

## Facies sedimentarie e ichnocenosi in un sistema deltizio/estuarino della Formazione Piedra Clavada (Cretaceo), Bacino Australe (Argentina)

ANDREA CARLONI (\*) & PAOLO MONACO (\*)

### RIASSUNTO

La Formazione Piedra Clavada del Cretaceo della Provincia di Santa Cruz, Bacino Australe (*Cuenca Austral*), Argentina, è potente 70 m, ed è suddivisibile in due Membri, 22 facies tra conglomeratiche, arenacee, pelitiche, ed eterolitiche, e 9 distinte associazioni di facies intensamente bioturbate. Nella località tipo, presso Tres Lagos, l'intervallo cronostratigrafico va dall'Albiano inferiore fino al passaggio Cenomaniano-Turoniano. In quest'area sono stati realizzati quattro log: 1) Piedra Clavada (sigla PPC); 2) Tres Lagos PTL; 3) Arroyo los Paisanos PAP; 4) Quebrada Don Nilsen QDN. L'unità presenta livelli conchigliari con abbondanti molluschi fossili (*Eriphyla*, *Corbula*, *Trigonia*, *Mytilus*, *Panopea*, ostreidi e gasteropodi), tronchi e resti vegetali, squame di pesci (*Lepidotes*) e placche di tartaruga. Le associazioni di facies del Membro inferiore e superiore indicano un ambiente marino costiero deltizio-estuarino con escursioni di marea. Per il Membro inferiore il sistema deltizio/estuarino predominava sulla influenza tidale, cosicché il materiale trasportato da terra verso il mare aperto (*ebb*), inclusi grossi tronchi e resti vegetali, era tale da impedire alle maree di inibire il flusso, come dimostrano la distribuzione delle paleocorrenti e le caratteristiche tafonomiche dei livelli conchigliari. Nel Membro superiore il sistema evolveva decisamente verso un vero e proprio estuario, con le relative caratteristiche idrologiche ed ecologiche. Il sistema di canali di foce che caratterizzava il Membro inferiore scomparve a favore di un'area tidale ampia e continua e i depositi sabbiosi di barra, antistanti alla piana tidale, venivano continuamente rielaborati e trasportati da correnti di marea e tempeste.

Dal punto di vista ichtnologico sono stati individuati 22 ichnogenere e alcune ichnospecie non segnalate in lavori precedenti, a costituire 8 ichnocenosi diversificate a partire dal backshore/foreshore fino allo shoreface esterno: *Gastrochaenolites* (IGa), *Polykladichnus* (IPy) nel backshore/ foreshore, *Ophiomorpha nodosa* (ION), *Arenicolites* isp. 1 (IA), *Teichichnus* (IT) nel shoreface superiore, *Gyrochorte* (IG), *Phycodes/Curvolithus* (IPC), *Rhizocorallium/Chondrites* (IRC) nel shoreface inferiore. Dal punto di vista paleoecologico, paleoecologico e paleoambientale le ichnocenosi mostrano una stretta relazione con le associazioni di facies, a seconda se deposte in condizioni di flusso di ebb o flood, confermando che gli organismi infaunali erano particolarmente sensibili alle variazioni dei parametri energetici e alle caratteristiche del substrato.

Lo studio stratigrafico ad alta risoluzione ha permesso di riconoscere ciclicità del IV-V ordine attorno a 50-100 Ka, con 4 parasequenze *shallowing upward* per il Membro inferiore di potenza intorno a 10 metri e 5 per il Membro superiore intorno a 5-8 metri. Le parasequenze sono sia di tipo strato-grano-decrescente (*thinning, fining-upward*) con progradazione delle facies eterolitiche di piana tidale su quelle arenacee di fonte interno, sia di tipo strato-grano-crescente (*thickening, coarsening-upward*), con la progradazione delle facies arenacee ed eterolitiche di barra/frontera di barra tidale su quelle pelitico/eterolitiche di fronte esterno e prodelta. È possibile suddividere la Formazione Piedra Clavada in due sequenze deposizionali del III° ordine dovute a variazioni eustatiche. Della sequenza inferiore abbiamo solo il sistema deposizionale di stazionamento alto del livello del mare (*highstand systems tract*), caratterizzato dal-

le parasequenze 1, 2, 3 e 4 con tendenza verticale progradante (*progradational stacking pattern*). Il limite di sequenza (*type 1 sequence boundary*), viene posto in corrispondenza del passaggio tra le parasequenze 4 e 5. Ai depositi di stazionamento alto seguono facies a *lags* tipiche di eventi trasgressivi. Sistemi deposizionali trasgressivi (*transgressive systems tract*) sono caratterizzati dalle parasequenze 5 e 6 con tendenza verticale retrogradante (*retrogradational stacking pattern*). Alla superficie hiatale di massima trasgressione (*maximum flooding surface*), caratterizzata da concentrazioni scheletriche ricche in fosfato, seguono le parasequenze 7, 8 e 9 con tendenza progradazionale del sistema di stazionamento alto (*highstand systems tract*), che si estende ai depositi pelitici continentali della sovrastante Fm Mata Amarilla.

TERMINI CHIAVE: *Analisi di facies, ichnocenosi, delta/estuario, parasequenze, Formazione Piedra Clavada, Cretaceo, Bacino Australe, Argentina.*

### ABSTRACT

The Piedra Clavada Formation (PCF), Austral Basin, Argentina, reaches 70 m in thickness in the Santa Cruz area and has been subdivided into two Members (lower and upper) and 9 facies associations. These are represented by 22 coarse- to fine-grained deposits from bioclastic, polygenic orthoconglomerates, to lithoarenites, pelites and heterolithic (sand and pelite) facies. In the type locality, near Tres Lagos, PCF spans from Albian to the Cenomanian-Turonian boundary. In this area four logs have been made recording lithostratigraphy, sedimentology and ichnology (Piedra Clavada PPC, Tres Lagos PTL, Arroyo los Paisanos PAP and Quebrada Don Nilsen QDN). Invertebrates, vertebrate fossils and plant remains (large log) have been sampled, mainly bivalve shell beds (*Eriphyla*, *Corbula*, *Trigonia*, *Mytilus*, *Panopea*), ostreids, gastropods, fish teeth or scales of semionotiform *Lepidotes*, and plates of turtles. Facies assemblages of the lower Member suggest a coastal, estuarine-deltaic environment with minor tidal-storm influences. In the lower part of PCF, alluvial (*ebb*) currents of the deltaic system, mainly from land through open shelf, prevailed over the open-sea influence of waves, tides, combined flows and storms, as indicated by palaeocurrents, facies distributions and taphonomic features of shell bed/plant remains. In the upper Member the paleoenvironmental system of PCF evolved progressively through a typical estuarine-bay environment, with tidal/storm (flood) waves and combined flows prevailing over the deltaic/alluvial land influences, as indicated mainly by paleocurrents, facies distribution and taphonomic features of shell beds. Therefore, the narrow-mouthed channel system with a sandy bar complex which characterized the lower Member seems to be replaced by a wider and relatively uniform area which in the upper Member was dominated by tidal/storm wave currents of the estuarine system.

On trace fossils, 22 ichnogenere and several ichnospecies (not previously studied) have been analyzed. A total number of 8 ichnocenoses has been distinguished from the backshore/foreshore throughout the lower shoreface environment: *Gastrochaenolites* (IGa), *Polykladichnus* (IPy) of backshore/ foreshore, *Ophiomorpha nodosa* (ION), *Arenicolites* isp. 1 (IA), *Teichichnus* (IT) of upper shoreface, and *Gyrochorte* (IG), *Phycodes/Curvolithus* (IPC), *Rhizocorallium/Chondrites* (IRC) of lower shoreface, respectively. Palaeoeco-

(\*) Università degli Studi di Perugia, piazza dell'Università, 06100 Perugia, Italia. E-mail: pmonaco@unipg.it, web page: <http://www.unipg.it/~pmonaco/index.html>

logic, palaeoecologic and palaeoenvironmental indicators inferred from ichnocoenoses reveal a close relationship between infaunal activity and facies distribution promoted by ebb or flood currents, confirming that tracemakers were particularly sensitive to changes of energy parameters and substrate conditions.

High-resolution stratigraphy allows a IV-V order cyclicity to be defined, and reveals nine shallowing-upward parasequences, reaching eight to ten meters in thickness in the lower Member (total 4), and of five to eight meters thick (total number of 5) in the upper Member. Parasequences are both fining-thinning upward and coarsening-thickening upward, revealing in the first case a progradation of tidal, heterolithic facies above sandy prodelta facies, and, in the second, sandy front bar facies above pelitic-heterolithic prodelta facies, respectively. The Piedra Clavada Fm. may be subdivided into two depositional sequences of third order. For the lower one the highstand systems tract includes the parasequences 1, 2, 3 and 4 which show a progradational stacking pattern. The type 1 sequence boundary may be placed at the transition between parasequences 4 and 5. The transgressive systems tract with shell lags has been placed in parasequences 5-6 which reveal a retrogradational stacking pattern. The maximum flooding surface shows phosphatic-rich skeletal concentrations and the highstand systems tract can be recognised in the parasequences 7, 8 and 9, which were deposited before the continental pelitic deposits of the Mata Amarilla Formation.

**KEY WORDS:** *Facies analysis, ichnocoenoses, deltaic/estuarine environment, parasequences, Piedra Clavada Formation, Cretaceous, Austral Basin, Argentina.*

#### INTRODUZIONE

Il lavoro ha come obiettivo la caratterizzazione delle facies sedimentarie e delle principali ichnocoenosi, a tutt'oggi poco studiate, della Formazione Piedra Clavada (Cretaceo) nella Provincia di Santa Cruz (Argentina), del Bacino Australe (*Cuenca Austral*). Integrando le informazioni ichnologico-sedimentarie si è cercato di caratterizzare la dinamica paleoambientale e l'evoluzione paleoecologica delle comunità faunistiche bioturbanti in un sistema deltizio-estuarino.

La definizione delle sequenze deposizionali, unitamente allo studio dei depositi nell'area compresa fra Tres Lagos e Lago San Martin, dove sono stati segnalati circa 60-70 m di arenarie con molluschi e tronchi pietrificati (FERUGLIO, 1938), contribuisce alla ricostruzione delle variazioni paleoecologiche e del percorso evolutivo del margine gondwanico durante il Mesozoico.

La Fm. Piedra Clavada si estende dalla regione di Tres Lagos verso nord, nel bacino del Lago San Martin, Belgrano e Peuyrredon. Il profilo tipo è esposto nelle immediate vicinanze della località omonima, situata sopra il margine nord del Rio Chalia, quattro chilometri ad est dell'abitato di Tres Lagos (fig. 1). Il suo spessore massimo arriva a 400 m, e appare nel settore settentrionale al limite con il mesocratone del Deseado; da qui si va riducendo verso ovest e sud, fino a perdersi completamente. I suoi affioramenti più meridionali sono stati individuati immediatamente a nord di Cerro Indice; da questa località verso ovest scompare rapidamente, mentre verso sud è coperta da formazioni più recenti.

Dal punto di vista stratigrafico la Fm. Piedra Clavada si dispone in apparente concordanza sulla Fm. Rio Mayer o Lago San Martin, che rimpiazza lateralmente verso nord (NULLO *et alii*, 1981) (fig. 2). LEANZA (1972) descrisse litologicamente una sequenza di banchi di arenarie di taglia da media a grossa, con spessore variabile da 1 metro a 4-5 m, con marcata stratificazione incrociata. Alcune delle caratteristiche segnalate mostrano una variazione dalla parte inferiore a quella superiore

della formazione, tra cui l'aumentare della granulometria e dello spessore degli strati, la diminuzione dei resti vegetali così come quella degli invertebrati marini (RICCARDI & ROLLERI, 1980). Si passa dunque a sedimenti via via più costieri, fino a continentali, sia verso il tetto della formazione sia verso i suoi affioramenti più settentrionali (ARBE, 1988; 1989). È stato segnalato un abbondante contenuto paleontologico, in particolare molluschi, tra cui *Actaeonella patagonica*, *Potamides patagoniensis*, *Exogira guaranítica*, *Corbula shehuena*. L'età dei sedimenti è stata oggetto di ripetute controversie, e in più riprese diversi studiosi hanno datato la Fm. Piedra Clavada utilizzando gruppi fossili distinti. Il primo fu FERUGLIO (1938) che, sulla base dell'*Actaeonella patagonica*, la datò al Cenomaniano inferiore-Turoniano superiore, mentre LEANZA (1970, 1972), avvalendosi sempre di invertebrati marini, la attribuì al Coniaciano anche per la presenza di ammoniti della stessa età nella parte inferiore della Fm. Mata Amarilla (fig. 2).

Nel settore nord del Lago San Martin i sedimenti sono più antichi (Albiano medio-superiore), mentre nell'estancia La Vega, spostandoci a sud, sono riferibili al Cenomaniano; questo diacronismo è giustificato dalla progradazione dei depositi continentali e costieri da NW verso SE, a partire proprio dall'Albiano per tutto il Cretaceo (NULLO *et alii*, 1981).

In conclusione la Fm. Piedra Clavada sarebbe compresa probabilmente tra l'Albiano medio-superiore e il Cenomaniano, visto che stratigraficamente è limitata inferiormente dai depositi pelitici dell'Aptiano-Albiano della Fm. Rio Mayer e superiormente dai sedimenti pelitici del Coniaciano della Fm. Pari Aike.

#### INQUADRAMENTO GEOLOGICO DEL BACINO AUSTRALE

Il Bacino Australe (*Austral* o *Magellanes*), individuabile nella provincia argentina di Santa Cruz, regione all'estremo sud del continente americano, ha ricevuto dagli anni cinquanta le attenzioni di alcuni ricercatori che hanno studiato l'aspetto geologico strutturale, stratigrafico e paleontologico anche ai fini dell'esplorazione mineraria (FERUGLIO, 1949-1950; RUSSO & FLORES, 1972; RUSSO *et alii*, 1980; RAMOS, 1982; KRAEMER, 1993). Le variazioni di facies e le distanze molto grandi tra gli affioramenti resero tuttavia difficili le correlazioni tra unità litologiche che, attraverso le perforazioni operate dalla compagnia YPF, furono studiate grazie alle informazioni desunte dai carotaggi (fig. 2).

La copertura sedimentaria si generò a partire dai movimenti estensionali alla fine del Giurassico e fu colmata con la sedimentazione cretacea e terziaria (CIONE & PEREIRA, 1986). Il bacino è confinato tra il mesocratone del Deseado a nord-est, dalla Cordigliera Andina a sud-ovest e dalla linea di costa e dal fiume Rio Chico ad est. Procedendo dalla foce di questo fiume in linea retta verso nord, il bacino si estende fino alle mesetas Guenguel e Senguier che fisserebbero l'estremo settentrionale della zona. Da questo punto in poi spariscono i sedimenti terziari inferiori e cretaci e il Terziario superiore appoggia direttamente sopra il complesso porfirico; inoltre il Bacino Austral oltrepassa la linea di costa e penetra nel mare estendendosi ad est per molti chilometri sull'ampia piattaforma sottomarina. Nel settore nord-ovest il limite corrisponde al bordo deposizionale dei sedimenti cretaco-

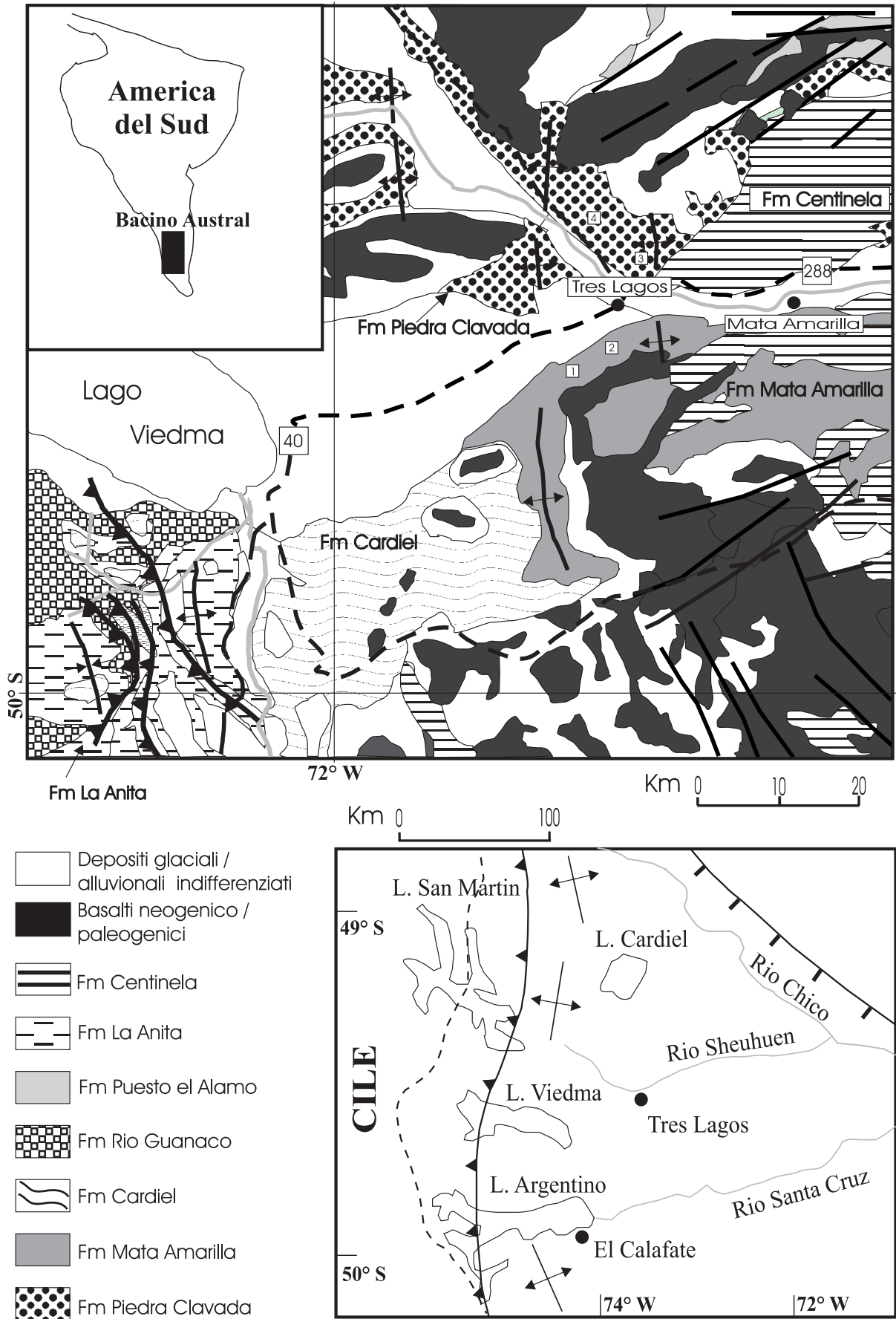


Fig. 1 - Mappa geologica dell'area di studio, nel settore occidentale della Provincia di Santa Cruz, Bacino Australe, Argentina.  
 - Geological map of the area studied in the western sector of Santa Cruz area, Austral Basin, Argentina.

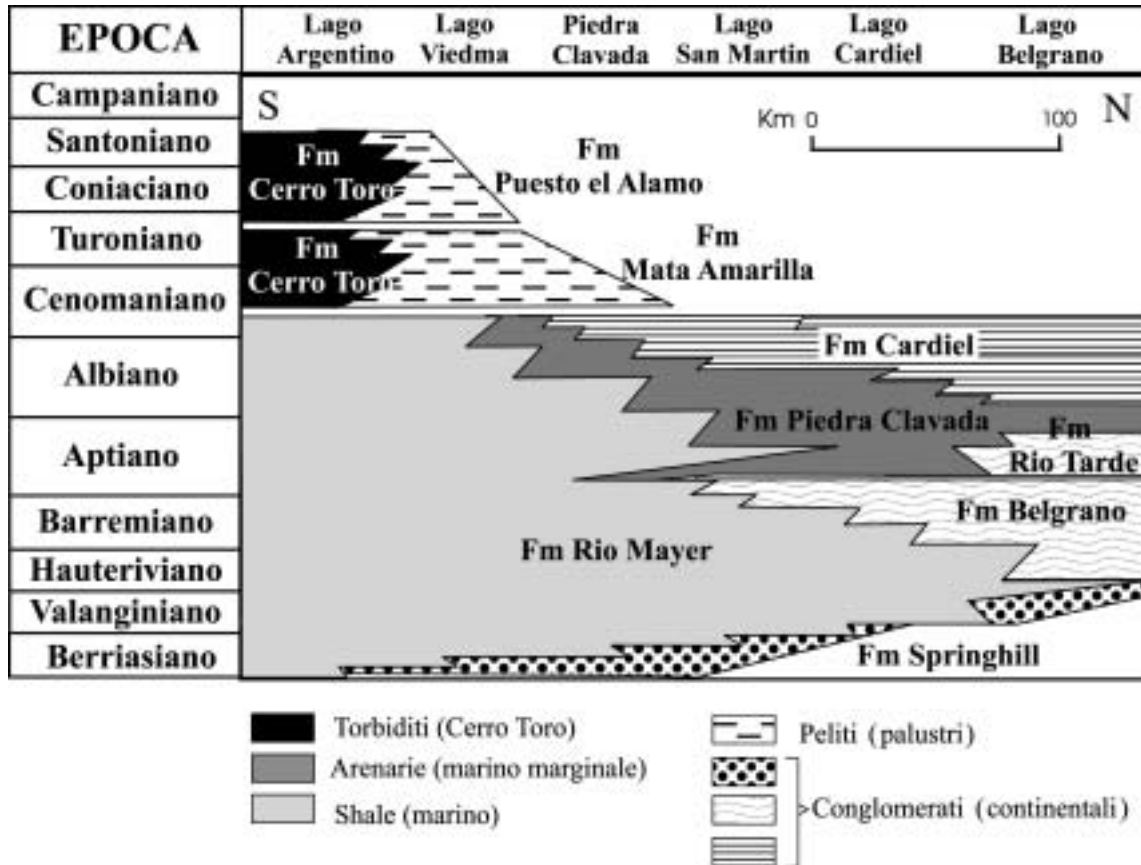


Fig. 2 - Sezione stratigrafica del margine occidentale del Bacino Australe.  
- Stratigraphy of the western margin of the Austral Basin.

terziari, mentre nel settore sud il cambio è erosivo ed è legato all'orogenesi della Cordigliera Andina.

Due sistemi di fratturazione caratterizzano il settore marginale del Bacino Austral, uno di direzione NW-SE, originatosi durante il Giurassico e l'altro di direzione est-ovest sviluppatosi durante il Terziario. Verso il settore sud del bacino, inoltre, le strutture estensionali giurassiche presentano uno sviluppo minore; probabilmente la loro identificazione è resa difficile dalla sovrapposizione di strutture trascorrenti di direzione est-ovest, di età terziaria (Nullo *et alii*, 1981; 1999). Ed è proprio durante il Terziario che i movimenti andini iniziati nel settore nord del bacino originarono movimenti estensionali di possibile dinamica transtensiva, con conseguente riattivazione delle strutture giurassiche; l'estremo sud del bacino fu interessato da movimenti di tipo trascorrente-transpressivo a direzione predominante est-ovest, che diedero origine allo sviluppo del blocco delimitato da faglie transpressive e transtensionali.

Esistono almeno due fasi principali di rifting, associate alla rottura iniziale del Gondwana durante il Giurassico: una prima giurassica media, presente nel mesocraton del Deseado e un'altra giurassica superiore, rappresentata dalla serie Tobifera nell'ambito del Bacino Austral (Nullo *et alii*, 1981; 1999). Le strutture che si originarono furono emigraben marcatamente asimmetrici, riempiti inizialmente da depositi epiclastici generalmente lacustri, seguiti da depositi vulcanici e vulcanoclastici di natura marina verso ovest e continentale verso est. Una volta terminato il periodo di apertura del bacino, l'attività

vulcanica andò scemando dal settore ovest fino ad est, innescando una subsidenza termica nella porzione più profonda. Ciò determinò la rapida trasgressione marina con sedimentazione di unità marine, interposte a raro materiale vulcanoclastico. Tale fase si collocherebbe tra il Valanginiano e l'Hauteriviano.

L'ultima fase è relazionata con i movimenti patagonici del Cretaceo medio, la fase peruviana del tardo Cretaceo e quella andina terziaria. I sedimenti provenienti dal settore continentale settentrionale (Alto Rio Chico) cominciarono a colmare l'area marina a partire dall'Hauteriviano, determinando vari cicli sedimentari che testimoniano una migrazione dei depocentri da nord-ovest verso sud-est. A partire dal Cenomaniano il settore nord del bacino Australe era completamente continentalizzato, e, dall'area del Lago San Martin verso sud fino alla valle del fiume Shehuen, le facies francamente marine che caratterizzavano la Fm. Rio Mayer superiore furono rimpiazzate da depositi clastici litorali con intercalazione di livelli marini (fig. 2). Questi depositi marino-costieri furono raggruppati nella Fm Piedra Clavada (FERUGLIO 1938; FOSSA MANCINI *et alii*, 1938). Durante questo ciclo sedimentario, al sud del bacino continuavano le condizioni di sedimentazione marina con deposizione torbiditica. Tali depositi sono raggruppati e descritti nella Fm. Rio Guanaco, nel comprensorio del Lago Viedma, e nella Fm. Cerro Toro in quello del Lago Argentino (Nullo *et alii*, 1981). Nel settore nord del Lago Viedma affiorano depositi clastici arenacei progradanti alternati a livelli pelitici, che verso il tetto passano a banchi conglomeratici

di 1 m di spessore. Questi ultimi sono raggruppati nella Fm. Puesto El Alamo (NULLO *et alii*, 1981) di età Coniaciano-Santoniano (fig. 2), sincrona alla Fm. Mata Amarilla che ad est del bacino testimonia la continua continentalizzazione (FERUGLIO, 1938; FOSSA MANCINI *et alii*, 1938).

### METODOLOGIE

La descrizione delle facies sedimentarie è stata portata a termine dopo un'accurata analisi degli aspetti litologici, paleontologici, sedimentologici e ichnologici determinati durante la realizzazione di quattro log stratigrafici ubicati nell'area intorno alla località Tres Lagos (SW della provincia di Santa Cruz) (figg. 3-4). Essi sono: 1) Piedra Clavada (località omonima), 49°35'0,9"S-71°24'9,4"W (sigla PPC); 2) Tres Lagos, 49°36'10,1"S-71°28'13,6" (sigla PTL); 3) Arroyo los Paisanos, 49°37'S-71°28'31,5"W (sigla PAP); 4) Quebrada Don Nilson, 49° 31' 52,6" S - 71° 28' 32" (sigla QDN). Si sono identificate ventidue facies sedimentarie, definite a partire dalle caratteristiche granulometriche, geometria, potenza, litologia e strutture sedimentarie inorganiche (fig. 3; tab. 1). Dal punto di vista puramente classificativo sono state identificate otto classi litologiche: 1) ortoconglomerato poligenico, 2) paraconglomerato poligenico, 3) arenaria grossolana (clasti di diametro maggiore a 2 mm < 50%), 4) arenaria litica, sublittoarenitica e wacke subordinate, 5) eterolite (arenaria/pelite), 6) pelite, 7) arenaria grossolana ricca in bioclasti, 8) rudstone/floatstone bioclastico (ortocalcirudite/paracalcirudite) (EMBRY & KLOVAN, 1972; SCHWARZ, 1999). I depositi bioclastici di natura carbonatica, con maggiore e minore tenore di matrice arenosa, sono stati analizzati anche dal punto di vista tafonomico considerandone le caratteristiche biostratinomiche (KIDWELL, 1991a,b).

Dal punto di vista composizionale, attraverso lo studio petrografico di diffrazione a raggi X, i depositi mostrano un forte predominio di litici vulcanici, con abbondante presenza di quarzo monocristallino. Scarsi sono i feldspatoidi, come plagioclasio e microclino, così come la percentuale dei minerali del gruppo delle miche e minerali pesanti. Per quanto riguarda i minerali argillosi nei depositi pelitici, la caolinite è il minerale più abbondante, accompagnata da smectite, illite, minerali interstratificati come illite-smectite e occasionalmente clorite (POIRÉ *et alii*, 2001).

Attraverso lo studio delle tracce fossili, sia dal punto di vista della sistematica che delle ichnocenosi, si è cercato di ottenere indicazioni a carattere paleoecologico da relazionare alle facies sedimentarie: batimetria, energia dell'ambiente, risposta degli organismi tracciatori in funzione della velocità di sedimentazione e del grado di erosione, ossigenazione e tipologia (consistenza) del substrato, quantità di nutrienti, temperatura, salinità tipo di colonizzatori (equilibrati/opportunisti) (GOLDRING, 1995; BROMLEY, 1996).

### FACIES SEDIMENTARIE

#### a) Facies conglomeratiche

Le caratteristiche tessiturali e petrografiche ci permettono di distinguere un primo deposito clasto-sostenuto, con matrice scarsa e clasti di varia natura (ortocon-

glomerato); ed un secondo deposito matrice-sostenuto ad abbondante matrice arenacea e clasti di varia natura (paraconglomerato). Le caratteristiche tafonomiche delle diverse concentrazioni scheletriche presenti in alcune facies conglomeratiche hanno inoltre permesso di caratterizzare alcuni processi sindeposizionali. Le relative simbologie e il riassunto dei caratteri di facies vengono riportate nelle figg. 3-4-5 e tab. 1.

*Cxf* - Ortoconglomerato poligenico con clasti di diametro superiore ai 2 mm, spessore di 50 cm circa, con stratificazione incrociata a festoni, rappresentanti la migrazione di megaripples, con geometria tridimensionale. I set hanno uno spessore di pochi centimetri ed una lunghezza molto variabile, da poche decine di centimetri fino al metro.

*Clag* - Questa facies ricorre molto spesso ed è subordinata ad altre che caratterizzano tutto un corpo arenaceo di dimensioni metriche. La facies è costituita da un paraconglomerato poligenico con spessore non superiore a 20 cm e si colloca alla base di un corpo arenaceo canalizzato, con elementi tessiturali clastici di diametro superiore a 2 cm, *clay chips* e bivalvi disarticolati. Il deposito mostra embriatura sia da parte dei clasti litoidi che degli elementi tessiturali pelitici. Le valve appartengono al genere *Eriphyla*, e sono presenti anche alcuni esemplari di gasteropodi.

Dal punto di vista strettamente tafonomico, le valve, alcune conservate sotto forma di impronta esterna, altre disarticolate ma non rotte o frammentate, sono disposte con convessità al 50% verso l'alto e secondo orizzonti paralleli alla stratificazione. Molto spesso sono presenti anche resti di tronchi silicizzati e/o con processi di *boring* (*Teredolites*), orientati nella maggior parte dei casi parallelamente al flusso della corrente. Le dimensioni possono raggiungere in alcuni casi anche qualche metro.

*Cmt* - Ortoconglomerato poligenico massivo, tabulare, con clasti di diametro superiore ai 2 cm, con elevata selezione e spessore di 20 cm circa.

*Cb* - Conglomerato bioclastico con almeno il 50% di elementi tessiturali carbonatici. Il deposito può essere considerato nella maggior parte dei casi granulo-sostenuto, anche se non scarseggiano termini più ricchi in matrice arenacea fine (matrice-sostenuti), che secondo la classificazione di EMBRY & KLOVAN (1972) possono essere considerati di transizione tra *rudstone* e *floatstone*. La geometria è tabulare e la continuità laterale elevata (alcune centinaia di m), e può essere suddiviso in due o tre strati amalgamati per uno spessore totale di 50 cm. Tra gli elementi tessiturali oltre alla componente bioclastica carbonatica si può aggiungere la presenza di un quantitativo di matrice arenacea fine o siltitica, comunque non sufficiente ad impedire un contatto tra i bioclasti.

Dal punto di vista paleontologico si è potuta riconoscere una notevole diversità tassonomica, con organismi non sempre confinabili all'interno di un ambiente strettamente marino. Si possono osservare valve disarticolate del bivalve *Eriphyla* e gasteropodi di piccole dimensioni non classificabili. Oltre a bivalvi e gasteropodi di sicura attribuzione ad un ambiente marino, si sono rinvenuti frammenti di squame e denti di pesci actinopterigi, come il semionotiforme *Lepidotes*, la cui estrema adattabilità può far presupporre anche un ambiente salmastro. Sono presenti anche frammenti di placche di carapace di tarta-



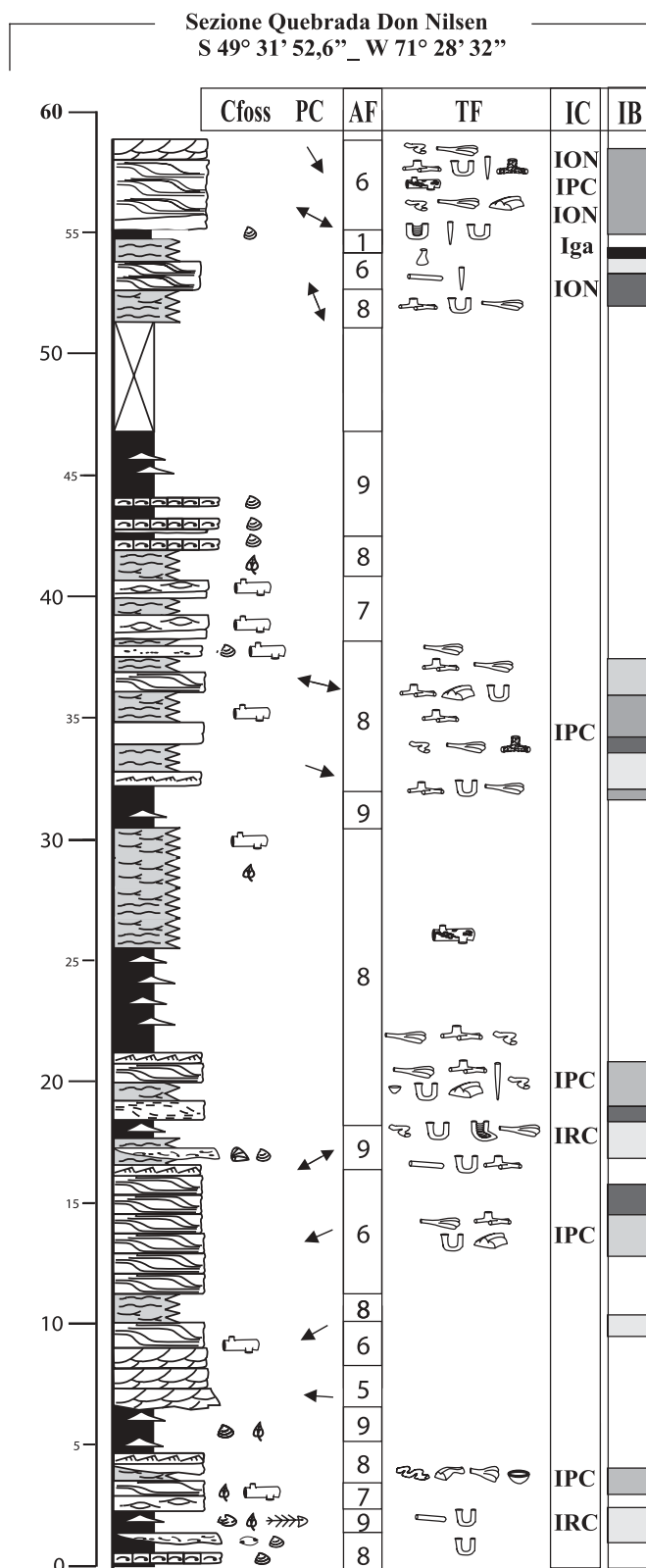
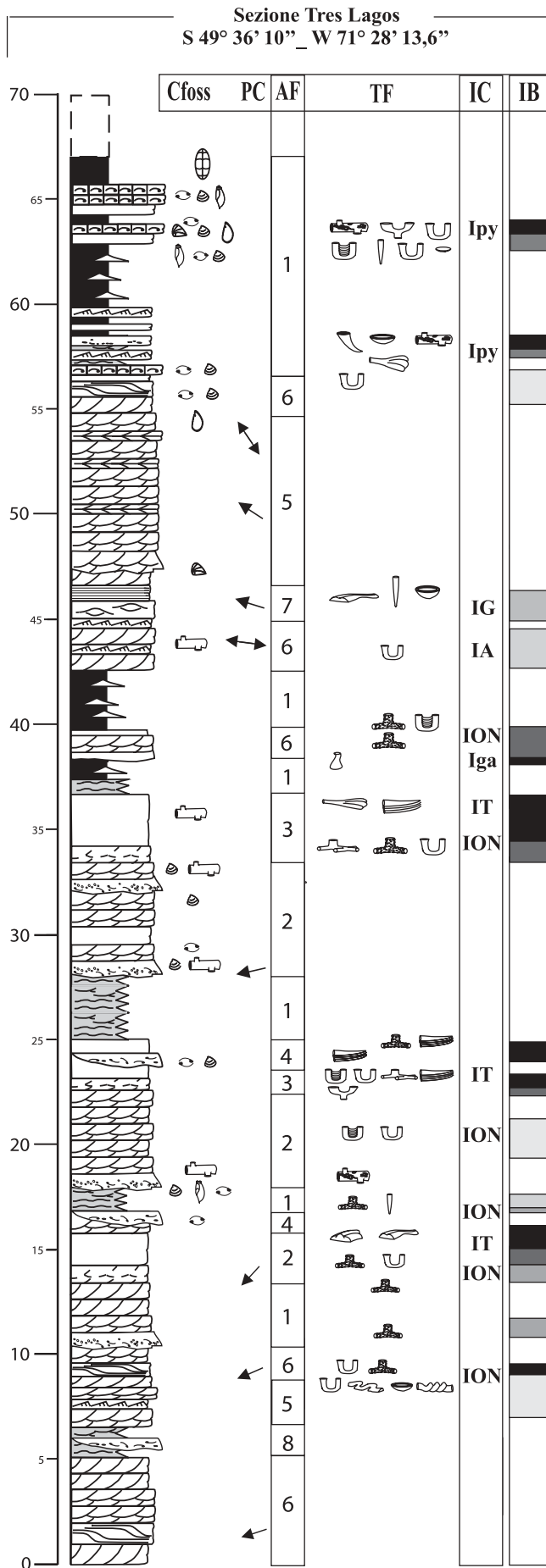


Fig. 4 - Logs stratigrafici delle sezioni Tres Lagos e Quebrada Don Nilsen. Cfoss = contenuto fossilifero; PC = paleocorrenti; AF = associazioni di facies; TF = tracce fossili; IC = ichnoscenesi; IB = indice di bioturbazione (vedi simbologia in fig. 3).  
- Stratigraphic logs of Tres Lagos and Quebrada Don Nilsen sections. Cfoss = fossiliferous content; PC = paleocurrents; AF = facies assemblage; TF = trace fossils; IC = ichnosceneses; IB = bioturbation index (see symbols in fig. 3).

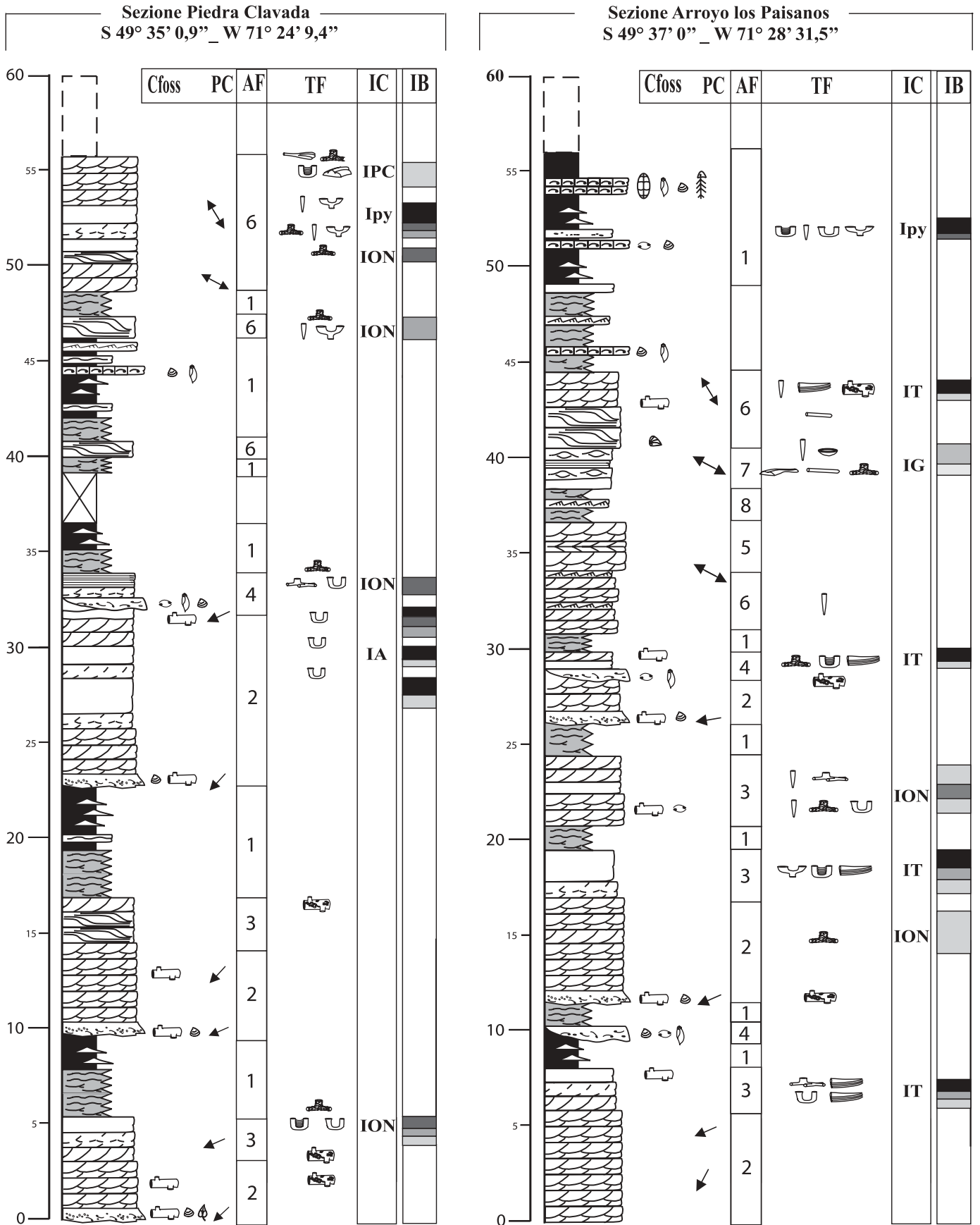


Fig. 5 - Logs stratigrafici delle sezioni Piedra Clavada e Arroyo los Paisanos. Cfoss = contenuto fossilifero; PC = paleocorrenti; AF = associazioni di facies; TF = tracce fossili; IC = ichnocenosi; IB = indice di bioturbazione (vedi simbologia in fig. 3).  
- Stratigraphic logs of Piedra Clavada and Arroyo los Paisanos sections. Cfoss = fossiliferous content; PC = paleocurrents; AF = facies assemblage; TF = trace fossils; IC = ichnosenoses; IB = bioturbation index (see symbols in fig. 3).



TABELLA 1

Facies e loro caratteristiche nella Fm. Piedra Clavada.  
*Facies and their characteristics of the Piedra Clavada Formation.*

Facies	Geometria	Spessore	Litologia	Struttura interna	Base
<b>Clag</b>	Lenticolare	Circa di 20 cm	Paraconglomerato poligenico	Massiva	Concava, erosiva
<b>Cmt</b>	Tabulare o lenticolare	Tra 20 e 30 cm	Ortoconglomerato poligenico	Massiva	Piana o concava, erosiva
<b>Cxf</b>	Tabulare	Circa di 50 cm		Stratificazione incrociata concava	Piana netta
<b>Cb</b>	Tabulare o lenticolare	25 a 50 cm	Rudstone e Floatstone bioclastico	Massiva. Con bivalvi e/o gasteropodi. Eventualmente resti di vertebrati. A volte amalgamati	Piana o concava, netta a lievemente erosiva
<b>Cbt</b>	Tabulare	Tra 10 e 20 cm		Massiva. Con bivalvi disarticolati e scarso tenore di matrice siltosa ( <i>hardground</i> )	Piana netta
<b>Cbc</b>	Lenticolare	20 a 30 cm	Arenaria ricca in bioclasti	Massiva con <i>lag</i> basale di bioclasti (gasteropodi, bivalvi articolati e disarticolati), che diminuiscono di concentrazione verso il tetto. Intraclasti pelitici. <i>Flutes</i>	Concava altamente erosiva
<b>ACxf</b>	Tabulare	Intorno a 1 m	Arenaria ghiaiosa	Stratificazione incrociata concava granodecrescente	Piana erosiva
<b>Amc</b>	Lenticolare	25 a 50 cm	Arenaria litica e sublitoarenitica. <i>Wackes</i> subordinate	Massiva. Occasionalmente con intraclasti pelitici e tronchi	Piana non erosiva a lievemente erosiva
<b>Am</b>	Tabulare	Intorno a 1 m		Altamente bioturbato. Strutture meccaniche diffuse	Piana non erosiva
<b>Axf</b>	Tabulare	Variable, 20 cm a 1,5 m		Stratificazione incrociata concava. Superfici interne erosive, <i>lag deposits</i>	Piana netta o erosiva
<b>Axt</b>	Tabulare	50 cm a 1 m		Stratificazione incrociata tabulare	Piana netta
<b>Axh</b>	Lenticolare	Tra 10 e 30 cm		Stratificazione incrociata gibbosa ( <i>hummocky</i> ). Antidune stazionarie	Piana netta o erosiva
<b>Axs</b>	Tabulare	50 cm a 1,5 m		Stratificazione incrociata sigmoidale, superfici di riattivazione e <i>mud draps</i>	Piana netta
<b>Axp</b>	Tabulare	Circa di 50 cm		Stratificazione piano-parallela. Stratificazione incrociata planare a basso angolo	Piana netta
<b>Axr</b>	Tabulare	Intorno a 20 cm		Laminazione incrociata concava	Piana netta
<b>Axg</b>	Tabulare	Circa 1 m		Laminazione incrociata a spina di pesce ( <i>herringbone</i> )	Piana netta o erosiva
<b>Ar</b>	Tabulare	Da 30 a 40 cm		Massiva. <i>Ripples</i> da onda, corrente e interferenza al tetto	Piana netta
<b>Ea</b>	Tabulare	30 a 60 cm		Eterolitica ricca in sabbia	Laminazione incrociata, sigmoidale, <i>climbing ripples</i> . <i>Flaser bedding</i>
<b>Eap</b>	Tabulare	Tra 30 e 40 cm	Eterolitica pura	Stratificazione mista wavy <i>lenticular</i>	Piana netta
<b>Ep</b>	Tabulare	Tra 10 e 20 cm	Eterolitica ricca in pelite		Piana netta
<b>Pm</b>	Tabulare	10 a 20 cm	Pelite	Massiva	Piana
<b>PI</b>	Tabulare	10 a 20 cm		Laminazione parallela	Piana netta

*Cbc* – Arenaria e/o conglomerato ricco in bioclasti, a geometria canaliforme con abbondante presenza di matrice arenosa, che va aumentando notevolmente fino a costituire la totalità del deposito verso la porzione sommitale dello strato. La geometria canalizzata del deposito, con scarsa continuità laterale, ci indica un evento localizzato, dovuto forse ad una alluvione con flusso confinato, la quale ha probabilmente determinato la concentrazione del deposito grossolano, privo di qualsiasi struttura sedimentaria primaria (MUTTI *et alii*, 2001).

La concentrazione dei bioclasti è maggiore alla base del piccolo canale, quasi a costituirne il *lag* basale, con una grande abbondanza di valve di *Eriphyla*, valve disarticolate e rotte di ostreidi, e gasteropodi, anche di dimensioni fino a 3 cm, assimilabili al genere *Natica*, oltre che a clasti di dimensioni centimetriche sparsi nello strato. Verso il tetto del canale i bioclasti e i clasti risultano dispersi nella matrice arenacea, con elementi flottanti in quello che doveva forse essere un flusso ad alta densità ed alta viscosità (LOWE, 1982; COLACICCHI & MONACO, 1994). All'interno di questa facies, con le stesse caratteristiche granulometriche, geometriche e tessiturali, è stato compreso anche un altro corpo conglomeratico che non è presente nei logs PAP, PTL o PPC, ma tipico solo del log QDN. Tale corpo è un deposito bioclastico lenticolare continuo lateralmente, con abbondante presenza di matrice, con elevata selezione, forse relazionabile ad un lobo distale di un deposito alluvionale, che da confinato si apriva disperdendo il materiale trasportato (MUTTI *et alii*, 2001).

#### b) *Facies arenitiche*

Per quanto riguarda la distinzione granulometrica delle arenarie sono state rinvenute tre diverse tipologie di sabbie: grossolane da 1 a 2 mm di diametro; medie da 1 a 0,3 mm; fini da 0,3 a 0,062 mm. Sono stati inoltre rinvenuti set di lamine incrociate a grande scala (spessore del *set* da 5 cm ad 1,5-2 metri) probabilmente dovuti a migrazione di dune e barre e al riempimento di docce erosive. Comuni i set di lamine incrociate a piccola scala con uno spessore dei set inferiore a 5 cm, in genere dovuti a migrazione di ripples.

*Axt* – Arenaria litica e sublitoarenitica di granulometria media, con stratificazione incrociata tabulare, di spessore totale variabile da 50 cm a 1 m. I set incrociati hanno uno spessore dai 10 ai 20 cm con base planare, i coset possono raggiungere il metro; inoltre le superfici incrociate sono di basso angolo, intorno ai 10°, e sono visibili in alcuni casi pacchi di lamine più grossolane esclusivamente arenose, alternate ad altre lamine subordinate di pelite scura. La genesi delle lamine di pelite è legata probabilmente alla decantazione del deposito più fine durante un momento di bassa marea, che diede origine ad un *mud drap*. Lo sviluppo della stratificazione incrociata è forse dovuta alla migrazione di megaripples bidimensionali, trasversali al flusso dominante.

*Axs* – Arenaria litica o sublitoarenitica di granulometria media con stratificazione incrociata sigmoidale o cosiddetta doppia tangenziale, di spessore variabile da 50 cm a 2 m. I set incrociati dei megaripples hanno uno spessore da 10 a 20 cm con base planare, i coset possono raggiungere il metro ed in alcuni casi fino ai tre metri e le la-

mine incrociate sono in genere di basso angolo intorno ai 15°. La facies è caratterizzata anche da strutture che indicano cambiamenti nel regime di flusso come drappaggi da decantazione che potrebbero essersi originati in regimi di flusso basso, non sempre stazionario, come nel caso di un'area dominata da maree (SPALLETTI, 1996). In questa facies sono state rinvenute anche superfici di riattivazione che tagliano le lamine con un angolo inferiore a quello dei foreset e sono presenti set incrociati con lamine pelitiche ad alto angolo di inclinazione (interpretabili come correnti tidali di *ebb*), alternati ad altri set con lamine piano parallele (correnti tidali di *flood*).

*Axf* – Arenaria litica o sublitoarenitica di granulometria da media a grossolana con stratificazione incrociata a festoni; i set hanno spessore variabile, intorno ai 30-40 cm, e di estensione vicino al metro; in alcuni casi possono presentare una laminazione da ripples da onda al tetto. I coset oscillano tra 1 e 3 metri di spessore e in generale appoggiano su superfici basali conglomeratiche («*lag* basale») con spessori pari a 30-50 cm. Sono numerosi i *lag deposits*, evidenziati dalla tessitura microconglomeratica dell'orizzonte all'interno della stratificazione. Le superfici di contatto che si alternano più o meno regolarmente possiedono uno spessore che al massimo raggiunge i 30 cm, hanno una forma biconvessa e scarsa continuità laterale, divenendo via via più sottili fino a sfumare definitivamente. Questa facies si sarebbe potuta originare per la migrazione di megaripples tridimensionali forse in regimi di tempesta (SWIFT *et alii*, 1983; LECKIE 1988).

*ACxf* – Arenaria litica di taglia grossolana con stratificazione incrociata a festoni, che al tetto si fa grano-decrescente, e presenta la base erosiva. Lo spessore dei set si aggira attorno a 50 cm con una lunghezza superiore al metro, essendo dunque considerevolmente maggiore rispetto a quelle dei set della facies *Axf*; la granulometria ci indica chiaramente un grado di energia superiore. Questa facies si trova spesso associata alla *Axf*, che segue al tetto. Dunque anche la *ACxf* potrebbe rappresentare la migrazione di megaripples tridimensionali, talvolta con base erosiva, sulla quale si possono osservare frammenti vegetali e resti di tronchi disposti secondo due direzioni preferenziali (AIGNER, 1985).

*Axr* – Arenaria litica da media a fine, con clasti sparsi di diametro inferiore al centimetro e laminazione incrociata concava; la facies ha uno spessore di 20 cm circa e geometria tabulare. La migrazione di sistemi di ripple da corrente linguoidi o a creste sinuose sarebbe all'origine della laminazione incrociata, in condizioni di basso regime di flusso e in acque di minima profondità. Si potrebbe ipotizzare che all'origine di tali strutture da corrente trattiva ci siano moti di maree in una piana tidale.

*Ar* – Arenaria litica a *wackes*, a granulometria media con laminazione da ripple da onda con sezione da simmetrica a leggermente asimmetrica. Lo spessore dei set di lamine è circa di un centimetro con una lunghezza che può arrivare a 10 cm. La geometria è tabulare con uno spessore pari a 15-20 cm. I ripple simmetrici si formavano in risposta a correnti oscillatorie indotte dal moto ondoso in condizioni di basso regime di flusso in acque

poco profonde (AIGNER, 1985; SNEDDEN *et alii* 1988). Tali strutture potrebbero essersi originate nella porzione più esterna di un fronte deltizio, ad una profondità tale in cui l'azione combinata del moto ondoso e di marea potevano generare flussi oscillatorio-trattivi sul fondale (SNEDDEN *et alii*, 1988).

*Axh* - Arenaria litica a *wackes*, di taglia medio-fine, con stratificazione incrociata *hummocky-swaley*, con set di lamine ondulate separati da superfici erosive anch'esse ondulate secondo un modello tridimensionale a zone concave e convesse (DOTT & BURGEAIS, 1982). I set raggiungono uno spessore anche di 50 cm, con laminazione molto fine da basso angolo fino ad orizzontale. La base è netta e piana con convessità verso l'alto, gli strati posseggono una geometria lenticolare piano-convessa con una continuità di circa 3 metri e terminazione *pinch out*. Questo tipo di stratificazione verso il tetto, così come lateralmente, tende a svanire in maniera graduale, assumendo una laminazione piano-parallela. In alcuni casi si presenta totalmente amalgamata, con residui di strutture relitte alla base; ciò è dovuto alle caratteristiche del flusso, alto e in regime oscillatorio, oltre che alla elevata densità (CHEEL & LECKIE, 1993). Seguendo i numerosi meccanismi deposizionali, ben conosciuti e descritti dall'ampia modellistica esistente in letteratura, originati da tempeste agenti negli ambienti di shelf, il sedimento sabbioso sarebbe stato trasportato come carico in sospensione sotto l'azione di un flusso oscillatorio puro e/o trattivo (HARMS *et alii*, 1975; KREISA, 1981; DUKE, 1985; WALKER, 1979; LECKIE, 1988; DOTT & BURGEAIS, 1982; LECKIE & SINGH, 1991; MONACO, 1992, 1994; MYROW & SOUTHARD, 1996, tra gli altri). Gli strati di tempesta (*storm layer*) nella Fm. Piedra Clavada tendono a conservarsi con tutte le proprie strutture, nello *shoreface* inferiore, sia perché sono più spessi sia perché l'azione rielaboratrice delle onde normali è più debole. Tendono invece a essere cancellati e sostituiti da normali megaripples nello *shoreface* superiore (LECKIE, 1988; PRAVE *et alii*, 1996). Sotto la stessa facies sono compresi anche tutti quei corpi arenacei con caratteristiche strutture monticolari a sezione tondeggianti simmetrica indotti da regimi di flusso alti, come il caso di dune stazionarie, con lamine ondulate troncoideali simili a quelle *hummocky*, però di dimensioni ridotte. Queste strutture potrebbero essersi originate anche per episodi di piena in canali di foce, che scaricavano l'energia accumulata proprio nella piana deltizia al contatto con il flusso opposto del moto ondoso e tidale (MUTTI *et alii*, 2001).

*Axp* - Arenaria litica o sublitoarenitica di taglia media, con stratificazione da piano-parallela ad incrociata planare di piccola scala, con potenza variabile, intorno a 50 cm-1 metro. I set hanno uno spessore di circa 5-10 cm, base planare o leggermente concava. Le superfici incrociate sono di basso angolo (mediamente < 10°), con lamine convesse verso l'alto. La facies raccoglie due diverse strutture da corrente trattiva, però con regimi di flusso diversi. Gli strati piano paralleli (*plane bed*) si sarebbero originati in condizioni di alti regimi di flusso; la migrazione di megaripples bidimensionali sotto condizioni di regime di flusso variabile sarebbe all'origine della stratificazione incrociata tabulare di basso angolo. L'inclinazione di pochi gradi dei foreset ci indica comunque che il regime di flusso era prossimo al valore ipercritico (BOSELLINI *et alii*, 1989).

*Axg* - Arenaria litica o sublitoarenitica di taglia grossolana con set di lamine adiacenti ad immersione opposta (*herringbone*). I set misurano una potenza pari ad 2-3 cm, e in certi casi le lamine sono costituite da clasti equidimensionali di diametro superiore al centimetro. La formazione di foreset immergenti in senso opposto è dovuta a periodiche inversioni della corrente, in condizioni di basso regime di flusso, situazione comune nei canali tidali interessati da correnti di flusso (*flood*) e riflusso (*ebb*) mareale aventi la stessa intensità (SHINN, 1983).

*Am* - Arenaria litica a *wacke* di taglia media, priva di strutture sedimentarie; in alcuni casi sono riconoscibili strutture relitte difficilmente classificabili; lo spessore è variabile e generalmente si aggira intorno al metro. L'azione di *weathering* ha prodotto l'alterazione superficiale del corpo arenaceo, mettendo in alcuni casi in rilievo strutture sedimentarie organiche; tale erosione è stata possibile considerando che l'arenaria possiede un buon tenore di frazione pelitica.

La distribuzione delle strutture sedimentarie primarie è da imputare all'attività bioturbante della comunità bentonica. L'azione di rimaneggiamento post e sindeposizionale operata dalle comunità epifaunali e infaunali avrebbe obliterato le strutture, probabilmente potendo contare su condizioni fisiche stabili (es. basso tasso di sedimentazione).

*Amc* - La facies è costituita da un corpo arenaceo massivo con tessitura da media a grossolana e base erosiva. La geometria complessiva è piano-convessa, di spessore variabile intorno a 25-50 cm e lateralmente il corpo arenaceo si fa sempre più sottile con terminazione *pinch-out*. Spesso tale facies è stratigraficamente seguita da set incrociati *hummocky*. Sebbene differenziabile dalla facies Am precedentemente descritta, a causa dell'assenza di strutture sedimentarie indicative, sia organiche che inorganiche, risulta difficile risalire con certezza al meccanismo deposizionale e al paleoambiente.

### c) Facies Eterolitiche

Si intende come facies eterolitica un deposito misto di elementi tessiturali della taglia di una pelite e di una sabbia fine secondo l'interpretazione di SPALLETTI (1996). Si possono riconoscere tre principali suddivisioni, determinabili in relazione alla percentuale della frazione pelitica presente. Oltre al tenore in pelite cambiano in ognuna le strutture sedimentarie inorganiche.

*Ea* - Alternanza ritmica sabbia/fango con stratificazione *flaser bedding* molto sottile dell'ordine del centimetro, con lenti discontinue biconcave di fango alternate a lenti sabbiose a ripples simmetrici curvi o asimmetrici rettilinei. Sono stati riconosciuti anche ripples rampicanti (*climbing ripples*), originatisi in condizioni idrodinamiche non stazionarie. La ritmicità sabbia/fango suggerisce variazioni periodiche di energia, come può essere in un ambiente interessato dal moto delle maree. Durante il flusso (*flood*) e il riflusso (*ebb*) l'apporto sabbioso era cospicuo e la corrente determinava un trasporto di fondo con strutture trattive. Nel momento di stasi tra un ciclo e l'altro, la pelite decantava in condizioni di calma, a drappeggiare e dividere ritmicamente le strutture di flusso da quelle di riflusso. Un caso analogo è stato osservato in al-

cuni depositi eterolitici del Messiniano della Cordigliera Betica (J.M. SORIA, *comunic. pers.*).

Dal punto di vista dell'ambiente deposizionale, la facies Ea è probabilmente da collocare in un *foreshore* o *lower shoreface*, nella porzione più esterna al fronte deltizio lontana dalla costa (SPALLETTI, 1996).

*Eap* – Termine intermedio tra Ea ed Ep in cui il contenuto di pelite e sabbia è paritario. La struttura sedimentaria dominante è la stratificazione ondulata (*wavy*) con lenti sabbiose continue con laminazione da ripple di diversa natura, più spesso ripples simmetrici curvi, mentre le lenti e il drappeggio pelitico assumono un carattere continuo.

*Ep* – Alternanza ritmica sabbia/fango, ma con stratificazione lenticolare molto sottile nell'ordine del centimetro. I livelli sottili di sabbia perdono la continuità laterale e si riducono a piccole lenti allineate. I ripples, in questa particolare stratificazione, erano probabilmente sottoalimentati e discontinui. La discontinuità delle lenti sabbiose è dovuta non tanto alla forza della corrente trattiva, ma alla poca disponibilità di sedimento sabbioso; tale insufficienza doveva rendere impossibile il ricoprimento dell'intero fondale da parte della sabbia. Anche questa facies sarebbe da attribuire ad un ambiente interessato da correnti di marea, molto deboli, e un apporto di materiale sabbioso scarso. Questo farebbe pensare ad un fronte deltizio più distale (*lower shoreface*), un piede di barra al limite con il prodelta, totalmente pelitico, oppure ad una porzione di piana tidale. In entrambi i casi ci troviamo in un subambiente dominato dal moto oscillatorio delle maree con un basso regime di flusso (BOYD *et alii*, 1992).

#### d) Facies Pelitiche

Le facies pelitiche, caratterizzate da una granulometria inferiore a 0,004 mm, mostrano una scarsa varietà di strutture sedimentarie, mentre il colore e la consistenza nella Fm Piedra Clavada variano e costituiscono il principale elemento di interpretazione sul processo deposizionale e sull'ambiente stesso. Dal punto di vista composizionale i minerali argillosi sono principalmente caolinite accompagnata da illite e smectite (POIRÉ *et alii*, 2001).

*Pm* – Pelite massiva priva di laminazione, di colore da grigio chiaro al bianco, con spessore variabile, che da pochi centimetri in PTL e PPC, raggiunge quasi i 30 cm in QDN. Lateralmente possiede una scarsa continuità areale, raggiungendo, nel migliore dei casi, la decina di metri. In genere la facies Pm si assottiglia lateralmente fino a un sottile orizzonte di clasti pelitici, ben arrotondati e di diametro superiore al centimetro, in qualche caso di 50 cm, scarsamente erosi e con *borings*. La presenza di un particolare ichnogenere quale *Gastrochaenolites* confermerebbe che il substrato era effettivamente indurito (*hardground/rockground*, GOLDRING, 1995). La diagenesi precoce del sedimento sarebbe dovuta alla continua e prolungata esposizione subarea del deposito, tale da favorire la perdita di acqua (deidratazione) e la precipitazione di cemento.

*Pl* – Facies pelitica con laminazione evidenziata dall'alternanza tra lamine fossilifere di colore grigio scu-

ro con abbondanza di resti vegetali e gusci e lamine grigio-chiare che tra l'altro variano in spessore. In alcuni livelli si concentrano bivalvi, in particolare del genere *Corbula*. Questi ultimi risultano essere ancora articolati o lievemente disarticolati ma non rotti, con disposizione pressoché parallela alla laminazione. Sono stati riconosciute anche resti di pesci di difficile collocazione tassonomica, numerosi frustoli vegetali per lo più foglie e frammenti millimetrico/centimetrici di legno. Un'osservazione preliminare di tipo biostratigrafico sui gusci dei bivalvi indicherebbe mancanza di trasporto, data l'ottima conservazione delle valve di una probabile paleocomunità infaunale-semi-infaunale. La deposizione della pelite potrebbe ricondursi a processi di decantazione, ad una profondità tale per cui il moto ondoso non poteva esercitare trazione sul fondo e superare quindi la velocità critica di trascinamento. Dal punto di vista della batimetria, il sedimento pelitico in sospensione doveva decantare in un *lower shoreface* o in un *offshore*, che nella suddivisione ambientale di un delta si potrebbe tradurre come la porzione più distale di tutto il sistema deltizio (prodelta).

#### ASSOCIAZIONI DI FACIES

Le singole facies, una volta descritte, possono essere raggruppate a partire dalla loro distribuzione verticale e laterale, considerando la loro relazione genetica (READING, 1986; READING & COLLINSON, 1996). Mentre le singole facies individuano un processo deposizionale non indicativo di un ambiente, lo studio delle associazioni ci permette di stabilire quale siano i subambienti deltizio-estuarini di cui l'associazione di facies costituisce il termine distintivo. Si sono individuate nove diverse associazioni:

##### Associazione I (*Ea, Eap, Ep, Axr, Ar, Am, Cb, Pm*)

Carattere distintivo e ricorrente è l'alternanza di un corpo arenaceo ad uno eterolitico; le unità litologiche sono provviste di strutture sedimentarie inorganiche, da azione tidale, come laminazione ondulata da ripple di corrente nei termini arenacei (Ar), e strutture flaser e lenticolari in quelli eterolitici (Ea, Ep). Congiuntamente, si hanno associati più strati conglomeratici carbonatici bioclastici (Cb) (*rudstone* e/o *floatstone*). Probabilmente doveva rappresentare una zona costiera ampia (piana tidale o lagunare), soggetta alternativamente ad emersione ed inondazione, in cui le correnti tidali avrebbero generato nastri, cordoni litorali di gusci e ciottoli.

##### Associazione II (*Clag, Amc, ACxf, Axf*)

L'associazione II si apre con un conglomerato basale (Clag), spesso privo di strutture chiare e in certi casi del tutto assenti, seguito da set incrociati concavi (ACxf) che passano superiormente a strati incrociati di spessore e granulometria via via inferiori (Axf). Il conglomerato basale possiede clasti di diversa natura, sia organici che inorganici, come bivalvi, tronchi di notevoli dimensioni e intraclasti pelitici (*clay chips*). In alcuni casi è possibile riconoscere una stratificazione ondulata con set di dieci centimetri circa di potenza. La morfologia dei set ricorda strutture che si originano per alti regimi di flusso, come antidune stazionarie. Successivamente tali condizioni

idrauliche, unite alla diminuzione nell'apporto di sedimento, vengono abbandonate; si passa allora a strutture trattive di regime di flusso variabile, con set incrociati a festoni, con diminuzione sia della granulometria che dello spessore verso il tetto. La geometria è canaliforme, con terminazione pinch-out, raggiungendo una lunghezza che da alcune decine di metri arriva fino a circa un centinaio e con una potenza variabile tra 4-5 metri. L'associazione potrebbe rappresentare il riempimento di un canale di foce.

#### *Associazione III (ACxf, Axf, Axt, Am)*

La base dell'associazione è priva di contatti erosivi ed è caratterizzata da litofacies a tessitura grossolana e stratificazione incrociata concava (ACxf). Superiormente si passa a strati con strutture incrociate, concave o tabulari (Axt, Axf) con una sensibile diminuzione della granulometria del deposito ed un sensibile aumento di matrice pelitico/siltosa. L'associazione si chiude con un ultimo orizzonte massivo fortemente bioturbato (Am), in cui è difficile il riconoscimento degli ichnotaxa, tale è il grado di bioturbazione e la sovrapposizione delle tracce. La geometria complessiva del corpo arenaceo è tabulare, con una continuità laterale che può raggiungere il centinaio di metri, mentre la potenza si stabilizza tra il metro e i cinque metri. L'associazione costituisce un deposito sabbioso di barra di foce.

#### *Associazione IV (Amc, Cbc, Am, Axp)*

L'associazione IV è costituita da un deposito arenaceo di geometria canaliforme (Amc); alla base risulta estremamente ricco in bioclasti (Cbc), essenzialmente valve di articolate e rotte. La continuità laterale risulta piuttosto limitata, non superando dieci metri di lunghezza per un metro circa di potenza. La frazione fine arenacea aumenta il suo tenore passando dalla base, completamente bioclastica, a livelli arenacei fini al tetto. Il corpo superiore tabulare arenaceo è fortemente bioturbato (Am), e si può riconoscere una stratificazione incrociata planare con set di dimensioni centimetriche (Axp). L'associazione rappresenta un deposito alluvionale prossimo alla foce deltizia, dove la comunità a bivalvi veniva rimaneggiata durante gli eventi di piena.

#### *Associazione V (ACxf, Axf, Axt, Axs, Axc)*

Nell'associazione V le facies si susseguono verticalmente nell'ordine sopra riportato; passando dal basso verso l'alto si hanno prima le tre facies arenacee con stratificazione incrociata a festoni e/o tabulare a base da ondulata a erosiva (ACxf, Axf, Axt), poi quella a granulometria media con stratificazione incrociata sigmoidale (Axs), e infine chiude l'associazione la facies a laminazione ondulata da ripple di corrente (Axc). Complessivamente la base della V è erosiva, mentre il tetto è piano con tendenza complessiva strato e granodecrescente. La potenza dell'associazione intera raggiunge dimensioni variabili, da un minimo di un metro fino ad un massimo di cinque circa; lateralmente termina a pinch-out, e può raggiungere una decina di metri. Le strutture sedimentarie inorganiche, quali stratificazione incrociata sigmoidale e laminazione da ripple di corrente al tetto, insieme ad una varietà di strutture tidali come quella *herringbone* (Axc),

ci indicano che il deposito potrebbe essere stato il riempimento di un canale tidale.

#### *Associazione VI (Axf, Axs, Axt, Axc, Ar, Am)*

L'associazione è caratterizzata da depositi arenacei con stratificazione incrociata sigmoidale (Axs), concava o tabulare (Axf, Axt) di basso angolo, o planare di piccola scala (Axc); è presente anche una laminazione ondulata da ripple (Ar). Caratteristica è la stratificazione incrociata con superfici di riattivazione. Tra i depositi legati a meccanismi tidali si possono annoverare i livelli pelitici più scuri (*mud draps*) e tra le strutture la stratificazione incrociata «bipolare» con inversione dei foreset a prevalenza di set inclinati verso terra. L'associazione possiede uno spessore variabile, da un metro fino ai cinque metri; lateralmente il corpo arenaceo è estremamente continuo e può raggiungere qualche centinaio di metri. L'associazione potrebbe costituire un deposito sabbioso di barra tidale.

#### *Associazione VII (Amc, Axc, Axc, Axf)*

Alla base è costituita da una facies arenacea massiva (Amc) con geometria concavo-convessa e terminazione laterale a pinch-out. Segue una facies anch'essa arenacea (Axc), ma con stratificazione incrociata monticolare (*hummocky*), concava o convessa (*swaley*); l'estensione areale complessiva può raggiungere una lunghezza anche di una decina di metri. Il deposito sarebbe il risultato di eventi di tempesta che interesserebbero la parte di fronte deltizio prossima alla costa, al di sotto della base d'onda di buona stagione. L'organizzazione di strati tabulari di maggiore estensione laterale, a volte amalgamati con tronchi silicizzati e strutture HCS, corrisponderebbe a condizioni di maggiore profondità, di *shoreface* basso.

#### *Associazione VIII (Ea, Eap, Ep, Ar, Cbt)*

L'associazione è costituita sia da facies arenacee che eterolitiche. La facies arenacea (Ar) è costituita da strati di potenza ridotta che non superano il metro e al tetto è riconoscibile una laminazione ondulata da ripple di corrente. Il termine eterolitico possiede strutture da trazione e decantazione: *flaser* (Ea) nei termini più arenacei, mentre passa a stratificazione *lenticular* in quelli con maggiore tenore di pelite (Ep). Strati più o meno continui arenacei di dimensioni centimetriche si susseguono a quelli pelitici; l'alternanza è dovuta al regime delle correnti di marea che favorivano in un caso l'azione trattiva e nell'altro la decantazione. L'associazione potrebbe essere considerata come un deposito di fronte di barra e/o piede di barra tidale.

#### *Associazione IX (Ep, Pl, Cbt)*

L'associazione possiede, rispetto a tutte quelle descritte in precedenza, una prevalenza di facies pelitiche ed eterolitiche. In dettaglio si può riconoscere una facies pelitica laminata (Pl) con l'alternanza di livelli a differenza colorazione, da grigio scuri a verdognoli. Al suo interno, inoltre, possono esserci livelli sottili di resti vegetali, frustoli e fogliame, e valve articolate di bivalvi. Troviamo associati particolari strati conglomeratici carbonatici bioclastici (*rudstone* e/o *floatstone*), di geometria tabulare

con le valve caoticamente disposte, disarticolate e rotte unitamente alla cospicua presenza di matrice arenosa, che non superano i quindici centimetri di spessore con estensione laterale che può arrivare sulla decina di metri ed oltre (Cbt). L'associazione IX pelitico-eterolitica, ricca in materia organica, potrebbe indicare un ambiente di prodelta, con sedimentazione lenta di particelle fini essenzialmente per decantazione e con sporadici e subordinati livelli alluvionali.

### PALEOCORRENTI

Al fine di determinare la natura delle paleocorrenti prodotte dal moto ondoso, da correnti fluviali o tidali, sono state prese numerose misure (fig. 6). Un primo picco modale si attesta tra i 220° e i 270°, e caratterizza la porzione inferiore della formazione Piedra Clavada, mentre un secondo compreso tra i 290° e i 340°, per la parte superiore. Per il primo caso si tratta principalmente di correnti unidirezionali e unipolari, che provengono da NE, generando una migrazione a SW di megaripples e ripples tridimensionali, caratterizzando sia il deposito di canale di foce, che le barre sabbiose antistanti. Il secondo picco modale vede la migrazione di megaripples e ripples verso NW; in questo caso il flusso non è più unidirezionale unipolare, ma con maggiore tendenza alla bipolarità, con direzione delle strutture sedimentarie prevalentemente NW-SE. Nella parte inferiore della formazione si registrano paleocorrenti unidirezionali unipolari e subordinatamente bipolari, a secondo che ci si trovi a ridosso della zona di foce o più distali in un fronte deltizio, con correnti tendenzialmente dirette dal continente verso il mare aperto (*ebb*). Nella parte superiore le paleocorrenti sono essenzialmente unidirezionali con un aumento alla bipolarità, anche se le correnti principali unipolari scorrevano dal mare verso il continente (*flood*).

### MODELLO DEPOSIZIONALE DELLA FORMAZIONE PIEDRA CLAVADA

Dall'analisi delle associazioni di facies emerge una netta separazione tra i depositi della porzione inferiore e quella superiore della Fm Piedra Clavada, a tal punto che è possibile dividere l'unità in due membri: uno inferiore, caratterizzato da depositi deltizi/estuarini ed uno superiore con facies franche di estuario (DARLYMPLE, 1992; DARLYMPLE *et alii*, 1990; 1992) (fig. 7).

Il modello deposizionale relativo al **membro inferiore** della Fm Piedra Clavada prevede l'esistenza di una piana deltizia superiore attraversata da canali distributori, argini subaerei (che si assottigliano verso mare) e baie interdistributrici, con specchi d'acqua sia salmastra che dolce. La piana deltizia inferiore era solcata da canali di foce (ass. di facies II) che favorivano la deposizione di parte del carico sabbioso e detritico in prossimità della foce, determinando la costruzione di grandi barre di foce (sez. PAP, PTL e PPC).

Sempre nella piana deltizia inferiore si estendevano delle piane tidali (ass. di facies I) non troppo ampie e continue (fig. 7). Procedendo verso mare l'energia delle correnti fluviali diminuiva drasticamente, tanto che il primo agente del processo sedimentario diveniva la corrente di marea. Si organizzavano canali e barre tidali (ass. di fa-

cies V e VI), ortogonali alla costa (sez. PTL e QDN). Nel fronte deltizio esterno si depositava il sedimento più fine pelitico/siltitico, rielaborato da deboli correnti trattive, che costituiva il fronte e il piede di barre tidali. Occasionalmente eventi di tempesta (ass. di facies VII) potevano rastrellare il sedimento più grossolano sottocosta e trasportarlo fino al fronte esterno. Per quanto riguarda i depositi di piena fluviale (ass. di facies IV), il deposito grossolano veniva depositato nella piana deltizia inferiore (sez. PAP, PTL e PPC), mentre quello più fine poteva raggiungere anche il prodelta, data l'alta densità posseduta (sez. QDN).

Dal punto di vista paleoambientale il membro inferiore corrispondeva ad un delta con una forte influenza delle maree, nel quale tuttavia i canali distributori possedevano una capacità di trasporto considerevole, tale da impedire alle maree di inibire il flusso (fig. 7). Le paleocorrenti ci indicano proprio un flusso predominante dal continente verso mare (*ebb*) nella piana deltizia inferiore, e un flusso contrario nel fronte deltizio interno (*flood*). Il delta possedeva una buona capacità costruttiva anche se il sedimento veniva ridistribuito regolarmente dalle maree; probabilmente l'alto tasso di sedimentazione e la grande quantità di sedimento proveniente dal continente impedivano che il sistema assumesse i caratteri geomorfologici di un estuario.

Il **membro superiore** possiede delle associazioni di facies chiaramente diverse da quello inferiore. Il modello prevede l'esistenza di una piana deltizia superiore caratterizzata da specchi d'acqua sia salmastra che dolce (fig. 7). Le facies pelitiche massive della Fm. Mata Amarilla con sviluppo di paleosuoli ci indicano l'esistenza di estese pianure alluvionali attraversate da corsi fluviali canalizzati, in regime subcritico di bassa energia (GOIN *et alii*, 2001).

La presenza di corpi scuri carboniosi suggerisce l'esistenza di specchi lacustri e paludi arboree (*swamp*) con fondo eutrofico poco ossigenato in clima umido. I dipnoi, che attualmente vivono in Sudamerica in ambienti ad alto regime pluviale, sono simili a quelli rinvenuti nella Fm Piedra Clavada e Mata Amarilla. I chelonidi rinvenuti, da parte loro, sono affini a tartarughe di acque continentali/salmastre (carnivori consumatori di pesci e crostacei e della parte molle di certi gasteropodi) (BROIN & DE LA FUENTE, 1993; DE LA FUENTE *et alii*, 2001). Anche la presenza di coccodrilli è indicativa di ambienti lacustro/salmastri e paludi arboree a clima caldo/umido con abbondante vegetazione (GOIN *et alii*, 2001).

La piana deltizia inferiore era priva di canali, al contrario si estendeva una grande piana tidale (ass. di facies I), piuttosto continua, che in certi casi poteva essere protetta da barre sabbiose (ass. di facies VI), formando così una laguna aperta (fig. 7). L'energia delle correnti di marea veniva dissipata lungo le barre, mentre la parte interna della piana tidale in certi casi poteva soffrire di una scarsa circolazione delle acque con sedimentazione di pelite essenzialmente per decantazione. Per la stessa causa le acque della laguna dovevano essere salmastre; successivamente con l'instaurarsi di un ambiente di natura lacustre e palustre (Fm Mata Amarilla) cambiò la fauna, passando da bivalvi marini (es. *Trigonidae*, *Panopidae*, *Corbulinidae* ed *Eriphylidae*), ad invertebrati marini tolleranti le acque salmastre (es. ostreidi), per finire con vertebrati marini (es. *Lepidotes*, coccodrilli, tartarughe) e terrestri (dinosauri).

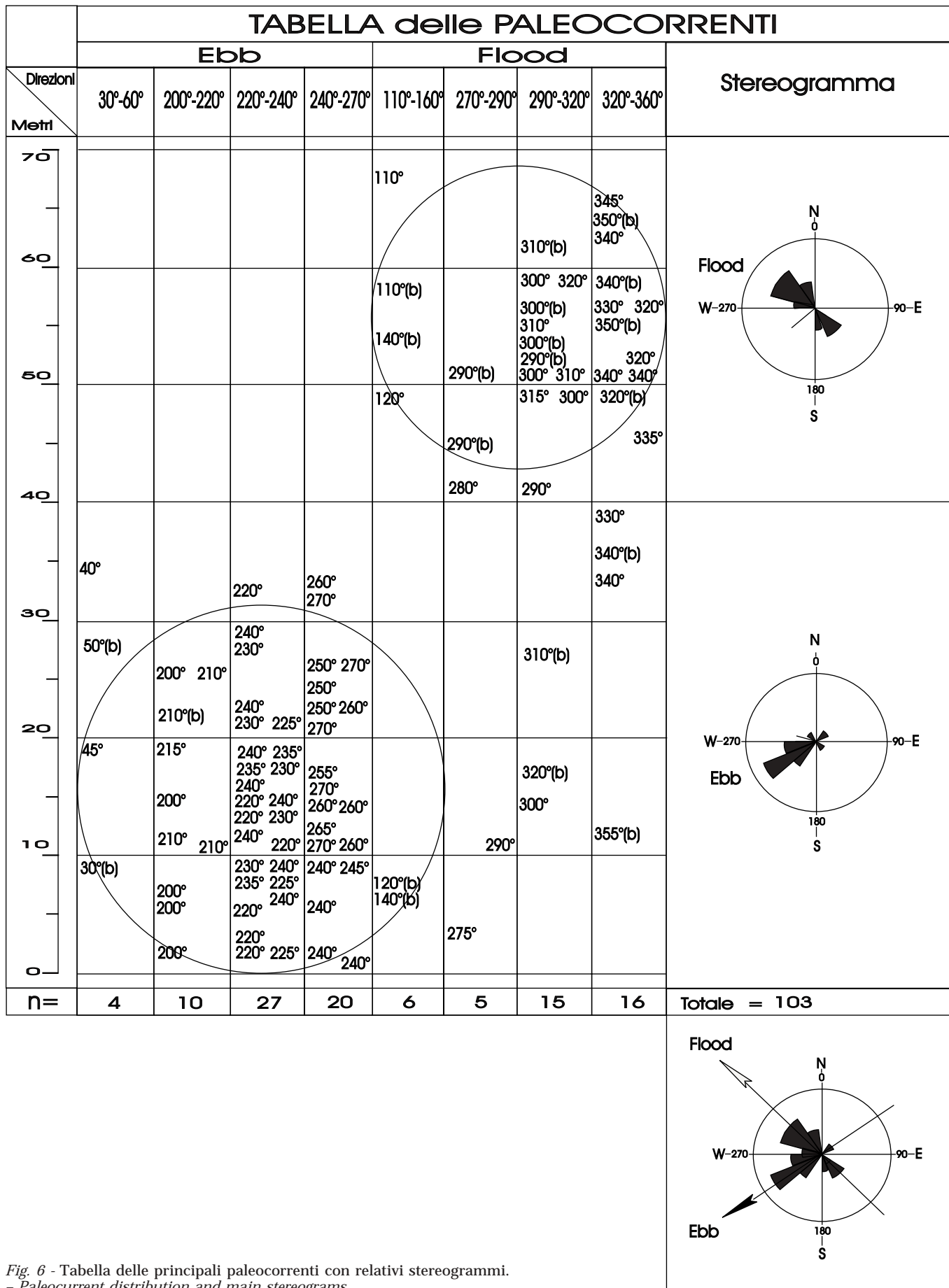
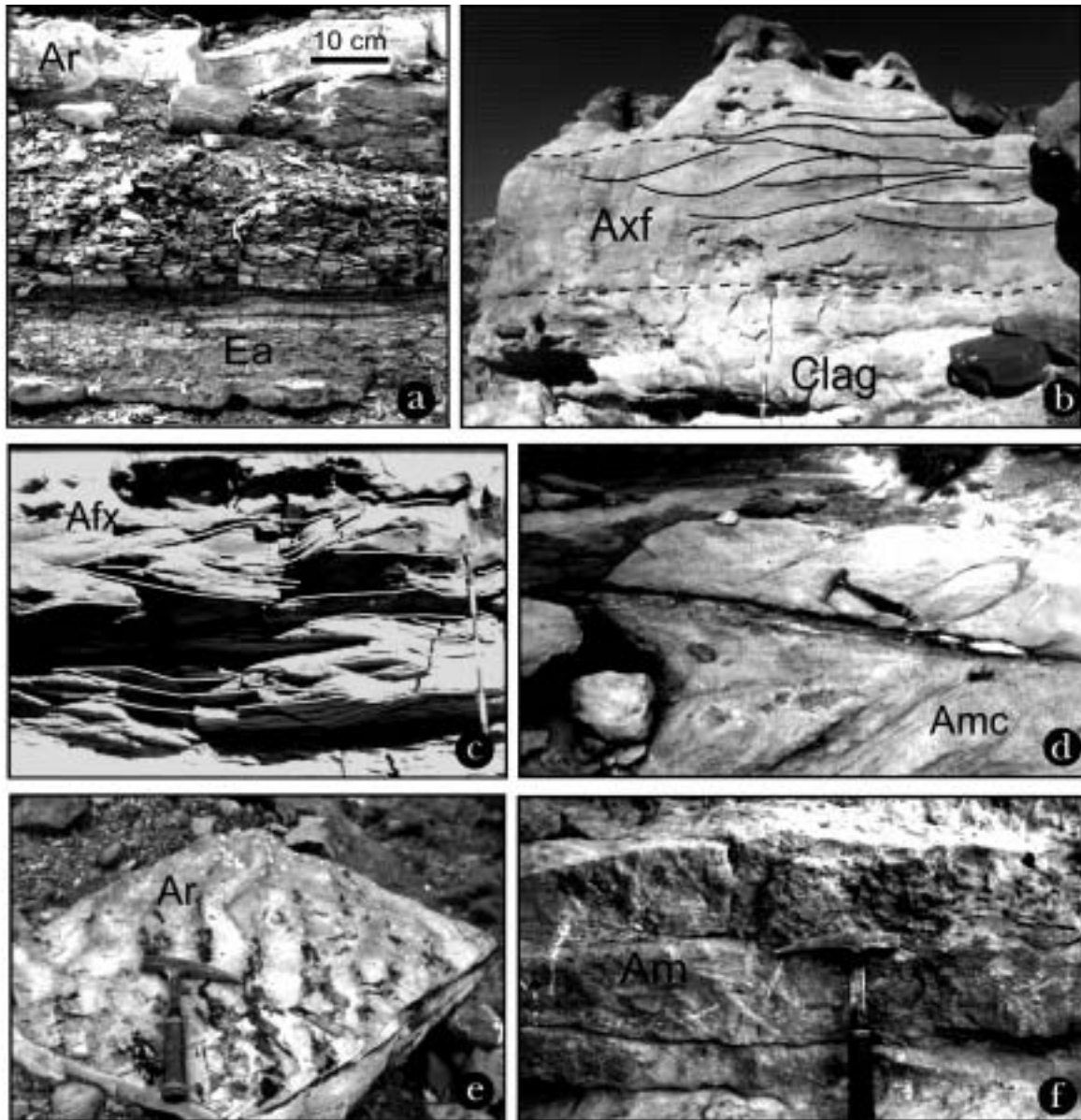


Fig. 6 - Tabella delle principali paleocorrenti con relativi stereogrammi.  
- Paleocurrent distribution and main stereograms.





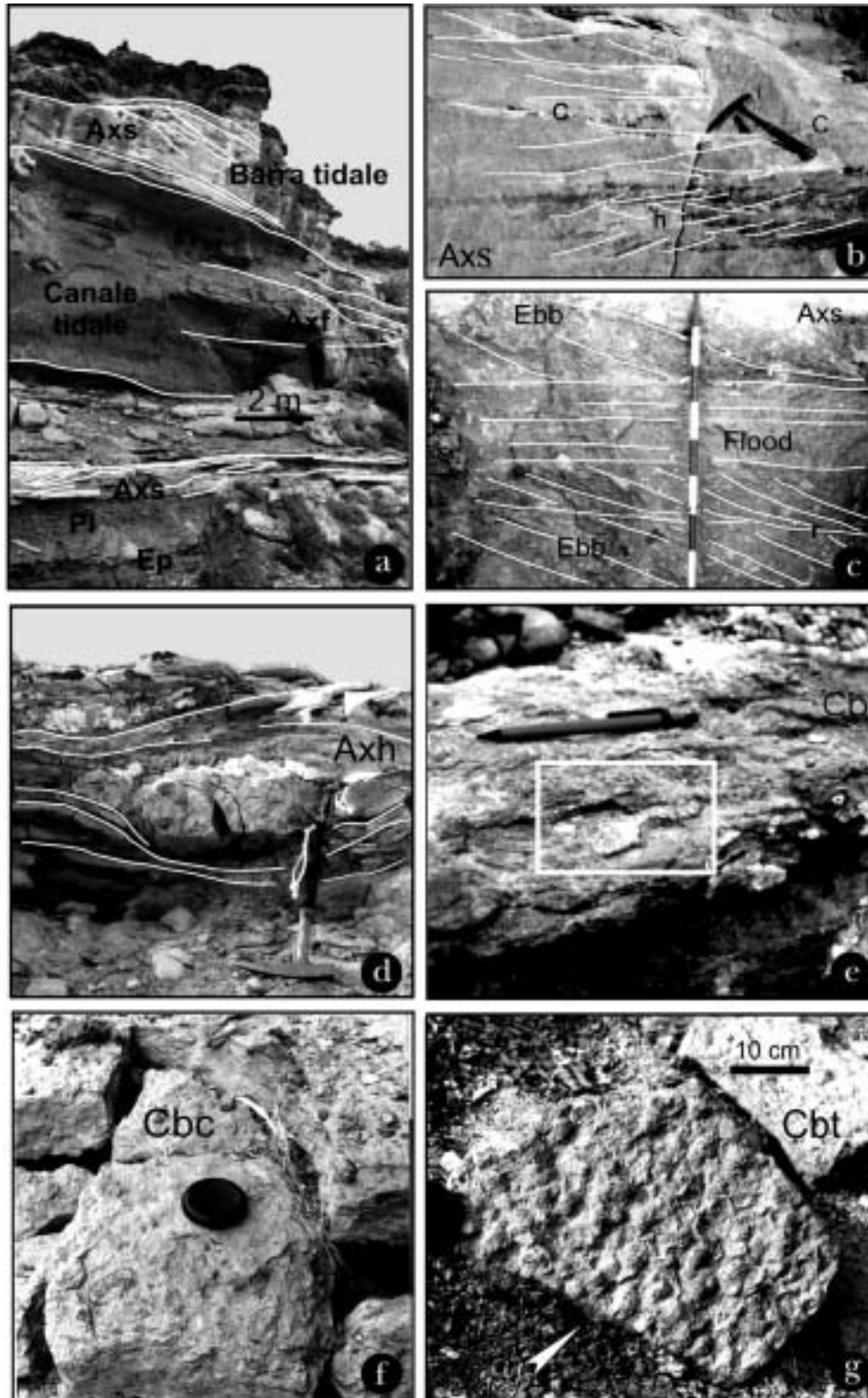


Tav. 1 - Esempi di facies sedimentarie nella Fm Piedra Clavada, Cretaceo, Argentina. a) Facies eterolitiche (Ea) con stratificazione lenticolare, alternate a depositi arenacei massivi o con laminazione incrociata (Ar), (sez. PPC, 20 m) Ass. facies I; b) Corpo centrale del canale di foce con stratificazione incrociata concava (Axf); la base è massiva (Clag) ricca in tronchi fossili silicizzati (sez. PTL, 30-36), Ass. Facies II; c) Particolare di set incrociati concavi (sez. PAP, 48-50 m), Ass. Facies II; d) Base del canale priva di strutture e con tronchi silicizzati (Amc) (sez. PAP, 12 m), Ass. Facies II; e) Ripples asimmetrici da corrente tidale (Ar) (sez. PTL, 57-59), Ass. Facies I (piana tidale); f) Bioturbazione intensa (Am) al tetto di un canale (sez. PAP, 18-19 m), Ass. Facies III (barra di foce).

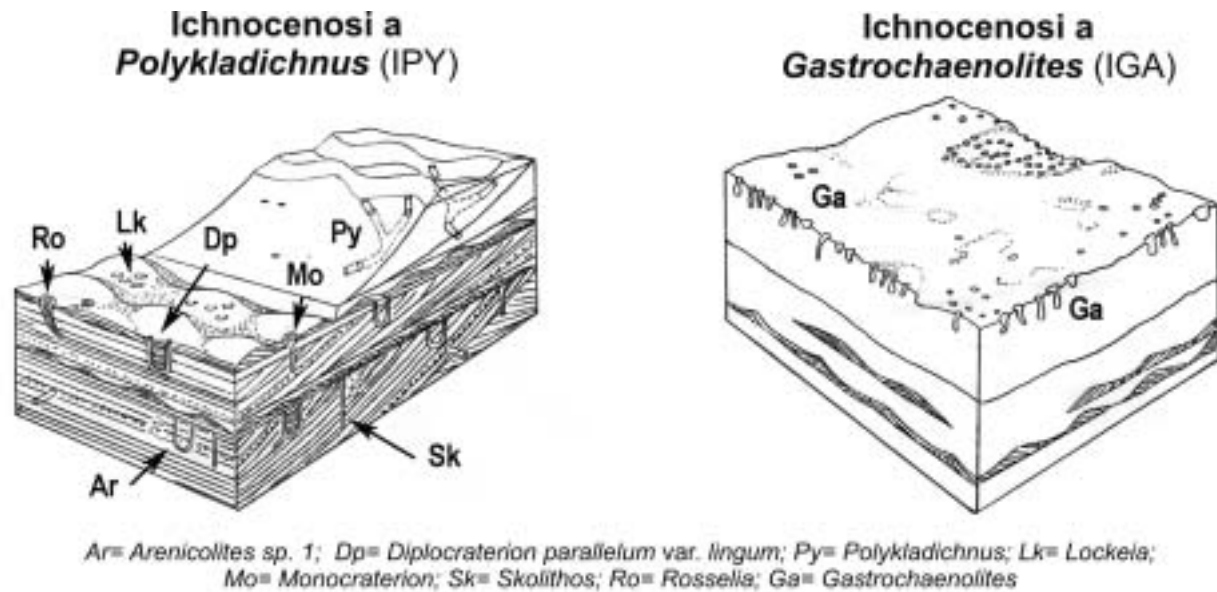
- Examples of sedimentary facies in the Piedra Clavada Formation, Cretaceous, Argentina. a) lenticularly stratified heterolithic facies (Ea) and cross bedded, massive arenaceous deposits (Ar), (sez. PPC, 20 m), facies assemblage I; b) Central part of concave, cross bedded arenaceous layer referable to estuary body (Axf); the base is massive (Clag) and several silicified fossil logs are present (sez. PTL, 30-36), facies ass. II; c) cross laminated bed with concave sets (sez. PAP, 48-50 m), facies ass. II; d) base of a massive channel body with silicified logs (Amc) (sez. PAP, 12 m), facies ass. II; e) asymmetric ripples probably due to tidal currents (Ar) (sez. PTL, 57-59), facies ass. I (tidal flat); f) Intense bioturbation (Am) at the top of a channel (sez. PAP, 18-19 m), facies ass. III (mouth bar).

Nella piana deltizia inferiore e nel fronte interno si articolava una complessa rete di barre e canali tidali (ass. di facies V e VI) ortogonali alla linea di costa, documentata in tutti i log stratigrafici. Il processo sedimentario era governato principalmente dalle correnti di marea, mentre il sedimento che sopraggiungeva copioso dal continente permetteva alla massa d'acqua e alla profondità di decrescere con il tempo. Il riempimento dell'estuario determinava il cambiamento delle caratteristiche idrologiche e delle comunità biologiche.

Nel fronte deltizio esterno si depositava il sedimento più fine pelitico/siltitico, rielaborato da deboli correnti trattive, che costituiva il fronte e il piede di barre tidali (ass. di facies VIII e IX). Occasionalmente eventi di tempesta (ass. di facies VII) potevano ridistribuire il sedimento più grossolano sotto costa e trasportarlo fino al fronte esterno. Geologicamente si può ipotizzare che il sistema deltizio/estuarino (membro inferiore) evolvesse decisamente in un vero e proprio estuario con le sue caratteristiche idrologiche ed ecologiche. Il sistema di canali di



Tav. 2 - Facies sedimentarie della Fm. Piedra Clavada, Cretaceo, Argentina. *a*) Nella parte basale sono visibili strutture tidali tra cui set incrociati sigmoidali (Axs), alternati a facies pelitiche eterolitiche; superiormente si passa ad un corpo arenaceo con base erosiva e stratificazione incrociata concava (Axf) e, al tetto, ancora strutture tidali (sez. QDN, 3-10 m), Ass. Facies VIII (fronte di barra) alla base, V (canale tidale) e al tetto VI (barra tidale); *b*) Stratificazione incrociata sigmoidale (Axs) e laminazione incrociata *herringbone* (h) con clasti centimetrici (c) (sez. PTL, 53 m); Ass. Facies V (canale tidale); *c*) Strutture tidali: correnti di riflusso (ebb) con lamine oblique, e correnti di flusso (flood) con lamine piano-parallele. Presenti anche superfici di riattivazione (r) (sez. PPC, 50 m); Ass. Facies VI (barra tidale); *d*) Depositi arenacei con stratificazione incrociata *hummocky* e tronchi silicizzati di grandi dimensioni all'interno del deposito (Axs); (sez. QDN, 39 m); Ass. Facies VII (deposito da tempesta); *e*) Conglomerato bioclastico (Cb) che limita superiormente i depositi della Fm Piedra Clavada. Nel riquadro è visibile una placca di chelonide (sez. PTL, 65 m); Ass. Facies I; *f*) Rudstone/Floatstone bioclastico ad ostreidi (Cbc) (sez. QDN, 1 m), Ass. Facies VIII (depositi di prodelta); *g*) Strati bioclastici (Cbt) (Rudstone) con scarsa matrice siltosa; le valve disarticolate sono disposte parallelamente alla stratificazione con concentrazione di minerali autigeni (fosfato) (sez. QDN, 42-45), Ass. Facies IX.



### Ambiente deposizionale

Arenaria media, facies eterolitiche  
Set incrociati, flaser, laminazione incrociata  
Softground  
Energia media  
Tasso di sedimentazione medio

Pelite massiva  
Rockground  
Bassa energia  
Erosione

Fig. 8 - Schema interpretativo delle ichnocoenosi IPY *Polykladichnus* e IGA *Gastrochaenolites* e relativo ambiente deposizionale.  
- Interpretative sketch of *Polykladichnus* IPY and *Gastrochaenolites* IGA ichnocoenoses, and associated depositional setting.

foce che caratterizzava il membro inferiore scomparve a favore di un'area tidale molto ampia e continua; i depositi sabbiosi di barra, antistanti alla piana tidale, venivano continuamente rielaborati e trasportati dalle correnti di marea (fig. 7). La progradazione di facies continentali che procedeva da N-NE produsse il progressivo riempimento dell'estuario con la creazione di paludi e laghi (Fm Mata Amarilla). Questa particolare dinamica progradazionale interessò il bacino Australe a partire dall'Albiano, quando iniziò la fase orogenetica Andina Patagonica, e proseguì per tutto il Cretaceo.

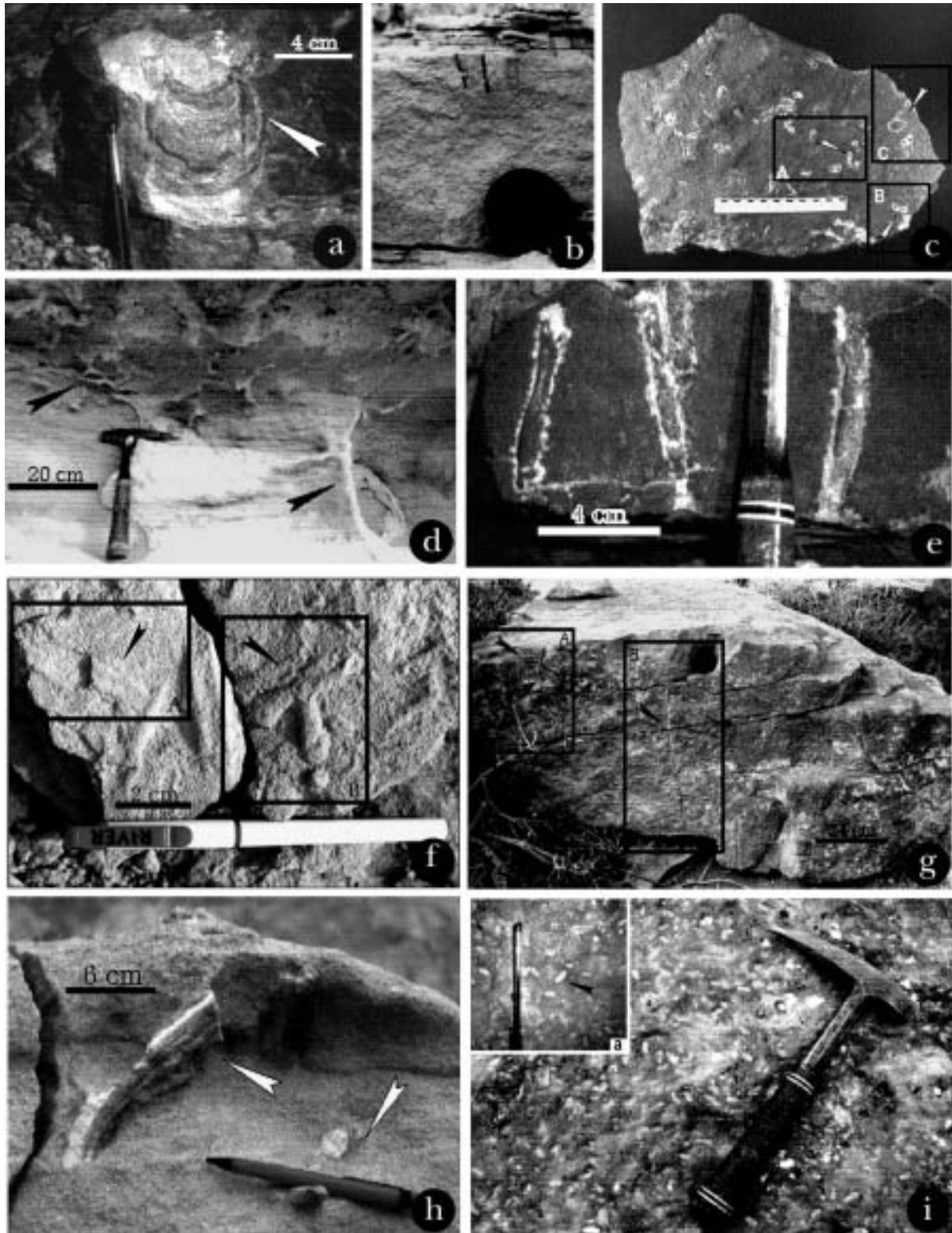
### COMPENDIO DEGLI ICHNOTAXA

La formazione Piedra Clavada possiede un'abbondante e diversificato patrimonio ichnologico, poco conosciuto e quindi trascurato fino ad oggi, ma tuttavia stretta-

mente associabile alle facies sedimentarie. Esso si può riassumere in 25 ichnotaxa (22 ichnogenere e alcune ichnospecie): *Arenicolites* (2 isp.), *Bergaueria*, *Chondrites*, *Cochlichnus*, *Curvolithus*, *Diplocraterion* (2 isp.), *Gastrochaenolites* (2 isp.), *Gyrochorte*, *Helicolithus*, *Lockeia*, *Monocraterion*, *Ophiomorpha*, *Palaeophycus*, *Phycodes*, *Planolites*, *Polykladichnus*, *Rhizocorallium*, *Rosselia*, *Skolithos*, *Teichichnus*, *Teredolites* (2 isp.) e *Thalassinoides*. Per ogni singola traccia si è qualificato l'aspetto dimensionale, le geometrie, lo stato di conservazione ed in genere i parametri strettamente tafonomici, tralasciando l'estesissima bibliografia descrittiva o di riferimento che avrebbe inutilmente appesantito il lavoro; in ultimo si sono considerate le relazioni quantitative esistenti con altre tracce (ichnocoenosi) nel caso fossero presenti all'interno dello stesso strato (POIRE 1993; POIRE *et alii*, 2001).

1) *Arenicolites* isp. 1 (figg. 8-9-10; tav. 3, foto c (b), g).  
Descrizione: Tubo semplice con forma di U, senza spre-

- *Sedimentary facies of the Piedra Clavada Formation, Cretaceous, Argentina.* a) Tidal structures with sigmoidal, cross bedded sets (Axs), and alternate heterolithic or pelitic facies; in the middle-upper part an arenaceous tidal channel (Axf) and bar (Axs) are present. Upper bar shows erosive base and concave, cross stratified lamina sets (sez. QDN, 3-10 m), facies ass. VIII (bar front) at base, V (tidal channel) and VI at top (tidal bar); b) Sigmoidal, cross lamination (Axs) with herringbone lamina sets (h) and centimetre-sized clasts (c) (sez. PTL, 53 m); facies ass. V (tidal channel); c) Tidal structures: alternate oblique lamina sets (ebb) and flat parallel lamina sets (flood): Some reactivation structures (r) are present (sez. PPC, 50 m); facies ass. VI (tidal bar); d) Arenaceous deposits showing hummocky cross stratification enveloping large silicified logs (center), (Axf) (sez. QDN, 39 m); facies ass. VII (storm deposit); e) Bioclastic conglomerate (Cb) at the top of the Piedra Clavada Formation; a turtle plate (chelonid) is visible in the rectangle (sez. PTL, 65 m); facies ass. I; f) Bioclastic rudstone-floatstone (Cbc) with ostracods (sez. QDN, 1 m), facies ass. VIII (delta front deposits); g) Bioclastic coarse-grained deposits (Cbt) with scarce silty matrix; a pavement of bivalve shells is visible, with valves lying mainly with the concavity downward and phosphatic minerals are present (sez. QDN, 42-45), facies ass. IX.



Tav. 3 - Tracce fossili nella Fm Piedra Clavada, Cretaceo, Argentina. a) *Diplocraterion parallelum* var. *lingum* (PTL, 22 m), Ichnocenosi IO<sub>n</sub>; Ass. Facies 3 (barra di foce), Membro inferiore; vista parallela alla superficie di strato; b) *Diplocraterion* cfr. *habichi* e *Skolithos* isp. (sopra il tappo) (QDN, 56 m), Ichnocenosi IO<sub>n</sub>; Ass. Facies 6 (barra tidale) Membro superiore; vista parallela alla superficie di strato; c) (a) *Diplocraterion habichi*, (b) *Arenicolites* isp. 1, (c) *Ophiomorpha nodosa* (PPC, 54.5 m), ichnocenosi IO<sub>n</sub> Ass. Facies 6 (barra tidale); Membro superiore; vista perpendicolare alla superficie di strato; d) *Ophiomorpha nodosa* (sez. PTL, 9 m); ichnocenosi IO<sub>n</sub>; Ass. Facies 6 (barra tidale), Membro inferiore; vista parallela alla superficie di strato; e) *Ophiomorpha nodosa* (sez. PTL, 39 m); ichnocenosi IO<sub>n</sub>; Ass. Facies 6 (barra tidale); Membro superiore; vista parallela alla superficie di strato; f) *Curvolithus simplex* (A), *Phycodes* isp. (B) (QDN, 57 m); Ichnocenosi IPC; Ass. Facies 6 (barra tidale), Membro superiore; vista perpendicolare alla superficie di strato; g) *Arenicolites* sp. 1 (A); *Skolithos linearis* (B) (QDN, 21 m); Ichnocenosi IPC; Ass. Facies 8 (fronte di barra tidale), Membro inferiore; vista parallela alla superficie di strato; h) *Teichichnus* isp. (PTL, 23 m); Ichnocenosi IT; Ass. Facies 3 (barra di foce), Membro inferiore; vista parallela alla superficie di strato; i) *Lockeia* isp. (PTL, 57.5 m); particolare nel riquadro (a); Ichnocenosi IP<sub>y</sub>; Ass. Facies 1 (piana tidale), Membro superiore; vista perpendicolare alla superficie di strato.

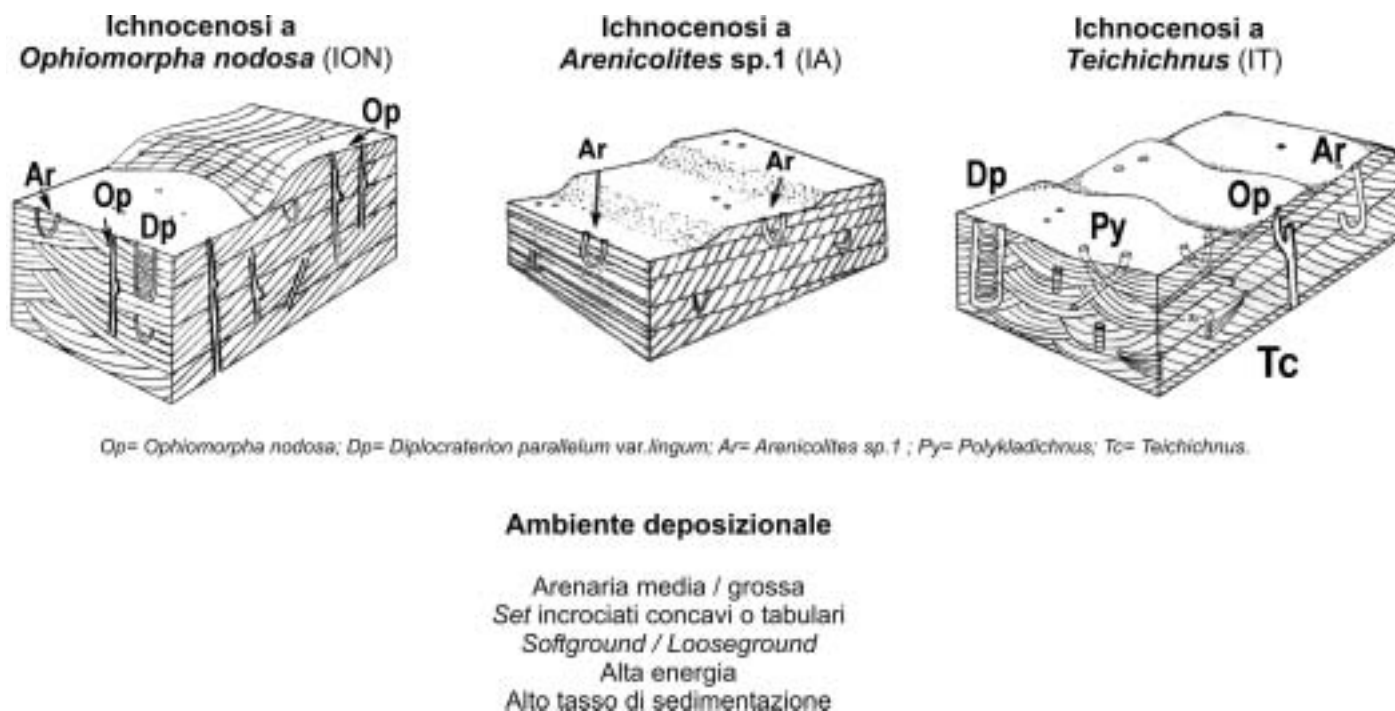


Fig. 9 - Schema interpretativo delle ichnocenosi IOn *Ophiomorpha nodosa*, IA *Arenicolites* isp. 1 e IT *Teichichnus* e relativo ambiente deposizionale.

- Interpretative sketch of *Ophiomorpha nodosa* IOn, *Arenicolites* IA isp. 1 and *Teichichnus* IT ichnocoenoses, and associated depositional setting.

ten tra gli estremi. Il tubo non presenta ornamentazioni, con le aperture pressoché uguali, che si aggirano attorno a 1 cm di diametro, con la distanza tra le aperture tra 3 e 5 cm. Il riempimento è uguale alla roccia ospitante e si conserva in pieno rilievo (exichnia), con completo sviluppo verticale. L'ichnotaxon appartiene alla classe etologica domichnia, rappresenta quindi una struttura abitativa di organismi infaunali per la maggior parte appartenenti alla categoria trofica dei sospensivori e carnivori, come gli anellidi.

2) *Arenicolites* isp. 2. Descrizione: Tubo semplice con forma di U, senza spreiten tra gli estremi. Il tubo non presenta ornamentazioni, con le aperture pressoché uguali, le cui dimensioni sono inferiori a 0.5 cm, con distanza tra le aperture inferiore a 2 cm. Il riempimento è uguale alla roccia ospitante e si conserva in pieno rilievo (exichnia), con completo sviluppo verticale. L'ichnotaxon presenta delle caratteristiche dimensionali nettamente inferiori rispetto alla ichnospecie *A. isp. 1*, e si presenta in associazione con altri individui della stessa specie in alta densità (DAM, 1990). Le caratteristiche dimensionali non sono le uniche a distinguere le due specie: anche il rapporto tra la distanza aperturale e la profondità del tubo (La/Lt),

sono nettamente diverse; nella specie in questione risulta molto più sviluppata verticalmente la traccia, con un rapporto La/Lt molto inferiore ad uno.

3) *Bergaueria* isp. Descrizione: piccolo tubo, subsferico, in iporilievo (hypichnia). Struttura cilindrica o emisferica, con orientazione verticale, la parete è priva di ornamentazione, leggermente irregolare. La parte aperturale è fornita di un contorno radiale e una depressione centrale. L'ichnotaxon appartiene alla classe etologica cubichnia o anche domichnia, che rappresentano strutture da riposo o abitativa; la forma della traccia può ricordare la forma stessa dell'organismo produttore, nel caso specifico un organismo sospensivoro, comunque infaunale capace di produrre una escavazione limitata in profondità, come può essere il caso di un anemone.

4) *Chondrites* isp. Descrizione: struttura complessa di burrows con una serie di tunnel ramificati regolarmente di diametro uniforme. I tunnel non si intercettano mai uno con l'altro, e la ramificazione raggiunge il quinto ordine. Gli angoli della ramificazione sono acuti, la biforcazione produce quindi una forma ad Y e dendritica. Le dimensioni sono minime, si aggirano intorno all'ordine dei pochi millimetri (2 mm) di diametro, conservate in

- Trace fossils in the Piedra Clavada Formation, Cretaceous, Argentina. a) *Diplocraterion parallelum* var. *lingum* (PTL, 22 m), Ichnocoenosis IOn; facies ass. 3 (mouth bar), lower Member, section is parallel to the bed surface; b) *Diplocraterion* cf. *habichi* and *Skolithos* isp. (QDN, 56 m), Ichnocoenosis IOn; facies ass. 6 (tidal bar), upper Member; parallel to bedding; c) (a) *Diplocraterion habichi*, (b) *Arenicolites* isp. 1, (c) *Ophiomorpha nodosa* (PPC, 54.5 m), ichnocoenosis IOn, facies ass. 6 (tidal bar); upper Member; perpendicular to bedding; d) *Ophiomorpha nodosa* (sez. PTL, 9 m); ichnocoenosis IOn; facies ass. 6 (tidal bar), lower Member; parallel to bedding; e) *Ophiomorpha nodosa* (sez. PTL, 39 m); ichnocoenosis IOn; facies ass. 6 (tidal bar); upper Member; parallel to bedding; f) *Curvolithus simplex* (A), *Phycodes* isp. (B) (QDN, 57 m); Ichnocoenosis IPC; facies ass. 6 (tidal bar), upper Member; perpendicular to bedding; g) *Arenicolites* sp. 1 (A); *Skolithos linearis* (B) (QDN, 21 m); Ichnocoenosis IPC; facies ass. 8 (tidal bar front), lower Member; parallel to bedding; h) *Teichichnus* isp. (PTL, 23 m); Ichnocoenosis IT; facies ass. 3 (mouth bar), lower Member; parallel to bedding; i) *Lockeia* isp. (PTL, 57.5 m) detailed in the rectangle (a); Ichnocoenosis IPy; facies ass. 1 (tidal flat), upper Member; perpendicular to bedding. Hammer for scale.

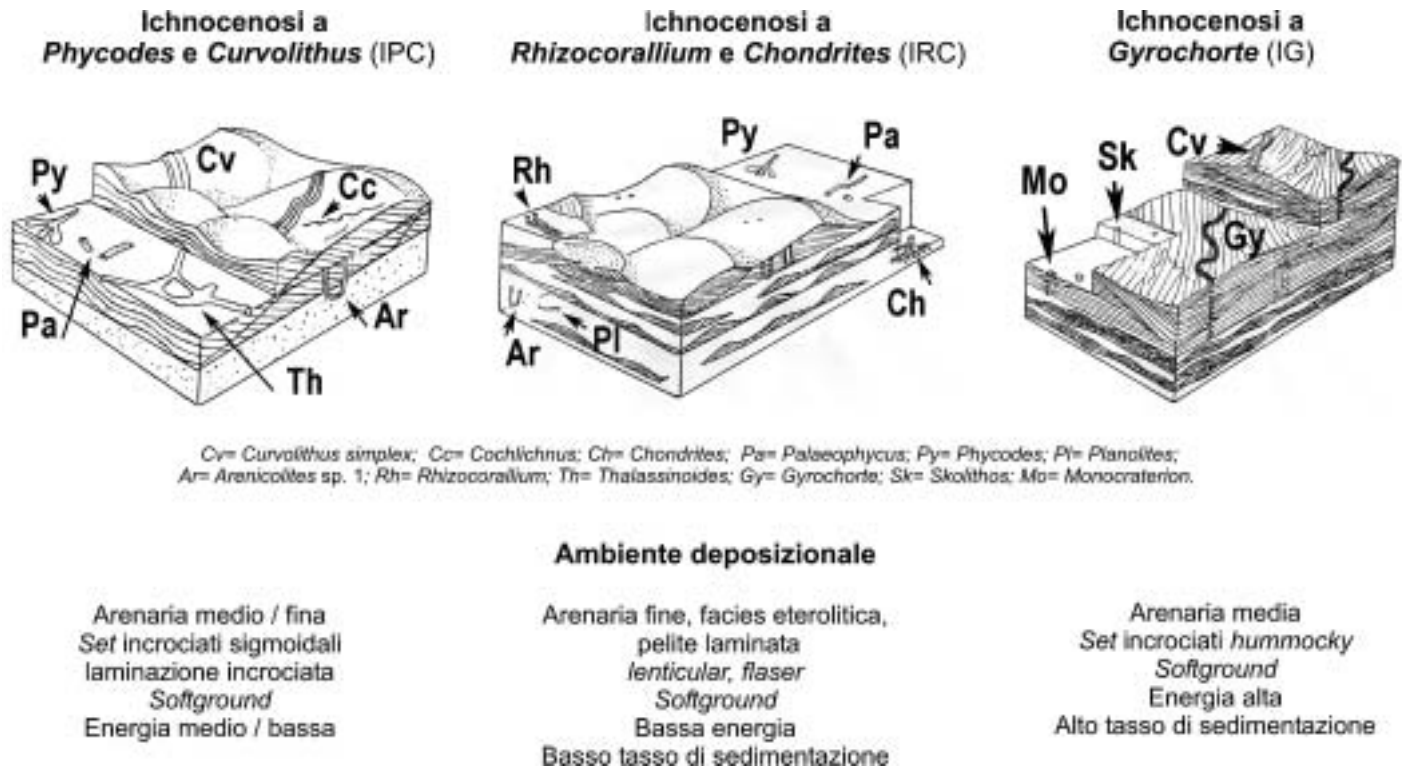


Fig. 10 - Schema interpretativo delle ichnocoenosi IPC *Phycodes-Curvolithus*, IRC *Rhizocorallium-Chondrites*, IG *Gyrochorte* e relativo ambiente deposizionale.

- Interpretative sketch of *Phycodes-Curvolithus* IPC, *Rhizocorallium-Chondrites* IRC, and *Gyrochorte* IG ichnocoenoses, and associated depositional setting.

pieno rilievo (exichnia). *Chondrites* rappresenta una delle più comuni tracce fossili nel registro geologico (vedi BROMLEY, 1996; UCHMAN & WETZEL, 1999, cum biblio). Nel caso della Fm. Piedra Clavada i tunnel ramificati potrebbero essere stati prodotti da organismi depositivori, forse ascrivibili ad anellidi o sifonculidi e rappresentare strutture abitative di organismi forniti di tecniche di penetrazione simili a quelle dei policheti attuali. La classe etologica si può attribuire a una fodinichnia, legata a strategie nutrizionali.

5) *Cochlichnus* isp. (fig. 10). Descrizione: tubo che si avvolge in maniera elicoidale sul piano orizzontale, conferendo alla traccia una morfologia sinuosa spesso regolare. Conservata come epirilievo convesso (epichnia), il diametro del tubo è di 0.5 cm, con lunghezza variabile per ogni singolo soggetto, e comunque a completo sviluppo orizzontale. Questo ichnotaxon presenta affinità con l'ichnogenere *Helicolithus*, dal quale a volte è difficile poterlo distinguere; quest'ultimo in particolare cambia la direzione di avvolgimento, mentre in *Cochlichnus* rimane fedele ad un asse orizzontale. Risulta essere un'impressione lasciata dalla locomozione, forse legata all'attività di un anellide o anche una struttura che riflette una strategia alimentare intermedia tra una repichnia e una fodinichnia. *Cochlichnus* viene spesso rinvenuto in ambienti areati tidali a medio-bassa energia (DAM, 1990).

6) *Curvolithus* cfr. *simplex* (fig. 10; tav. 3, foto f). Descrizione: tubo orizzontale che si svolge in direzione curva, trilobato diviso da due coste nella parte superiore, mentre in quella inferiore concava è da unilobata a trilobata. L'ampiezza del tubo è di circa 1,5 cm, con lunghezza variabile da pochi centimetri fino a 10. La parete non

presenta ornamentazione e il riepimento è costituito dallo stesso materiale della roccia ospitante, nel caso specifico un'arenaria. La traccia è preservata in epirilievo convesso (epichnia). Dal punto di vista tassonomico la ichnospecie *C. simplex* si differenzia da *C. multiplex* per la superficie inferiore che nella ichnospecie appena citata presenta una partizione quadrilobata del tubo. Inoltre è distinguibile dalle forme come *Aulichnites*, *Gyrochorte* e *Psammichnites* per la partizione trilobata della parte superiore. Appartiene alla classe etologica *repichnia*, quindi una traccia da locomozione prodotta con probabilità da invertebrati vagili e carnivori, come gasteropodi o altri organismi capaci di produrre una scavazione marcata nell'interfaccia acqua-sedimento. L'ichnocoenosi a *Curvolithus* è stata segnalata in facies del Giurassico inferiore in ambiente marino poco profondo, ben areato e di media energia (DAM, 1990).

7) *Diplocraterion parallelum* var. *lingum* (figg. 8-9; tav. 3, foto a). Descrizione: tubo verticale con forma di U con spreiten protusivi; la profondità degli spreiten è inferiore alla lunghezza, rispettivamente di 0.8 cm la prima e di circa 6 cm la seconda. Le aperture dei tubi sono subcilindriche, parallele tra loro, e hanno diametro di 1 cm circa. Partendo dagli apici aperturali, per arrivare alla porzione apicale in basso, il tubo assume un andamento curvato, non più parallelo, preservato in pieno rilievo (exichnia). Il morfotipo *lingum* differisce da altri (es. *quadrum* o *arcum*), principalmente nella porzione apicale, oltre che per le dimensioni minori. L'ichnotaxon è interpretato come domichnion, struttura abitativa di organismi sospensivori quali anellidi e crostacei.

8) *Diplocraterion* cfr. *habichi* (tav. 3, foto b, c (a). Descrizione: tubo verticale con forma di U con spreiten protrusivi; traccia preservata in pieno rilievo (exichnia). Le aperture dei tubi sub-cilindriche concave, sono parallele tra loro, di diametro inferiore i 0.5 cm, inoltre i tubi risultano essere molto ravvicinati, per raggiungere una profondità fino all'apice curvato di 10 cm al massimo. *D. habichi* differisce da *D. parvulum* per le dimensioni notevolmente inferiori. Dal punto di vista etologico questo ichnotaxon risulta essere una struttura abitativa, creata da organismi sospensivori.

9) *Gastrochaenolites* isp. 1 (fig. 8). Descrizione: perforazione verticale con la parte apicale a forma di sacco che verso l'apertura si restringe. La lunghezza della perforazione, uniforme, raggiunge i 3-4 cm con diametro dell'apertura di 1 cm, mentre la porzione inferiore apicale è di diametro circa pari a 2 cm. Il riempimento è arenaceo mentre la roccia ospitante è una pelite di colore bianco ben compattata. La traccia è preservata come riempimento passivo (endichnia). L'ichnotaxon è interpretato come una struttura abitativa, domichnia, in particolare di bivalvi, la cui forma ricorda quella del boring stesso. Attualmente alcuni bivalvi operano lo stesso tipo di perforazione; le differenze morfologiche sono dovute essenzialmente ai metodi e agli strumenti di escavazione, producendo una varietà cospicua di boring. Le strategie alimentari sono le più differenziate possibili collegate a carnivori, litofagi, o più raramente sospensivori.

10) *Gastrochaenolites* isp. 2. Descrizione: perforazione verticale con forma cilindrica, dove la porzione apicale misura pari diametro con quella aperturale. La profondità uniforme della perforazione raggiunge i 2-3 cm, con diametro dell'apertura di 0,5 cm. Il riempimento è passivo (endichnia) come per *G. sp. 1* ed è arenaceo mentre la roccia ospitante è una pelite di colore bianco. L'ichnotaxon è interpretato come una struttura abitativa (domichnia) di bivalvi che, contrariamente alla specie *G. isp. 1*, non ricorda la forma dell'organismo tracciante. L'ichnospecie *G. isp. 2* somiglia all'ichnogenere *Mammelichnus*, una struttura abitativa tipica di substrati mobili (*soft-ground*); nel caso in questione, al contrario, il substrato è duro (*rockground*).

11) *Gyrochorte* isp. (fig. 10). Descrizione: tunnel biserialo a sviluppo orizzontale sinuoso, in epirilievo convesso. La parete presenta una ornamentazione irregolare, non classificabile all'interno delle diverse tipologie di ornamentazione. L'ampiezza del tubo è costante lungo tutto lo sviluppo longitudinale e di diametro pari a 0.5 cm. Il riempimento è uguale alla roccia ospitante, preservata in epirilievo convesso (epichnion). La difficile identificazione mediante l'ornamentazione della parete non permette l'attribuzione ad una specie piuttosto che un'altra. Dal punto di vista etologico da alcuni autori è stata interpretata come fodichnion, alimentazione di organismi depositivori, mentre secondo altri potrebbe essere pascichnion cioè una traccia da pastura legata alla locomozione e alimentazione. *Gyrochorte* si ritrova nella ichnocenosi a *Curvolithus* precedentemente descritta in facies del Giurassico inferiore in ambiente marino poco profondo, ben areato e di media energia con influenze di tipo tidale (DAM, 1990).

12) *Helicolithus* cfr. *sampelayoi*. Descrizione: traccia orizzontale preservata in epirilievo convesso (epichnion), con tubo semplice che si avvolge lungo un asse orizzontale parallelo alla superficie di strato, in modo elicoidale descrivendo dei meandri regolari (cfr. UCHMAN, 1998, fig.

79). Il riempimento è identico alla litologia della roccia ospitante, con tubo cilindrico di diametro intorno a 5 mm valore costante per tutto lo sviluppo longitudinale. L'ichnotaxon *H. sampelayoi* si differenzia da *H. tortuosus* per lo sviluppo unidirezionale dell'avvolgimento, che in *H. tortuosus* cambia più volte direzione descrivendo una traiettoria curvata. Dal punto di vista etologico la struttura è interpretata come una agrichnia, prodotta da organismi fossatori che si nutrivano di micro-organismi o batteri presenti nella galleria; è probabilmente il risultato di un'azione nutrizionale tipo pascolo, combinata alla strategia di intrappolare il cibo. I possibili autori di tale strutture si fanno risalire ad anellidi.

13) *Lockeia* isp. (fig. 8; tav. 3, foto i). Descrizione: traccia ovoidale biconvessa e bilateralmente simmetrica, preservata come rilievo positivo (epichnion) al tetto dello strato. Le dimensioni di ogni singola traccia misurano al massimo 1 cm di diametro. L'ichnotaxon è stato interpretato come una traccia compressiva del tipo cubichnion, la cui forma ricorda quella del piede a forma di cono di un bivalve sospensivoro (BROMLEY, 1996).

14) *Monocraterion* isp (figg. 8-10). Descrizione: traccia verticale, di profondità ridotta di 1-2 cm, e diametro massimo di 4 cm. La forma ricorda quella di un cono molto schiacciato, la parete è priva di ornamentazione con riempimento identico alla roccia ospitante. Conservata in epirilievo concavo, presenta inoltre riempimenti concentrici, con la parte più esterna dell'apertura rialzata rispetto al piano di strato e alla parte interna della stessa bocca aperturale. L'ichnotaxon presenta delle affinità tassonomiche con l'ichnogenere *Skolithos*: entrambe sono tracce verticali, nel caso di *Skolithos* senza lineazioni concentriche di riempimento. *Monocraterion* tuttavia ha una profondità di pochi centimetri, al contrario di *Skolithos* che raggiunge lunghezze dell'ordine anche della decina di centimetri. *Monocraterion* è considerata da alcuni autori una struttura superficiale legata all'attività bioturbante, più profonda nel substrato, prodotta da organismi detritivori come echinidi spatangoidi (PLAZIAT & MAHMOUDI, 1988).

15) *Ophiomorpha nodosa* (fig. 9; tav. 3, foto c (c), d, e). Descrizione: sistema di burrows retti o leggermente curvati, orizzontali, verticali o leggermente inclinati. Le ramificazioni sono irregolari a forma di Y o T; la parete presenta una caratteristica ornamentazione a pellets ovoidali, più o meno equidimensionali; la parte interna della parete è liscia con riempimento tessituralmente distinto dalla roccia ospitante. Il diametro del tubo raggiunge 2-3 cm ed è conservato in pieno rilievo (exichnia). L'ichnospecie *O. nodosa* è ben riconoscibile in tutti i profili eseguiti, contrariamente ad altri ichnotaxa del gruppo *Ophiomorpha*, che a causa del pessimo stato di conservazione non hanno permesso una classificazione a livello specifico per la mancata determinazione della forma dei pellets, elemento distintivo specifico. In alcuni casi la loro forma potrebbe avvicinarsi a quella poligonale allungata della *O. annulata*. Il burrow, interpretato come domichnion ovvero struttura abitativa, viene attribuito, nei sedimenti tardo-terziari ed attuali, ad organismi mobili fossatori attivi in ambienti marini poco profondi quali crostacei decapodi thalassinoidei (es. attuale *Callinassa*) o callichiridi (es. attuale *Callichirus*) (BROMLEY, 1996, cum biblio), sebbene per il Mesozoico non sia da escludere l'attività di differenti gruppi di crostacei decapodi attualmente estinti (MONACO & GARASSINO, 2000).

16) *Palaeophycus* isp (fig. 10). Descrizione: tubo cilindrico non ramificato, da orizzontale ad inclinato rispetto alla stratificazione, con andamento da retto a curvato. La parete, se la traccia è ben conservata, risulta lineata e striata longitudinalmente. Il diametro è variabile da 0.5 a 2 cm. Conservata in epirilievo convesso o concavo (epichnion), con riempimento identico a quello della roccia ospitante. La differenza principale dall'ichnogenere *Planolites* consiste nella natura del riempimento, che in *Palaeophycus* è identico alla roccia ospitante, inoltre la parete possiede delle lineazioni assenti in *Planolites*. Non è ancora chiaro se il riempimento sia legato ad un meccanismo di sedimentazione passiva che va occludendo il tunnel. La traccia è interpretata come domicilio (domichnion) di organismi quali vermi policheti depositivori.

17) *Phycodes* isp. (fig. 10; tav. 3, foto f (B)). Descrizione: associazione di tunnel orizzontali, organizzati nella parte basale dello strato che si diramano da un tubo centrale, con terminazione subsferica. I rami oscillano da un numero di 2 a 3 e aumentano il diametro del tubo nella porzione distale dal punto di ramificazione. Il riempimento è identico alla roccia ospitante ed è conservato in ipirilievo (hypichnion). L'ichnotaxon potrebbe rappresentare una struttura dovuta ad organismi sedimentivori (anellidi?), della classe etologica fodinichnion, probabilmente tracce di alimentazione, sebbene siano controverse sia l'origine che l'attribuzione ad uno specifico organismo marino (UCHMAN, 1998).

18) *Planolites* isp (fig. 10). Descrizione: burrow orizzontale semplice, non ramificato, preservato come epirilievo convesso (epichnia). La parete si presenta irregolare, con riempimento del burrow diverso dalla roccia ospitante, nel caso specifico una arenaria. In sezione trasversale si presenta di forma ellittica con diametro variabile ma che non supera il centimetro negli ichnotaxa più grandi, fino ad un minimo di pochi millimetri in quelli più piccoli. *Planolites* è uno degli ichnogenere più comuni nel registro geologico (cfr. UCHMAN, 1998). Si distingue da *Palaeophycus* principalmente per la natura del riempimento che nella traccia in esame è di tessitura diversa dalla roccia ospitante, quantomeno di una granulometria inferiore, con composizione mineralogica e colore diverso. Il riempimento rappresenta la rielaborazione del sedimento originale da parte di organismi depositivori vagili forse policheti o anellidi, della classe etologica fodinichnion.

19) *Polykladichnus* isp (figg. 8-9). Descrizione: sistema di burrow con parete liscia che si diramano da punti di biforcazione a forma di Y. I tubi hanno una sezione cilindrica di diametro pari a 2-3 cm, con sviluppo della traccia nettamente verticale. Il riempimento è tessituralmente diverso, presenta una granulometria siltosa, inferiore a quella arenosa della roccia ospitante e di colorazione grigia, preservata in rilievo pieno (exichnia). La differenza con l'ichnogenere *Thalassinoides* sta nella natura del riempimento, ben diverso tra i due, e per la ramificazione apicale che conferisce al *Polykladichnus* la forma verticale ad Y. Viene considerata una traccia legata ad organismi opportunistici attivi in sabbie marine costiere (cfr. BROMLEY, 1996, fig. 10.16), nelle classi etologiche fodinichnion e domichnion, strutture abitative e di alimentazione.

20) *Rhizocorallium* isp. (fig. 10). Descrizione: tubo che si allunga sinuoso o retto, orizzontale o quantomeno

obliquo alla superficie di strato, con forma di U e fornito di spreiten protusivi. I tubi sono paralleli ed equidimensionali, con diametro di 4 o 5 volte superiore a quello degli spreiten, e il riempimento è inoltre identico alla litologia della roccia ospitante, conservato in pieno rilievo (exichnion). Dal punto di vista tassonomico, è affine all'ichnogenere *Diplocraterion*, non solo per la presenza di spreiten, ma anche per la forma del tubo e la maniera di avvolgersi; ciò che differisce è la posizione rispetto alla stratificazione che nel caso di *Rhizocorallium* è obliqua, in certi casi quasi orizzontale, specie nella parte più lontana dalle aperture. Anche questo ichnotaxon è assai comune in sedimenti marini sia costieri che di rampa carbonatica che marini di media profondità (FÜRSICH, 1974), e viene interpretato come legato ad una strategia alimentare di scavazione da parte di organismi sedimentivori (fodinichnion), forse anellidi.

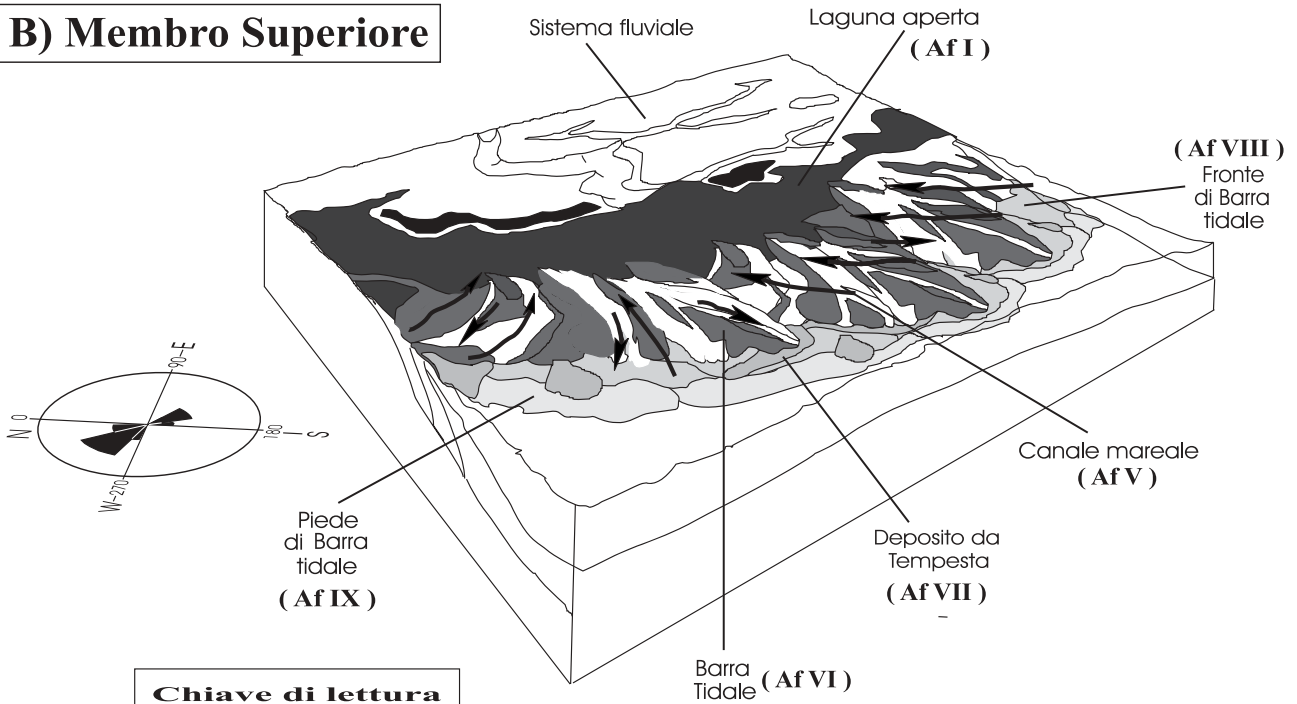
21) *Rosselia* isp. (fig. 8). Descrizione: traccia sub-verticale, conica, con lineazione concentrica all'interno. La apertura del tubo, di diametro pari a 2.5 cm, ha entrata a forma ellissoidale che diminuisce il suo diametro dalla porzione entrante fino all'apice in basso, assumendo una posizione sub-orizzontale. La traccia è preservata in pieno rilievo (exichnion). L'ichnotaxon ricorda l'ichnogenere *Skolithos*, ma si differenzia da quest'ultimo per la divisione interna del tubo in strati concentrici e per le dimensioni decisamente maggiori, almeno nella porzione aperturale. *Skolithos* inoltre si presenta con un tubo verticale disposto senza variare troppo lungo l'asse di allungamento. Rispetto a *Cylindricnus concentricus* differisce sempre per quest'ultima caratteristica, oltre che per le caratteristiche morfologiche; comunque *Cylindricnus* si colloca tra *Skolithos* e *Rosselia* possedendo la divisione concentrica del tubo. Appartiene alla classe etologica fodinichnia, forse prodotta da organismi depositivori quali anellidi, e potrebbe essere legata a variazioni di salinità in sedimenti costieri (BROMLEY, 1996, fig. 12.8).

22) *Skolithos linearis* (figg. 8-10; tav. 3, foto b, g (B)). Descrizione: tubo verticale leggermente curvato o retto, non ramificato, subcilindrico e privo di ornamentazione. Il riempimento è costituito dallo stesso materiale della roccia ospitante, conservata in rilievo pieno (exichnion). Probabilmente rappresenta una struttura abitativa (domichnion) di organismi sospensivori forse policheti, vermi che attualmente formano tracce verticali a caratteristica forma di camino in sedimenti costieri ad elevato tasso di sedimentazione e variazioni nelle caratteristiche del substrato in seguito a tempeste (*chimney-building worms*, BROMLEY, 1996; MYERS, 1972).

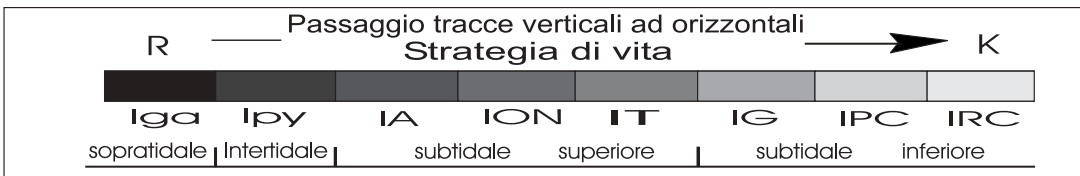
23) *Teichichnus* isp. (fig. 9; tav. 3, foto h). Descrizione: struttura tabulare orizzontale, con una serie di lineazioni (spreiten) verticali asimmetrici, ancorati in un punto e liberi di oscillare nell'altro, che hanno origine dalla parte inferiore del tubo principale formando una tipica forma subtriangolare. Una sezione frontale mette in evidenza gli spreiten con concavità verso l'alto che si intersecano fino ad arrivare al tubo principale superiore. Quest'ultimo possiede una sezione circolare o subcircolare, la parete è priva di ornamentazione ed il riempimento risulta tessituralmente diverso, quantomeno granulometricamente più fine rispetto alla roccia ospitante. Le dimensioni del diametro vanno da 1 a 3 cm. Conservato come endichnion in pieno rilievo. L'orientazione rispetto alla stratificazione ci permette di determinare almeno due diverse ichnospecie, *T. rectus* con orientazione perpendico-



**B) Membro Superiore**



**Chiave di lettura**



**A) Membro Inferiore**

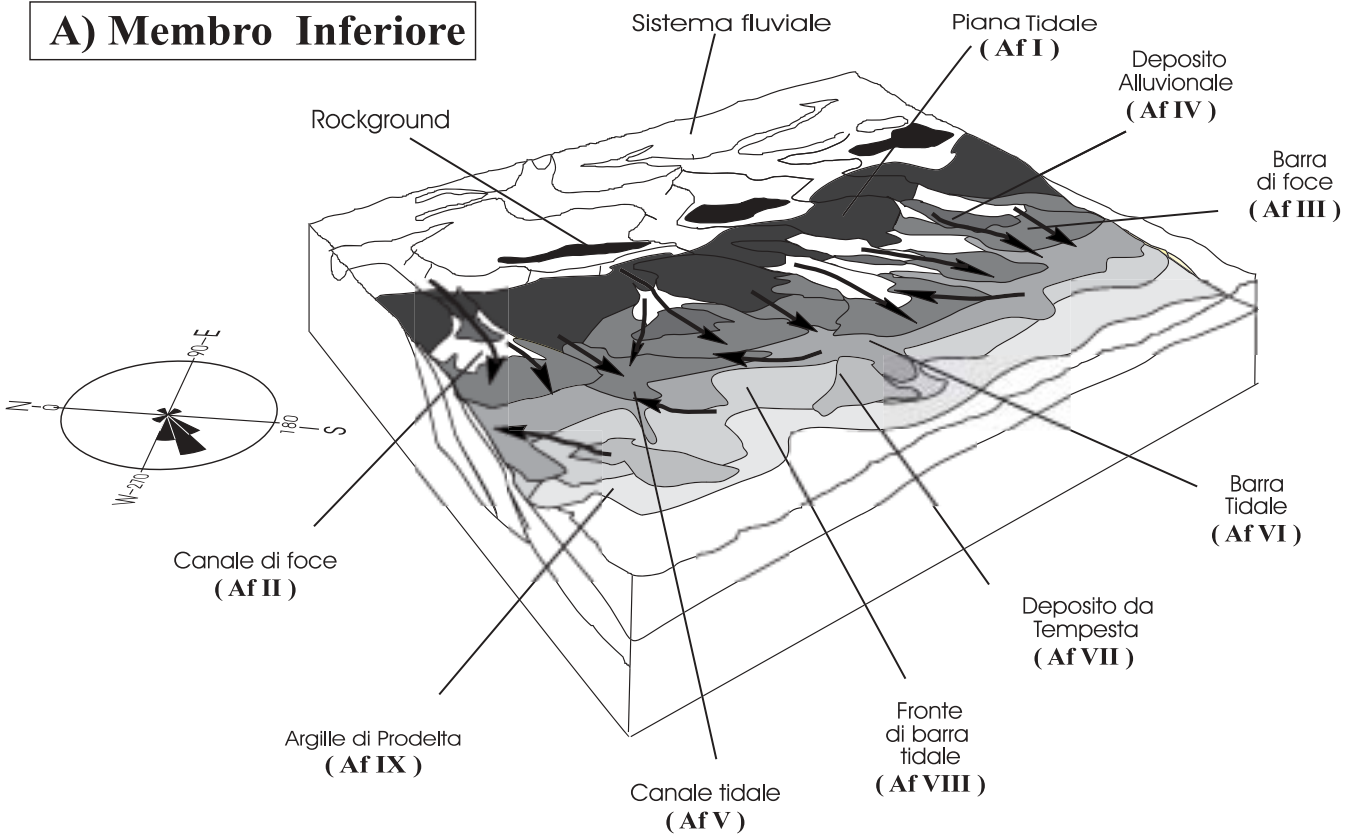


Fig. 11 - Modello deposizionale e paleoambientale schematico della Fm Piedra Clavada con le relative associazioni di facies (Af) e le ichnocoenosi (in retino, senza scala): a) Membro inferiore; b) Membro superiore.

- Depositional model of facies assemblages and ichnocoenoses distribution of the Piedra Clavada Formation: a) lower Member; b) upper Member.

lare ai piani di strato e *T. isp.* con orientazione obliqua ai piani di strato. Nel caso della Fm Piedra Clavada, sembrerebbe che il morfotipo dominante sia *T. isp.* con orientazione obliqua anche se *T. rectus* è presente. Tuttavia non sempre è chiara la loro orientazione. È considerata una struttura abitativa (*domichnia*), ma anche di alimentazione (*fodichnia*) o di equilibrio (*equilibrium*), come ad esempio nel caso di certi bivalvi depositivori/detritivori tellinacei attuali dotati di sifone (BROMLEY, 1996, pag. 73).

24) *Teredolites isp. 1; T. isp. 2.* Descrizione: perforazione (*boring*) che genera un sistema di tunnels conservati in pieno rilievo all'interno del substrato xialico. Ogni teredo possiede una forma allungata a sacco, con un asse più corto di 0,5 cm ed uno più lungo di 1 cm fornendo un rapporto L/W pari a 2. La rete di tunnel è ben ordinata e allineata secondo l'asse di massima lunghezza. Si possono distinguere due diverse ichtnospecie, in base al rapporto esistente tra i due assi del teredo, quello maggiore e quello minore. Nella prima ichtnospecie (*T. isp. 1*) il rapporto è pari a 2, nella seconda (*T. isp. 2*) è pari ad 1. Gli organismi produttori di tali strutture erano principalmente bivalvi, che si nutrivano del materiale xialico; è un traccia appartenente alla classe etologica fodichnion. La forma dei tunnel ricorda non solo la morfologia stessa del bivalve, ma in alcuni casi all'interno del teredo sono stati rinvenuti resti dell'organismo fossilizzato. L'autoctonia del substrato della traccia non è scontata, dal momento che i tronchi su cui si rinvengono hanno subito un chiaro trasporto.

25) *Thalassinoides isp.* (fig. 10). Descrizione: Sistema di burrows a forma di Y o T con parete da liscia fino a leggermente irregolare, che si diramano senza particolare ingrossamento nel punto di biforcazione che risulta essere spesso un elemento chiave di distinzione (MONACO & GARASSINO, 2001; MONACO & GIANNETTI, 2002). I tubi hanno sezione subcircolare con diametro intorno ai 2 cm, inoltre l'orientazione dei tubi varia essenzialmente da orizzontale a subverticale fino a irregolarmente inclinata, e il riempimento è identico a quello della roccia ospitante nei morfotipi a sviluppo verticale mentre è per lo più pelitico in quelli a sviluppo orizzontale. Preservata come epichnion, endichnion e hypichnion è uno tra gli ichnotaxa più comuni del registro geologico, con molte specie e varietà, e si rinviene praticamente in ogni tipo di ambiente dal subtidale superiore fino all'abissale sia di sedimenti carbonatici che terrigeni mostrando anche alcune analogie con l'ichnogenere *Ophiomorpha* (FREY *et alii*, 1978; BROMLEY, 1996; MONACO, 2000b). Etologicamente rappresenta una struttura abitativa e di alimentazione (*domichnion*, *fodichnion*) di organismi depositivori per lo più, ma non solamente, crostacei decapodi.

## ICHNOCENOSI

Il concetto di ichtnocenosi, introdotto da DORJES E HERTWECK (1975), comprende l'insieme delle tracce che possono essere relazionate tra loro per definire una biocenosi, ecologicamente coerente, prodotta in un definito ambiente da certi organismi bioturbanti. Si sono potute individuare otto diverse ichtnocenosi, ognuna delle quali risponde a caratteristiche sedimentologiche oltre che ichnologiche altrettanto distinte (figg. 8-9-10). Ogni singola ichtnocenosi è legata in maniera imprescindibile alle strutture sedimentarie inorganiche e dall'analisi sedimentologica integrata è possibile dedurre il grado di energia, l'os-

signazione, la salinità, la qualità del substrato, la disponibilità di nutrienti, e più in particolare uno specifico subambiente (BROMLEY, 1996; DAM, 1990).

### a) Backshore/Foreshore

#### *Ichnocenosi a Gastrochaenolites (IGa)*

Associazione oligotipica, caratterizzata dall'ichnogenere *Gastrochaenolites*, che rappresenta una struttura abitativa di bivalvi, in quanto la forma stessa del *boring* ricalca fedelmente sia la grandezza che la forma del guscio (fig. 8). Le strutture sono prevalentemente verticali, alcune oblique alla superficie di strato. La bioturbazione si concentra in un orizzonte pelitico di colore avana estremamente consistente, potente solo pochi centimetri e con continuità laterale irregolare. Le perforazioni rappresentano il domicilio di bivalvi in un substrato duro, o quantomeno semicementato, sopratidale (*rockground*).

#### *Ichnocenosi a Polykladichnus (IPy)*

L'ichtnocenosi è caratterizzata principalmente dall'ichnogenere *Polykladichnus*, in associazione con *Diplocraterion*, *Arenicolites* sp. 1, *Skolithos*, *Monocraterion*, *Rosselia* e *Lockeia* (fig. 8). La quasi totalità delle tracce fa parte della classe etologica *domichnion* come *Skolithos*, *Monocraterion*, *Arenicolites* e *Polykladichnus*, mentre strutture di alimentazione come *Rosselia* e lo stesso *Polykladichnus* sono subordinate. Oltre a queste due principali classi etologiche abbiamo tracce da riposo (*cubichnion*) come *Lockeia* e di riequilibrio come *Diplocraterion* (*equilibrichnion*), che chiudono il quadro etologico dell'ichtnocenosi. Dal punto di vista sedimentologico siamo in presenza di strutture a regime di flusso inferiore a 1, da una laminazione incrociata ad una laminazione ondulata a ripple di interferenza, con alternanza di strutture da regime trattato ad oscillatorio.

### b) Upper shoreface

#### *Ichnocenosi a Ophiomorpha nodosa (Ion)*

L'ichtnocenosi è caratterizzata da *Ophiomorpha nodosa*, subordinatamente in associazione con altri ichnotaxa quali *Diplocraterion parallelum* var. *lingum* e *Arenicolites* isp. 1. Le tracce sono disposte prevalentemente in posizione da verticale a subverticale rispetto alle superfici di strato (fig. 9). I burrows non si intercettano mai, al contrario appare evidente la stratificazione verticale dell'associazione ichnologica (*tiering*). Si possono riconoscere livelli oligotipici ad *Arenicolites* o ad *Ophiomorpha*, mentre al contrario *Diplocraterion* è presente in livelli misti. Tutti gli ichnotaxa appartengono alle classi etologiche *domichnion* ed *equilibrichnion*, con prevalente sviluppo verticale dei burrows ortogonali alla stratificazione. Gli organismi possibili produttori di tali strutture sono prevalentemente infaunali, sospensivori o filtratori, come anellidi e crostacei (BROMLEY, 1996). Si ha una stratificazione incrociata a festoni o tabulare; un ambiente con simili caratteristiche è soggetto a rapidi cambiamenti nella dinamica deposizionale (*interfaccia dinamica*), stressante per le comunità bentoniche marine.

#### *Ichnocenosi ad Arenicolites isp. 1 (Ia)*

L'ichtnocenosi è molto povera sia in abbondanza che in diversità (praticamente monospecifica), rappresentata dal solo ichnogenere *Arenicolites* sp. 1. L'associazione oli-

### Parasequenze tipo 1 (Membro inferiore)

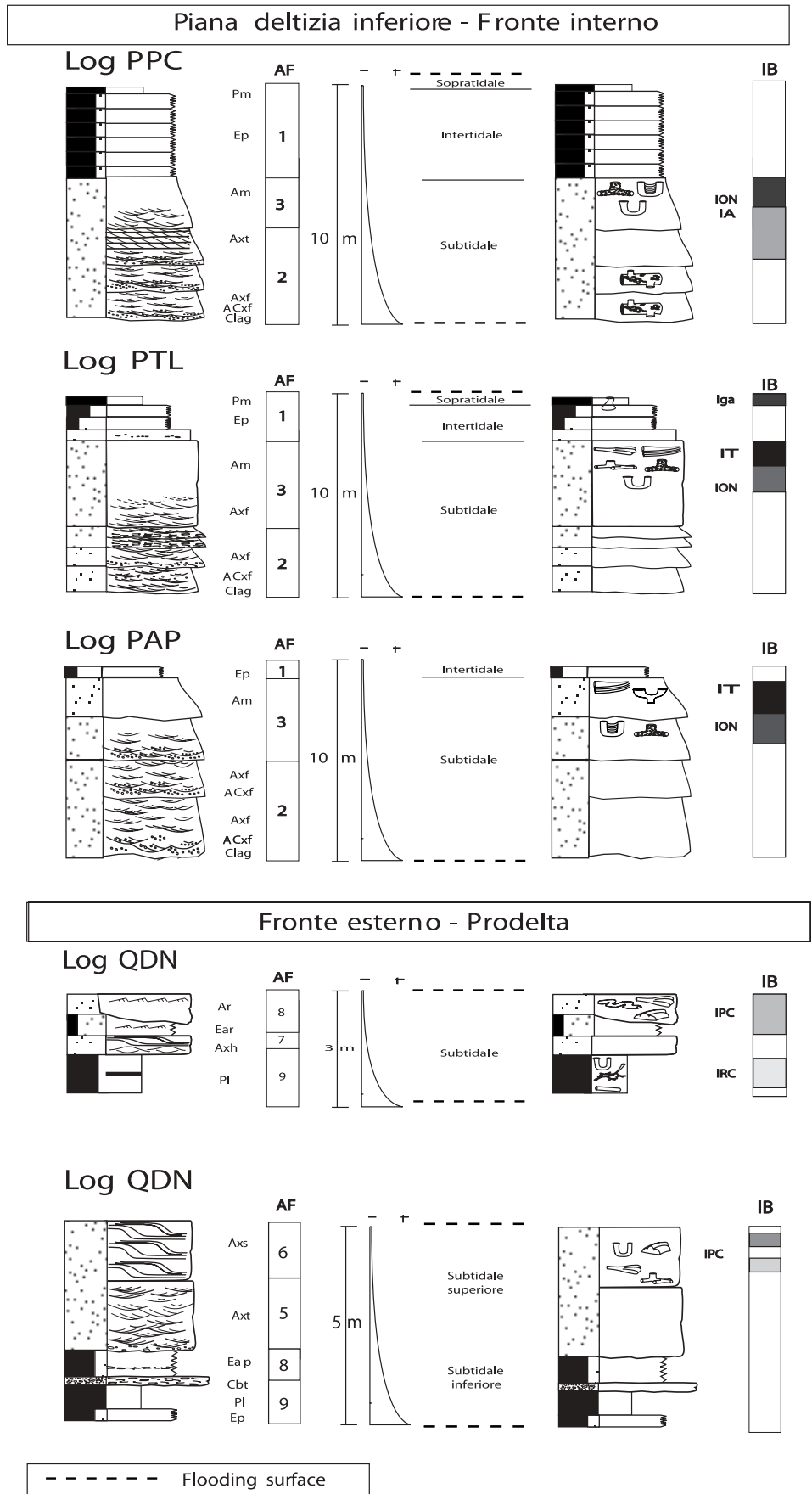


Fig. 12 - Esempio di parasequenza tipo 1 nei logs stratigrafici studiati per il Membro inferiore della Fm. Piedra Clavada.  
- Type 1 parasequence in the studied logs of the lower Member of Piedra Clavada Formation.

gotipica è costituita per intero da strutture abitative a sviluppo verticale ortogonali alla stratificazione (fig. 9). I *burrows* non si intercettano tra loro in nessun caso, in particolare si concentrano in porzioni arealmente limitate senza interessare mai un orizzonte in particolare. Queste strutture sedimentarie organiche potrebbero essere state prodotte da organismi sospensivori come anellidi. Le strutture sedimentarie associate sono set incrociati da concavi a tabulari e granulometria del deposito pari ad un'arenaria media che fanno presupporre un ambiente costiero subtidale alto (*upper shoreface*) (DAM, 1990).

#### *Ichnocenosi a Teichichnus (It)*

L'ichnogenere che caratterizza questa ichnocenosi è *Teichichnus*, non solo per la sua abbondanza ma anche perché la sua presenza non si riscontra in altre particolari associazioni. Oltre a *Teichichnus*, sono presenti altri ichnotaxa: *Diplocraterion parallelum* var. *lingum*, *Ophiomorpha nodosa*, *Arenicolites* isp. 1, *Polykladichnus*. I *burrows*, con diametro superiore al centimetro, sono orientati nella totalità dei casi ortogonalmente alla stratificazione con sviluppo prevalentemente verticale (fig. 9). Le tracce risultano sovrapposte le une alle altre in un reticolo estremamente denso di *burrows*. È possibile distinguere due particolarità: la prima riguarda l'assoluta predominanza dei generi *Teichichnus* e *Polykladichnus* sulle tracce restanti; la seconda riguarda le dimensioni considerevoli dei *burrows* rispetto a tutte le altre ichnocenosi. Una delle caratteristiche di questa ichnocenosi è proprio l'aumento graduale del grado di bioturbazione che al tetto della facies arenacea acquista un grado massimo. Dall'analisi etologica dell'associazione si può riconoscere l'assoluta predominanza di strutture abitative quali domichnion, subordinatamente fodinichnion ed equilibrichnion. Dal punto di vista sedimentologico siamo in presenza di strutture di regime di flusso inferiore a 1, con set incrociati da concavi a tabulari e granulometria del deposito pari ad un'arenaria media.

#### c) Lower shoreface

##### *Ichnocenosi a Gyrochorte (Ig)*

L'ichnocenosi è caratterizzata principalmente dalla presenza dell'ichnogenere *Gyrochorte* e altri ichnotaxa come *Curvolithus* e *Cochlichnus*; frequenti sono gli ichnogenieri *Monocraterion* e *Skolithos* (fig. 10). Le tracce sono orientate sia parallelamente alla stratificazione che ortogonalmente; i *burrows* dei diversi ichnotaxa non si intercettano mai, al contrario appare evidente una stratificazione verticale dell'associazione ichnologica (*tiering*). Si possono riconoscere livelli provvisti solo del genere *Monocraterion* e *Skolithos* ed altri con i generi *Curvolithus*, *Cochlichnus* e *Gyrochorte*. Esistono di fatto due orizzonti che si differenziano nettamente per caratteristiche etologiche e geometriche: il primo a *Skolithos* e a *Monocraterion* con orientazione verticale, ortogonale alla stratificazione, il secondo a *Gyrochorte*, *Curvolithus* e *Cochlichnus* con sviluppo orizzontale parallelo alle superfici di strato. I corpi arenacei che ospitano l'ichnocenosi possiedono una stratificazione incrociata *hummocky*. L'ichnogenere *Gyrochorte*, che dà il nome all'ichnocenosi, è comune al tetto dei depositi di tempesta dove si rinvencono ripples da onda della bella stagione.

##### *Ichnocenosi a Phycodes e Curvolithus (Ipc)*

L'ichnocenosi è costituita principalmente dagli ichnogenieri *Phycodes* e *Curvolithus*, in associazione con *Coch-*

*lichnus*, *Thalassinoides*, *Palaeophycus* ed *Arenicolites* isp. 1. Il patrimonio ichnologico è distribuito uniformemente in tutto il corpo arenaceo, le tracce non si concentrano in degli orizzonti ben precisi e manca una chiara stratificazione verticale (fig. 10). I *burrows* sono orientati, nella quasi totalità dei casi, parallelamente alla stratificazione con sviluppo prevalentemente orizzontale. I *burrows* di *Thalassinoides* presenti sono di piccole dimensioni e poco abbondanti rispetto ai generi *Curvolithus* e *Cochlichnus*. Ci sono tracce appartenenti alla classe etologica repichnia, come *Curvolithus* e *Cochlichnus*, altre tracce appartenenti alla classe domichnia come *Palaeophycus*, *Thalassinoides*, e *Arenicolites*, oltre a tracce della classe fodinichnia come *Phycodes* e *Thalassinoides*. Dal punto di vista sedimentologico siamo in presenza di strutture di basso regime di flusso con laminazione da ripple da corrente e stratificazione incrociata sigmoidale di piccola scala.

##### *Ichnocenosi a Rhizocorallium e Chondrites (Irc)*

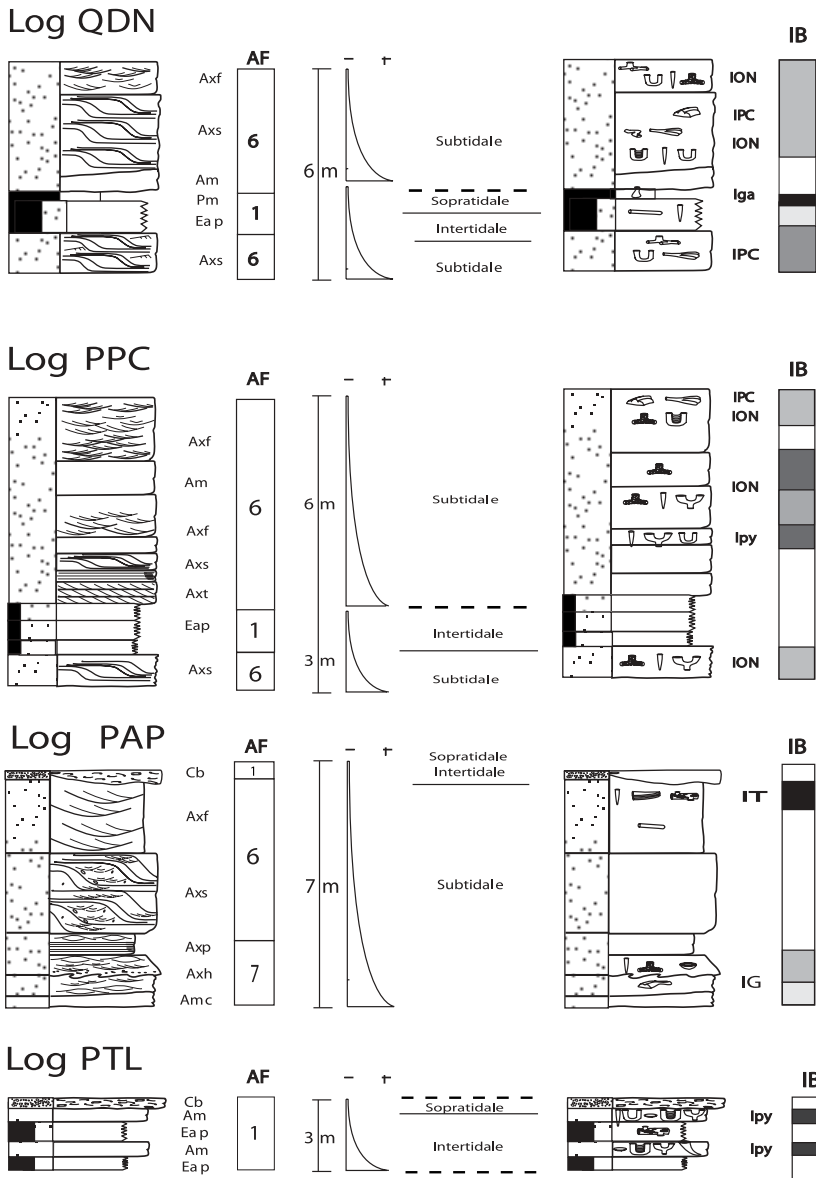
Oltre ai generi *Rhizocorallium* e *Chondrites* abbiamo in associazione anche *Palaeophycus*, *Phycodes*, *Arenicolites* isp. 2 e *Planolites*. Il patrimonio ichnologico non è distribuito uniformemente, e le tracce si concentrano in orizzonti ben precisi, privi di stratificazione verticale. I *burrows* sono orientati sia parallelamente alla stratificazione con sviluppo prevalentemente orizzontale, come nel caso dei generi *Planolites*, *Palaeophycus* e *Phycodes*, sia ortogonalmente alla stratificazione a sviluppo verticale, come nel caso del genere *Arenicolites* isp. 2, *Rhizocorallium* e *Chondrites* (fig. 10). Si possono riconoscere livelli con *Chondrites*, *Planolites* e *Arenicolites* isp. 2, ed altri ricchi in *Phycodes*, *Palaeophycus* e *Rhizocorallium*. Le dimensioni dei *burrows* sono molto inferiori rispetto a quelle delle altre ichnocenosi. In generale sono per lo più strutture di alimentazione, prodotte da organismi infaunali depositivori, come anellidi o crostacei. La facies è eterolitica arenosa con strutture *lenticular* e *pelitica* laminata. La presenza delle tracce di *Chondrites*, *Planolites* e *Arenicolites* è ristretta alla litofacies pelitica. L'ichnocenosi rappresenta l'attività bioturbante di una comunità di organismi che popolavano la parte più lontana dalla costa del sistema deltizio, dove il fondale risentiva in maniera limitata degli effetti del moto di marea.

#### INDICAZIONI PALEOETOLOGICHE, PALEOECOLOGICHE E PALEOAMBIENTALI

Dalla distribuzione degli ichnotaxa riconosciuti nei log stratigrafici della Fm. Piedra Clavada, risulta che i più abbondanti sono quelli appartenenti alle categorie domichnion ed equilibrichnion, seguendo la classificazione etologica di SEILACHER (1953; 1964), ripresa in BROMLEY (1996 fig. 2). Ciò indica che l'ambiente costiero deltizio doveva essere un sistema estremamente dinamico, regolato principalmente da tassi di energia variabili, sedimentazione piuttosto alta, ottima ossigenazione nel suo complesso e molti nutrienti a disposizione con repentine variazioni chimico-fisiche (EKDALE, 1985) (fig. 11). Tra gli ichnotaxa a sviluppo verticale semplice che appartengono alle classi etologiche domichnion ed equilibrichnion si possono indicare: *Skolithos*, *Arenicolites*, *Monocraterion*, *Gastrochaenolites*, *Polykladichnus*, *Diplocraterion*, ed in misura inferiore *Rhizocorallium*, o anche ichnotaxa che

Parasequenze tipo 2 (Membro superiore)

Piana deltizia inferiore - Fronte Interno



Fronte esterno - Prodelta

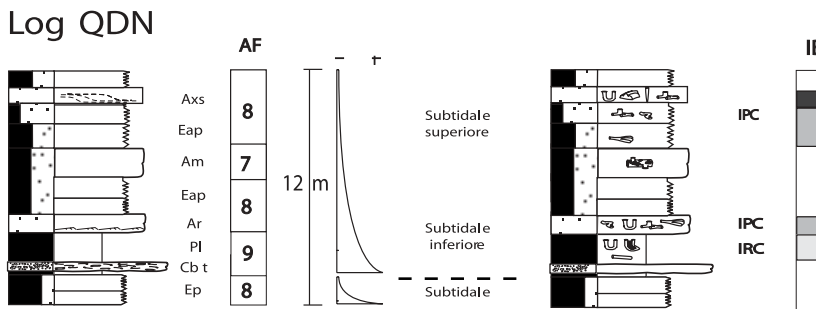


Fig. 13 - Esempio di Parasequenza tipo 2 nei logs stratigrafici studiati per il Membro superiore della Fm. Piedra Clavada.  
 - Type 2 parasequence in the studied log of the upper Member of Piedra Clavada Formation.

----- Flooding surface

prevedono il rafforzamento delle strutture per far fronte all'instabilità del substrato, come *Ophiomorpha*.

Nei log stratigrafici PPC, PAP e PTL, predominano i domichnia sui fodinichnia, mentre si registra un incremento relativo dei fodinichnia sui domichnia nel log QDN, in aggiunta alla presenza di repichnia. Generalmente i repichnia si sviluppavano sul piano di strato dove si veniva a sfruttare la relativa stabilità del substrato: *Curvolithus*, *Phycodes*, *Cochlichnus* e *Gyrochorte*. La minore diversità generica relativa è stata riconosciuta nei log PPC e PAP, mentre nei log QDN e PAP si ha una varietà ichnologica relativa superiore, con le dovute differenziazioni etologiche. I fodinichnia caratterizzano ambienti ad energia medio/bassa, con prevalenza di organismi depositivori e con maggiore diversità ichnologica; al contrario un subambiente più interno prossimo alla costa e con maggiore energia è caratterizzato da equilibrichnia sospensivori con minore diversità ichnologica.

Le ichnocenosi IOn, IA ed IT sono riferibili ad un subambiente deltizio con un elevato grado di energia; contrariamente i depositi da decantazione e trazione, riconosciuti in IPC e IRC, fanno ipotizzare un subambiente a minore energia (fig. 11). Per l'ichnocenosi IG va ricordato che il deposito da tempesta è legato ad un evento che non riflette le normali condizioni di sedimentazione del subambiente. L'ichnocenosi IGa naturalmente rappresenta una particolare condizione in cui vi sia stata la parziale e periodica esposizione di porzioni se non di tutta la pianura deltizia. Per l'ichnocenosi IPy il grado di energia è intermedio tra i due principali gruppi definiti, essendo un subambiente interessato da maree ma comunque protetto dalle correnti di maggiore intensità (fig. 11). Si può dedurre quindi che ad un minore grado di energia corrispondessero tracce etologicamente riconducibili a fodinichnia, repichnia e pascichnia, realizzate da organismi sedimentivori nell'esercizio delle loro funzioni vitali.

All'interno del contesto deltizio della Fm Piedra Clavada, appare evidente che tutto il sistema era ben ossigenato e che solo le aree più lontane dalla costa soffrivano di una minore ossigenazione. Nella totalità delle ichnocenosi non sono emersi evidenti indizi di condizioni disaerobiche né tantomeno anaerobiche. Si può delineare comunque un trend di decremento nell'ossigenazione da IOn, IA, IT, fino a chiudersi con IPC, IRC, passando per IPy, IGa e IG. In questo ordine si riconosce una diminuzione nelle dimensioni dei *burrows*, una diminuzione di penetrazione, oltre alla presenza di tracce dette diagnostiche, che nel caso di IRC documenta quantomeno condizioni disaerobiche, sebbene le ichnocenosi non si differenzino solo per l'ossigenazione del substrato, ma anche per la natura tessiturale del deposito alla quale gli organismi sono particolarmente sensibili (GOLDRING, 1995).

La maggiore densità di bioturbazione va ricercata in IT, IPy e IOn, tutte accomunate dalla presenza di ichnotaxa appartenenti alle classi etologiche domichnia, fodinichnia ed equilibrichnia in ordine di abbondanza e dove le tracce sono orientate verticalmente. La paleobiocenosi doveva essere composta in prevalenza da sospensivori e in minor quantità da depositivori. Le ichnocenosi con tenore di bioturbazione inferiore sono quelle con maggiore diversità ichnologica, ad eccezione della IPy, la quale non segue tale corrispondenza. Le ichnocenosi IRC, IPC e IG sono quelle con grado minimo di densità, in cui prevalgono i fodinichnia sui domichnia, con relativa paleobiocenosi composta da depositivori e carnivori. Nel caso del-

le ichnocenosi IA e IGa, entrambe oligotipiche, la densità di bioturbazione è abbondante mentre la diversità generica è minima.

Dai dati ricavati è possibile confermare che, nell'ambito del sistema deltizio/estuarino della Formazione Piedra Clavada, nei membri inferiore e superiore risultano differenziate, in funzione delle variazioni nelle associazioni di facies, le ichnocenosi in risposta ai cambi nelle condizioni deposizionali (fig. 11).

Le associazioni di facies di canale di foce e di marea (II e V) mostrano una bioturbazione estremamente ridotta a causa dell'elevato tasso di erosione e di energia. Al contrario, nelle barre di foce sabbiose e in quelle di marea (III e VI) si registra il grado maggiore di ichnodensità e ichnodiversità con lo sviluppo delle ichnocenosi IOn, IT e IA (fig. 11). L'ichnocenosi IPy rappresenta probabilmente un'eccezione e caratterizza i depositi eterolitici/arenacei dell'associazione I, che indicano un ambiente lagunare protetto, ma intensamente colonizzato e ricco in nutrienti, interessato sporadicamente da variazioni mareali e flussi combinati (SNEDDEN *et alii*, 1988).

Con densità di bioturbazione di grado medio, le ichnocenosi IOn, IT e IG caratterizzano le associazioni IV e VII, la prima di alluvione (*avenida fluvial*), e la seconda di tempesta. In entrambe la bioturbazione è localizzata solamente nella porzione superiore dei depositi in quanto la comunità tracciante si sviluppa prevalentemente in corrispondenza di quei livelli che segnano il ripristino alle normali condizioni di sedimentazione (AIGNER, 1985; GOLDRING, 1995; MONACO, 2002). Con indice di densità minima, da sparsa a scarsa, si attestano le ultime due ichnocenosi IRC ed IPC tipiche delle associazioni VIII e la IX. L'evoluzione batimetrica del sistema deposizionale può essere dedotta in un certo modo anche dall'andamento delle ichnocenosi, in quanto il grado di bioturbazione ricalcava i processi fisici che in ultima analisi governavano i processi biologici. La densità di bioturbazione e le ichnoassociazioni erano pertanto fortemente condizionate dall'energia e dalla direzione delle correnti del sistema deltizio-estuarino (fig. 11).

## SEQUENZE DEPOSIZIONALI

### a) Sequenze deposizionali di IV-V° ordine (parasequenze)

Lo studio stratigrafico ad alta risoluzione della Fm Piedra Clavada ha permesso di riconoscere cicli del IV-V° ordine, attorno cioè a 50-100 Ka, del tutto assenti nell'unico lavoro di ciclostratigrafia, relativo al Bacino Australe, di ARBE (1989).

L'analisi della ciclicità ha permesso di suddividere il membro inferiore in 4 parasequenze di tipo 1 di potenza molto variabile; nei logs PAP, PTL e PPC esse raggiungono i dieci metri, mentre nella sezione QDN hanno spessori molto più modesti, da 3 a 5 metri (fig. 12). L'associazione verticale delle facies non segue lo stesso ordine per i diversi log stratigrafici. Le sequenze *shallowing upward* che caratterizzano i logs PAP, PPC e PTL sono di tipo strato- e grano-decrescente (*fining e thinning upward*), come descritto nelle parasequenze di piana deltizia inferiore e fronte interno. Abbiamo la progredizione delle facies eterolitiche di piana tidale (associazione I) sopra quelle arenacee di fonte interno a barre e canali di foce (associazioni II e III) (fig. 12).

## SEQUENZE DEPOSIZIONALI, FM. PIEDRA CLAVADA

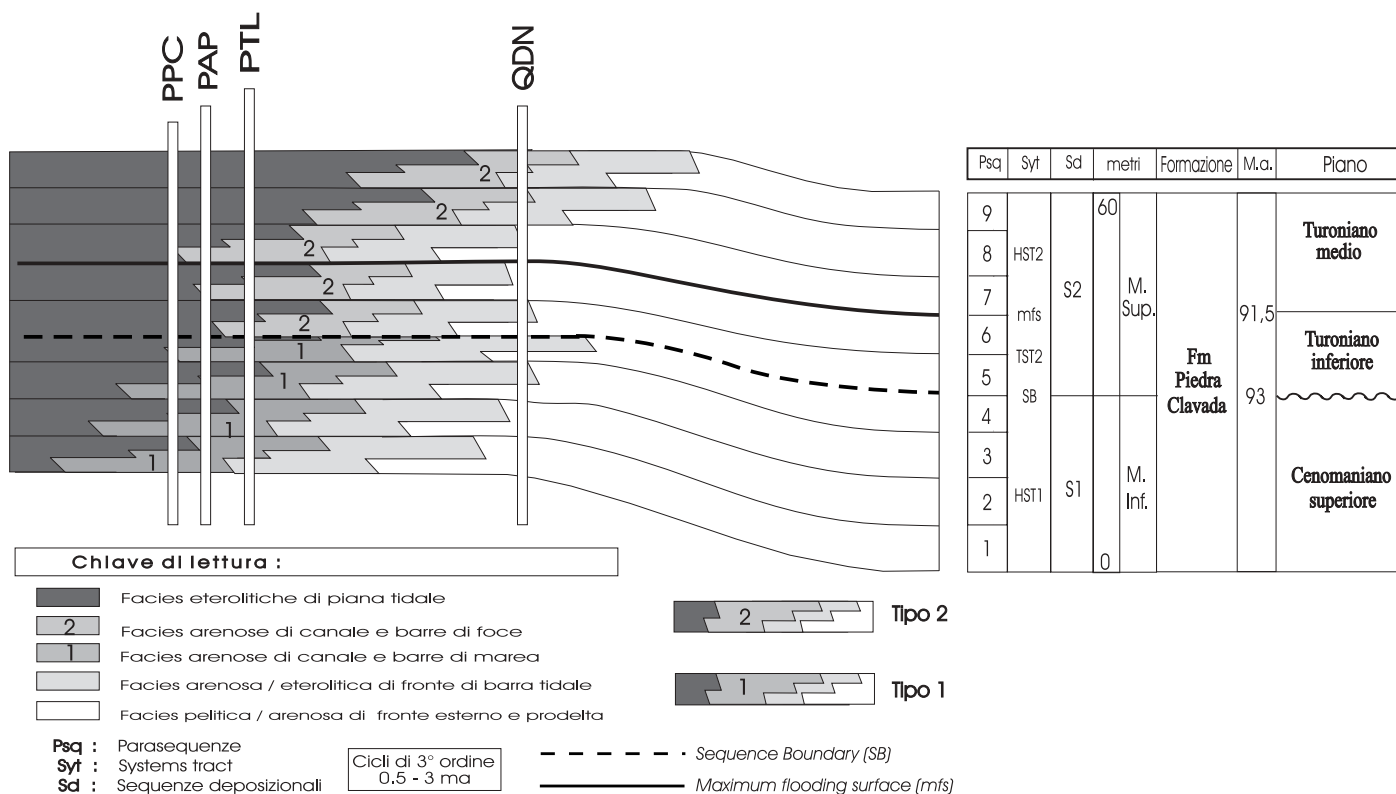


Fig. 14 - Schema riassuntivo stratigrafico e delle sequenze deposizionali con relative facies della Fm. Piedra Clavada, Bacino Australe, Argentina.

- Summary of stratigraphy and depositional sequences with facies of the Piedra Clavada Formation, Austral Basin, Argentina.

Le superfici di *flooding* sono erosive, e l'evento trasgressivo piuttosto rapido poteva causare la completa erosione del termine sopratidale della parasequenza antecedente con la presenza di intraclasti pelitici e *rip-up* nella parte basale subtidale della parasequenza successiva.

Le sequenze *shallowing upward* del log QDN sono al contrario di tipo strato- e grano-crescente (*coarsening e thickening upward*), come descritto nelle parasequenze di fronte deltizio esterno e di prodelta. Abbiamo quindi la progradazione delle facies arenacee ed eterolitiche di barra e fronte di barra tidale o canale (associazione VIII,VI e V rispettivamente) su quelle pelitico/eterolitiche di fronte esterno e prodelta (associazione IX) (fig. 12).

Nel membro superiore sono state riconosciute 5 parasequenze di spessore molto variabile; nei logs PAP e PPC vanno da 5-7 metri, fino a decrescere a 3 metri al tetto della formazione nel log PTL (fig. 13). Nella sezione QDN gli spessori sono maggiori e variabili e si attestano intorno a 7-12 metri. L'associazione verticale delle facies non segue lo stesso ordine per i diversi log stratigrafici. Le sequenze *shallowing upward* che caratterizzano i logs PAP, PPC e PTL sono di tipo strato- e grano-decrescente (*fining e thinning upward*), come descritto in certe parasequenze in ambienti di piana deltizia inferiore e fronte interno (COLEMAN & PRIOR, 1982). Abbiamo dunque la progradazione delle facies eterolitiche di piana tidale (associazione I) su quelle arenacee di fronte interno come barre e canali tidali (associazione VI).

Le superfici di *flooding* che testimoniano l'evento trasgressivo, con erosione del termine sopratidale della parasequenza antecedente, mostrano intraclasti pelitici e *rip-up* nella parte basale subtidale della parasequenza.

#### b) Sequenze deposizionali di III ordine

È possibile dividere la formazione in due sequenze deposizionali con ciclicità del III ordine, dovuta a variazioni eustatiche (cfr. GALLOWAY, 1989) (fig. 14). Durante il Cretaceo il Bacino Austral, nella sua porzione orientale, non era interessato da fenomeni tettonici importanti, mentre la porzione occidentale era sottoposta all'attività orogena andina. I sedimenti deltizio/estuarini della Fm. Piedra Clavada sono da collocare proprio nel settore costiero del bacino in cui l'attività tettonica era più moderata, tale da poter considerare passivo il margine orientale del bacino. Della sequenza inferiore abbiamo solo il sistema deposizionale di stazionamento alto del livello del mare (*high-stand systems tract*), caratterizzato dalle parasequenze 1, 2, 3 e 4 con tendenza verticale progradante (*progradational stacking pattern*) (fig. 14). La caduta del livello marino al di sotto del margine della piattaforma diede luogo ad una forte erosione determinando un limite di sequenza (*sequence boundary*) di tipo 1 (*sensu* VAIL, 1977; VAIL & POSAMENTIER, 1988; VAN WAGONER *et alii*, 1988), posto in corrispondenza del passaggio tra le parasequenze 4 e 5. Sistemi deposizionali trasgressivi (*transgressive systems tract*) sono individuabili nelle parasequenze 5 e 6 che mo-

strano una tendenza verticale retrogradante (*retrogradational stacking pattern*) (fig. 14). Alla superficie hiatale di massima trasgressione (*maximum flooding surface*), caratterizzata da concentrazioni scheletriche ricche in fosfato, seguono le parasequenze 7, 8 e 9 con tendenza progradazionale relativa al sistema di stazionamento alto (*high-stand systems tract*), che si estende ai depositi pelitici continentali della Fm Mata Amarilla. Facendo riferimento alle sequenze cronostratigrafiche di HAQ *et alii* (1988), è possibile stabilire, in accordo con ARBE (1989), che la Fm Piedra Clavada, nella località tipo, è compresa in un intervallo cronostratigrafico che va da 93,5 ai 91 m.a., giusto al passaggio Cenomaniano-Turoniano, relativo ai cicli di terzo ordine 2.4, 2.5 del superciclo UZA-2 di ARBE (1989).

### CICLICITÀ NELLE TRACCE FOSSILI

Dallo studio stratigrafico-sequenziale del sistema deltizio/estuarino del Cretaceo della Fm. Piedra Clavada si è potuto stabilire come le ichnocenosi varino all'interno delle parasequenze. La bioturbazione nell'ambito della parasequenza procedeva in accordo con i processi fisici, essendo quest'ultimi a governare i processi biologici (MONACO, 2000; MONACO & GIANNETTI, 2002); pertanto la densità di bioturbazione e le associazioni ichnologiche nelle parasequenze erano fortemente condizionate dall'energia e dalla direzione delle correnti, come si è visto in alcune situazioni del Cretaceo della regione di Alicante (CARACUEL *et alii*, 2002).

Nel caso della parasequenza di tipo 1 (fig. 12) abbiamo la progradazione delle facies eterolitiche di piana tidale su quelle arenacee di fronte interno, come barre e canali di foce e/o tidali; la caduta relativa del livello del mare e la progradazione sono documentate da una sequenza «*shallowing upward trace fossil arrangement*». In pratica si registra il passaggio verticale da ichnocenosi tipiche di un ambiente subtidale inferiore e medio dominate da sospensivori appartenenti alle categorie etologiche domichnia ed equilibrichnia (es. *Ophiomorpha*, *Diplocraterion*, *Arenicolites*, *Skolithos*, *Teichichnus*), ad altre ichnocenosi di dominio subtidale superiore fino a intertidale o sopratidale con tracce di alimentazione e strutture abitative sia di sospensivori che di sedimentivori (es. *Polykladichnus*, *Lockeia*, *Rosselia*, *Monocraterion*, *Skolithos*, *Diplocraterion*, *Arenicolites*, *Gastrochaenolites*) (fig. 12).

Nella parasequenza di tipo 2 relativa ad ambienti di maggiore profondità, abbiamo la progradazione delle facies arenacee ed eterolitiche di barra e fronte di barra tidale o canale su quelle pelitico/eterolitiche di fonte esterno e prodelta (fig. 13). In pratica si ha una parasequenza sempre di tipo *shallowing upward* ma strato- e grano-crescente (*coarsening e thickening upward*). Qui lo *shallowing upward trace fossil arrangement* è rappresentato dal passaggio verticale da ichnocenosi a depositivori, con categorie etologiche fodinichnia e domichnia (es. *Chondrites*, *Planolites*, *Arenicolites*, *Rhizocorallium*, *Palaeophycus* e *Phycodes*), ad ichnocenosi con tracce da locomozione (re-pichnia) e alimentazione (fodinichnia) (es. *Curvolithus*, *Cochlichnus*, *Phycodes*, *Thalassinoides*).

### CONCLUSIONI

La Formazione Piedra Clavada, di spessore pari a 70 metri nella località tipo, è costituita da depositi arenacei

con facies eterolitiche e pelitiche intercalate e accompagnate a depositi conglomeratici e conchigliari. Essa è riferibile ad un intervallo cronostratigrafico che va da 93,5 ai 91 m.a., al passaggio Cenomaniano-Turoniano, relativo ai cicli di terzo ordine 2.4, 2.5 del superciclo UZA-2. Lo studio stratigrafico ad alta risoluzione ci ha permesso di riconoscere le parasequenze dell'ordine di 50-100 Ka, del tutto assenti nell'unico lavoro di ciclostratigrafia (ARBE, 1989) relativo al Bacino Australe.

Dal punto di vista paleontologico, oltre agli invertebrati marini già menzionati da FERUGLIO (1938), RICCARDI (1971) e LEANZA (1972), sono stati rinvenuti nel corso di questo lavoro bivalvi del genere *Eriphyla*, *Modiolus*, *Panopea*, *Potamides*, ostreidi e gasteropodi del genere *Natica*. Molto più interessante, e del tutto originale, è il rinvenimento di vertebrati marini, squame di pesci actinopterigi quali il semionotiforme *Lepidotes*. Al tetto della formazione sono state rinvenute placche frammentate del carapace di tartarughe, assimilabili a pleurodiri della famiglia *Chelidae*. Proprio nello strato conchigliare contenente le placche di tartarughe è possibile far coincidere il limite formazionale con la Formazione sovrastante, nella località tipo.

La Formazione Piedra Clavada è stata suddivisa in due membri, uno inferiore ed uno superiore. Per il membro inferiore si è ipotizzato un complesso deltizio/estuarino con una forte influenza tidale, nel quale i canali distributori erano in possesso di una capacità di trasporto considerevole da terra verso il mare aperto (*ebb*), tale da impedire alle maree di inibire il flusso. Il delta possedeva una buona capacità costruttiva. Nel membro superiore il sistema deltizio/estuarino evolveva decisamente in un vero e proprio estuario, con le relative caratteristiche idrologiche ed ecologiche. Il sistema di canali di foce che caratterizzava il membro inferiore scomparve a favore di un'area tidale piuttosto ampia e continua; i depositi sabbiosi di barra, antistanti alla piana tidale, venivano continuamente rielaborati e trasportati dalle correnti di marea. In un contesto geologico regionale e seguendo i modelli paleogeografici esistenti, si può concludere che la progradazione del sistema deltizio costiero avveniva secondo una direzione approssimativa NE-SW e che il materiale silicoclastico proveniva non tanto dalla protocatena andina, ubicata ad ovest del sistema deltizio, ma più specificatamente dal mesocratone del Deseado posizionato a nord-est.

Per quanto riguarda la bioturbazione, assai abbondante ma in precedenza poco studiata, si sviluppava in stretto accordo con i processi fisici, essendo quest'ultimi a governare e regolare l'attività dell'infauna nel sistema deposizionale deltizio/estuarino. La densità di bioturbazione e le associazioni ichnologiche venivano ad essere fortemente condizionate dall'energia e dalla direzione delle paleocorrenti. Sono state individuate otto differenti ichnocenosi. Ognuna di esse ci fornisce un particolare grado di energia, ossigenazione, salinità, qualità del substrato, disponibilità di nutrienti, e ci fornisce indicazioni preziose sulle variazioni deposizionali e sulla batimetria. È stata riconosciuta una caratteristica sequenza «*shallowing upward trace fossil arrangement*», con il passaggio verticale da ichnocenosi tipiche di ambiente subtidale inferiore, ad altre ichnocenosi di dominio subtidale superiore fino a intertidale e sopratidale. Integrando le informazioni di sedimentologia con quelle di ichnologia è stato possibile caratterizzare e suddividere i diversi su-



bambienti, definendo la dinamica e l'evoluzione del sistema deltizio/estuarino. La fedele corrispondenza di strutture sedimentarie inorganiche ed organiche ci ha permesso inoltre di confrontare alcune indicazioni paleoetologiche, paleoecologiche e paleoambientali.

Lo studio stratigrafico ad alta risoluzione ha permesso di riconoscere una ciclicità di IV-V ordine, testimoniata da un totale di 9 parasequenze *shallowing upward*, 4 per il Membro inferiore, dove sono più spesse a causa degli apporti sedimentari, e 5 per il Membro superiore di spessore all'incirca della metà. Le parasequenze riconosciute sono sia di tipo strato- e granulo-decrescenti con progradazione delle facies eterolitiche di piana tidale su quelle arenacee di fonte interno, sia di tipo strato- e grano-crescenti con la progradazione delle facies arenacee ed eterolitiche di barra/fronte di barra tidale su quelle pelitico/eterolitiche di fronte esterno e prodelta. Anche la distribuzione delle ichnoassociazioni, così come gli ichnia correlati, ricalca fedelmente la ciclicità nella distribuzione delle facies, permettendo di ampliare le indicazioni a carattere ambientale. Per quanto riguarda poi la ciclicità del III ordine, sono state individuate due sequenze deposizionali dovute a variazioni eustatiche. Della sequenza inferiore è stato individuato solo il sistema deposizionale di stazionamento alto del livello marino testimoniato dalle parasequenze 1, 2, 3 e 4 che sembrano mostrare una tendenza verticale progradante. Il limite di sequenza di tipo 1 è stato posto in corrispondenza del passaggio tra le parasequenze 4 e 5 con *lags* tipiche di eventi trasgressivi. Le parasequenze 5 e 6 con tendenza verticale retrogradante potrebbero rappresentare sistemi deposizionali trasgressivi, mentre le concentrazioni scheletriche ricche in fosfato indicherebbero la superficie hiatale di massima trasgressione. Infine le parasequenze 7, 8 e 9 a tendenza progradazionale del sistema di stazionamento alto segnano la parte sommitale dei depositi della Fm. Piedra Clavada che condurrà progressivamente alle condizioni continentali della sovrastante Fm. Mata Amarilla.

#### RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare D. POIRÈ dell'Università Nazionale di La Plata (Argentina) per l'accoglienza e per la disponibilità fornita durante l'escursione e la permanenza nella regione di Santa Cruz (area di Tres Lagos, Patagonia) e N. CANESSA per il supporto durante la campionatura e lo studio. Un particolare ringraziamento va anche a F. COLOMBO della U.B. di Barcellona che ha permesso la realizzazione della campagna andina, insieme a O. FERRER e X. ALEMANY anch'essi di grande aiuto e disponibilità durante tutto lo svolgimento del lavoro. Si ringrazia A. GIANNETTI per la lettura critica del manoscritto. Un ringraziamento anche ai due revisori del manoscritto G. CANTALAMESSA e L. RAGAINI per i suggerimenti e le indicazioni fornite durante la revisione del presente lavoro, e F. CALAMITA quale editore della rivista. Contributi forniti dai Progetti di Ricerca dell'Università di Perugia (fondi ex-MURST 60% P. MONACO, «Progetto d'Ateneo» 1999-2001, W. DRAGONI-S. CIRILLI).

#### OPERE CITATE

- AIGNER T. (1985) - *Storm depositional system*. In Lecture notes in Earth Sciences (Ed. by G.M. Friedman, H.J. Neugebauer and A. Seilacher), Springer Verlag, pp. 174.
- ALLEN J.R.L. (1982) - *Sedimentary structures: their character and physical basis*. Elsevier, New York, pp. 593 (vol. I), pp. 663 (vol. II).
- ARBE H.A. (1988) - *El Cretácico de la Cuenca Austral: sus ciclos de sedimentación*. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires (inédito).
- ARBE H.A. (1989) - *Estratigrafía, discontinuidades y evolución sedimentaria del Cretácico en la Cuenca Austral, Provincia de Santa Cruz*. In G. Chebli & L.A. Spalletti (Eds.), *Cuencas Sedimentarias Argentinas*, Instituto Superior de Correlación Geológica, **6**, 419-442.
- BOYD R., DARLYMPLE R.W. & ZAITLIN B.A. (1992) - *Classification of coastal depositional environments*. *Sedimentary Geology*, **80**, 139-150.
- BOSELLINI A., MUTTI E. & RICCI LUCCHI F. (1989) - *Rocce e successioni sedimentarie*. UTET, Torino, pp. 395.
- BROIN F. & DE LA FUENTE M.S. (1993) - *Les tortues fossiles d'Argentine: Synthèse*. *Annales de Paléontologie*, **79**, 169-232.
- BROMLEY R.G. (1996) - *Trace fossils. Biology, taphonomy and applications*. Chapman & Hall Publ. London (second edition), pp. 361.
- CARACUEL J.E., MONACO P., YÉBENES A. & GIANNETTI A. (2002) - *Trazas afines a Imbrichnus wattonensis Hallam de edad Albiense en el Prebético de Alicante (Sierra Gelada)*. *Geocaceta*, **31**, 171-174.
- CHEEL H.G. & LECKIE D.A. (1993) - *Hummocky cross-stratification*. In V.P. Wright (Ed.), *Sedimentary Review*, **1**, 103-122.
- CIONE A.L. & PEREIRA S.M. (1986) - *Los peces del Jurásico posterior a los movimientos intermálmicos y del Cretácico Inferior de Argentina*. Congreso de Biostratigrafía de los Sistemas Regionales del Jurásico y Cretácico de América del sur, 385-395. Mendoza.
- COLACICCHI R. & MONACO P. (1994) - *Pure carbonate gravity flow deposits of the Scaglia basin compared with central Apennine siliciclastics (Marnoso-Arenacea and Laga): analogies and differences*. *Mem. Sci. Geol. Padova*, **46**, 23-41, Padova.
- COLEMAN J.M. & PRIOR D.B. (1982) - *Deltaic environments of deposition*. In P.A. Scholle & D. Spearing (Eds.), *Sandstone Depositional Environments*. *Mem., Am. Assoc. Petrology and Geology*, **31**, 139-178.
- DAM G. (1990) - *Paleoenvironmental significance of trace fossils from the shallow marine Lower Jurassic Neill Klinger Formation, East Greenland*. *Paleogeogr., Paleoclimatol., Palaeoecol.*, **79**, 221-248.
- DARLYMPLE R.W., KNIGHT R.J., ZAITLIN B.A. & MIDDLETON G.V. (1990) - *Dynamics and facies model of a macrotidal sand-bar complex, Cobequid Bay-Salmon River Estuary (Bay of Fundy)*. *Sedimentology*, **37**, 557-612.
- DARLYMPLE R.W. (1992) - *Tidal Deposition Systems*. In H.G. Walker & N.P. James (Eds.), *Facies Models: Response to sea level change*. Geological Association of Canada, 195-218, Ontario.
- DARLYMPLE R.W., ZAITLIN B.A. & BOYD R. (1992) - *Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications*. *Journal of Sedimentary Petrology*, **62**, 1130-1146.
- DE LA FUENTE M.S., LLAPPARENT DE BROIN F. & MANERA DE BIANCO T. (2001) - *The oldest and first nearly complete skeleton of a chelid, of the Hydromedusa sub-group (Chelidae, Pleurodira), from the Upper-Cretaceous of Patagonia*. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **172**, 237-244.
- DÖRJES J. & HERTWECK G. (1975) - *Recent biocoenoses and ichnoconos in shallow-water marine environments*. In R.W. Frey (Ed.), *The study of trace fossils*. Springer Verlag, New York, 459-491.
- DOTT R.H. & BOURGEOIS J. (1982) - *Hummocky stratification: significance of its variable bedding sequences*. *Geol. Soc. of America Bull.*, **93**, 663-680, Boulder.
- DUKE W.L. (1985) - *Hummocky cross-stratification, tropical hurricanes, and intense winter storms*. *Sedimentology*, **32**, 167-194. Oxford.
- EMBRY A.F. & KLOVAN E.J. (1972) - *Absolute water depths limits of Late Devonian paleoecological zone*. *Geologische Rundschau*, **61** (2), Stuttgart.
- EKDALE A.A. (1985) - *Paleoecology of the marine endobenthos*. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, **50**, 63-81.
- FERUGLIO E. (1938) - *El Cretácico superior del Lago San Martín (Patagonia) y de las regiones adyacentes*. *Physis*, **12**, 293-342, Buenos Aires.
- FERUGLIO E. (1949-1950) - *Descripción geológica de la Patagonia*. Tomos I, II y III. Informes inéditos de Yacimientos Petrolíferos Fiscales.
- FOSSA MANCINI E., FERUGLIO E. & YUSSEN DE CAMPANA J.C. (1938) - *Una reunión de geólogos de Y.P.F y el problema de la terminología estratigráfica*. *Böletín de Informaciones Petroleras*, **171**, 31-95, Buenos Aires.

- FREY R.W., HOWARD J.D. & PRYOR W.A. (1978) - *Ophiomorpha: its morphologic, taxonomic, and environmental significance*. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., **23**, 199-229.
- FÜRSICH F.T. (1974) - *Ichnogenus Rhizocorallium*. Palaont. Zeitschr., **48**, 16-28.
- FÜRSICH F.T. & OSCHMANN W. (1993) - *Shell beds as tools in basin analysis: the Jurassic of Kachchh, western India*. Journ. of the Geol. Soc. London, **150**, 169-185.
- GALLOWAY W.E. (1989) - *Genetic stratigraphic sequence in a basin analysis. I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units*. AAPG Bulletin, **73**, 125-142.
- GOIN F.J., POIRÉ D.G., DE LA FUENTE M.S., CIONE A.L., CARLONI A., FERRER O., CANESSA D.N., RIBEIRO A.M. & SALES VIANA M.S. (2001) - *Paleontología y Geología de los sedimentos del Cretácico Superior aflorantes al sur del río Shuehuen (Mata Amarilla), Provincia de Santa Cruz, Argentina*. Congreso de Sedimentología Argentina, 96-105, El Calafate.
- GOLDRING R. (1995) - *Organisms and the substrate: response and effect*. In D.W.J. Bosence & P.A. Allison (Eds.), Marine Paleoenvironmental Analysis from Fossils, Geological Society Special Publication, **83**, 151-180.
- HAQ B.U., HARDENBOL J. & VAIL P.R. (1988) - *Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea-level change*. In C.K. Wilgus, B.S. Hastings, H. Posamentier, J. Van Wagoner, C.A. Ross & C.G. Kendall (Eds.), Sea-level Changes: an integrated approach. The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, SEMP Special Publication No. **42**, 71-108, Tulsa.
- HARMS J.C., SOUTHARD J.B., SPEARING D.R. & WALKER R.G. (1975) - *Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences*. Soc. Econ. Paleont. Mineral., Tulsa, Short Course N° **2**, 161 pp., Tulsa.
- KIDWELL S.M. (1991a) - *Significance of molluscan shell beds in sequence stratigraphy: an example from the Lower Cretaceous Manville Group of Canada*. Sedimentology, **38**, 913-934.
- KIDWELL S.M. (1991b) - *The stratigraphy of shell concentrations*. In P.A. Allison & D.E.G. Briggs (Eds.), Taphonomy: releasing the data locked in the fossil record. Plenum Press, 211-289. New York.
- KRAEMER P.E. (1993) - *Perfil estructural de la Cordillera Patagónica Austral a los 50° L.S, Santa Cruz. XII Congreso Geológico Argentino y Congreso de Exploración de Hidrocarburos III*, 119-125.
- KREISA R.D. (1981) - *Storm-generated sedimentary structures in subtidal marine facies with examples from the middle and upper Ordovician in southwestern Virginia*. Journ. of Sediment. Petrol., **51** (3), 823-848, Amsterdam.
- LEANZA A.F. (1970) - *Ammonites nuevos o poco conocidos del Aptiano, Albiano y Cenomaniano de los Andes Australes, con notas acerca de su posición estratigráfica*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **25**, 197-261.
- LEANZA A.F. (1972) - *Andes Patagónicos Australes*. In A.F. Leanza (Ed.), Primer Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 689-706.
- LECKIE D. (1988) - *Wave-formed, coarse-grained ripples and their relationship to hummocky cross-stratification*. Journ. of Sediment. Petrol., **58** (4), 607-622, Tulsa.
- LECKIE D.A. & SINGH C. (1991) - *Estuarine deposits of the Albian Paddy Member (Peace River Formation) and lowermost Shaftesbury Formation, Alberta, Canada*. Journal of Sedimentary Petrology, **61**, 825-849.
- LOWE D.R. (1982) - *Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents*. Journal of Sedimentary Petrology, **52**, 279-297, Tulsa.
- MYROW P.M. & SOUTHARD J.B. (1996) - *Tempestite deposition*. Journ. Sedim. Res., **66** (5), 875-887, Tulsa.
- MONACO P. (1992) - *Hummocky cross-stratified deposits and turbidites in some sequences of the Umbria-Marche area (central Italy) during the Toarcian*. Sedimentary Geology, **77**, 123-142. Amsterdam.
- MONACO P. (1994) - *Hummocky cross-stratifications and trace fossils in the Middle Toarcian of some sequences of Umbria-Marche Apennines*. Geobios, M.S., **17**, 679-688, Villeurbanne.
- MONACO P. (2000) - *Biological and physical agents of shell concentrations of Lithiotis facies enhanced by microstratigraphy and taphonomy, Early Jurassic, Gray limestones Formation, Trento area (Northern Italy)*. In R.L. Hall & P. Smith (Eds.), Advances in Jurassic Research 2000, GeoResearch Forum vol. **6** (2000), Trans Tech Publ., Switzerland, 473-486.
- MONACO P. (2000b) - *Decapod burrows (Thalassinoides, Ophiomorpha) and crustacean remains in the Calcarei Grigi, lower Jurassic, Trento platform (Italy)*. 1<sup>st</sup> Workshop on Mesozoic and Tertiary decapod crustaceans, Studi e Ricerche, Associazione Amici del Museo Civico «G. Zannato» Montecchio Maggiore (Vicenza), October 6-8, 2000, pp. 55-57.
- MONACO P. (2002) - *Tiered ichnoassemblages in Jurassic tempestites from Apennines and Southern Alps*. Boll. Soc. Geol. It., Volume speciale n° 1 (2002), 613-618, Roma.
- MONACO P. & GARASSINO A. (2001) - *Burrowing and body fossil of decapod crustaceans in the Calcarei Grigi, Lower Jurassic, Trento platform (Italy)*. Geobios, **34** (3), 291-301.
- MONACO P. & GIANNETTI A. (2001) - *Stratigrafia tafonomica nel Lias Medio dei Calcarei Grigi della Piattaforma di Trento*. Atti Ticinensi di Scienze della Terra, **42**, 175-209, Pavia.
- MONACO P. & GIANNETTI A. (2002) - *Three-dimensional burrow systems and taphofacies in shallowing-upwards parasequences, lower jurassic carbonate platform (Calcarei Grigi, Southern Alps)*. Facies, **47**, 57-82, Erlangen.
- MUTTI E., TINTERRI R., DI BIASE D., FAVA L. & MAVILLA N. (2001) - *Asociaciones de facies de frente deltaico en sistemas fluvio-deltaicos fósiles dominados por avenidas fluviales*. Boletín de Informaciones Petroleras, **65**, 18-44.
- MYERS A.C. (1972) - *Tube-worm-sediment relationships of Diopatra cuprea (Polychaeta: Onuphidae)*. Marine Biology, **17**, 350-354.
- NULLO F.E., PROSERPIO C.A. & BLASCO G. (1981) - *El Cretácico de la Cuenca Austral entre el lago San Martín y Río Turbio*. Comité Sudamericano del Jurásico y Cretácico. Cuenca sedimentarias del Jurásico y Cretácico de América del Sur, **1**, 181-220, Buenos Aires.
- NULLO F.E., PANZA J.L. & BLASCO G. (1999) - *Jurásico y Cretácico de la Cuenca Austral*. In R. Caminos (Ed.), Geología Argentina. Subsecretaría de Minería de la Nación-Servicio Geológico Minero Argentino, 528-535, Buenos Aires.
- PLAZIAT J.C. & MAHMOUDI M. (1988) - *Trace fossils attributed to burrowing echinoids: a revision including new ichnogenus and ichnospecies*. Geobios, **21** (2), 209-233.
- POIRÉ D.G. (1993) - *Trazas fósiles en ambientes marinos*. In R.N. Melchor (Ed.), Nuevas tendencias en el estudio de trazas fósiles. Primera Reunión Argentina de Ichnología, Notas del Curso, 75-92.
- POIRÉ D.G., CARLONI A., CANESSA N.D. & FERRER O. (2001) - *Características ichnológicas de la Formación Piedra Clavada (Cretácico), Tres Lagos, Cuenca Austral, Argentina*. IV Reunión Argentina de Ichnología y Segunda Reunión de Ichnología del Mercosur, Resúmenes, **65**, San Miguel de Tucumán.
- PRAVE A.R., DUKE W.L. & SLATTERY W. (1996) - *A depositional model for storm- and tide-influenced prograding siliciclastic shorelines from the Middle Devonian of the central Appalachian foreland basin, USA*. Sedimentology, **43**, 611-629.
- RAMOS V.A. (1982) - *Geología de la región del lago Cardiel, provincia de Santa Cruz*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, **37** (1), 23-49.
- READING H.G. (1986) - *Sedimentary environments and facies*, Blackwell Scientific Publication, Oxford, pp. 615.
- READING H.G. & COLLINSON J.D. (1996) - *Clastic coast*. In H.G. Reading (Ed.), Sedimentary Environments: processes, facies and stratigraphy. Blackwell Scientific Publication, 232-280. Oxford.
- RICCARDI A. (1971) - *Estratigrafía en el oriente de la bahía de La Lancha, Lago San Martín, Santa Cruz, Argentina*. Revista Museo de La Plata 7 (geología), **61**, 245-318.
- RICCARDI A.C. & ROLLERI E.O. (1980) - *Cordillera Patagónica Austral*. In J.C. Turner (Ed.) Segundo Simposio de Geología Regional Argentina, 1163-1306, Córdoba.
- RUSSO A. & FLORES M.A. (1972) - *Patagonia Austral extra-andina*. In A.F. Leanza (Ed.), Primer Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 707-725.
- RUSSO A., FLORES M.A. & DI BENEDETTO H. (1980) - *Patagonia Austral Extrandina*. In J.C. Turner (Ed.), Segundo simposio de

- Geologia Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, 1431-1501.
- SCHWARZ E. (1999) - *Facies sedimentarias y modelo deposicional de la Formación Mulichinco (Valanginiano), Cuenca Neuquina Septentrional*. Asociación Argentina de Sedimentología, AAS Revista, **6** (1-2), 37-59.
- SEILACHER A. (1953) - *Studien zur Palichnologie. I. Über die Methoden der Palichnologie*. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, **96**, 421-452.
- SEILACHER A. (1964) - *Biogenic sedimentary structures*. In J. Imbrie & W. Newell (Eds.), *Approches to paleoecology*, Wiley & Sons, 296-316, New York.
- SHINN E.A. (1983) - *Tidal flat environment*. In P.A. Scholle, D.G. Bebout & C.H. Moore (eds.), *Carbonate depositional environment*, AAPG, Mem., **33**, 171-210, Tulsa.
- SNEDDEN J.W., NUMMEDAL D. & AMOS A.F. (1988) - *Storm- and fair-weather combined flow on the central Texas continental shelf*. Journ. of Sediment. Petr., **58** (4), 580-595, Tulsa.
- SPALLETTI L.A. (1996) - *Geology of Siliciclastic Shelf Seas: Estuarine and shallow-marine sedimentation in the Upper Cretaceous-Lower Tertiary west-central Patagonian Basin (Argentina)*. Geological Society, Special Publication, **117**, 81-93.
- STERREN A.F. (2000) - *Moluscos bivalvos en la Formación Río del Penón (Carbonífero Tardío-Permico Temprano), provincia de La Rioja, Argentina*. Rev. Asoc. Paleontologica Argentina, Ameghiana, **37** (4), 421-438.
- SWIFT D.J.P., FIGUEIREDO JR. A.G., FREELAND G.L. & OERTEL G.F. (1983) - *Hummocky cross-stratification and megaripples: a geological double standard?* Journ. of Sedim. Petrol., **53** (4), 1295-1317, Tulsa.
- THIES D. (1989) - *Sinneslinien bei dem Knochenfisch *Lepidotes elvensis* (Blainville, 1981) (Actinopterygii, Semionotiformes) aus dem Oberlias (Unter-Toarcium) von Grimmen in der DDR*. Neues Jahrbuch für Geologie und Paleontologie, Abhandlungen, **11**, 692-704.
- UCHMAN A. (1998) - *Taxonomy and ethology of flysch trace fossils: revision of the Marian Książkiewicz collection and studies of complementary material*. Annales Societatis Geologorum Poloniae, **68**, 105-218.
- UCHMAN A. & WETZEL A. (1999) - *An aberrant, helicoidal trace fossil *Chondrites Sternberg**. Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol., **146**, 165-169.
- VAIL P.R. & POSAMENTIER H.W. (1988) - *Principles of sequence stratigraphy*. In D.P. James & D.A. Leckie (Eds.), *Sequence, Stratigraphy, Sedimentology: Surface and Subsurface*. Mem., Can. Society of Petrology Geology, **15**, 572-580.
- VAIL P.R. (1977) - *Seismic stratigraphy and global change of sea level*. In C.E. Payton (Ed.), *Seismic stratigraphy. Application to hydrocarbon exploration*, AAPG Mem., **26**, 49-212.
- VAN WAGONER J.C., POSAMENTIER H.W., MITCHUM R.M., VAIL P.R., SARG J.F. & LOUTIT T.S. (1988) - *An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions*. Econ. Paleontology, Mineralogy, Spec. Publ., **42**, 39-45.
- WALKER R.G. (1979) - *Shallow marine sands*. In R.G. Walker (Ed.), *Facies Models*, Geosc. Canada, Ainsworth Press, Reprint Ser., **1**, 75-89. Kitchener, Ontario.