies de Skolithos (fig. 9B) correspon a condicions de moderada a relativament alta energia en sediments mòbils generalment arenosos sotmesos a erosió i sedimentació abrupta. L'erosió elimina el producte de l'activitat dels nivells ecològics més superficials. L'elevada energia hidrodinàmica i la baixa predictibilitat fan que aquesta icnofàcies presenti icnodiversitat baixa. Dominen els Domichnia verticals i profunds (*Skolithos*, *Monocraterion*, *Ophiomorpha*) i estructures d'equilibri (*Diplocraterion*, *Conichnus*) o escapament. Hi ha un domini d'estructures d'organismes suspensívors. Clàssicament correspon a dipòsits de *foreshore* i *shroreface* però també apareix en barres estuarines, deltes mareals, sorres de ventall profund, etc. (Frey *et al.* 1990).

L'icnofàcies de Cruziana (fig. 9C) correspon a sorres o lutites en ambients de moderada a relativament baixa energia. En aquestes condicions el potencial de preservació dels nivells ecològics més somms és més important, mentre que es poden desenvolupar comunitats més madures que en l'icnofàcies anterior. La bioturbació pot arribar a ser completa i la diversitat important, incloent Repichnia i Pascichnia (*Cruziana*, *Helminthopsis*, *Aulichnites* p.e.) i Fodinichnia (*Thalassinoides*, *Rhizocorallium*, *Teichichnus* p.e.). Aquesta icnofàcies és present en zones de plataforma soma entre el nivell d'oleatge normal i el de tempesta, i també en estuaris, *lagoons*, badies, i fins i tot en ambients no marins.

L'icnofàcies de Zoophycos (fig. 9D) es dona en lutites o sorres lutítiques riques en matèria orgànica, en condicions estables, d'elevada predictibilitat i amb una taxa de sedimentació baixa. Això permet l'ocupació de capes més profundes per sedimentívors (donant lloc a Fodinichnia com *Zoophycos* o *Chondrites*) que obliteren les estructures més somes. Sovint es relaciona aquesta icnofàcies amb fons pobres en oxigen però això només es cert quan els icnotaxons citats representen el nivell ecològic més som (Bromley & Asgaard 1991). Aquesta icnofàcies correspon a la zona de plataforma i talús sota les onades de tempesta i també a *lagoons* restringits i altres zones protegides. Malgrat tot, aquesta icnofàcies és la més poc clara de les quatre ("the black sheep" segons Bromley 1990). És l'única icnofàcies que només queda caracteritzada per un únic icnotaxó, *Zoophycos*, que d'altra banda pot

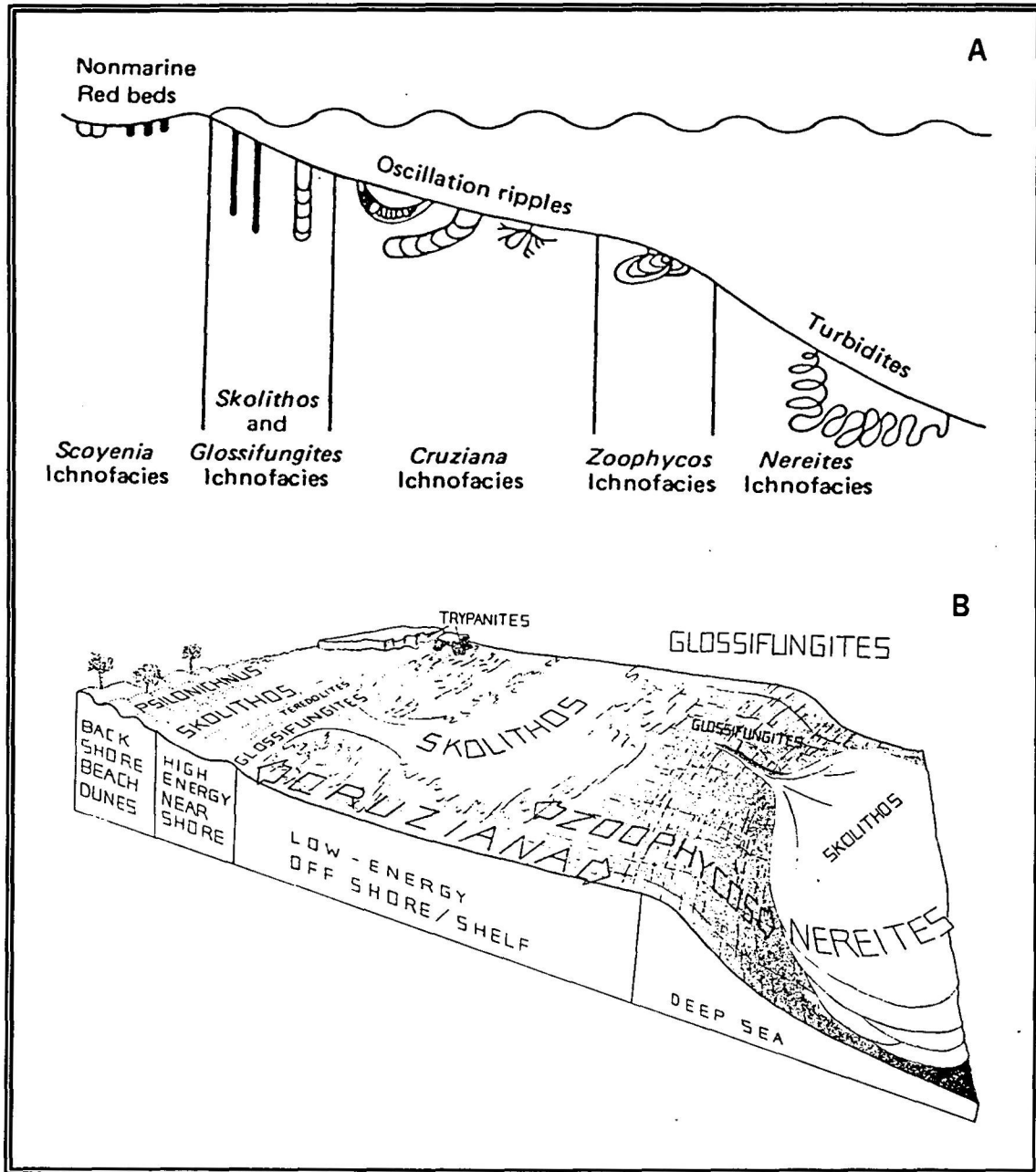


Figura 10. A. Model bidimensional de distribució de les icnofàcies en relació a la batimetria (Seilacher 1967). B. Model tridimensional de distribució de les icnofàcies mostrant com una mateixa icnofàcies pot aparèixer en diferents contexts sedimentaris i batimètrics (Pemberton et al., 1990).

Figure 10. A. Bidimensional model of ichnofacies distribution mainly related to depth (Seilacher 1967). B. 3-D model of ichnofacies distribution showing how each ichnofacies can occur in different depth and sedimentary setting. (Pemberton et al. 1990)

aparèixer en diferents contexts i a més ocupa diferents fàcies al llarg del temps geològic (Bottjer et al. 1988). Diversos autors (Byers 1982, Bromley 1990, Wetzel 1991) consideren que l'icnofàcies de Zoophycos i Nereites poden correspondre a variacions tafonòmiques de un mateix tipus d'associació. En el cas de l'icnofàcies de Zoophycos la sedimentació lenta afavoriria la preservació dels organismes

infàunics més profunds, mentre que en l'icnofàcies de *Nereites* la sedimentació turbidífica emfasitzaria els resultats de l'activitat dels nivells més somers.

L'icnofàcies de *Nereites* (fig. 9E) correspon a dipòsits batials a abisals amb sedimentació turbidífica. Es tracta d'ambients molt predictibles on el tipus de sedimentació exerceix un control molt important sobre el tipus de traces que es troben. Es pot diferenciar una associació pre-turbidífica i una post-turbidífica. La primera és la que caracteritza l'icnofàcies i inclou pistes de pastura i cultiu de gran complexitat (*Helminthoidea*, *Spiroraphe*, *Cosmoraphe*, *Palaeodyction*).

• Altres icnofàcies

Dues icnofàcies més han estat definides recentment: *Pylonichnus* i *Arenicolites*.

L'icnofàcies de *Pylonichnus* va ser proposada per Frey & Pemberton (1987) per a associacions supralitorals a litorals superiors en condicions subaèries o només parcialment subaquàtiques sotmeses a alteracions per corrents torrencials o tormentes. Es dona típicament en zones de *backshore* i dunes de platja, *washover fans* i planes supramareals. Aquesta associació inclou fonamentalment caus en J, Y, o U de crancs (*Pylonichnus*) i també caus i excavacions d'insectes i aràcnids i rastres d'artròpodes i vertebrats. Aquesta icnofàcies va ser definida originalment en un ambient modern encara que s'ha identificat al Pleistocè (Frey & Pemberton 1987) i al Juràssic (Fürsich 1981, Bromley & Asgaard 1991). No ha estat definida com a una icnofàcies recurrent i per tant la seva validesa com a icnofàcies de caràcter universal no és prou contrastada.

L'icnofàcies d'*Arenicolites* (Bromley & Asgaard 1991) va ser definida per cobrir associacions relacionades amb colonització de nivells episòdics depositats en contextos texturalment incongruents. Aquestes associacions són poc diverses amb domini de caus de suspensívors (*Skolithos*, *Arenicolites*, *Polykladichnus*). Frey & Goldring (1992) i Goldring (1993) critiquen aquesta icnofàcies aduint que *Arenicolites* no apareix quasi mai en aquestes associacions i que s'ignora la variació i diversitat de traces fòssils associades a nivells tempestífics (Frey 1990).

1.5.2.3. Valoració de les icnofàcies

El model de les icnofàcies ha estat de gran importància per al desenvolupament de l'icnologia. Les set icnofàcies principals o "clàssiques" (exceptuant la de *Scoyenia*) encara ara són útils per primeres aproximacions generals en estudis icnològics de seqüències deposicionals o a nivell de conca. Malgrat tot el desenvolupament de la sedimentologia amb la caracterització de nombrosos

ambients sedimentaris*, ha fet insuficient el seu nivell de resolució. Això implica la necessitat de desenvolupar estudis més detallats de les icnocenosis i/o les icnofàbriques evaluant les seves implicacions ecològiques a partir de la seva composició, diversitat i intensitat de bioturbació.

1.5.4. El concepte d'icnofàbrica

En els darrers anys, la icnologia ha conegut el naixement i desenvolupament del nou concepte d'icnofàbrica. Icnofàbrica fa referència a tots els aspectes de la textura i estructura d'un sediment que resulten de la bioturbació que aquest ha experimentat. Aquest concepte va ser introduït per Ekdale & Bromley (1983) i el seu èxit a permet la celebració de tres *Workshops* Internacionals sobre icnofàbriques (Bergen, Noruega 1991, Salt Lake City, U.S.A. 1993 i Bornholm, Dinamarca 1995) en els darrers anys. L'estudi de les icnofàbriques emfasitza les relacions entre la sedimentació i la bioturbació, així com les relacions entre les diferents traces (sobreimposicions, truncacions) permetent establir possibles estratificacions ecològiques. Per caracteritzar les icnofàbriques no és tant necessària la identificació taxonòmica de les traces fòssils com el tipus de estructures, les seves relacions entre elles i amb les estructures sedimentàries i la tasa total de bioturbació. Això ha fet que l'ús d'icnofàbriques hagi estat especialment relevant en l'estudi de testimonis de sondatges en Geologia del petroli (Pemberton 1992).

Un dels aspectes més importants de les icnofàbriques és la quantitat de bioturbació. Dos índexs han estat proposats per semiquantificar la bioturbació. El primer va ser proposat per Droser & Bottjer (1986, 1989) amb el nom d'índex d'icnofàbrica (*Ichnofabric index*). L'índex varia d'1 a 6 i cada nivell queda definit de la següent manera:

- ii1. Absència de bioturbació. 0% de bioturbació.
- ii2. Traces fòssils discretes i aïllades. 0-10%.
- ii3. Estructures generalment separades però parcialment sobreimpossant-se. 10-40 %.
- ii4. Només alguns vestigis de la fàbrica sedimentària original distingibles. 40-60%.
- ii5. Fàbrica totalment bioturbada, però amb algunes estructures discretes. 60-100%.
- ii6. Fàbrica totalment homogeneitzada.

L'altre índex va ser ideat per Taylor & Goldring (1993) amb el nom de Índex de Bioturbació (*Bioturbation index*) basat en una classificació prèvia de Reineck (1963). Inclou 6 categories:

* Cal tenir en compte que als anys 60 quan Seilacher va proposar el model de les icnofàcies, conceptes com el de les turbidites acabaven de néixer.

- B.I. 0. Absència de bioturbació. 0%.
- B.I. 1. Bioturbació molt escassa. 1-4%.
- B.I. 2. Bioturbació baixa. 5-30%.
- B.I. 3. Bioturbació moderada. 31-60 %.
- B.I. 4. Bioturbació elevada, sobreimposició freqüent. 61-90%.
- B.I. 5. Bioturbació molt intensa, laminació completament disturbada, només algunes estructures discretes. 91-99%.
- B.I. 6. Bioturbació completa. 100%.

Ambdós índexs són molt similars i comparables. Malgrat això, en aquest treball es farà servir el Índex de Bioturbació de Taylor & Goldring (1993) que resulta més clar per la coincidència de l'índex 0 amb l'absència de bioturbació.

1.6. Glossari terminològic

Aquest glossari s'ha realitzat a partir de la terminologia en anglès recollida per Häntzschel (1975), Frey & Pemberton (1985), Bromley (1990) i Pemberton *et al.* (1992a) i la terminologia en castellà proposada per García-Ramos *et al.* (1989, bioturbació) i Martinell (1989, bioerosió). Entre parèntesi s'inclou el terme equivalent en anglès.

AGRICHNION, pl. **AGRICHNIA** (*Agrichnion/Agrichnia*): Cau d'habitació permanent utilitzat com a "jardí" o "trampa" per obtenir aliment (=traça de cultiu, grafoglíptid).

BIODEPOSICIÓ (*Biodeposition*): Veure estructura de biodeposició.

BIOEROSIÓ (*Bioerosion*): Veure estructura de bioerosió.

BIOESTRATIFICACIÓ (*Biostratification*): Veure estructura de bioestratificació.

BIOGLIF (*Bioglyph*): Ornament en una excavació o perforació produït per l'activitat de l'ocupant.

BIOTURBACIÓ (*Bioturbation*): Veure estructura de bioturbació.

CAMBRA (*Cell*): Espai obert de forma ovoidal o esfèrica situat a l'extrem o al llarg d'un pou o túnel i que representa un eixamplament d'un cau.

CAU (*Dwelling burrow*): Excavació oberta i en connexió amb la superfície, en la qual viu un organisme.

CAU COMPLEXE (*Burrow system*): Sistema obert constituït per elements ramificats o interconnectats.

CONFIGURACIÓ (*Configuration*): Característiques tridimensionals d'un cau complex fent referència a la disposició dels seus elements entre sí i en relació al substrat.

CONJUNT ICNOLÒGIC (*Trace fòssils suite*): Una associació icnològica pot incloure diferents conjunts de traces fòssils, cada un d'ells representant una aproximació a una ecològicament pura icnocenosi.

- CUBICHNION, pl. CUBICHNIA (*Cubichnion/Cubichnia*): Traces deixades per organismes en moments de repòs o refugi temporal (=traça de repòs).
- DOMICHNION, pl. DOMICHNIA (*Domichnion/Domichnia*): Caus i altres estructures construïdes per servir de domicilis més o menys permanents (=traça d'habitació).
- EMPREMTA (*Track*): Impressió deixada en el sediment per l'acció d'un únic podi o extremitat d'un organisme.
- ENDICHNION, pl. ENDICHNIA (*Endichnion/Endichnia*): Traça fòssil preservada com a relleu complet a l'interior d'un determinat estrat.
- ENDOBENTÒNIC (*Endobenthic, Endobenthonic*): Qualsevol organisme que viu dintre d'un substrat.
- ENDOGÈNIC (*Endogenic*): Procés o estructura produït a l'interior del sediment.
- ENVÀ (*Spreite*, pl. *spreiten*): Estructura laminar resultat de la migració lateral d'un cau.
- EPIBENTÒNIC (*Epibenthic, Epibenthonic*): Qualsevol organisme que viu sobre un substrat.
- EPICHNIA (*Epichnia*): Veure epirelleu.
- EPIFÀUNIC (*Epifaunic*): Organisme metazou que viu sobre un substrat.
- EPIGÈNIC (*Epigenic*): Procés o estructura produït en la interfase deposicional.
- EPIRELLEU (*Epirelief*): Semirelleu preservat a sostre d'un estrat (=Epichnia).
- EQUILIBRICHNION, pl. EQUILIBRICHNIA (*Equilibrichnion/Equilibrichnia*): Estructura produïda per organismes que ajusten la seva posició en relació al fons en resposta a processos graduals o menors d'agradació o degradació (=traça d'equilibri).
- ESTRATIFICACIÓ ECOLÒGICA (*Tiering*): Ordenació vertical d'una comunitat biològica.
- ESTRUCTURA BIOGÈNICA (*Biogenic structure*): Qualsevol evidència tangible de l'activitat d'un organisme, excepció feta de la producció de parts de l'organisme. Inclou estructures de bioerosió, bioturbació, biostratificació i biodeposició.
- ESTRUCTURA DE BIODEPOSICIÓ (*Biodeposition structure*): Estructures resultat de la producció o concentració de sediment per l'acció d'organismes.
- ESTRUCTURA DE BIOEROSIÓ (*Bioerosion structure*): Estructura biogènica desenvolupada sobre un substrat dur.
- ESTRUCTURA DE BIOSTRATIFICACIÓ (*Biostratification structure*): Estructura sedimentària biogènica que dona lloc a l'estratificació de la fàbrica sedimentària. Inclou gradacions biogèniques i laminacions algals.
- ESTRUCTURA DE BIOTURBACIÓ (*Bioturbation structure*): Estructura sedimentària biogènica que reflexa el trencament o alteració d'una fàbrica sedimentària. Inclou rastres, pistes i excavacions.

- ESTRUCTURA DE DURÒFAG** (*Durophagous structure*): Estructura produïda per l'acció mecànica d'un depredador sobre l'esquelet d'un organisme.
- ESTRUCTURA D'INCRUSTACIÓ** (*Embedment structure*): Estructura resultant de l'encastament d'un organisme epibiont per acció del creixement esquelètic de l'organisme que representa el seu substrat.
- ESTRUCTURA SEDIMENTÀRIA BIOGÈNICA** (*Biogenic sedimentary structure*): Estructura biogènica produïda en un substrat sedimentari no consolidat. Inclou les estructures de bioturbació, biostratificació i biodeposició.
- EXCAVACIÓ**: 1. (*Burrow*) Estructura produïda per un organisme en excavar a l'interior d'un sedíment no litificat. 2. (*Burrowing*) Acció d'excavar en sediments no litificats.
- EXICHNION**, pl. **EXICHNIA** (*Exichnion/Exichnia*): Traça fòssil preservada com a relleu complet a l'exterior d'un determinat estrat.
- FODINICHNION**, pl. **FODINICHNIA** (*Fodinichnion/Fodinichnia*): Estructura produïda per un sedímentívor no vàgil (=traça d'alimentació).
- FUCOIDE** (*Fucoïd*): Terme antic utilitzat per a fer referència a fòssils, incloent traces fòssils i alguns fòssils d'organismes, que erròniament eren considerats vegetals per la seva semblança morfològica amb aquests.
- FUGICHNION**, pl. **FUGICHNIA** (*Fugichnion/Fugichnia*): Estructura produïda per un organisme fugint d'un episodi deposicional sobtat (=traça d'escapament).
- GALERIA** (*Gallery*): Veure túnel.
- GRAFOGLÍPTID** (*Graphoglyptid*): Veure Agrichnion.
- HIPORELLEU** (*Hyporelief*): Semirelleu preservat a la base d'un estrat (=Hypichnion).
- HYPICHNION**, pl. **HYPICHNIA** (*Hypichnion/Hypichnia*): Veure hiporelleu.
- ICNOASSOCIACIÓ** (*Trace fossils assemblage, Ichnoassemblage*): Associació de traces fòssils que apareixen juntes dintre d'una determinada unitat litològica (=associació de traces fòssils, associació icnològica).
- ICNOCENOSI** (*Ichnocoenose, Ichnocoenosis*): Associació de traces produïdes per una única comunitat bentònica i que, per tant, pot ser relacionada a una determinada biocenosi.
- ICNOFÀBRICA** (*Ichnofabric*): Tots els aspectes de la textura i estructura interna d'un sedíment que resulten de la bioturbació que aquest ha patit.
- ICNOFÀCIES** (*Ichnofacies*): 1. Associació de traces fòssils que típicament es repeteix durant un llarg interval de temps geològic i a escala global, i que és característica de unes condicions ambientals determinades (Seilacherian ichnofacies *sensu* Bromley 1990). 2. Registre fòssil d'una icnocenosi (=Paleoicnocenosis).
- ICNOFÒSSIL** (*Ichnofossil*): Estructura biogènica fossilitzada (=Traça fòssil).

- ICNOGÈNERE (*Ichnogenus*, pl. *ichnogenera*): Terme utilitzat per designar un gènere icnològic. Es pot abreviar com *ichnogen.* o *igen.*
- ICNOGREMI (*Ichnoguild*): Grup d'icnospècies que expresen un mateix tipus de comportament, pertanyen a un mateix grup tròfic i ocupen un nivell o posició similar dintre del substrat.
- ICNOLOGIA (*Ichnology*): Disciplina que estudia les estructures produïdes pels organismes sobre un substrat qualsevol (lític, esquelètic, sedimentari) com a resultat dels seus processos vitals.
- ICNOSPÈCIE (*Ichnospecies*): Nom amb que és designa un tipus de traça fòssil amb categoria d'espècie a nivell taxonòmic. Es pot abreviar com *ichnosp.* o *isp.*
- ICNOTAXOBASE (*Ichnotaxobase*): Caràcter morfològic d'una traça fòssil que pot ser considerat un criteri icnotaxonòmic vàlid.
- ICNOTAXONOMIA (*Ichnotaxonomy*): Sistema de classificació jeràrquica de les traces fòssils (=taxonomia icnològica).
- INFÀUNIC (*Infaunic*): Organisme metazou que viu a dintre d'un substrat (=Endobentònic).
- NEOICNOLOGIA (*Neoichnology*): Part de l'icnologia que s'ocupa de les estructures biogèniques actuals.
- ORIFICIS (*Drill hole*): Perforació amb entrada i sortida realitzada per depredació.
- PALEOICNOLOGIA (*Palaeoichnology*): Part de l'icnologia que s'ocupa de les estructures biogèniques fòssils.
- PASCICHNION, pl. PASCICHNIA (*Pascihnion/Pascichnia*): Estructura produïda per l'activitat tròfica d'organismes detritívors i sedimentívors vàgils (=traça de pastura).
- PERFORACIÓ (*Boring*): 1. Estructura produïda per un organisme en perforar un substrat dur. 2. Acció de penetrar en substrats durs.
- PETJADA (*Footprint*): Empremta deixada per un peu d'un organisme vertebrat.
- PISTA: 1. (*Trail*) Traça continua, epi o endogènica, produïda pel desplaçament d'un organisme. 2. (*Trace*) En sentit ampli, traça.
- POTENCIAL DE PRESERVACIÓ (*Preservation potential*): Possibilitats de que una estructura biogènica esdevingui fòssil.
- POU (*Shaff*): Cau vertical o element vertical d'un cau complexe.
- PRAEDICHNION, pl. PRAEDICHNIA (*Praedichnion/Praedichnia*): Estructura produïda com a resultat d'una activitat depredadora (=traça de depredació)
- PROTRUSIU (*Protrusive*): Fa referència a un envà produït per moviment en direcció distal respecte a les obertures del cau.
- RASTRE (*Trackway*): Conjunt d'empremtes produïdes pel desplaçament d'un organisme amb extremitats locomotores diferenciables.

- REBLIMENT (*Burrow fill, burrow cast*): Material que reompla una excavació (=reompliment).
- REBLIMENT ACTIU (*Active fill, backfill*): Rebliment emplaçat per l'organisme productor de l'excavació.
- REBLIMENT MENISCAT (*Meniscate fill*): Tipus de rebliment actiu en que el sediment és emplaçat a la part posterior del organisme productor en forma de paquets de morfologia circular i secció longitudinal en forma de mitja lluna, amb la part còncava indicant la direcció d'avanç.
- REBLIMENT PASSIU (*Passive fill*): Rebliment emplaçat per l'acció de la gravetat sense intervenció biològica.
- RELLEU COMPLERT (*Full relief*): Terme utilitzat per referir-se a traces fòssils preservades en tres dimensions i continuades dintre d'una unitat de roca.
- REOMPLIMENT (*Burrow fill*): Veure rebliment.
- REPICHNION, pl. REPICHNIA (*Repichnion/Repichnia*): Traça produïda per simple locomoció (=traça de locomoció).
- RETRUSIU (*Retrusive*): Fa referència a un envà produït per moviment en direcció cap a les obertures del cau.
- REVESTIMENT (*Lining*): Material incorporat a la paret d'un cau pel seu ocupant.
- SEDIMENT ENCAIXANT (*Host sediment*): Sediment que allotja una determinada traça biogènica.
- SEMIRELLEU (*Semirelief*): Terme utilitzat per referir-se a trace fòssils preservades en plans d'estratificació.
- SEMIRELLEU DEFORMATIU (*Cleavage relief*): Semirelleu que deforma la laminació del sediment.
- SEMIRELLEU NO DEFORMATIU (*Boundary relief*): Semirelleu que no deforma la laminació del sediment.
- SISTEMA EN XARXA (*Boxwork*): Cau complex constituït per elements ramificats sense orientació predominant, tant verticals com horitzontals o inclinats.
- SISTEMA LABERÍNTIC (*Maze*): Cau complex constituït per elements ramificats predominantment horitzontals.
- SUBEMPREMTA (*Undertrack*): Deformació produïda en les làmines de sediment per sota d'una empremta.
- SUBSTRAT CONSISTENT (*Firmground*): Substrat compost per sediment consistent però no litificat.
- SUBSTRAT ENDURIT (*Hardground*): Substrat cimentat impenetrable per organismes bioturbadors.
- SUBSTRAT FLUÏD (*Soupground*): Substrat compost per sediment carregat d'aigua amb comportament de fluïd.

- SUBSTRAT INCONSOLIDAT (*Softground*): Substrat sedimentari tou, intermedi entre un substrat fluid i un consistent.
- SUBSTRAT LLENYÓS (*Woodground*): Substrat constituït per fusta susceptible d'allotjar perforacions.
- TRAÇA (*trace, lebensspur*): Estructura biogènica individualment diferenciable. No s'inclouen les estructures de biostratificació.
- TRAÇA DE CULTIU (*Farming trace*): Veure Agrichnion.
- TRAÇA DE DEPREDACIÓ (*Predation trace*): Veure Praedichnion.
- TRAÇA DE LOCOMOCIÓ (*crawling trace*): Veure Repichnion.
- TRAÇA DE PASTURA (*Grazing trace*): Veure Pascichnion.
- TRAÇA DE REPÒS (*Resting trace*): Veure Cubichnion.
- TRAÇA D'ALIMENTACIÓ (*Feeding trace*): Veure Fodinichnia.
- TRAÇA D'EQUILIBRI (*Equilibrium trace*): Veure Equilibrichnia.
- TRAÇA D'ESCAPAMENT (*Escape trace*): Veure Fugichnion.
- TRAÇA D'HABITACIÓ (*Dwelling trace*): Veure Domichnion.
- TÚNEL (*Tunnel*): Cau dominantment horitzontal o element horitzontal dintre d'un cau complexe (=galeria).
- XENOGLIF (*Xenoglyph*): Ornament imposat a una excavació o perforació degut a les característiques del substrat.

**2. LA MEDITERRÀNIA NORD-OCCIDENTAL.
INTRODUCCIÓ GEOLÒGICA**

2. LA MEDITERRÀNIA NORD-OCCIDENTAL. INTRODUCCIÓ GEOLÒGICA

2.1. Marc Estructural

L'estructura geològica de la conca mediterrània es troba lligada a l'evolució geodinàmica d'un complex cinturó orogènic regit pels moviments relatius de les plaques africana i europea, així com de petites microplaques individualitzades a partir d'aquestes (com la Microplaca Ibèrica). Aquest cinturó orogènic inclou algunes de les cordilleres més importants d'Europa i el Nord d'Àfrica (el Rif, l'Atlas, les Bètiques, els Alps, els Apenins i els Càrpats) (fig. 11) i constitueix el sector occidental (conegut com a Sistema Alpí Mediterrani) de la Serralada Himalaiana-alpina, que s'extén des de Gibraltar fins l'Àsia Oriental.

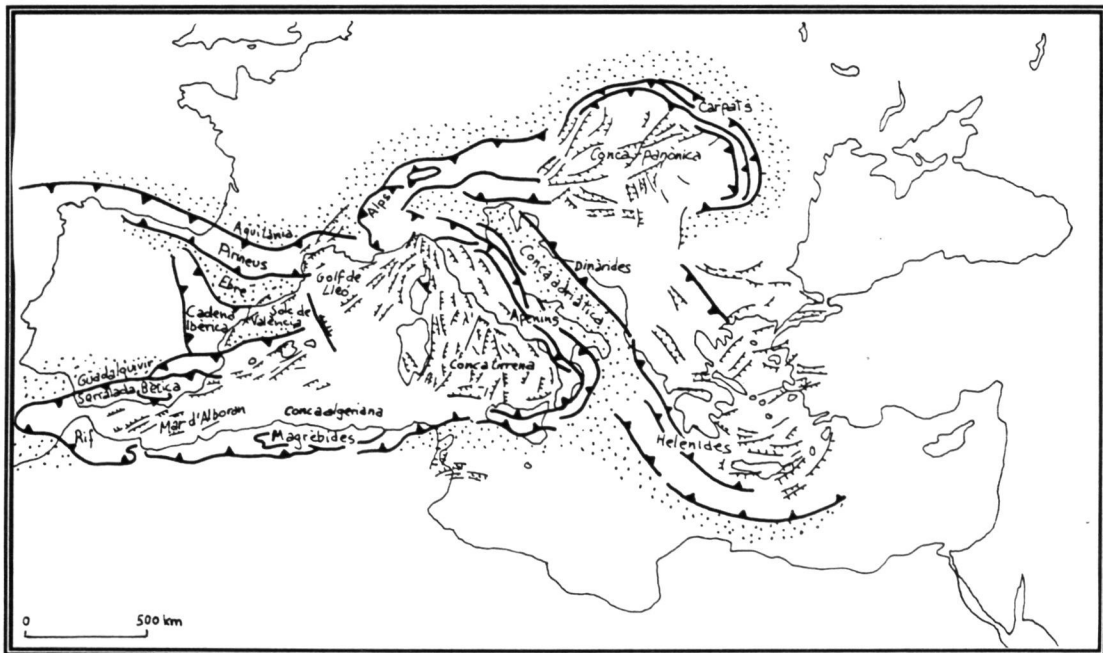


Figura 11. Esquema tectònic de la Mediterrània en el present indicant les principals estructures orogèniques i les conques sedimentàries. En puntejat les conques d'avantpaís.

Figure 11. Tectonic sketch of the Mediterranean showing the main orogenic ranges and sedimentary basins. Dotted areas correspond to foreland basins.

En el sector nord-occidental de la Mediterrània, a l'àmbit d'estudi d'aquesta obra, es poden diferenciar diverses unitats estructurals. D'entre elles els Alps és l'única que forma part en sentit estricte del Sistema Alpí Mediterrani. Els Pirineus són una branca independent resultat de la col·lisió de la microplaca ibèrica amb la placa europea, mentre que la Serralada Ibèrica i les Cadenes Costaneres Catalanes són cordilleres de menor importància formades dintre de la Placa Ibèrica. A més d'aquestes unitats podem considerar dues àrees poc o gens deformades: la conca de l'Ebre i el Massís

Central Francès. Els sectors més litorals presenten a més una estructuració extensiva d'edat neògena sobreposada relacionada amb la formació del Solc de València i el moviment del Bloc Corso-sardinià (Roca 1992). Seguidament comentarem les característiques geològiques essencials d'algunes de les estructures tectòniques principals en l'àmbit d'aquest treball.

- **Serralada Ibèrica-Cadenes Costaneres Catalanes**

Aquesta unitat (Guimerà 1988) inclou el conjunt d'estructures desenvolupades durant la compressió terciària a l'interior de la petita Placa Ibèrica. Aquesta regió queda situada entre la Conca de l'Ebre (al Nord) i la Serralada Bètica (al Sud). Les estructures compressives són resultat de la inversió tectònica d'antigues conques mesozoiques durant la col·lisió entre Ibèria i Europa. Podem diferenciar dues unitats que fins recentment havien estat considerades per separat: la Serralada Ibèrica i les Cadenes Costaneres Catalanes.

La Serralada Ibèrica té una orientació NW-SE i constitueix la branca principal del sistema. Està constituïda per un sòcol hercínic afectat per falles sinistres convergents d'orientació NW-SE, i encavalcaments E-W, i per una cobertura mesozoica afectada per plects i encavalcaments directament relacionats amb les estructures del sòcol.

Les Cadenes Costaneres Catalanes, a l'Est, es caracteritzen per l'existència de grans falles subverticals esglaonades, orientades NE-SW i obliqües a l'orientació de la cadena. Al llarg d'aquestes falles es concentra la deformació més intensa, mentre que entre elles queden blocs poc deformats. D'altra banda, algunes falles d'orientació NW-SE, com la falla del Llobregat, tallen transversalment aquesta unitat (Anadón *et al.* 1979).

El sector on es connecten aquestes dues unitats es conegut com la Zona d'enllaç (Guimerà 1988) i es caracteritza per presentar estructures amb orientacions intermitges entre les de la Serralada Ibèrica i les Cadenes Costaneres Catalanes.

L'activitat compressiva va afectar aquesta regió des de l'Eocè més superior fins l'Oligocè-Miocè inferior. Posteriorment, durant el Miocè, les Cadenes Costaneres Catalanes i els sectors més orientals de la Serralada Ibèrica van ser afectats per un règim extensiu relacionat amb la formació del Solc de València (Fontboté *et al.* 1990) donant lloc a l'actual estructuració en fosses i *horsts*. Algunes d'aquestes fosses es troben al Baix Ebre, el Camp de Tarragona, el Vallés-Penedés o La Selva.

• Pirineus

Els Pirineus constitueixen una serralada orogènica que s'extén amb orientació E-W des de l'Atlàntic (NW de Galícia) fins a la Provença, a tocar dels Alps. Els seus límits estructurals, per tant, superen en molt els límits geogràfics que corresponen a l'istme que uneix la Península Ibèrica amb la resta d'Europa. L'aixecament de la cordillera és conseqüència de la col·lisió i subducció parcial de la placa Ibèrica sota la Placa Europea (ECORS Pyrenees Team 1988). Es poden diferenciar dos sectors a la Serralada (Muñoz *et al.* 1983), el Pirineu occidental o bascocantàbric (amb estructures vergents cap al Nord) i el Pirineu central i oriental (amb vergències cap al Sud i cap al Nord), separats per la falla de Pamplona. Els Pirineus central i oriental queden limitats a Nord i a Sud per dues conques d'avant-país terciàries, la Conca d'Aquitània i la Conca de l'Ebre respectivament, l'evolució de les quals es troba íntimament lligada amb la dels Pirineus. En aquests sectors es pot diferenciar una zona meridional formada fonamentalment per roques mesozoïques, amb grans mantells i apilaments antiformalment vergents cap al Sud, una zona axial constituïda per materials paleozoïcs d'arrelament de les principals estructures, i una zona septentrional on les estructures vergeixen cap al Nord.

L'activitat orogènica al Pirineu va tenir lloc des del Maastrichtià (Cretaci superior) fins l'Oligocè (al sector oriental) o el Miocè inferior (a les zones més occidentals). Des de l'Oligocè, els Pirineus Orientals han estat afectats per processos extensius que han donat lloc a la formació d'algunes fosses: Cerdanya, Empordà, Rosselló.

• Alps

Els Alps són una gran cordillera que s'extén des de Còrsega fins als Càrpats. Els Alps Occidentals estan constituïts per dos conjunts arquejats: l'arc extern o helvètic i l'arc intern o penínic. El primer presenta dos nivells estructurals ben diferenciats: el sòcol, estructurat en llàmines encavalcants, i una potent cobertura mesozoica i cenozoica, estructurada en grans encavalcaments dirigits cap a l'Oest i el Sud. L'arc intern és un complex apilament d'unitats formades per sòcol i cobertura. La compressió que va originar els Alps va tenir lloc entre el Cretaci i el Pliocè.

2.2. Origen i evolució de les conques pliocenes al marge nord-occidental de la Mediterrània

Les conques pliocenes del marge nord-occidental de la Mediterrània presenten una paleogeografia molt característica en forma de paleories més o menys elongades (fig. 12). Aquesta fisiografia vé condicionada per un esdeveniment d'important magnitud que va afectar a la Mediterrània a les acaballes del Miocè

superior i que és conegut com la "crisi de salinitat messiniana". En aquest període el nivell del mar va descendir de manera dramàtica produint un encaixament de la xarxa hidrogràfica que durant el Pliocè va esdevenir el control fonamental de la morfologia de les rieres en els marges de la conca mediterrània. Es per això que analitzarem primerament alguns aspectes d'aquesta "crisi".

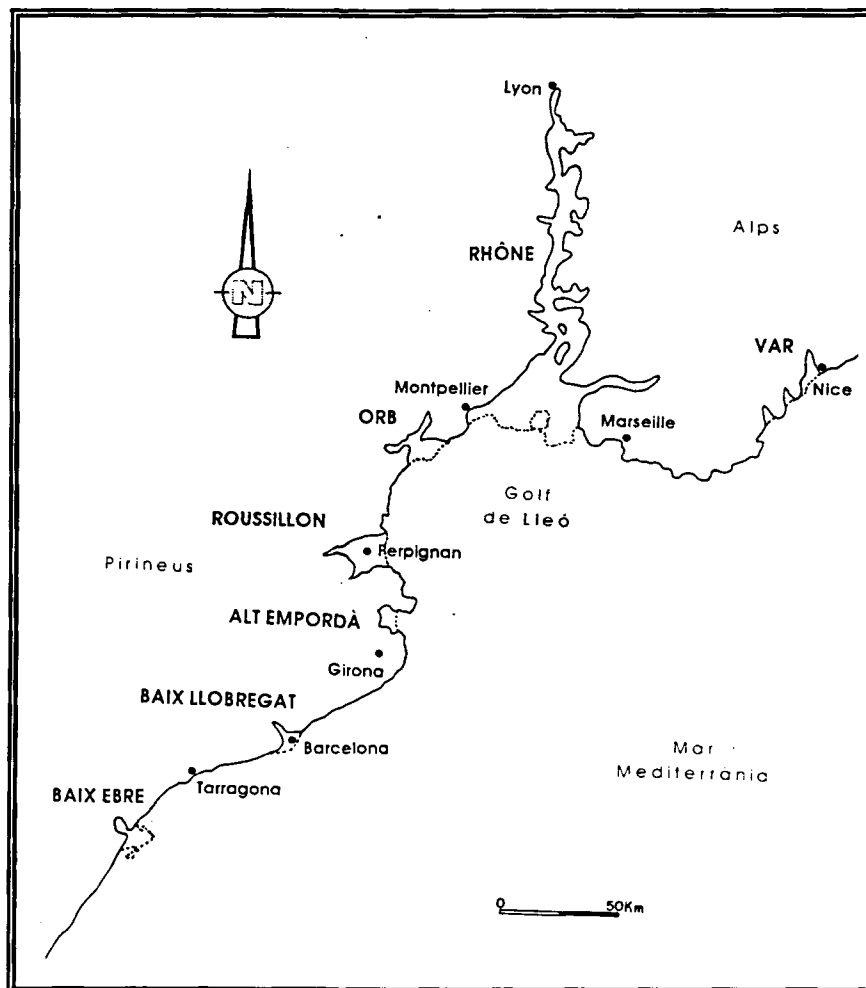


Figura 12. Mapa paleogeogràfic de la Mediterrània nord-occidental durant el Pliocè inferior mostrant la posició de les principals conques marginals estudiades en aquesta obra. La línia discontinua indica la línia de costa actual.

Figure 13. Paleogeographical map of the North-Western Mediterranean during the Lower Pliocene showing the position of the main basins studied in this work. The discontinuous line indicates the present shoreline.

• La crisi messiniana

La crisi messiniana és un fet que malgrat ser acceptat per molts autors encara és motiu de discussió avui en dia (Busson 1990). La visió més acceptada d'aquest esdeveniment és que durant el Messinià superior, la Mediterrània va perdre contacte amb les aigües oceàniques de l'Atlàntic i a partir d'aquest fet va anar descendant el

nivell de la làmina d'aigua fins uns 1500-2000 m respecte l'actual nivell del mar (Ryan 1976, Clauzon 1982). Aquesta teoria es basa en dos fets fonamentals:

- La presència d'un important gruix (de l'ordre de 1-2 Km) d'evaporites d'edat messiniana a les planes abissals de la Mediterrània (Hsü *et al.* 1973).
- L'existència de canons profundament excavats als marges de la conca i recoberts per sediments del Pliocè inferior (Ryan & Cita 1978, Clauzon 1978, 1982).

El fet que va originar tota la polèmica sobre aquesta crisi va ser el descobriment d'evaporites messinianes a més de 2000 m de profunditat durant unes campanyes oceanogràfiques enmarcades dintre del *Deep Sea Drilling Project* a la Mediterrània Occidental (Hsü *et al.* 1973). Aquest fet podia ser explicat en principi a partir de tres models (Hsü *et al.* 1973, Riba 1981):

- Model d'aigües profundes i conca profunda (*deep water, deep basin model*). Segons aquest model la precipitació de les sals havia d'haver tingut lloc en aigües profundes, confinades i estratificades i el nivell eustàtic coincidiria amb el de l'Atlàntic. Això no sembla coherent amb la sedimentologia de les evaporites que suggereixen una formació en condicions molt somes o subaèries (Hsü *et al.* 1973)

- Model d'aigües somes i conca soma (*shallow water, shallow basin model*). En aquest model les sals es formarien en condicions somes amb un nivell eustàtic coincidint amb el de l'Atlàntic. Això implicaria canvis fisiogràfics d'origen tectònic molt importants a la Mediterrània després de la crisi, que enfonsarien els dipòsits evaporítics fins a la seva posició actual a mils de metres de profunditat (Nesteroff 1973).

- Model de conca profunda dessecada (*desiccated deep basin model*). Aquest model implicaria la formació de les sals en condicions somes però en la seva posició profunda actual dins la conca mediterrània. Aquest fet només seria possible per un aïllament de la Mediterrània respecte l'Atlàntic que permetria un descens dramàtic del nivell del mar (Hsü *et al.* 1973).

D'entre aquests tres models, el darrer és el que ha tingut més èxit, encara que alguns autors encara el discuteixen actualment (Busson 1990). El model de conca profunda dessecada es recolza amb una altra evidència complementària a la presència d'evaporites a les planes abissals. Aquesta evidència és l'existència de canons, també d'edat messiniana, fortament encaixats als marges de la conca mediterrània. Aquests canons poden estar profundament encaixats com el del Rhône que assoleix uns 1300 m de profunditat (Clauzon 1982) o el del Nil la base del qual es troba gairebé 200 m per sota de l'actual nivell del mar a la presa d'Assuan, a 1250 Km de l'actual costa (Chumakov 1973). Això ha de ser explicat per un

importantíssim descens del nivell del mar, fins 1500-2000 m segons Ryan (1976) i Clauzon (1982), que pogués produir l'encaixament de la xarxa fluvial. Les característiques d'aquests canons han estat estudiades en zones emergides del litoral francès (Clauzon 1978, 1979, 1982, Clauzon *et al.* 1990) i també en zones submergides (Cita & Ryan 1978).

L'anàlisi de les evidències suggereix el model de la conca profunda dessecada com el més plausible per a explicar els esdeveniments que afectaren a la Mediterrània a les acaballes del Miocè, encara que cal valorar els aspectes foscos que són presentats per alguns dels seus detractors (Busson 1990).

Analitzades les evidències, cal analitzar les possibles causes de la crisi. Aquestes cal buscar-les en tres aspectes fonamentals (Clauzon 1995):

- Marc estructural. La Mediterrània es troba en una zona de col·lisió entre les plaques africana i europea. Aquest fet va fer que durant el Neogen estigués afectada per diversos canvis d'origen tectònic en la seva fisiografia. Un d'aquests canvis va ser la formació de la Serralada Bético-Rifenyà, entre fa 10 i 5 milions d'anys (Benson 1991), que va modificar el grau de connexió entre la Mediterrània i l'Atlàntic, de manera que en algun moment els corredors existents entre ambdues masses d'aigua van poder ser tancats.

- Eustatisme a escala global. Al Messinià existeix un descens global del nivell del mar corresponent al cicle TB 3.3 de Haq *et al.* (1987). La magnitud d'aquest descens no és tan important en els oceans com ho és a la Mediterrània, però podria haver estat suficient per a que les connexions existents fins aquell moment entre la Mediterrània i les aigües atlàntiques es tanquessin totalment o parcial.

- Condicions paleoclimàtiques. El clima no va patir canvis importants abans, durant i després la crisi messiniana a l'àrea mediterrània (Suc & Bessais 1990, Suc *et al.* 1992). Es tractava d'un clima càlid i sec que si bé no va ser el desencadenant de la crisi, sí que proporcionava el contexte adequat per a que la crisi tingués lloc donats els condicionants geomorfològics i eustàtics adequats.

Així doncs, aquests tres condicionants per si sols probablement no haguessin provocat una crisi com la del Messinià, però la combinació de tots tres sí que ho va fer. La durada de la crisi messiniana ha estat valorada per Gautier *et al.* (1994) en uns 0.4 milions d'anys, entre els -5.7 i els -5.4.

- **La transgressió pliocena i la formació de les conques marginals**

Després de la crisi messiniana es va produir un ascens eustàtic d'escala global a l'inici del Zancleà (Pliocè inferior), corresponent al cicle TB 3.4 de Haq *et al.* (1987).

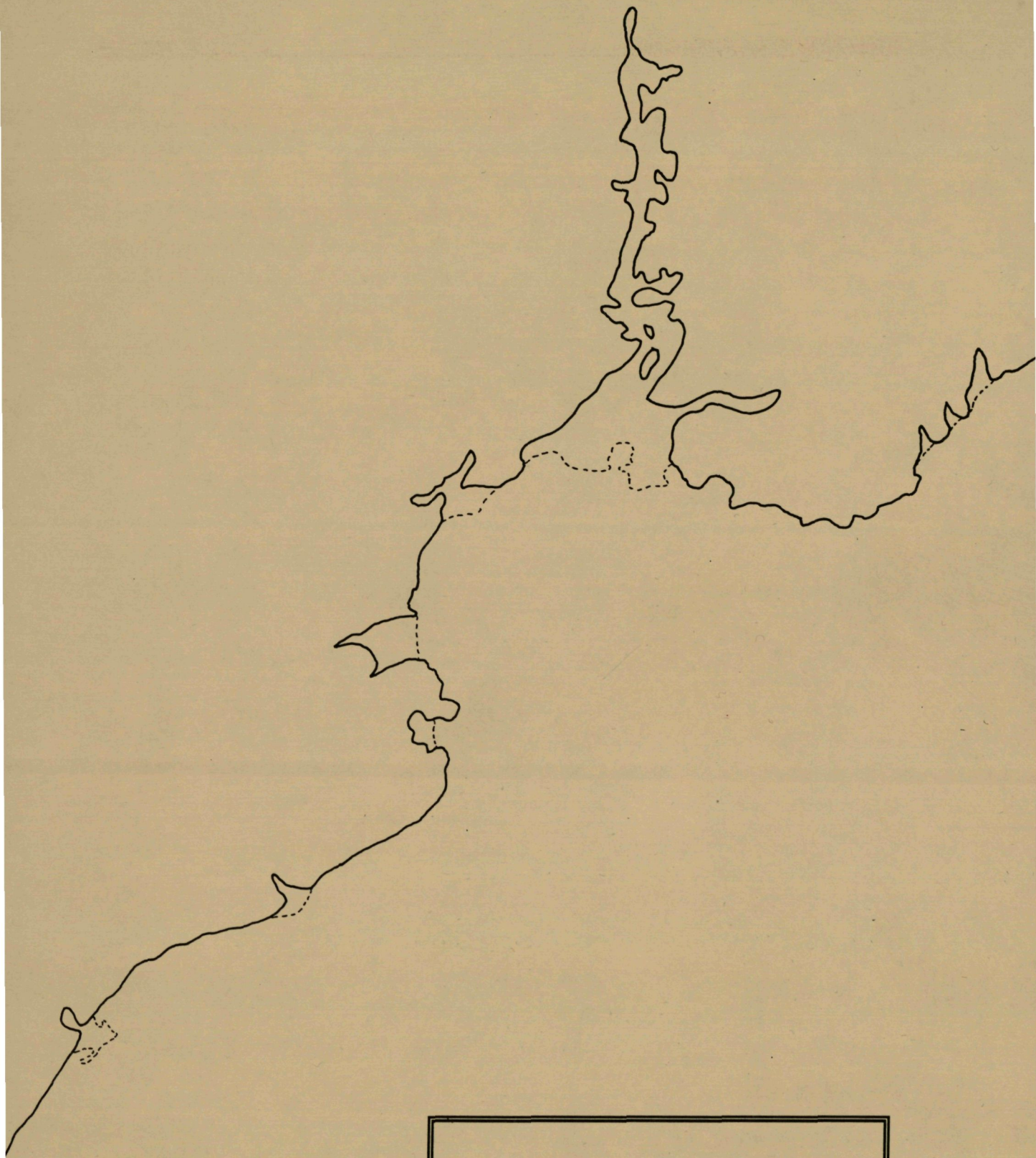
Aquest ascens va permetre que la conca mediterrània es tornés a connectar amb l'oceà Atlàntic i conseqüentment es va produir el seu reompliment. Això va implicar una ràpida transgressió en tot el Mediterrani sobre la superfície d'erosió excavada durant el Messinià als marges de la conca. Com a resultat d'aquesta sobreimposició d'una important transgressió sobre un paleorelleu amb una xarxa hidrogràfica fortament incidida, la costa pliocena va estar caracteritzada per l'existència d'importantes entrades marines en forma de ries o badies. La penetració marina pliocena ha estat identificada en diferents sectors de tota la Mediterrània. Al sector nord-occidental és on s'han estudiat més intensament aquestes conques marginals pliocenes i les seves característiques paleogeogràfiques (Clauzon *et al.* 1990). En aquest sector la paleoria més important correspon a la vall del Rhône, on el mar al Pliocè va penetrar fins a la posició actual de la ciutat de Lyon, 300 Km terra endins (Ballesio 1972, Clauzon 1982). La resta de les conques són de dimensions més petites. Malgrat que el seu origen és estrictament degut a la invasió de valls fluvials pre-existents, en alguns sectors aquestes es superposen a fosses d'origen tectònic actives durant el Miocè i que condicionen en part la seva morfologia com en el cas del Rosselló (Clauzon *et al.* 1989, Clauzon 1990), l'Alt Empordà (Fleta *et al.* 1991) i el Baix Ebre (Fleta *et al.* 1991). Altres en canvi presenten una morfologia allargada més pròpia d'una ria com són el Baix Llobregat (Gibert 1992, Gibert & Martinell 1993), l'Orb (Ambert 1989), o les paleories dels Alps Marítims (Argens, Siagne i Var, Clauzon 1978, Irr 1984) i de la Ligúria (Roya, Argentina i Arroscia).

La sedimentació pliocena en aquestes paleories o paleogolfs es va iniciar en el Zancleà més inferior (Matias 1990). En la majoria de les conques els dipòsits pliocens corresponen únicament al Pliocè inferior. En algunes d'elles les unitats continentals que culminen el rebliment han estat datades com a Ruscinià, pis de l'escala continental equivalent al Zancleà (Baix Ebre, Agustí *et al.* 1983, Agustí 1985; Alt Empordà, Gibert *et al.* 1979, Agustí 1982; Rosselló, Clauzon *et al.* 1989 entre d'altres). Només a les conques dels Alps Marítims s'ha reconegut la presència de la base del Pliocè superior marí (Irr 1984, Matias 1990).

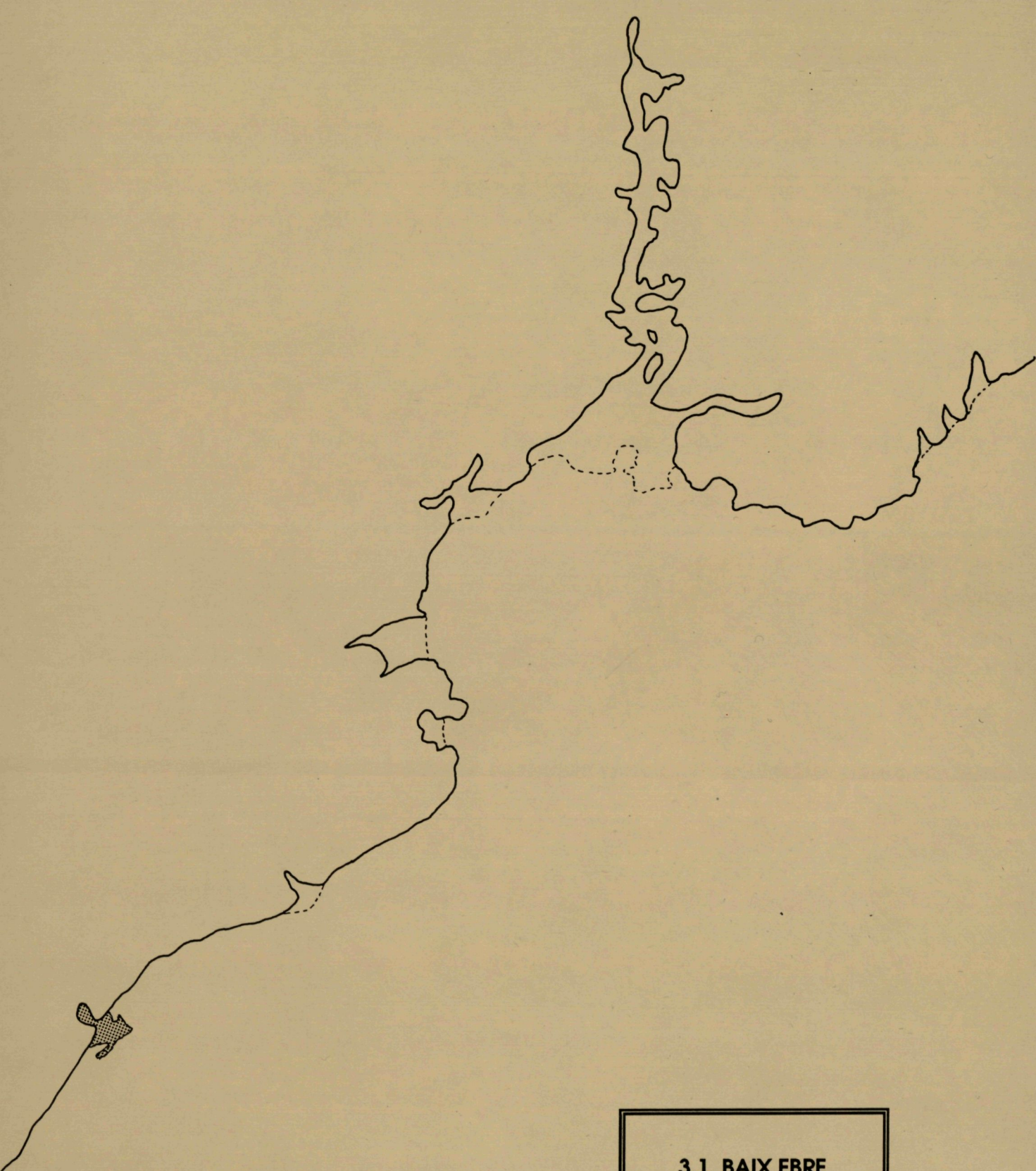
El reompliment de les conques correspon a un cicle eustàtic complet, el TB 3.4* on la transgressió es troba representada quasi exclusivament per una superfície de bioerosió i incrustació d'organismes marins, excepte al Baix Ebre on els dipòsits transgressius tenen una certa entitat major. La seqüència regressiva presenta similituts entre les diferents conques i sempre s'inicia amb una unitat d'argiles blaves (encara que les condicions paleoecològiques són variables) que són recobertes

* Segons Clauzon & Rubino 1992, les ries dels Alps Marítims i de la Ligúria serien policíclics (TB 3.4-TB 3.7).

per dipòsits marins més grullers, o bé sorrencs o bé conglomeràtics, depenent del context geodinàmic i paleogeogràfic de cada conca. La sèrie culmina amb les unitats continentals que en alguns casos poden ser bastant potents. El tipus de rebliment d'algunes conques (Rosselló, Var) ha estat identificat per alguns autors (Clauzon *et al.* 1989, 1990, Clauzon & Rubino 1992) amb el model de delta de Gilbert compost de base a sostre per unes capes somitals (*bottomsets*) horitzontals, unes capes de talús (*foresets*) amb forta pendent i unes capes superiors (*topsets*) horitzontals. Els dos primers conjunts serien d'origen marí i el tercer continental.



**3. ICNOLOGIA DE LES CONQUES
PLIOCENES DE LA
MEDITERRÀNIA NORD-OCCIDENTAL**



3.1. BAIX EBRE

3.1. EL BAIX EBRE

3.1.1. Situació geogràfica

La depressió del Baix Ebre es situa a la comarca del mateix nom en la part meridional de la província de Tarragona. El principal aflorament de materials pliocens de l'àrea es situa a uns 15 Km de la població d'Amposta en unes explotacions d'argiles, conegudes com l'Argiler d'Anguera. Aquestes explotacions es troben a ambdues bandes de la carretera C-235 a la Venta del Ranxero, al voltant de l'antiga ubicació de l'hermita de Sant Onofre. També es coneixen materials d'edat pliocena dins de la població de Tortosa, encara que actualment són de difícil accés.

3.1.2. Antecedents

Els sediments corresponents al Pliocè a l'àrea del Baix Ebre són coneguts ja des del segle passat. El primer en citar-los, a la ciutat de Tortosa, va ser Landerer (1880), encara que els va atribuir erròniament al Miocè superior. Font i Sagué (1905) va ser el primer en considerar els materials com a pliocens, mentre que Gignoux i Fallot (1922) per primer cop van citar Pliocè clarament marí al Baix Ebre. Bataller i López-Manduley (1929) en l'explicació de la fulla de Tortosa del Mapa Geològic Nacional, comenten diversos afloraments d'edat pliocena, descrivint una abundant flora fòssil a Tortosa i una fauna de mol·luscs a Sant Onofre que atribueixen a l'Astià (Pliocè superior).

L'estratigrafia del Pliocè del Baix Ebre va ser objecte d'estudi per Solé *et al.* (1965, 1970) i Maldonado (1972), però els estudis més complets, estratigràfics i també sedimentològics, van ser duts a terme per Arasa (1985, 1990, 1994) i Fleta *et al.* (1991).

Pel que fa als treballs de tipus paleontològic, diversos grups fòssils han estat objecte d'estudi. Civis (1975) i Magné (1978) fan breus estudis del contingut micropaleontològic del Pliocè marí del Baix Ebre que Magné data com a Pliocè mig-superior. Agustí *et al.* (1983) i Agustí (1985) estudien els micromamífers subministrats pels trams lacustres de l'aflorament de Sant Onofre, i els situen dintre de la zona MN-13, corresponent al Ruscinià inferior (Pliocè inferior). Valle (1983) i Bessais & Cravatte (1988) estudien el contingut pol·línic del Pliocè del Baix Ebre. Martinell & Domènech (1984a) s'ocupen de la malacofauna marina de l'aflorament de Sant Onofre, i citen 27 espècies de gasteròpodes i 25 de bivalves, que permeten caracteritzar un ambient som, restringit i molt proper a la costa. Martinell (1985, 1988) i Martinell *et al.* (1989) fan un recull de les dades paleontològiques del Pliocè del Baix Ebre, el comparen amb el de les altres dues conques pliocenes catalanes i el daten com a Pliocè inferior (Zancleà).

3.1.3. Situació geològica

El Baix Ebre constitueix una fossa amb orientació NNE-SSW desenvolupada sobre materials mesozoics i reblerta per sediments neogens i quaternaris (fig. 13). El límit nord-occidental de la fossa queda definit per la falla del Baix Ebre, clarament desenvolupada entre Xerta i Sant Mateu, amb un salt de més de 1200 m. a la latitud de Tortosa. A l'Oest d'aquesta falla s'aixequen els Ports de Beseit constituïts per materials mesozoics, predominantment juràssics i cretàcics, afectats per encavalcaments i plecs amb orientació ENE-WSW i vergència NNW. Al Nord la fossa queda limitada pel bloc de la Serra del Boix, constituït també per materials mesozoics amb una estructura molt similar a la dels Ports de Beseit. Cap a l'Est la fossa queda parcialment separada del Delta de l'Ebre i de la Mar Mediterrània pels materials cretàcics dels horsts del Montsià i Godall, amb orientació paral·lela a la fossa. Mentre que pel Sud la fossa limita amb el Maestrat format per materials mesozoics. Els afloraments coneguts de Pliocè es situen al sector septentrional i oriental de la fossa.

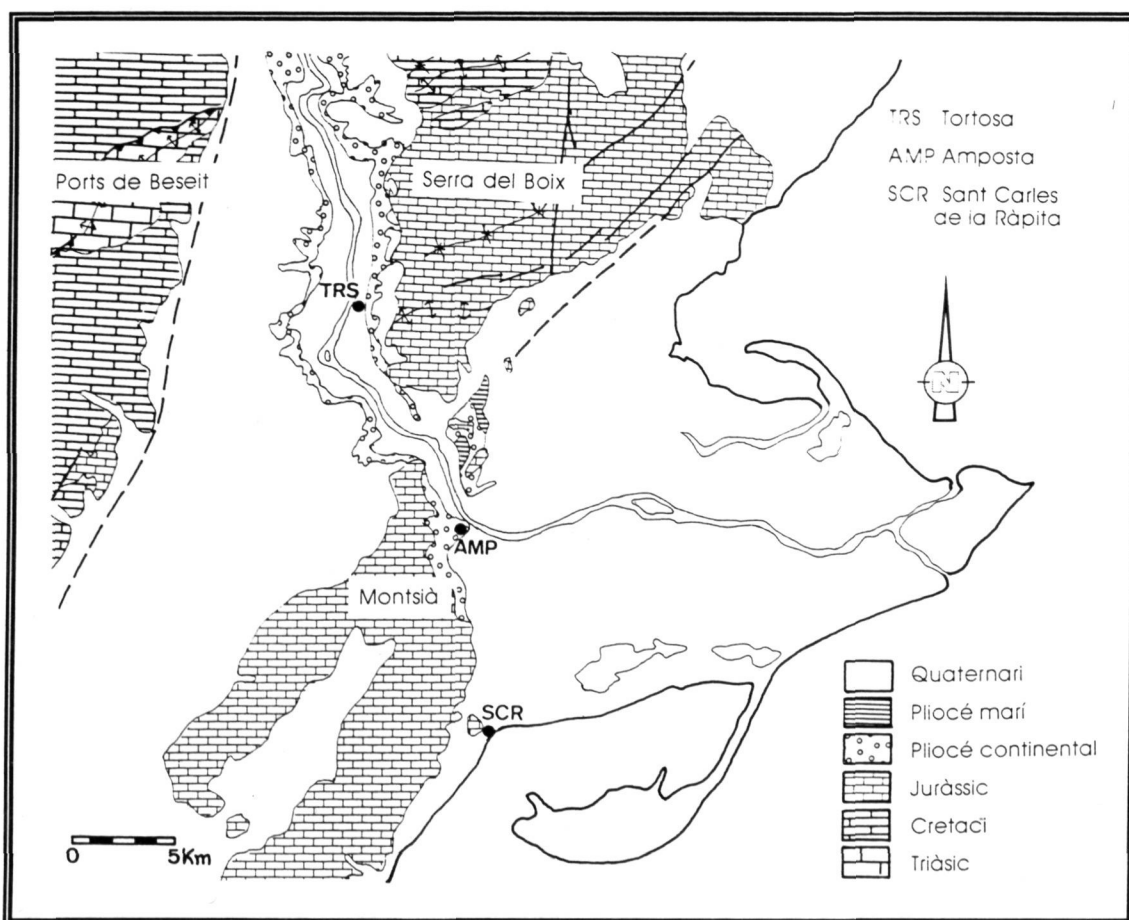


Fig 13. Mapa geològic del Baix Ebre.
Figure 13. Geological map of the Baix Ebre.

La fossa del Baix Ebre i els alts que l'envolten formen la part més oriental de la unitat tectònica anomenada per Guimerà (1988) Zona d'enllaç, que engloba tots aquells materials i estructures que constitueixen el nexa entre la Serralada Costanera Catalana al Nord, amb orientació NNE-SSW, i la Cordillera Ibèrica a l'Oest, amb orientació WNW-ESE. En aquest sector els materials mesozoics es presenten afectats per encavalcaments i plects E-W a ENE-WSW (en el sector més oriental) que constitueixen el Feix frontal d'encavalcaments Portarlubió-Vandellós. Aquesta estructura va ser adquirida durant el Paleogen i posteriorment modificada durant la etapa distensiva del Neogen en que algunes falles van actuar com a normals donant lloc al sistema de fosses i alts que avui reconeixem.

3.1.4. Estratigrafia i paleogeografia

L'estratigrafia dels materials neogens del Baix Ebre ha estat estudiada per Arasa (1985, 1990, 1994). Aquest autor defineix quatre unitats litostratigràfiques informals, dues marines i dues continentals, per al Pliocè a l'àrea de Sant Onofre (fig. 14). Al present treball s'utilitzen set unitats, cinc marines i dues continentals (fig. 15, 16). Les equivalències amb les unitats d'Arasa es poden veure a la taula I.

Les unitats de graves i sorres, de rodofícies, la lutítico-sorrenca inferior i part de les margues blaves constitueixen la part transgressiva de la sèrie pliocena del Baix Ebre. S'instal·len sobre el substrat mesozoic o sobre diverses formacions conglomeràtiques pre-pliocenes (Conglomerats de la Venta del Ranxero, Conglomerats silícics d'Anguera). La part superior de les margues blaves, la unitat lutítico-sorrenca superior, els carbonats de Sant Onofre i els conglomerats de Roca Corba formen la sèrie regressiva (lám 1A).

Els estudis duts a terme per Arasa (1985, 1990, 1994) a partir de dades tant de superfície com de subsòl, han permès aquest autor proposar un mapa paleogeogràfic per al Pliocè a l'àrea del Baix Ebre (Fleta *et al.* 1991) (fig. 17). Es pot diferenciar una zona interna entre Tortosa i Amposta que quedaria l'Oest, gairebé separada de mar obert pels relleus de la Serra del Boix i la Serra del Montsià. El registre sedimentari pliocè en aquesta àrea és quasi exclusivament subsuperficial i els sondatges han indicat la presència d'argiles grises lignífères amb ostràcodes, gasteròpodes i caròfits indicant unes condicions deposicionals en un medi palustre restringit. La zona externa s'estendria a l'Est dels relleus abans esmentats, incloent l'aflorament de Sant Onofre, i correspondria a condicions més marines encara que segurament amb salinitats baixes (Martinell & Domènech 1984a).

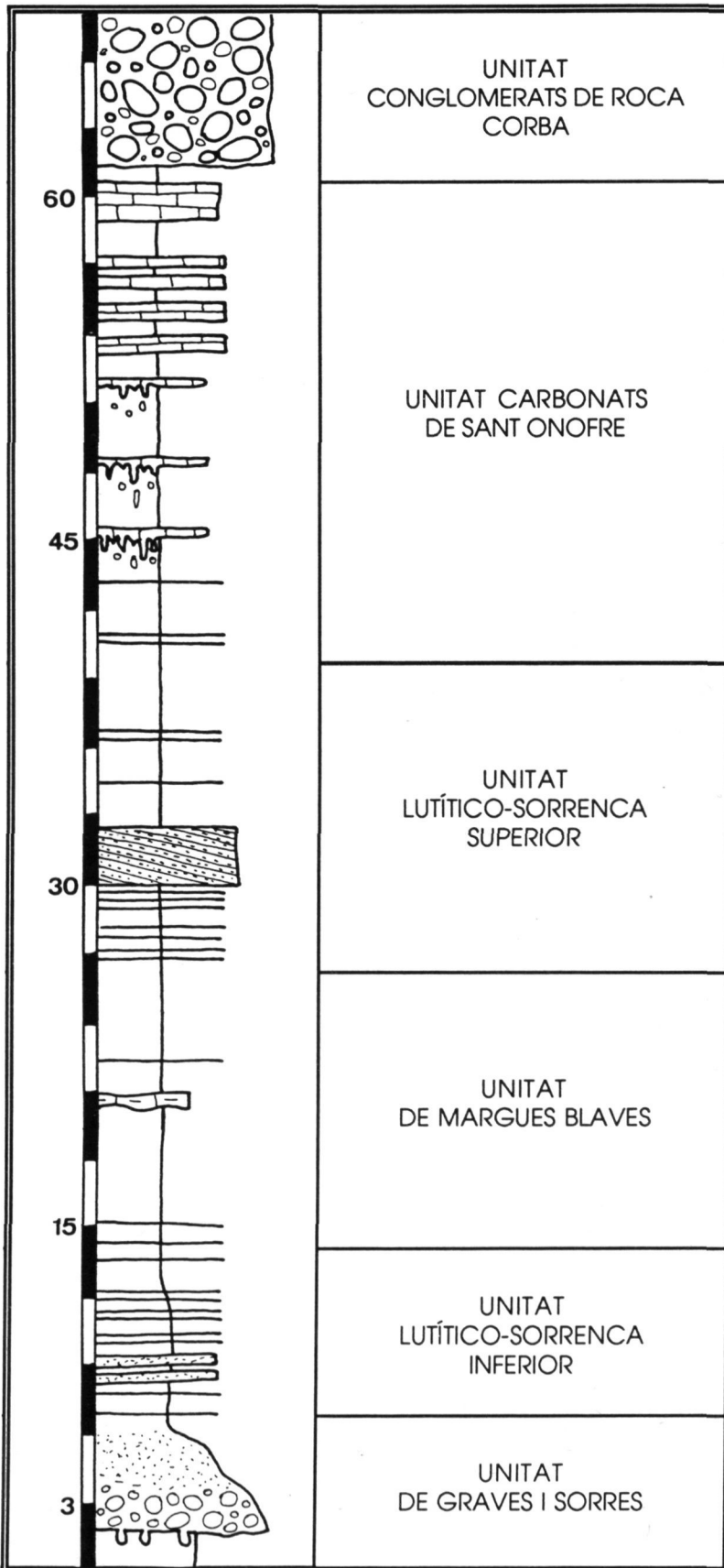


Figura 16. Columna estratigràfica sintètica del Pliocè de Sant Onofre.
 Figure 16. Stratigraphic section of the Sant Onofre Pliocene.

ARASA 1990	AQUEST TREBALL
Unidad Conglomerados de Roca Corba	Unitat Conglomerats de Roca Corba
Unidad Carbonatos de Sant Onofre	Unitat Carbonats de Sant Onofre
Unidad Margas azules de Campredó	Unitat lutíico-sorrenca superior
	Unitat de margues blaves
	Unitat lutíico-sorrenca inferior
Unidad de Gravas y Arenas con Ostreidos	Unitat de gravas i sorres
	Unitat de rodofícies i fàcies associades

Taula I. Equivalències entre les unitats proposades per Arasa (1990) i les utilitzades en aquest treball.

Table I. Equivalences between the lithostratigraphic units proposed by Arasa (1990) and those used in this work.

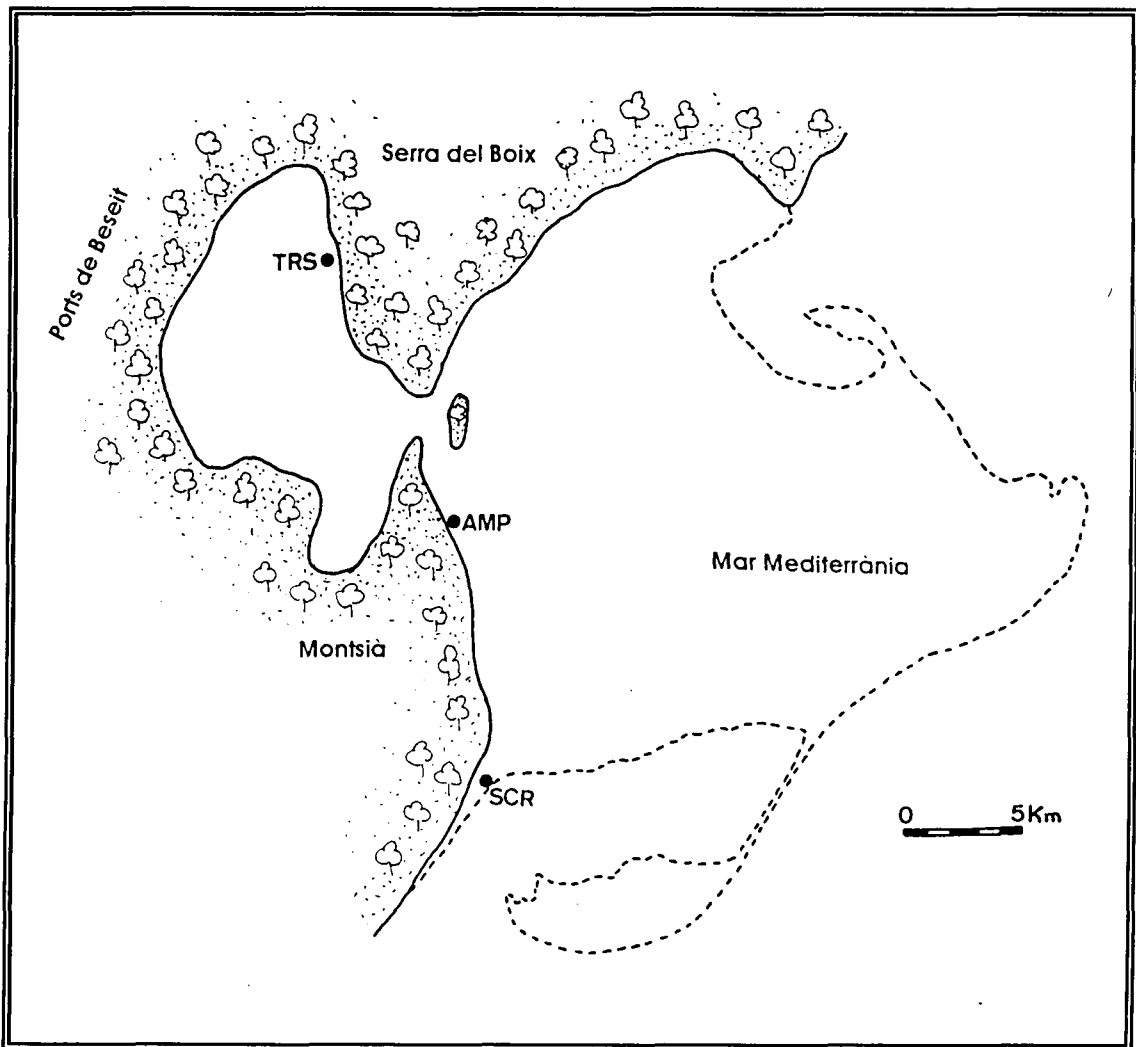


Figura 17. Esquema paleogeogràfic de l'àrea del Baix Ebre durant el Zancleà. La línia discontinua representa la posició actual del litoral.

Figure 17. Paleogeographical map of the Baix Ebre area during the Zanclean. The discontinuous line indicates the present-day position of the shoreline.