

Avaliação do potencial gerador de petróleo e interpretação paleoambiental com base em biomarcadores e isótopos estáveis de carbono da seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior (Jurássico Inferior) da região de Peniche (Bacia Lusitânica, Portugal)

Oil generation potential assessment and paleoenvironmental interpretation based on biomarkers and stable carbon isotopes of the Pliensbachian – lower Toarcian (Lower Jurassic) of the Peniche region (Lusitanian Basin, Portugal)

Luiz Carlos Veiga de Oliveira | René Rodrigues | Luis Vitor Duarte | Valesca Brasil Lemos

resumo

A Bacia Lusitânica (Portugal) localiza-se na borda oeste da Placa Ibérica, abarcando uma espessura sedimentar máxima de aproximadamente 5 km. Apesar de apresentar evidências de sistemas petrolíferos, e cerca de uma centena de poços perfurados, o seu potencial gerador ainda não foi totalmente avaliado. Os sedimentos foram depositados entre o Neotriássico e o final do Cretáceo, principalmente durante o Jurássico. O Jurássico Inferior está bem representado na Bacia Lusitânica, sendo a seção de Peniche uma das áreas mais destacadas por apresentar cerca de 450 m de margas e calcários depositados entre o Sinemuriano e o Toarciano. O presente estudo aborda a avaliação do potencial gerador da seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior de Peniche, abrangendo as formações Vale das Fontes, Lemedé e Cabo Carvoeiro (membros CC 1 e 2), com base em 233 amostras de rocha onde foram realizadas análises de carbono orgânico total (COT), pirólise *Rock-Eval* e biomarcadores. Para as interpretações paleoambientais também foram utilizados dados de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^{13}\text{C}$. O Membro Margo-calcários com níveis betuminosos (Mcnb), da Formação Vale das Fontes, apresenta os maiores valores de COT, atingindo 14,95%, correspondendo às zonas de amonites *ibex* (parte superior), *davoei* e *margaritatus* e parte das biozonas de nanofósseis NJ4a e NJ4b (Pliensbaquiano). Este membro também possui alto potencial gerador (S_2 : 10 a 50 mgHC/g rocha) e valores regulares de índice de hidrogênio (IH: 200 a 555 mgHC/g COT) em uma seção termicamente imatura (T_{max} com cerca de 430°C).

A relação IH x IO revela que o querogênio predominante, na parte da seção onde os valores de COT são mais elevados, é do tipo II. A boa correlação positiva entre valores de COT e as relações de biomarcadores P/nC₁₇ e esteranos (C₂₇/C₂₉), ao longo do Membro Mcnb, sugere gradativo aumento de anoxia e maior contribuição de algas em relação a vegetais terrestres. Geralmente, as variações de $\delta^{18}\text{O}$ verificadas nas bacias da Península Ibérica têm sido explicadas como sendo relacionadas a mudanças na temperatura. Este trabalho apresenta uma interpretação alternativa, correlacionando as alterações de $\delta^{18}\text{O}$ com dados de biomarcadores para indicar variações de salinidade. Assim, a presença de gamacerano nos membros margas e calcários com *Uptonia* e *Pentacrinus* (Mcup) e membros margas e calcários grumosos (Mcg), associada ao aumento de valores de $\delta^{18}\text{O}$ indicariam ambiente com salinidade acima dos níveis normais. Além disso, o aumento da proporção dos moretanos em direção à superfície de inundação máxima (SIM) (posicionada na excursão positiva de $\delta^{13}\text{C}$ na parte superior do Membro Mcnb – zona de amonites *margaritatus* e biozona de nanofósseis NJ4b), associada à ausência de gamacerano, sugere o declínio gradativo da salinidade. A presença de gamaceranos na porção superior do Membro Mcnb, com a diminuição da proporção de moretanos e aumento da razão Ts/Tm, parece indicar novo ciclo de aumento de salinidade.

(originais recebidos em 14.07.2006)

Palavras-chave: Bacia Lusitânica | rochas geradoras | potencial gerador | Jurássico | isótopos de carbono

abstract

The Lusitanian Basin (Portugal) is located on the western margin of the Iberian Plate with maximum sedimentary thickness around 5 km. In spite of containing promising petroleum systems and more than a hundred wells, its hydrocarbon generation potential has not been fully evaluated yet. These sediments range from upper Triassic to upper Cretaceous, mainly from the Jurassic age. The Lower Jurassic is particularly well represented in the Lusitanian Basin, specifically in the Peniche region, where there are more than 450 m thick outcrops of carbonate rocks aged between Sinemurian and Toarcian. This study presents the evaluation of the hydrocarbon generation potential of the Pliensbachian – lower Toarcian of the Peniche section; which includes the Vale das Fontes Formation, Lemedé Formation and Cabo Carvoeiro Formation (CC 1 and CC 2 members) based on 233 rock samples analyzed for total organic carbon (TOC), Rock-Eval pyrolysis and biomarkers. Available data of oxygen and carbon stable isotopes were also used in the paleoenvironmental interpretation. Marls and limestones with the bituminous facies (Mlbf) of the Vale das Fontes Formation, present the highest TOC values, up to 14.95%, corresponding to the *ibex* (upper part), *davoei* and *margaritatus ammonites* zones and part of the NJ4a and NJ4b nannofossil biozones (Pliensbachian). In thermally immature sections (T_{max} about 430°C), this member also shows high S_2 values (10 to 50 mgHC/g rock) and Hydrogen index (HI: 200 to 555 mgHC/g TOC). The correlation between HI x OI shows that type II kerogen is predominant in the portion of the section where TOC values are higher. The good positive correlation between TOC values and the biomarkers ratio P/nC_{17} and steranes (C_{27}/C_{29}) throughout the Mlbf Member suggests a gradual increase of anoxia and higher contribution of algae in relation to terrestrial organic matter. Usually $\delta^{18}O$ variations observed in the basins of the Iberian Peninsula have been explained by temperature changes. This work proposes an alternative interpretation, by correlating $\delta^{18}O$ alterations with data on biomarkers to indicate salinity variations. Thus, the presence of gammacerane in the marls and limestones with *Uptonia* and *Pentacrinus* (Mlup) and lumpy marls and limestones (Lml), associated to the increase of $\delta^{18}O$ values would indicate an environment with salinity above normal levels. In addition to this, the increase of moretanes rates towards the

maximum flooding (MF) interval - which is located in the $\delta^{13}C$ positive excursion in the upper part of the Mlbf Member - *margaritatus ammonites* zone and NJ4b nannofossil biozone - associated with the absence of gammacerane, suggests gradual salinity reduction. The presence of gammaceranes at the uppermost part of the Mlbf Member, with the moretanes rate reduction and the increase of Ts/Tm values seems to indicate a new cycle of increasing salinity.

(expanded abstract available at the end of the paper)

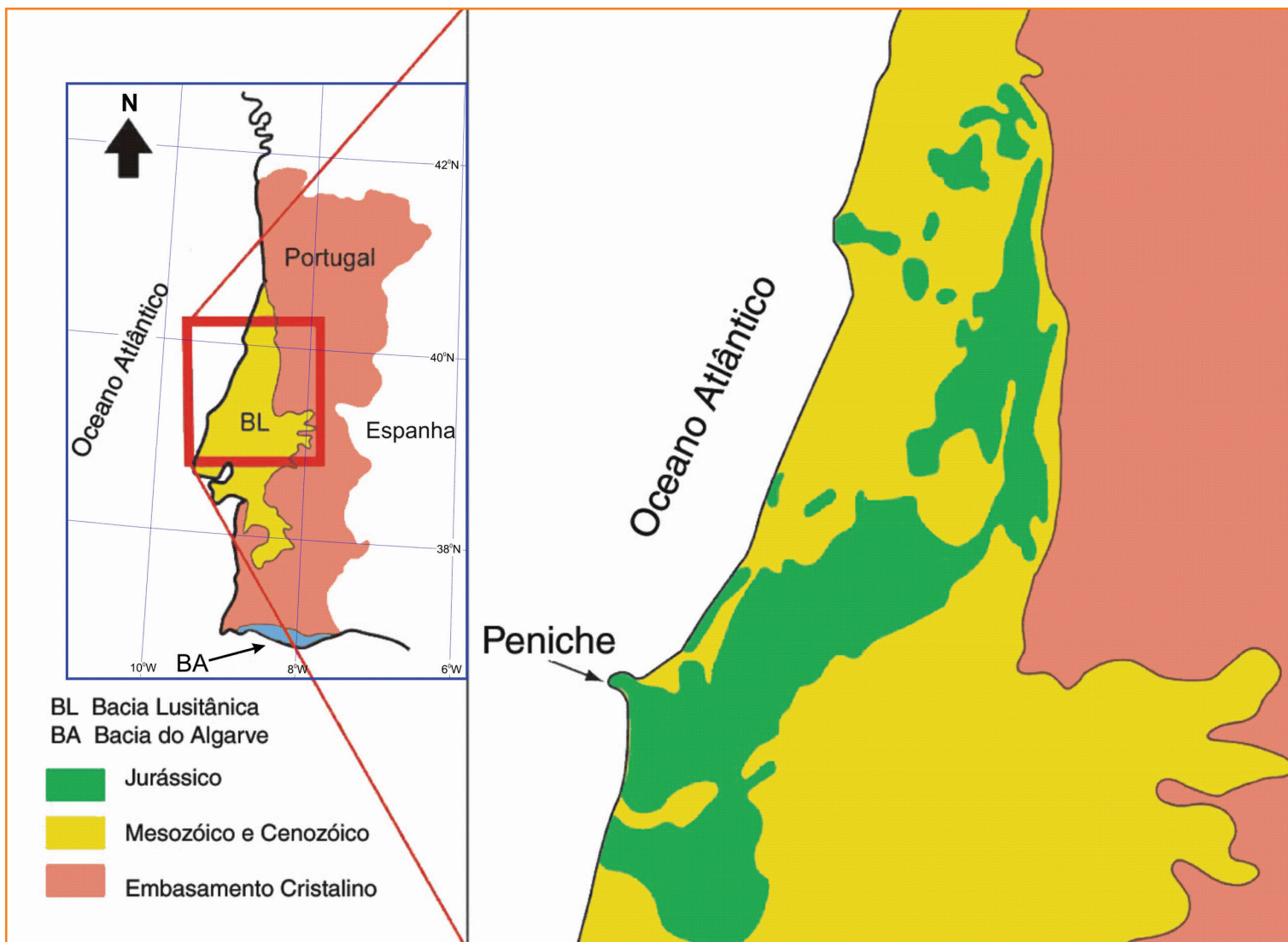
Keywords: Lusitanian Basin | source rocks | source potential | Jurassic | carbon isotopes

introdução

A Bacia Lusitânica, em Portugal (fig. 1), localizada na borda oeste da Placa Ibérica, pertence a um conjunto de bacias oceânicas marginais atlânticas que teve sua formação iniciada durante a fase rifte que ocorreu no final do Triássico (Boillot *et al.* 1979; Mauffret *et al.* 1989; Ribeiro *et al.* 1979; Soares *et al.* 1993; Vanney e Mougenot, 1981; Wilson, 1975). A sua orientação é NE-SW, com cerca de 300 km de comprimento e 150 km de largura, incluindo-se a parte submersa, com espessura sedimentar máxima de 5 km. Tais sedimentos foram depositados entre o Neotriássico e o Neocretáceo, com cobertura do Terciário, sendo o maior volume sedimentar de idade jurássica (Ribeiro *et al.* 1979; Wilson, 1988; Azerêdo *et al.* 2003).

Apesar de apresentar promissores sistemas petrolíferos, o potencial da bacia não foi explorado em sua totalidade. Já foram perfurados 102 poços, sendo 57 de campanhas anteriores a 1963. Outros 46 tiveram objetivos rasos, não ultrapassando 600 metros de profundidade, enquanto 47 não alcançaram o Jurássico Médio (Uphoff, 2005).

A referência mais antiga a hidrocarbonetos em Portugal data de 1844, com a extração de asfalto na mina do Canto d’Azeche, no setor



ocidental da Bacia Lusitânica. De 1938 a 1968, no âmbito de um alvará para a pesquisa de hidrocarbonetos, foram obtidos 3 200 km de linhas sísmicas, na maioria mono-canal (GEOLOGIA..., 2006).

Dias (2005) registra que os primeiros contratos de concessão para exploração na Plataforma Continental da Bacia Lusitânica foram constituídos em 1973, sendo que, nesta etapa de permissões que perdurou até 1979, realizaram-se 14 perfurações *offshore* com profundidade variando entre 2 500 e 4 000 m. Neste mesmo período, adquiriram-se mais de 20 000 km de linhas sísmicas marinhas. Este mesmo autor menciona que, do início da década de oitenta até 2005, foram perfurados 11 poços no mar, além de efetuadas mais de 4 000 km de linhas

sísmicas na plataforma continental rasa e 2 000 km em terra.

Tradicionalmente, os intervalos estratigráficos apontados como prováveis portadores de rochas geradoras na Bacia Lusitânica abrangem o Sinemuriano - Pliensbaquiano (Jurássico Inferior), Oxfordiano (Jurássico Superior) e o Cretáceo Superior. O potencial gerador das rochas do Kimeridgiano inferior também é apontado por alguns autores, entre eles Silva (2003). Uphoff (2005) indica uma nova possibilidade de prospecto exploratório (pré-Jurássico), com rochas geradoras do Siluriano (8% de carbono orgânico total - COT), reservatórios do Triássico e capeadoras do Jurássico.

Análises geoquímicas de amostras da região sul da Bacia Lusitânica (Torres Vedras – Montale-

Figura 1

Mapa de localização da Bacia Lusitânica.

Figure 1

Lusitanian Basin location map.

gre), em rochas da Formação Cabaços (Oxfordiano), revelaram espessuras de rocha geradora entre 20 e 110 m com valores de COT de até 3% e com níveis de maturação variando entre imaturos a senis (GEOLOGIA..., 2006).

Dias (2005) avaliou o COT de 13 poços perfurados em terra, cujas profundidades finais variaram entre 576 e 2 947 m, em cerca de 60 amostras representativas do Sinemuriano ao Caloviano, Oxfordiano – Kimeridgiano e Cenomaniano – Turoniano. O valor de COT mais elevado encontrado por este autor foi 4,12% em amostras da Formação Cabaços. Também verificou que as formações Cabaços e Montejunto (ambas do Oxfordiano) apresentam valores com média superior a 0,5% considerando-as, desta forma, como as de maior potencial para a geração de petróleo.

No que concerne ao Jurássico Inferior, Duarte *et al.* (2005) apontam que no setor ocidental da bacia ocorrem elevados valores de COT em sedimentos depositados durante o Eosinemuriano na Formação Água de Madeiros (zona de amonites *raricostatum*) e no Pliensbaquiano, Formação Vale das Fontes (zonas de amonites *jamesoni* a *margaritatus*), atingindo valores máximos de, respectivamente, 10% e 15%. Também foi verificado por Duarte *et al.* (2005) que sedimentos da Formação Cabo Carvoeiro e do equivalente lateral Formação São Gião (Toarciano inferior, zona de amonites *levisoni*) possuem um enriquecimento local de COT que chega a 3%. Silva *et al.* (2006) estudaram, em específico, a distribuição de COT na Formação Vale das Fontes no setor norte da bacia e verificaram que o seu membro superior (margo-calcários com níveis betuminosos – Mcnb) possui os níveis mais ricos de matéria orgânica do Eojurássico da bacia, alcançando valores de 10%.

O presente estudo foi realizado nas formações Vale das Fontes, Lemed e Cabo Carvoeiro (membros Cabo Carvoeiro 1 e 2) da seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior de Peniche. Foram levantados, detalhadamente, os teores do carbono orgânico total (COT) e realizadas análises de pirólise *Rock-Eval* e biomarcadores. Para as interpretações paleoambientais também foram utilizados os dados de isótopos estáveis de oxigênio

($\delta^{18}\text{O}$) e carbono ($\delta^{13}\text{C}$) obtidos por Oliveira (no prelo) em rocha total. O zoneamento de amonites utilizado para as correlações foi baseado nos trabalhos de Mouterde (1955), Phelps (1985), Elmi *et al.* (1989) e Rocha *et al.* (1996). O arcabouço de nanofósseis foi realizado por Oliveira *et al.* (2006).

estratigrafia de Peniche

O Jurássico Inferior está particularmente bem representado na Bacia Lusitânica, por vários afloramentos de grande relevância geológica (Duarte, 1997, 2004; Duarte e Soares, 2002; Azerêdo, *et al.* 2003; Duarte *et al.* 2004). Entre eles, a região de Peniche constitui uma das seções mais importantes (Duarte 2004, 2005) devido à boa exposição das séries margo-calcárias e à continuidade da sucessão sedimentar, com mais de 450 m de espessura, distribuída entre o Sinemuriano e o Toarciano (Mouterde, 1955; Wright e Wilson, 1984; Duarte, 1995, 2003, 2004, 2005; Duarte *et al.* 2004). Prova da sua grande importância é a indicação pela *International Subcommission on Jurassic Stratigraphy* da seção que abrange o limite Pliensbaquiano – Toarciano do perfil de Peniche (localidade da Ponta do Trovão), como candidato ao *GSSP (Global Stratotype Section and Point)* do Toarciano (Elmi *et al.* 1996; Elmi, 2002; *Toarcian Working Group*, 2005).

Na figura 2 são apresentadas as unidades litostratigráficas definidas para a região por Duarte e Soares (2002) e na figura 3 pode ser observada coluna estratigráfica esquemática da seção de Peniche. A Formação Coimbra é de idade sinemuriana, sendo composta, principalmente, por calcários bioclásticos. A Formação Água de Madeiros, de idade neosinemuriana – eopliensbaquiana (?) (fig. 4), é subdividida em dois membros: o Membro Polvoeira, composto por alternância de margas e de calcários margosos associados a vários espécimes de echioceratídeos, e o Membro Praia de Pedra Lisa, constituído predominantemente por calcários intercalados com margas milimétricas a centimétricas.

A Formação Vale das Fontes (Pliensbaquiano) (fig. 5) é composta por três membros. O membro

Cronoestratigrafia		Biozonas de Amonites	Duarte & Soares (2002)					
			Generalidade da Bacia		Peniche / S. Pedro de Moel			
JURÁSSICO	MÉDIO (=DOGGER)	AALENIANO	Opalinum	Calcários de Póvoa da Lomba		Fm. do Cabo Carvoeiro	Membro C. Carvoeiro 5	
	INFERIOR (= LIAS)	TOARCIANO	Superior	Aalensis	Fm. de S. Gião		Margas e margas calcárias com braquiópodes	Membro C. Carvoeiro 4
				Meneghini			Margas e calcários margosos com bioconstruções de espongiários	
			Speciosum	Gradata	Margas e calcários margosos com <i>Hildaïtes</i> e <i>Hildoceras</i>		Membro C. Carvoeiro 3	
			Bonarellii	Bifrons	C. nodul. em plaquetas		Membro C. Carvoeiro 2	
		Médio	Levisoni	Margo-calcários com fauna de <i>Leptaena</i>	Membro C. Carvoeiro 1			
		Inferior	Polymorphum	Formação de Lemedo				
		PLIENSAQUIANO	Domeriano	Spinatum	Fm. de Vale das Fontes	Fm. de Vale das Fontes	Margo-calcários com fácies betuminosas	Margo-calcários com níveis betuminosos
	Margaritatus			Margas e calcários grumosos			Margas e calcários grumosos	
	Davoei		Margas e calcários com <i>Uptonia</i> e <i>Pentacrinus</i>	Margas e calcários com <i>Uptonia</i> e <i>Pentacrinus</i>				
	Carixiano	Ibex	Jamesoni	Fm. de Coimbra	Fm. de Água de Madeiros	Camadas de S. Miguel	Mb. Praia Pedra Lisa	
							Raricostatum	Camadas de Coimbra s.s.
SINEMURIANO	Superior (Lotaringiano)	Oxynotum	Fm. de Coimbra	Fm. de Água de Madeiros	Camadas de Coimbra s.s.	Membro de Polvoeira		
	Inferior	Obtusum						

Figura 2

Unidades litoestratigráficas propostas por Duarte e Soares (2002) para o Jurássico inferior da Bacia Lusitânica.

Figure 2

The lithostratigraphic units proposed by Duarte and Soares (2002) for the lower Jurassic of the Lusitanian Basin.

inferior, margas e calcários com *Uptonia* e *Pentacrinus* (Mcup) (fig. 6), é formado por sucessões rítmicas de margas e calcários argilosos, com a presença de deformações sinsedimentares. O membro intermediário, margas e calcários grumosos (Mcg), é composto por margas, margas calcárias e calcários grumosos (*lumpy limestones*). Os denominados grumos são concreções nodulares subangulosas, centimétricas, com intraclastos de cor cas-

tanho escura e recristalizações microesféricas, espículas de espongiários silicosos e moluscos. O membro superior da Formação Vale das Fontes, margo-calcários com níveis betuminosos (Mcnb) (figs. 7 e 8), é formado por margas laminadas cinzentas, por vezes limoníticas, alternadas com calcários argilosos. Para Duarte e Soares (2002), esta unidade corresponde a uma fase de aprofundamento da bacia, com o desenvolvimento de condições anóxicas.

Figura 3

Coluna estratigráfica esquemática da seção de Peniche (Duarte et al. 2004)

Figure 3

Schematic stratigraphy of the Peniche section (Duarte et al. 2004).

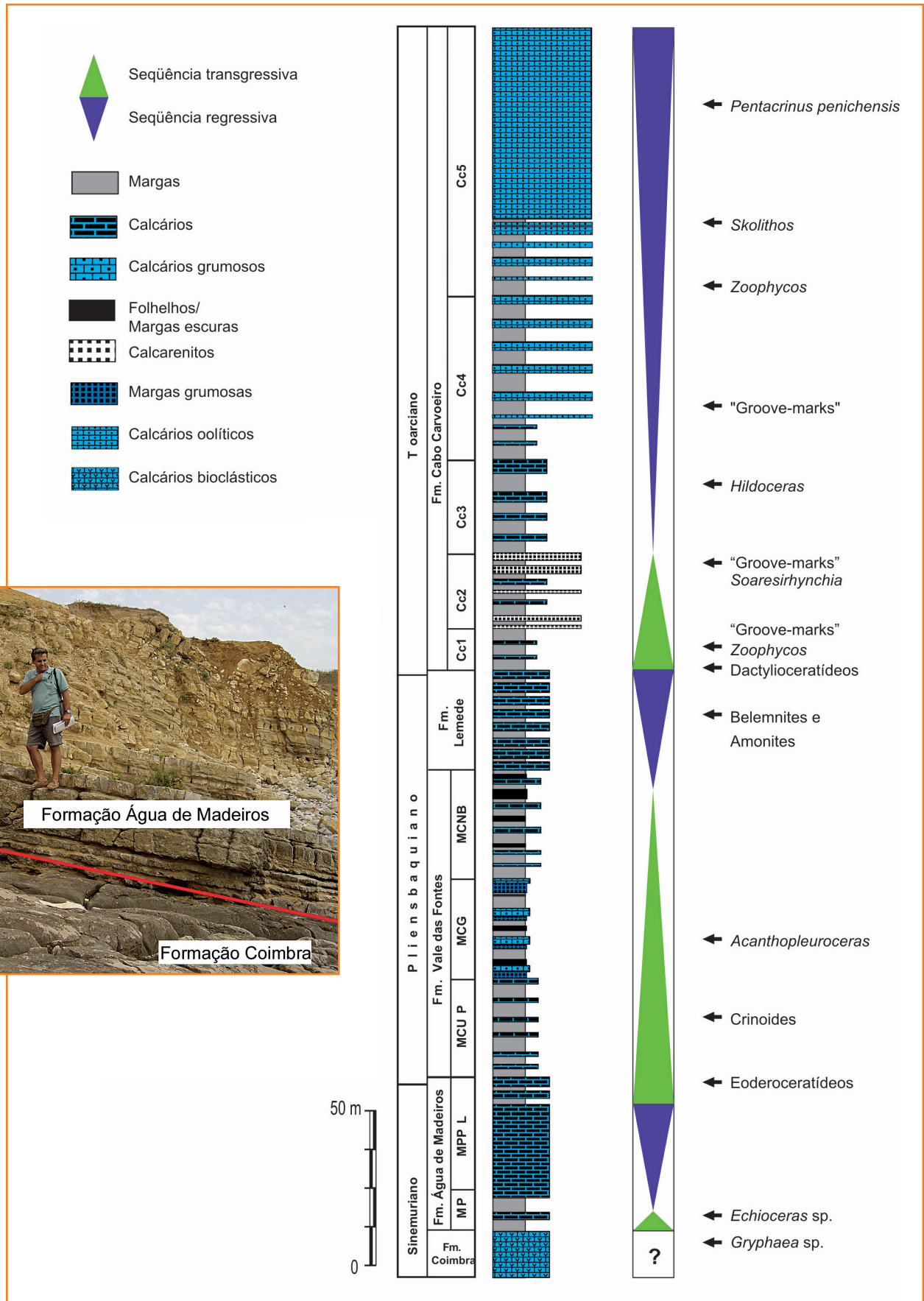
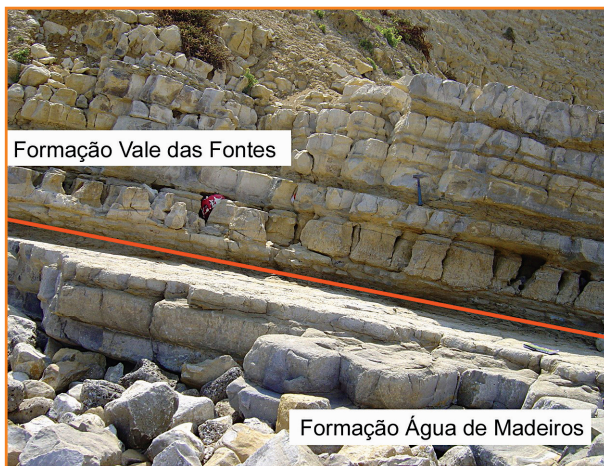


Figura 4

Limite entre as formações Coimbra e Água de Madeiros.

Figure 4

Boundary between Coimbra Formation and Água de Madeiros Formation.



Formação Vale das Fontes

Formação Água de Madeiros

Figura 5 – Limite entre as formações Água de Madeiros e Vale das Fontes.

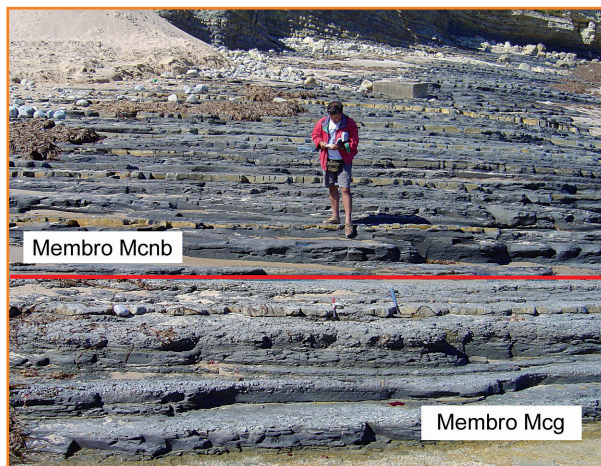
Figure 5 – Boundary between Água de Madeiros Formation and Vale das Fontes Formation.



Figura 6 – Detalhe do membro margas e calcários com *Uptonia* e *Pentacrinus* (Mcup). Presença de belemnites e crinóides.

Figure 6 – Detail of marls and limestones member with *Uptonia* and *Pentacrinus* (Mlup). Presence of belemnites and crinoids.

A Formação Lemedé depositou-se durante o Neoplensbaquiano e o Eotoarciano (figs. 9 e 10). É composta por calcários margosos e micríticos decimétricos, alternados com margas calcárias cinzentas centimétricas. É rica em fósseis, com a presença de amonites, belemnites, braquiópodes e bivalvos.



Membro Mcnb

Membro Mcg

Figura 7

Vista geral do membro margo-calcários com níveis betuminosos (Mcnb) e limite com o membro margas e calcários grumosos (Mcg).

Figure 7

General view of marls and limestones with bituminous facies Member (Mlbf) and boundary with lumpy marls and limestones Member (Lml).



Figura 8

Detalhe da camada de folhelho escuro limonítico com concreções de pirita do Membro Mcnb.

Figure 8

Detail of the limonitic black shales with pyrite concretions of the Mlbf Member.



Formação Lemedé

Figura 9 – Vista geral da Formação Lemedé.

Figure 9 – General view of Lemedé Formation.

Figura 10

Detalhe da Formação Lemedé com belemnites.

Figure 10

Detail of Lemedé Formation with belemnites.



Figura 11

Vista Geral do Membro Cabo Carvoeiro 1 (CC 1).

Figure 11

General view of Cabo Carvoeiro 1 Member (CC 1).



Figura 12 – Detalhe de camada arenosa no Membro Cabo Carvoeiro 2 (CC 2).

Figure 12 – Detail of sandy layer in the Cabo Carvoeiro 2 Member (CC 2).

A Formação Cabo Carvoeiro ocorre exclusivamente em Peniche, sendo subdividida em cinco membros: O Membro Cabo Carvoeiro 1 (CC 1) (fig. 11) é formado por margas cinzentas, decimétricas, localmente micáceas e laminadas, alternadas com calcários margosos centimétricos (biomicritos argilosos/*wackestones*), que foram depositados durante o Eotoarciano (zona *polymorphum*). O Membro Cabo Carvoeiro 2 (CC 2) é composto por margas cinzentas, localmente betuminosas, siltosas e arenosas; calcários margosos, micríticos e arenosos; arenitos e conglomerados subarcoseanos com cimento calcário (Duarte e Soares, 2002) (fig. 12). Apresenta localmente fragmentos de matéria orgânica de origem continental (fig. 13). Esta unidade correlaciona-se com a base da zona de amonites *levisoni*. No Membro Cabo Carvoeiro 3 (CC 3) (fig. 14), a base é formada por calcários margosos, finamente quartzosos e micáceos que se alternam com margas cinzentas decimétricas. Para o topo registra-se o domínio de calcários, tendência que se evidencia nos membros Cabo Carvoeiro 4 (CC 4) e Cabo Carvoeiro 5 (CC 5) por meio de calcários oolíticos, bioclásticos e siliciclásticos.



Figura 13 – Detalhe da matéria orgânica de origem continental no Membro CC 2. Caneta de escala com 15 cm.

Figure 13 – Detail of the terrigenous organic-matter in the CC 2 Member. Scale pen with 15 cm.

métodos

Análises geoquímicas foram realizadas em 233 amostras coletadas ao longo de cerca de 143 m da seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior de Peniche. Em todas as amostras foram mensuradas o Carbono Orgânico Total (COT), procedendo-se, nas 84 amostras que apresentaram COT acima de 0,6%, análises de pirólise *Rock-Eval* (tabela 1). Dez dessas amostras tiveram os biomarcadores avaliados (tabela 2).



Cota (cm)	COT	IH	IO	S ₁	S ₂	S ₃	TMax	RI	unidade
12608	0.63	31.74603	138.0952	0.21	0.2	0.87	443	60	CC 2
12488	2.6	327.6924	35	0.35	8.52	0.91	427	38	CC 2
12447	0.97	77.31959	67.01031	0.24	0.75	0.65	430	84	CC 2
12301	1.18	102.5424	72.03391	0.34	1.21	0.85	431	72	CC 2
11810	0.66	37.87879	89.39393	0.15	0.25	0.59	435	77	CC 2
11690	0.6	30.50848	67.79662	0.12	0.18	0.4	433	73	CC 2
11354	0.79	64.55695	50.63291	0.14	0.51	0.4	431	48	CC 1
11305	0.62	54.83871	72.58064	0.08	0.34	0.45	434	46	CC 1
11087	0.73	41.09589	134.2466	0.32	0.3	0.98	435	38	CC 1
10750	0.64	101.5625	65.625	1.09	0.65	0.42	485	52	CC 1
10650	0.62	100	80.64516	1.27	0.62	0.5	488	40	CC 1
10585	0.81	46.91358	120.9877	0.3	0.38	0.98	433	60	CC 1
10176	0.663	55.80694	354.4495	0.01	0.37	2.35	433	46	Lemedede
9733	1.11	116.2162	134.2342	0.11	1.29	1.49	435	42	Lemedede
9208	2.8	0.7142857	51.42857	0.08	0.02	1.44	440	24	Lemedede
8194	0.74	64.86486	174.3243	0.1	0.48	1.29	432	40	Lemedede
7998	0.65	56.92308	153.8462	0.1	0.37	1	427	48	Lemedede
7589	0.79	56.96202	188.6076	0.09	0.45	1.49	433	46	Lemedede
7538	0.65	36.92308	126.1539	0.1	0.24	0.82	432	44	Mcnb
7528	0.69	36.23188	233.3333	0.09	0.25	1.61	435	48	Mcnb
7518	1.09	74.31192	159.633	0.14	0.81	1.74	427	62	Mcnb
7481	2.03	197.537	63.05419	0.18	4.01	1.28	435	54	Mcnb
7455	1.26	117.4603	96.03175	0.15	1.48	1.21	430	54	Mcnb
7440	1.56	192.9487	64.10257	0.21	3.01	1	430	50	Mcnb
7342	1.18	106.7797	54.23729	0.04	1.26	0.64	431	53	Mcnb

continua/continues

Figura 14

Vista geral dos afloramentos de Peniche. Em primeiro plano o Membro Cabo Carvoeiro 3 (CC 3).

Figure 14

The full view of the Peniche outcrops. Cabo Carvoeiro 3 Member (CC 3) on the foreground.

Tabela 1

Resultados de COT (carbono orgânico total) e pirólise *Rock-Eval* nas amostras com COT > 0,6% na seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior de Peniche (cotas em relação à base de seção medida).

Table 1

TOC and *Rock-Eval* pyrolysis results of the samples with TOC > 0.6% in the Pliensbachian – lower Toarcian of Peniche section (height in relation to the base of the measured section).

Cota (cm)	COT	IH	IO	S₁	S₂	S₃	TMax	RI	unidade
7212	2.662	210.7438	29.67694	0.07	5.61	0.79	427	53	Mcnb
7187	13.08	279.2813	59.021141	0.79	36.53	7.72	431	47	Mcnb
7179	5.03	427.6342	22.46521	0.47	21.51	1.13	424	50	Mcnb
7149	2.96	290.8784	66.21622	0.29	8.61	1.96	427	60	Mcnb
7022	5.71	465.8494	28.89667	0.55	26.6	1.65	423	62	Mcnb
6974	5.24	250.7634	39.12214	0.19	13.14	2.05	432	47	Mcnb
6904	2.96	158.4459	42.90541	0.14	4.69	1.27	432	61	Mcnb
6887	2.86	319.9301	55.94406	0.26	9.15	1.6	431	68	Mcnb
6578	7.98	555.2632	21.17795	0.73	44.31	1.69	424	54	Mcnb
6560	9.69	452.2188	22.91022	0.49	43.82	2.22	424	48	Mcnb
6496	0.72	59.72222	251.3889	0.13	0.43	1.81	424	58	Mcnb
6194	1.16	68.96552	109.4828	0.1	0.8	1.27	432	51	Mcnb
6153	0.79	69.62025	243.038	0.13	0.55	1.92	427	61	Mcnb
6134	3.19	401.5674	21.94357	0.37	12.81	0.7	417	52	Mcnb
6124	14.95	300.3344	43.47826	0.8	44.9	6.5	429	50	Mcnb
6111	9.6	185.9375	65.3125	0.26	17.85	6.27	435	48	Mcnb
6095	13.4	376.8657	30.59702	1.2	50.5	4.1	429	56	Mcnb
5930	1.02	58.82353	133.3333	0.15	0.6	1.36	430	48	Mcnb
5784	0.66	42.42424	146.9697	0.14	0.28	0.97	428	44	Mcnb
5624	0.99	52.52525	90.90909	0.13	0.52	0.9	434	68	Mcnb
5526	0.91	71.42857	138.4615	0.11	0.65	1.26	428	62	Mcnb
5484	2.1	284.2857	58.09524	0.18	5.97	1.22	435	42	Mcnb
5412	2.44	257.377	57.37704	0.23	6.28	1.4	429	50	Mcnb
5144	0.75	52	164	0.11	0.39	1.23	429	48	Mcnb
5070	12.22	353.7643	33.63339	0.78	43.23	4.11	432	63	Mcnb
5067	3.47	284.1498	37.46397	0.32	9.86	1.3	435	56	Mcnb
5061	1.28	117.9688	89.84375	0.13	1.51	1.15	435	44	Mcnb
5044	3.41	331.3783	58.94428	0.08	11.3	2.01	426	47	Mcnb
4940	5.74	479.4425	21.08014	0.39	27.52	1.21	432	56	Mcnb
4826	1.23	80.48781	93.49593	0.14	0.99	1.15	432	64	Mcnb
4774	0.99	70.70707	171.7172	0.1	0.7	1.7	433	78	Mcnb
4706	1.03	23.30097	227.1845	0.09	0.24	2.34	433	52	Mcnb
4607	0.6	21.66667	275	0.08	0.13	1.65	430	68	Mcg
4576	0.61	16.39344	344.2623	0.08	0.1	2.1	429	58	Mcg
4552	0.62	40.32258	280.6451	0.43	0.25	1.74	466	48	Mcg
4484	0.86	51.16279	212.7907	0.18	0.44	1.83	429	48	Mcg
4466	0.81	56.79013	256.7901	0.09	0.46	2.08	435	50	Mcg
4446	0.77	40.25974	254.5455	0.27	0.31	1.96	455	60	Mcg
4276	1.2	85.83333	144.1667	0.52	1.03	1.73	432	50	Mcg
4171	1.79	172.6257	49.16201	0.67	3.09	0.88	431	44	Mcg
4076	3.64	123.6264	103.2967	0.42	4.5	3.76	439	40	Mcg
4033	0.78	42.3077	233.3333	0.33	0.33	1.82	443	46	Mcg

continua/continues

Cota (cm)	COT	IH	IO	S ₁	S ₂	S ₃	TMax	RI	unidade
3971	0.86	53.48837	94.18604	0.5	0.46	0.81	445	38	Mcg
3827	0.74	64.86486	228.3784	0.37	0.48	1.69	430	50	Mcg
3660	1.29	144.9612	151.938	0.76	1.87	1.96	431	46	Mcg
3577	0.84	60.71429	113.0952	0.92	0.51	0.95	497	36	Mcg
3489	0.9	60	164.4444	0.51	0.54	1.48	432	52	Mcg
3204	0.73	43.83561	220.5479	0.4	0.32	1.61	453	44	Mcg
3172	1.17	53.84616	129.0598	0.44	0.63	1.51	429	52	Mcg
3073	0.87	52.87357	204.5977	0.34	0.46	1.78	429	46	Mcg
3028	1.07	93.45794	127.1028	0.56	1	1.36	432	44	Mcg
2873	0.7	64.28571	118.5714	0.47	0.45	0.83	442	36	Mcg
1865	0.92	58.69566	133.6956	0.11	0.54	1.23	434	52	Mcup
1805	0.79	121.519	134.1772	0.14	0.96	1.06	430	40	Mcup
1774	1.04	93.26923	137.5	0.09	0.97	1.43	434	40	Mcup
1713	0.96	103.125	127.0833	0.11	0.99	1.22	433	40	Mcup
1681	0.86	118.6046	141.8605	0.14	1.02	1.22	432	48	Mcup
892	0.64	115.625	217.1875	0.1	0.74	1.39	430	52	Mcup
718	0.59	100	284.7458	0.12	0.59	1.68	428	42	Mcup

carbono orgânico total (COT) e resíduo insolúvel (RI)

As amostras foram pulverizadas, em geral de ágata, em partículas menores do que 0,18 mm de diâmetro – controlado pela peneira de 80 mesh. Para eliminação dos carbonatos, aproximadamente 0,250 g de amostra foi submetida a ácido clorídrico a quente por cerca de uma hora. O RI assim obtido é expresso em porcentagem (%), em relação à quantidade original da amostra. O COT foi determinado no equipamento Leco-SC444, do Laboratório de Geoquímica do Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes), e expresso em porcentagem de peso em relação à amostra original. A calibração do equipamento foi realizada com amostra-padrão após conjuntos de dez análises.

pirólise rock-eval

Nestas análises foram adotados, basicamente, os procedimentos analíticos de Espitalié *et al.* (1977). Para cada amostra, cerca de 100 mg de sedimento pulverizado em geral de ágata, em par-

tículas menores do que 0,18 mm de diâmetro – controlado pela peneira de 80 mesh – foram aquecidos no no pirolisador *Rock-Eval* do Laboratório de Geoquímica do Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes). O aquecimento foi realizado em atmosfera inerte, entre 200 e 550°C, utilizando o gás hélio como carreador. Os hidrocarbonetos e o CO₂ liberados foram medidos, respectivamente, por detectores de ionização de chama e de condutividade térmica. Os resultados foram expressos em mg de hidrocarbonetos (HC)/grama de rocha ou miligrama de CO₂/grama de rocha. Os resultados obtidos oferecem os seguintes parâmetros: hidrocarbonetos liberados até 350°C correspondem ao pico S₁, representando os hidrocarbonetos livres na rocha; o pico S₂ representa os hidrocarbonetos produzidos pelo craqueamento térmico do querogênio entre 350 e 550°C, ou seja, os hidrocarbonetos ainda não gerados naturalmente. O dióxido de carbono liberado entre 250 e 390°C representa a quantidade de oxigênio presente no querogênio (pico S₃). O valor de Tmax corresponde à temperatura em que ocorre a altura máxima do pico S₂. O índice de hidrogênio (IH = S₂/COT x 100) é expresso em miligramas de hidrocarbonetos (HC)/gramas de carbono orgâni-

Cota (m)	Unidade	HOP/EST	P/F	P/nC ₁₇	nC ₁₇ /nC ₂₅	TRI 23/21	TETRA/C ₃₀	Ts/Tm C ₃₀	Tm/17β/C ₃₀	C ₂₇ /C ₂₉ /C ₃₀	HOP 29βα/29αβ
124.88	CC2	4.33	3.23	3.64	1.75	0.58	0.06	0.02	1.01	0.18	0.84
72.12	Mcnb	1.7	3.22	0.89	1.39	1.69	0.09	0.27	0.4	0.07	0.63
70.22	Mcnb	1.69	1.93	2.22	1.3	1.2	0.09	0.17	0.59	0.15	0.52
65.78	Mcnb	2.85	2.54	3.02	1.4	1.06	0.06	0.09	0.66	0.2	0.6
65.60	Mcnb	2.71	3.56	4.83	1.77	0.75	0.05	0.06	0.74	0.23	0.65
54.84	Mcnb	5.55	3.58	2.82	1.11	1.12	0.08	0.07	0.71	0.15	0.64
54.12	Mcnb	2.9	3.22	2.76	2.63	0.66	0.08	0.04	0.87	0.19	0.64
49.4	Mcnb	5.7	2.84	3.82	1.34	0.67	0.06	0.03	0.73	0.39	0.65
40.76	Mcg	2.08	1.2	3.46	0.16	2.25	0.09	0.16	0.55	0.36	0.86
17.74	Mcup	5.61	1.58	1.81	1.24	1.25	0.14	0.14	0.76	0.11	0.75

Tabela 2

Resultados de biomarcadores em amostras selecionadas na seção Pliensbaquiiano – Toarciano inferior de Peniche. A altura dos picos nos cromatogramas e nos fragmentogramas m/z 191 e m/z 217 foram utilizados para a determinação das razões.

Table 2

Biomarker results in the select samples in the Pliensbachian – lower Toarcian of Peniche section. The height of the peaks in the chromatograms and the fragmentogram m/z 191 were used to determine biomarkers ratios.

LEGENDA

Hop/Est= razão C₃₀ (αβ)hopano/C₂₉ (αααR) esterano

P/F= razão Pristano/Fitano

P/nC₁₇= Pristano/alcano linear com 17 átomos de carbono

nC₁₇/nC₂₅= alcano linear com 17 átomos de carbono/ alcano linear com 25 átomos de carbono

TRI 23/21= terpanos tricíclicos C₂₃/C₂₁

TETRA/C₃₀= terpano tetracíclico C₂₄/C₃₀(αβ)hopano

Ts/Tm= C₂₇ (trisorneohopano/trisorhopano)

Tm/C₃₀= C₂₇ trisorhopano/ C₃₀(αβ)hopano

C₂₇(17β)/C₃₀= C₂₇(17β) trisorhopano/ C₃₀(αβ)hopano

HOP C₂₉/C₂₀= C₂₉(αβ) norhopano/ C₃₀(αβ)hopano

HOP 29βα/29βα= C₂₉ moretano/ C₂₉(αβ)norhopano

HOP 30αβ/30 αβ= C₃₀ moretano/ C₃₀(αβ) hopano

HOP 31/30= C₃₁ homohopano/ C₃₀(αβ) hopano

27Dia/27Est= C₂₇ diasterano/C₂₇ (αααR) esterano

EST 27/29= C₂₇ (αααR) esterano/ C₂₉ (αααR) esterano

EST 28/29= C₂₈ (αααR) esterano/ C₂₉ (αααR) esterano

TRI/PENTA= Terpano tricíclico C₂₃/ C₃₀(αβ) hopano

G/C₃₀= Gamacerano/ C₃₀(αβ) hopano

COT= carbono orgânico total

RI= resíduo insolúvel

S₂= potencial gerador

IH= índice de hidrogênio

co total (COT). O índice de oxigênio (IO = S₃/COT x 100) é expresso em miligramas de CO₂/gramas de carbono orgânico total (COT). Durante o período das análises, o equipamento foi calibrado diariamente com padrões e a cada dez amostras analisadas, procedeu-se à repetição de uma amostra.

biomarcadores

O betume das amostras foi obtido por extração em *soxhlet*, utilizando-se o diclorometano como solvente. O material obtido foi fracionado em alcanos, hidrocarbonetos aromáticos e resinas + asfaltenos, empregando-se uma coluna de vidro com uma fase sólida composta de sílica gel (1/3) e alumina (2/3). Os solventes empregados foram, respectivamente, hexano, uma mistura (1:1) de hexano-diclorometano e clorofórmio. Os alcanos foram analisados em cromatógrafo gasoso da marca Agilent, modelo 6890, acoplado a um detector de massas modelo 5973 Network, tendo sido monitorados os íons m/z 191, para os terpanos, e m/z 217, para os esteranos. As razões de abundância relativa foram calculadas, semiquantitativamente, a partir das alturas dos picos nos fragmentogramas e os dados das relações entre os biomarcadores são apresentados na tabela 2. Todas as análises de biomarcadores foram efetuadas no Laboratório de Geoquímica da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

HOP 30 β /30 $\alpha\beta$	HOP 31/30	HOP 27Est	27Dia/ 27/29	EST 28/29	EST PENTA	TRI/	G/C ₃₀	COT	RI	S ₂	IH
0.46	0.58	0.6	0.14	2.76	0.5	0.12	0	2.6	38	8.52	328
0.21	0.24	0.38	0.36	0.7	0.3	0.1	0.35	2.66	53	5.61	211
0.39	0.42	0.5	0.89	1.03	0.45	0.12	0	5.71	62	26.6	466
0.43	0.48	0.53	0.57	1.22	0.45	0.08	0	7.98	54	44.31	555
0.46	0.56	0.57	0.58	1.53	0.43	0.07	0	9.69	48	43.82	452
0.42	0.44	0.51	0.43	1.02	0.37	0.12	0	2.1	42	5.97	284
0.43	0.52	0.52	0.35	0.92	0.3	0.13	0	2.44	50	6.28	257
0.39	0.46	0.52	0.33	1.47	0.49	0.1	0	5.74	56	27.52	479
0.4	0.47	0.47	0.7	1.31	0.42	0.17	0.18	3.64	40	4.5	124
0.27	0.31	0.46	0.65	1	0.35	0.23	0.05	1.04	40	0.97	93

geoquímica orgânica

carbono orgânico

A quantidade de petróleo que pode ser gerada em uma bacia sedimentar é dependente do teor da matéria orgânica preservada. Valores maiores que 1% de COT, em folhelhos, são considerados como razoáveis alvos para a exploração e mais de 4% de COT teriam alto potencial. Em carbonatos, os teores necessários geralmente são menores, valores acima de 1% de COT já podem ser avaliados como de excelente potencial (Espitalié *et al.* 1977, 1985). Nas bacias sedimentares brasileiras, as ocorrências de óleo ou gás geralmente estão associadas a intervalos geradores com teores de COT superiores a 1,5%, sendo que, nas áreas mais prolíferas, o valor médio é sempre mais elevado que 2% (*e.g.*, Estrella *et al.* 1984; Gaglianone *et al.* 1987; Rodrigues, 1995).

Na Bacia do Amazonas, a Formação Barreirinhas apresenta folhelhos radioativos do Devoniano Superior com COT entre 1,56 e 7,78% (Rodrigues, 1973). Já na Bacia de Campos, os geradores da Formação Lagoa Feia têm COT entre 2 e 6% (Guardado *et al.* 2000). Na Bacia do Congo as Formações Bucomazi (Barremiano – Aptiano) e labe (Turoniano – Santoniano) possuem rochas com COT entre 2 e 10% (Cole *et al.* 2000). Na Bacia de Paris, as rochas geradoras do Toarciano

inferior possuem valores de até 6% (Espitalié *et al.* 1987). No Kuwait, as Formações Sulay (Tito-niano), Ratawi (Valengiano – Hauteriviano), Zubair (Barremiano) e Burgan (Albiano) apresentam, respectivamente, valores de COT de 2,68; 3,23; 3,03 e 3,4% (Abdullah e Kinghorn, 1996). Na Península Arábica, a Formação Hanifa (Kimeridiano) tem COT entre 1 e 6% (Droste, 1990), enquanto na Formação Diyab (Jurássico Superior) os valores oscilam entre 1,8 e 5,5% (Whittle e Alsharhan, 1996). Nos Estados Unidos, rochas do Devoniano Superior – Mississipiano possuem elevados valores, chegando a atingir 15,6% nos *New Albany Shales* da Bacia de Illinois (Barrows e Cluff, 1984; Chou e Dickerson, 1985) e 15% nos *Bakken Shales* da Bacia de Williston (Price *et al.* 1986). Entretanto, apenas altos valores de COT não significam, necessariamente, que a rocha em questão possa ser geradora de hidrocarbonetos. Isto também vai depender de outros fatores, como o tipo e a evolução térmica da matéria orgânica.

Na seção de Peniche, os valores de COT são bastante variáveis: a maioria está abaixo de 1%, mas chega a atingir 14,95% em sedimentos do Membro Mcnb da Formação Vale das Fontes (fig. 15). Esta unidade apresenta as mais altas anomalias da seção distribuídas por cerca de 25 m, com valores quase sempre acima de 2% (tabela 1). Três intervalos de maior enriquecimento se destacam no Membro Mcnb: o intervalo

inferior (correspondente, aproximadamente, ao topo da zona de amonites *ibex*/base de *davoei*, e parte da biozona de nanofósseis NJ4a) tem cerca de 4 m de espessura e máximos (COT) de 12,22%. A porção mediana, com aproximadamente 2 m, correlaciona-se com a porção basal da zona *margaritatus*, ainda na zona NJ4a, atingindo o máximo de COT registrado em Peniche: 14,95%. O intervalo superior tem cerca de 9 m de espessura, abrangendo vários níveis betumi-

nosos com máximo de 13,08% de COT, correlaciona-se com o topo da zona *margaritatus* e com a base da zona NJ4b de nanofósseis.

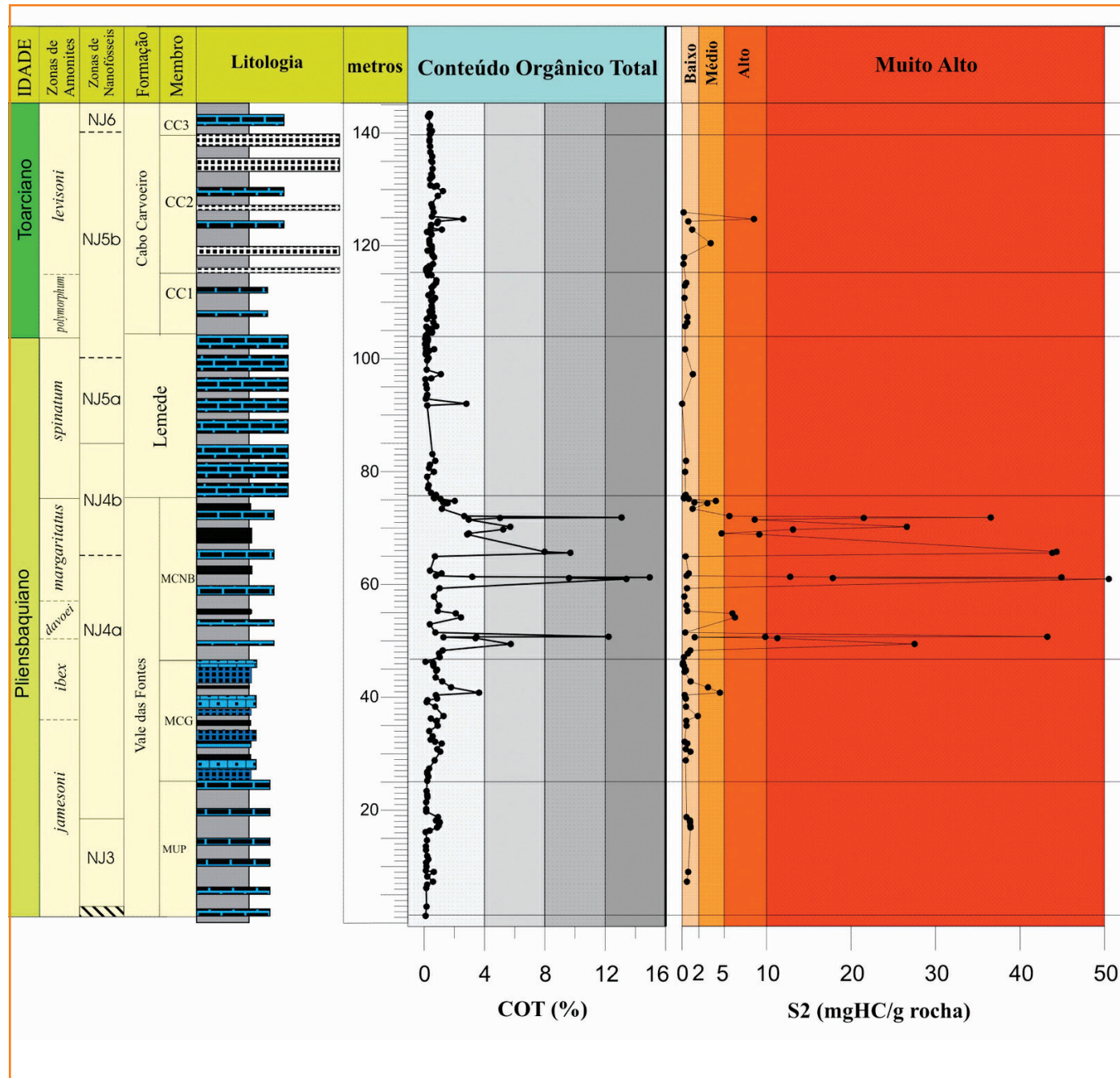
Também foram registrados alguns valores elevados isolados nas outras unidades: no Membro MCG constatou-se o valor de 3,64% na amostra 40,76 m (zona de amonites *ibex* e biozona de nanofósseis NJ4a); na Formação Lemedede, a única amostra destacável foi a de 92,08 m (zona de amonites *spinatum* e biozona de nanofósseis NJ5a)

Figura 15

Avaliação do potencial gerador da seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior de Peniche com base no COT, S₂, IH e Tmax. Zonas de amonites baseadas em Mouterde (1955); Phelps (1985); Elmi et al. (1989) e Rocha et al. (1996). Zonas de nanofósseis de Oliveira et al. (2006). Legenda das litologias na figura 3.

Figure 15

Hydrocarbon generation potential evaluation of the Pliensbachian – lower Toarcian Peniche section based on TOC, S₂, HI, Tmax. Ammonite zones based on Mouterde (1955); Phelps (1985); Elmi et al. (1989) e Rocha et al. (1996). Nannofossils zones from Oliveira et al. (2006). Legends of the lithologies in figure 3.



com 2,8% de COT e no Membro CC 2 da Formação Cabo Carvoeiro (Toarciano inferior), a amostra de 124,88 m registrou 2,6% de COT (zona de amonites *levisoni* e biozona de nanofósseis NJ5b).

pirólise

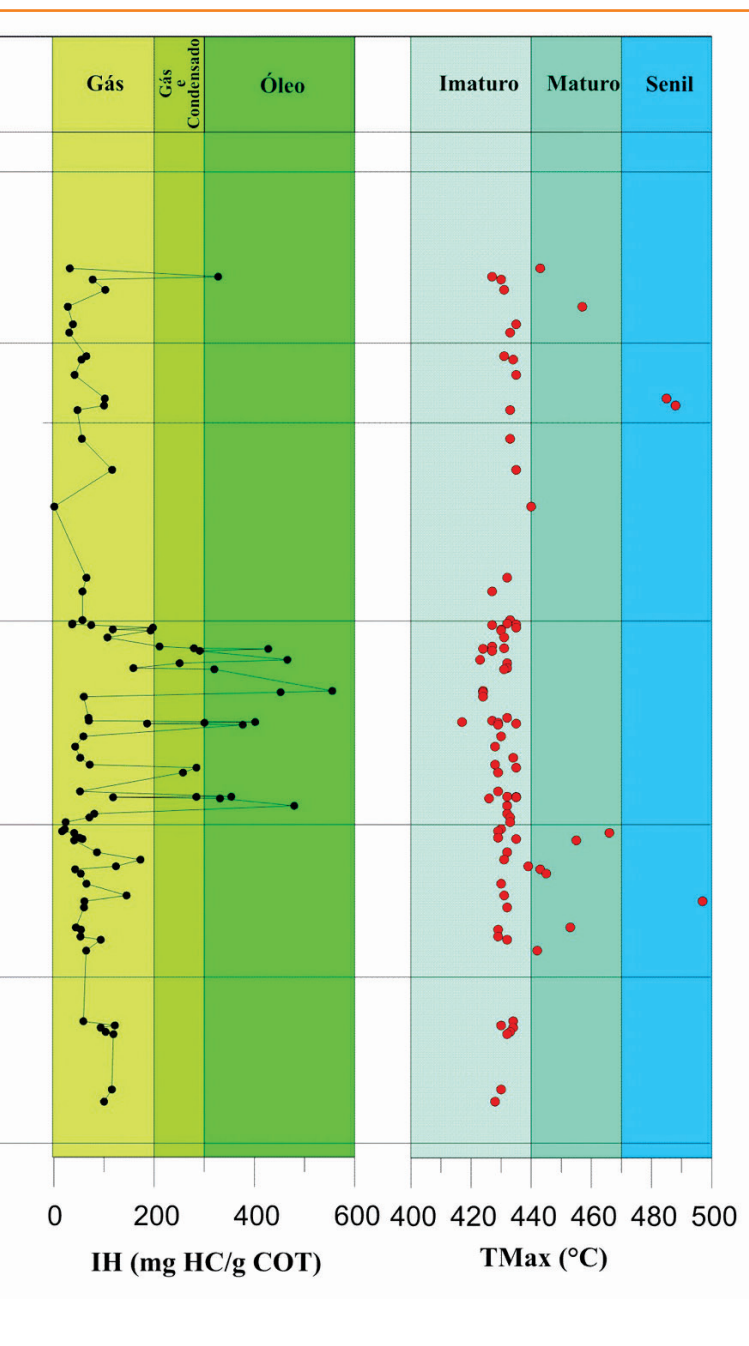
A análise de pirólise *Rock-Eval* revelou que, em muitas amostras do Mcnb, os valores de S_2

superaram os 10 mg HC/g rocha, acompanhados por teores de IH acima de 200 mgHC/g COT e Tmax abaixo de 440°C (fig. 15). Este padrão sugere que os cerca de 25 m de sedimentos do Membro Mcnb com COT elevado possui alto potencial gerador (com indicação para óleo, gás e condensado) e que, em termos de evolução térmica, a matéria orgânica presente é imatura. Nas demais unidades, os valores de S_2 raramente ultrapassaram os 2 mgHC/g rocha. No Membro CC 2 da Formação Cabo Carvoeiro, apenas a amostra 124,88 m (COT de 2,6%) apresentou alto potencial gerador (S_2 de 8,52 mgHC/g rocha), com IH de 327,7 mgHC/g COT e Tmax de 427°C.

Na figura 16 é apresentado o diagrama tipo Van Krevelen (IH versus IO) para a seção de Peniche, discriminados por unidades estratigráficas. Na Formação Vale das Fontes, o Membro Mcup tem querogênio do tipo III, característico de matéria orgânica terrestre ou marinha oxidada. O Membro Mcg também apresenta, predominantemente, querogênio do tipo III. O Membro Mcnb é, na sua maior parte, do tipo II, em diferentes estágios de preservação, provavelmente relacionada à matéria orgânica de origem marinha. A Formação Lemede e o Membro CC 1 da Formação Cabo Carvoeiro apresentaram as menores médias de IH (58,58 e 68,16 mgHC/g COT, respectivamente), significando possivelmente, matéria orgânica oxidada. O querogênio presente no Membro CC 2 também é do tipo III, com exceção da amostra 124,88 m que é do tipo II, parcialmente degradada.

biomarcadores

Os indicadores geoquímicos moleculares, que também são conhecidos como “fósseis químicos”, (Eglinton e Calvin, 1967) “marcadores biológicos” (Speers e Whitehead, 1969) e “biomarcadores” (Seifert e Moldowan, 1981) são amplamente utilizados para inferir o grau de maturação térmica, no entendimento dos processos da migração do óleo e para a correlação óleo-óleo e óleo-rocha geradora. Além disso, podem ser utilizados como elementos de diagnose e de interpretação geológica de ambientes sedimentares pretéritos.



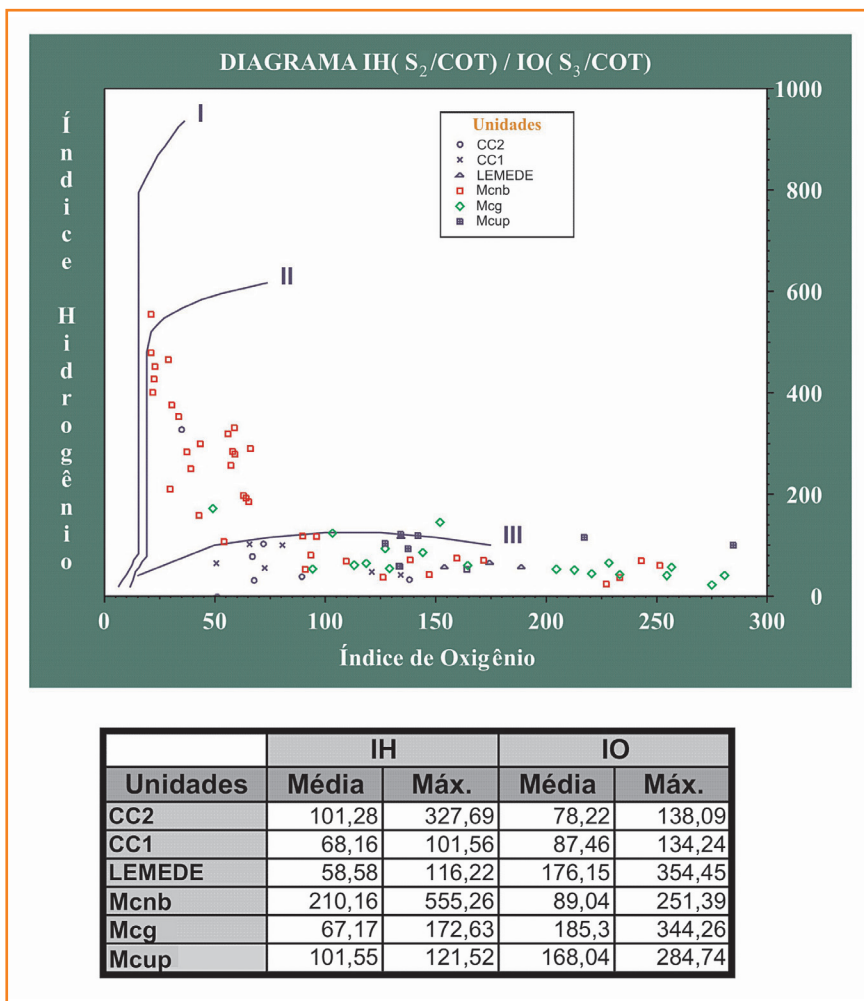


Figura 16
Diagrama tipo Van Krevelen (IH versus IO) para a seção Pliensbaquiano - Toarciano inferior de Peniche.

Figure 16
Van Krevelen type diagram (HI versus OI) for the Pliensbachian - lower Toarcian of Peniche section.

Biomarcadores são compostos orgânicos presentes na geosfera, cujas estruturas podem ser indubitavelmente relacionadas aos constituintes de algum tipo de organismo. Na geoquímica do petróleo, os mais estudados são n-alcenos, hidrocarbonetos isoprenóides, triterpanos, esteranos e seus respectivos compostos insaturados e aromáticos.

Para este estudo foram analisados biomarcadores em dez amostras, que estão listados na tabela 2 e exemplificados nos fragmentogramas da figura 17.

No Membro Mcnb, a análise de biomarcadores foi realizada nas amostras 49,4; 54,12; 54,84; 65,60; 65,78; 70,22 e 72,12 m (fig. 17a) que apresentam carbono orgânico total elevado: 5,74; 2,44; 2,1; 9,69; 7,98; 5,71 e 2,66%, respectivamente (tabela 2). Por corresponder à parte da seção com os valores médios mais elevados de carbono orgânico, realizaram-se mais análises para biomarcadores.

No Membro Mcg, a análise para biomarcadores foi realizada apenas na amostra 40,76 m (fig. 17b), que apresenta os teores de carbono orgânico mais elevados desta unidade (3,64%). Para tal unidade, os teores de carbono orgânico - normalmente baixos, inferiores ou ao redor de 1% e o fato da amostra com teor mais elevado apresentar um baixo valor do índice de hidrogênio (124 mgHC/g rocha) - constituem elementos indicativos da predominância de matéria orgânica pobre em hidrogênio e, provavelmente, de um ambiente de sedimentação inadequado à preservação da matéria orgânica.

No Membro Mcup, a análise de biomarcadores foi realizada apenas na amostra a 17,74 m (fig. 17c), cujo teor de carbono orgânico é de 1,04%. Neste membro, os teores são normalmente inferiores a 1%, indicando um ambiente de sedimentação inadequado à preservação da matéria orgânica, o que também é confirmado pelos valores do índice de hidrogênio inferiores a 100 mgHC/g rocha (fig. 18).

Semelhante ao indicado por Duarte *et al.* (2004) para toda a bacia, no Membro Mcnb registra-se o máximo transgressivo do Pliensbaquiano em Peniche, caracterizado por uma série de parasequências delimitadas por folhelhos e margas que apresentam altos valores de COT. A boa correlação dos dados de COT com o IH (valores de até 500 mgHC/g COT) sugere um ambiente de sedimentação onde ocorreram eventos que possibilitaram a preservação da matéria orgânica, considerando-se o fato de serem amostras termicamente pouco evoluídas, depositadas em ambiente marinho (figs. 18 e 19). Geralmente, em bacias sedimentares marinhas, os intervalos com melhor preservação da matéria orgânica possuem valores máximos de IH de cerca de 600 mgHC/g COT.

A boa correlação entre os dados de COT e as razões P/nC₁₇ e esteranos (C₂₇/C₂₉), no Membro Mcnb pode ser sugestiva, respectivamente, de maior anoxia e de aumento da contribuição de algas em relação ao aporte de matéria orgânica terrestre na composição do querogênio (Rodrigues, 1995) (figs. 20 e 21). Isto evidencia que a sedimentação rica em matéria orgânica ocorrida durante o Pliensbaquiano de Peniche tem seme-

lhanças com as das bacias setentrionais da Espanha. De fato, Borrego *et al.* (1996) ao estudarem a seqüência rítmica de margas e calcários do Pliensbaquiano das Astúrias também encontraram relação entre altos valores de COT e alta razão P/nC₁₇, na seção margosa correspondente: à parte final da zona de amonites *jamesoni*, ao limite entre as zonas *ibex* e *davoei* e, principalmente, à parte inicial da zona *margaritatus*. Para estes autores, tais intervalos ricos em matéria orgânica teriam sido depositados em ambiente com baixo nível de oxigênio dissolvido na coluna d'água e no substrato deposicional, onde a matéria orgânica foi preservada. Estas mesmas evidências foram detectadas por Quesada e Robles (1995) na Bacia Basco-Cantábrica.

No Membro CC 2 da Formação Cabo Carvoeiro, foi analisada apenas a amostra 124,88 m que possui 2,6% de COT (tabela 2). Por se tratar de amostra isolada, não é possível relacioná-la adequadamente com as demais e tecer interpretações mais detalhadas. Entretanto, os valores de biomarcadores obtidos são similares aos verificados no intervalo de inundação máxima do Membro Mcnb, podendo sugerir condições ambientais similares (figs. 18, 20 e 22).

LEGENDA

△ C₁₉ - C₂₄: Terpanos tricíclicos com 19 a 24 átomos de carbono

□ C₂₄: Terpano tetracíclico com 24 átomos de carbono

Ts: C₂₇ (18α) Trinorneohopano

Tm: C₂₇ (17α) Trinorhopano

C₂₉αβ: Norhopano

C₃₀ αβ: Hopano

C₂₉ βα: C₂₉ Moretano

C₃₀ βα: C₃₀ Moretano

C₃₁ βα: C₃₁ Moretano

C₃₁: Homohopano

C₃₂: Bishomohopano

C₃₃: Trishomohopano

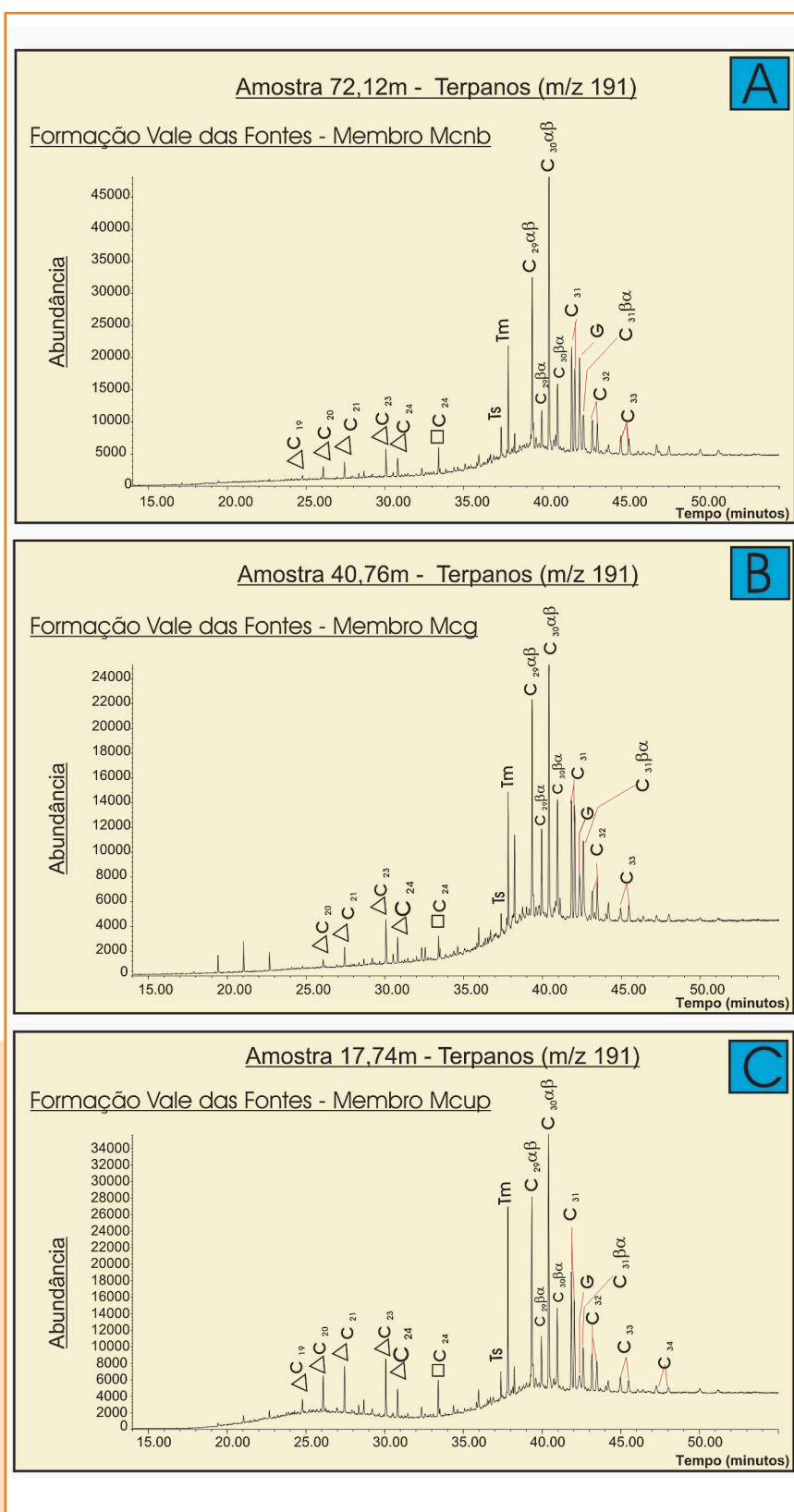


Figura 17 – Fragmentogramas das amostras com a identificação dos principais biomarcadores: a) 72,12 m (Mcnb); b) 40,76 m (Mcg); c) 17,74 m (Mcup).

Figure 17 – Fragmentograms of samples with the identification of the main biomarkers: a) 72.12 m (Mlbf); b) 40.76 m (Lml); c) 17.74 m (Mlup).

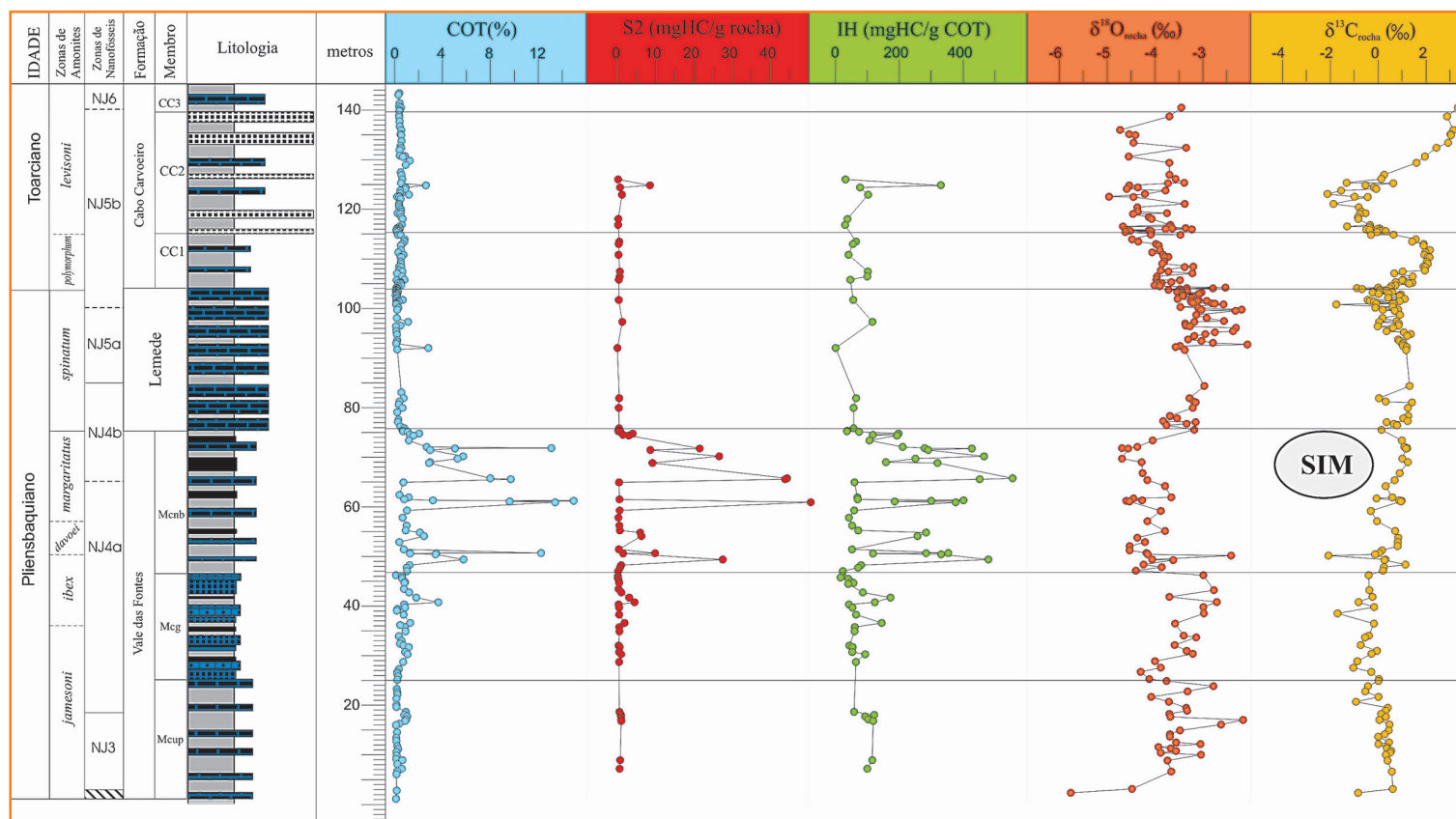


Figura 18

Curvas de distribuição do COT, S_2 , IH, $\delta^{18}O$ e $\delta^{13}C$ na seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior de Peniche. Legenda das litologias na figura 3.

Figure 18

TOC, S_2 , HI, $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ distribution curves in the Pliensbachian – lower Toarcian Peniche section. Legends of the lithologies in figure 3.

paleotemperatura x salinidade

As variações na composição isotópica do oxigênio dos carbonatos dependem tanto das mudanças de temperatura quanto das modificações na salinidade. A correlação com indicadores de salinidade, como alguns biomarcadores, pode auxiliar nas interpretações.

Rosales *et al.* (2004) interpretaram os dados de isótopos de oxigênio, obtidos em belemnites da Bacia Basco – Cantábrica, apenas em termos de paleotemperatura. Estes autores indicaram que o Eopliensbaquiano era caracterizado por águas oceânicas aquecidas, enquanto no Neopliensbaquiano as temperaturas eram mais frias. A mudança teria ocorrido ao equivalente à parte inferior da zona de amonites *margaritatus*. Rosales *et al.* (2004), indicam que, neste tempo, haveria uma conexão entre o mar de Tétis e o mar epicontinental boreal do norte da Europa. Por esta abertura, águas mais densas do Tétis teriam sido introduzidas nas bacias da Península Ibérica.

Oliveira *et al.* (2006) analisaram os isótopos de oxigênio em belemnites da seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior de Peniche e também interpretaram as suas variações com base em mudanças de temperatura. No Eopliensbaquiano, a temperatura da água do mar teria diminuído gradualmente (biozona de nanofósseis NJ3 e a parte inferior da NJ4a; zona de amonites *jamesoni*). Em seguida, ocorreu um período de aquecimento (NJ4a e NJ4b; na parte superior da zona *jamesoni* a porção inferior da zona *spinatum*) que coincidiria com um aumento nos valores de carbono orgânico total (COT), interpretado por Oliveira *et al.* (2006) como um período de elevação relativa do nível do mar e de alta produtividade orgânica. No Pliensbaquiano superior e no Toarciano inferior (NJ5a e a parte inferior da NJ5b; zonas *spinatum* a *polymorphum*), as variações nos valores isotópicos sugerem discreta tendência a menores temperaturas na parte superior da zona *spinatum* e leve subida de temperatura na parte inferior da zona *polymorphum*.

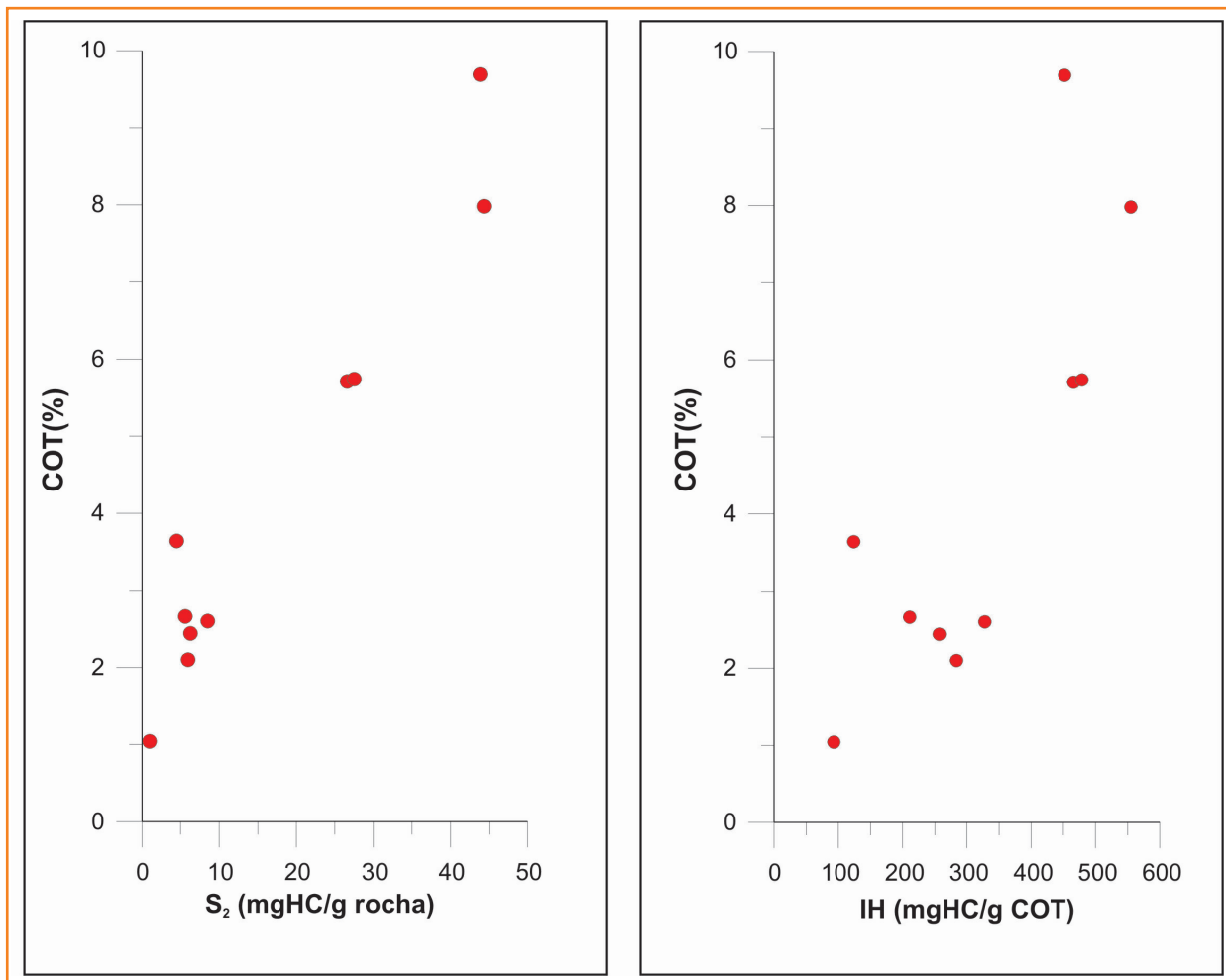


Figura 19
Correlações COT-S₂ e COT-IH nas dez amostras selecionadas para biomarcadores.

Figure 19
TOC-S₂ and TOC-IH correlations in the ten selected samples for the biomarkers.

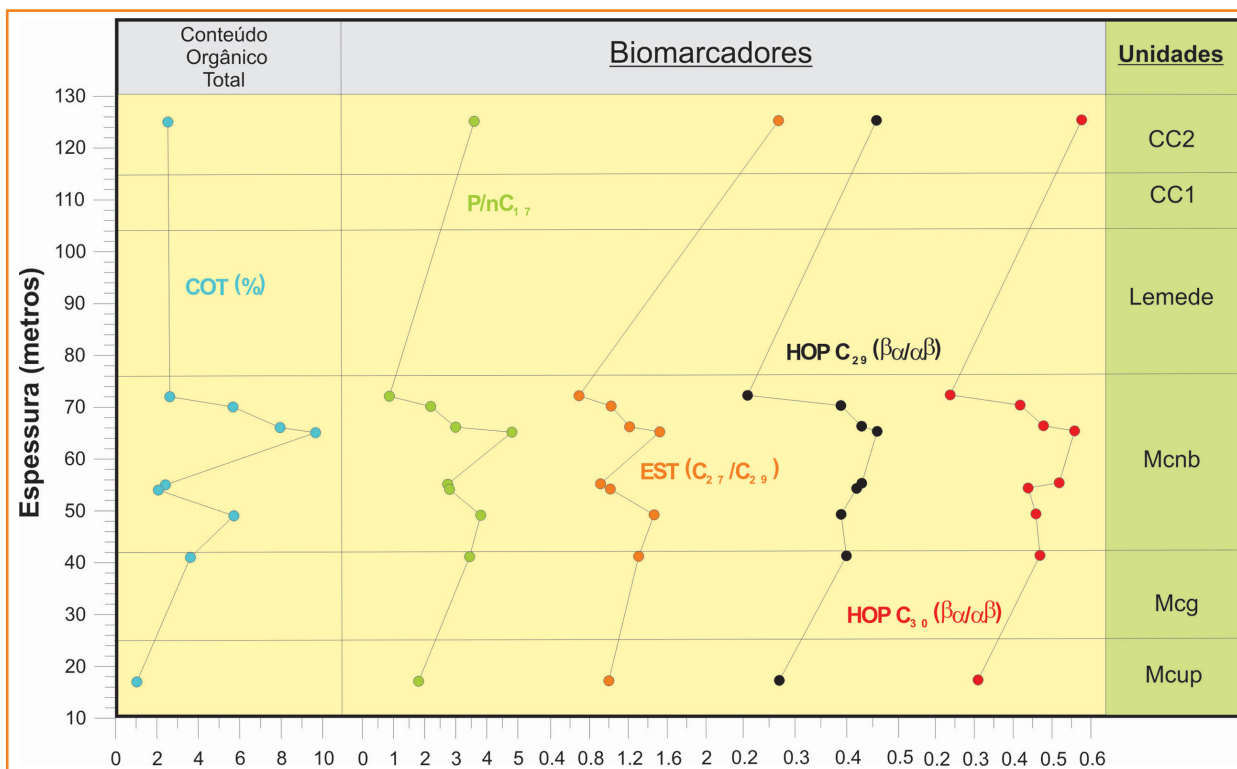


Figura 20
Curvas de distribuição dos biomarcadores P/nC₁₇, EST (C₂₇/C₂₉), HOP C₂₉ e HOP C₃₀ e suas correlações com o COT.

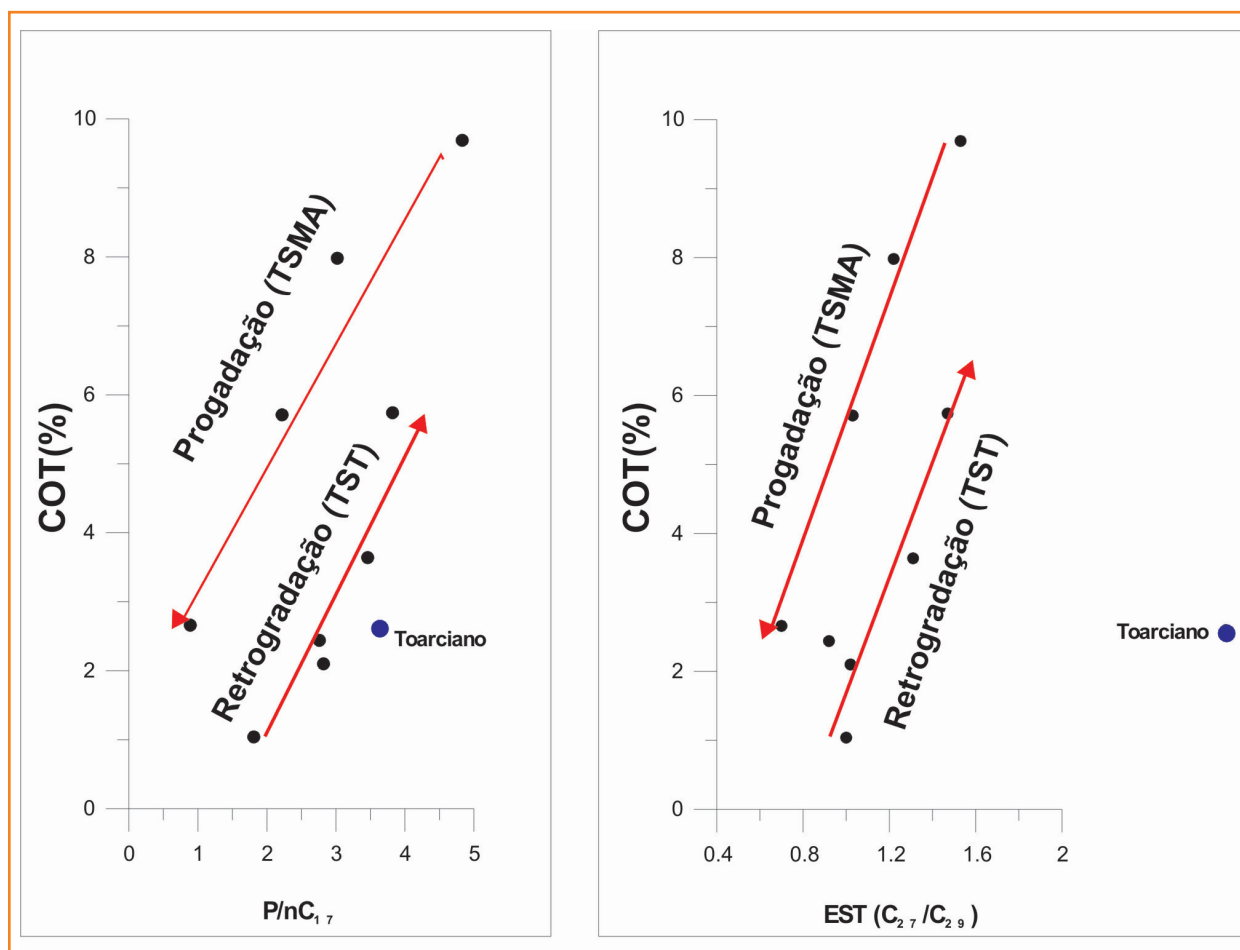
Figure 20
Distribution curves of the P/nC₁₇, EST (C₂₇/C₂₉), HOP C₂₉ and HOP C₃₀ biomarkers and their TOC correlations.

Figura 21

Correlações COT – P/nC₁₇ e COT – EST (C₂₇/C₂₉). Durante a retrogradação (TST) ocorre o aumento do COT e das relações C₂₇/C₂₉ e P/nC₁₇, indicando o aumento gradativo da influência de organismos aquáticos (algas) em relação à matéria orgânica continental. Na progadação (TSMA) o evento ocorre de modo inverso, indicado pela diminuição dos teores de COT e das relações C₂₇/C₂₉ e P/nC₁₇, sugerindo o aumento do afluxo de matéria orgânica continental. A amostra isolada do Toarciano, Membro CC 2 (em azul), poderia representar em um novo sistema retrogradacional.

Figure 21

TOC correlations – P/nC₁₇ and TOC – EST (C₂₇/C₂₉). During retrogradation (TST) there was an increase of TOC, and C₂₇/C₂₉ and P/nC₁₇ rates, thus indicating a gradual increase of the impact of aquatic organisms (algae) on continental organic matter. In progradation (TSMA) the event occurs the opposite way, thus indicating a reduction of TOC content and of C₂₇/C₂₉ and P/nC₁₇ rates that suggests an increase of continental organic matter afflux. The isolated sample of the Toarcian, Member CC 2 (in blue) may represent a new retrogradational system.



Outra interpretação alternativa, aventada neste trabalho, seria relacionar os aumentos dos valores isotópicos do oxigênio ($\delta^{18}\text{O}$) e os dados de biomarcadores (principalmente aqueles relacionados à presença de gamacerano) com os aumentos de salinidade, cuja interpretação está resumida na figura 23.

No Membro Mcup, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ tendem a aumentar para o topo, indicando duas possibilidades: diminuição da temperatura da água ou aumento da salinidade (fig. 18). Entretanto, a presença de gamacerano na parte média da seção (G, na figura 17c), embora em pequena proporção, sugere ambiente com salinidade acima da normal (Moldowan *et al.* 1985). Isto sinaliza que os aumentos dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ em direção ao topo da unidade estariam mais relacionados a um ciclo de aumento de salinidade do que de diminuição da temperatura.

No Membro Mcg, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ também tendem a aumentar para o topo. A presença de

gamacerano (G, figura 17b) também sugere que o aumento dos valores isotópicos seria devido ao aumento de salinidade e não à diminuição de temperatura da água. Assim, os membros Mcup e Mcg seriam representados por parasseqüências de aumento de salinidade, dentro de um trato de sistema transgressivo.

É possível que ocorra uma diminuição de salinidade em direção à superfície de inundaçãomáxima (SIM), conforme poderia estar sugerindo a maior proporção de moretanos: diminuição da razão HOP C₂₉ ($\beta\alpha/\alpha\beta$) e HOP C₃₀ ($\beta\alpha/\alpha\beta$) (fig. 20). Os valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ sugerem que nesta parte da seção, aparentemente, a salinidade seria menor. Tal fato seria coerente com uma sedimentação mais argilosa, que representasse diversos eventos de inundaçãoe que seriam intercalados com intervalos mais carbonáticos.

A partir da SIM, com a diminuição dos teores de carbono orgânico em direção à seção constituída essencialmente de carbonatos (Formaçã

Lemedede), ocorre uma inversão na proporção dos moretanos, podendo significar um evento de aumento de salinidade, ao contrário do observado por Rullkötter e Marzi (1988) na região norte da Alemanha. Esta interpretação é corroborada pela presença de gamacerano no topo do Membro Mcnb e pelos valores de $\delta^{18}\text{O}$ sensivelmente mais positivos na Formação Lemedede (figs. 17 e 18). Já as razões terpanos tetracíclicos/pentacíclicos e de trisnorhopano/trisnorhopano (C_{27} Ts/Tm) possuem distribuição inversa em relação aos moretanos, ou seja, aumentam em direção à Formação Lemedede (fig. 22). Este fato também poderia estar relacionado a um aumento de salinidade ou à diminuição de anoxia em seções carbonáticas (e.g., Palacas *et al.* 1984; Connan *et al.* 1986; Rullkötter e Marzi, 1988).

conclusões

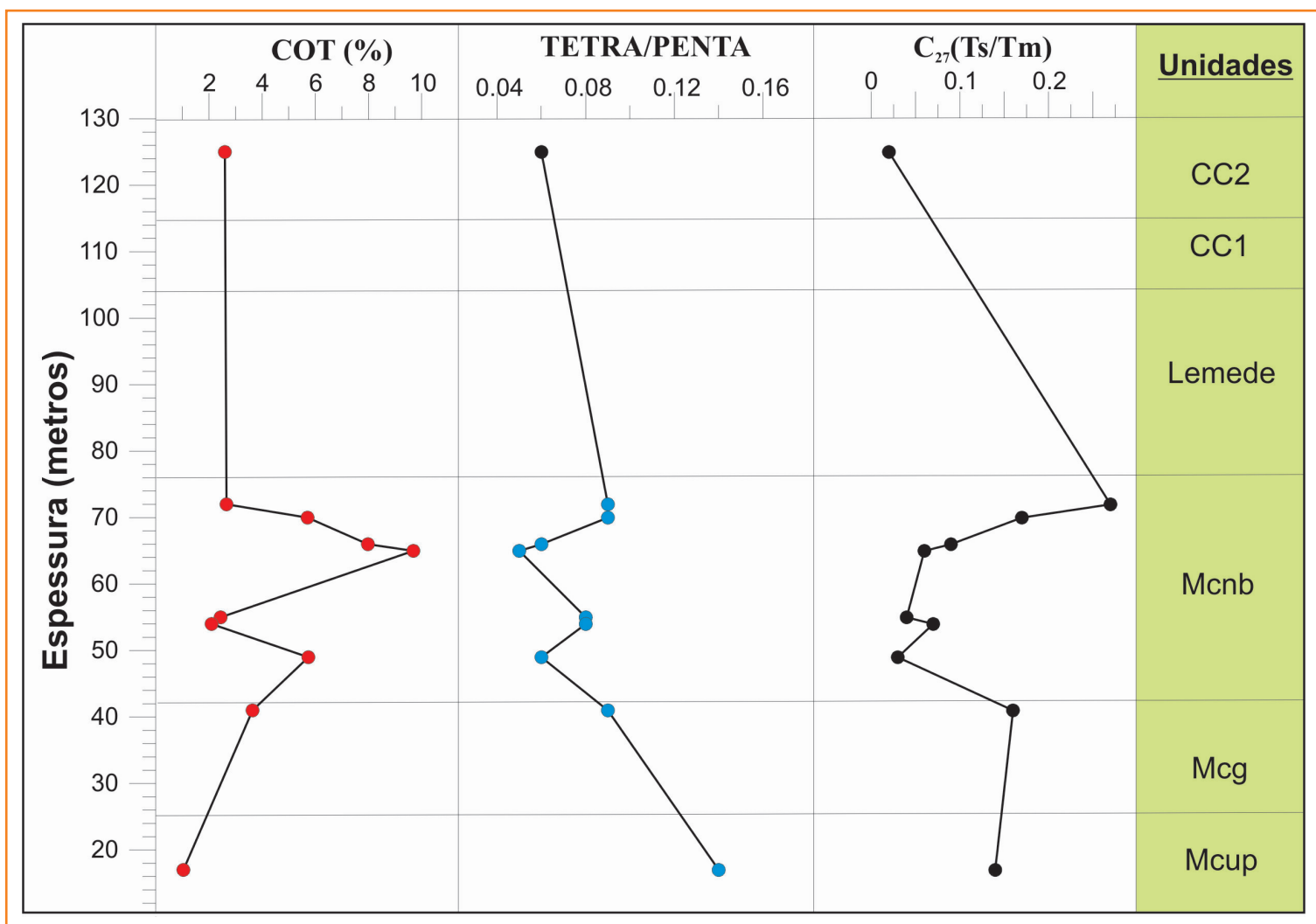
Na seção Pliensbaquiano – Toarciano inferior de Peniche, o intervalo de maior potencial gerador de petróleo inclui a parte superior do Membro Mcg e o Membro Mcnb, ambos da Formação Vale das Fontes, correspondendo às zonas de amonites *ibex* (parte superior), *davoiei* e *margaritatus* e parte das biozonas de nanofósseis NJ4a e NJ4b. Neste intervalo, de cerca de 35 m, intercalam-se calcários e níveis de margas e folhelhos escuros centimétricos a decimétricos. Alguns destes níveis, enriquecidos em matéria orgânica e termicamente imaturos, apresentam altos valores de COT (máximo de 14,95%), de S_2 e de IH. A relação IH x IO revela que onde os valores de COT são mais elevados, o querogênio

Figura 22

Curvas de distribuição dos biomarcadores Tetra/Penta e C_{27} (Ts/Tm) e suas correlações com o COT.

Figure 22

Distribution curves of the Tetra/Penta and C_{27} (Ts/Tm) biomarkers and their TOC correlations.



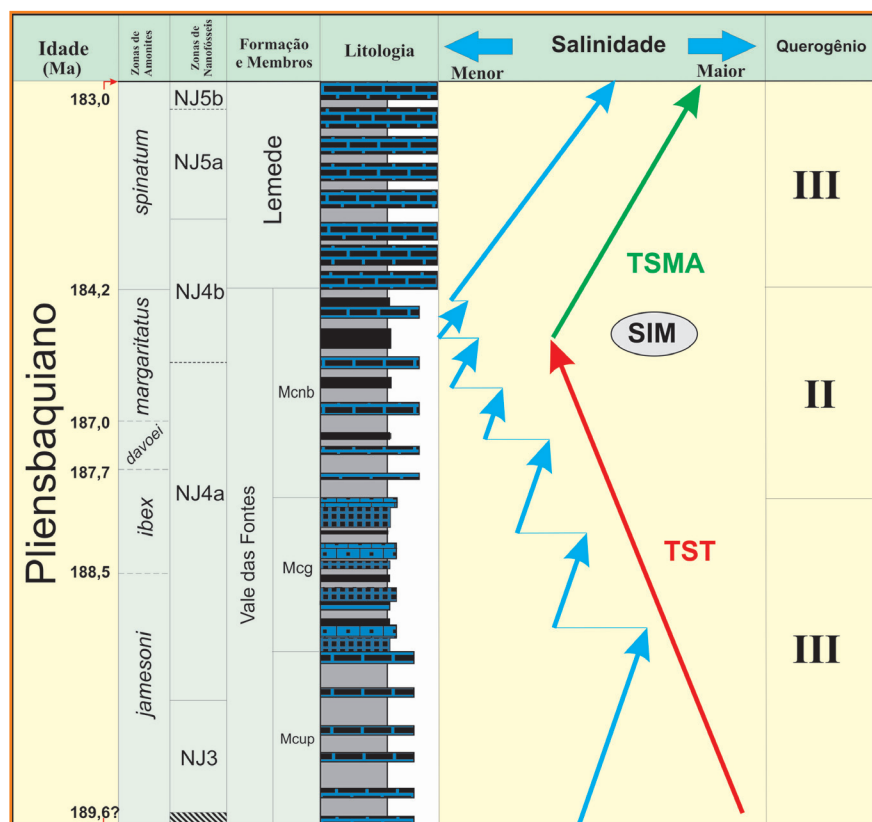


Figura 23

Interpretação alternativa, ressaltando a variação da salinidade, com base nos dados de $\delta^{18}\text{O}$ e biomarcadores. Idade das zonas de amonites baseadas em Ogg, 2004.

Figure 23

Alternative interpretation highlighting salinity variation based on $\delta^{18}\text{O}$ and biomarkers data. Age of ammonites zones age based on Ogg, 2004.

predominante é do tipo II. Já a boa correlação positiva entre valores de COT e as relações de biomarcadores P/nC_{17} e esteranos ($\text{C}_{27}/\text{C}_{29}$), ao longo do Membro Mcnb, sugere gradativo aumento de anoxia e maior contribuição de algas em relação ao aporte de matéria orgânica terrestre.

A presença de gamacerano nos membros Mcup e Mcg, associada ao aumento de valores de $\delta^{18}\text{O}$, sugere um ambiente com salinidade acima dos níveis normais. Desta forma, estas unidades, inseridas em um trato de sistema transgressivo com tendência geral de diminuição da salinidade, representariam parasseqüências onde teria ocorrido um aumento de salinidade. Os folhelhos representariam a base das parasseqüências e os momentos de menor salinidade, enquanto os carbonatos indicariam períodos de maior salinidade.

No Membro Mcnb destaca-se um conjunto de parasseqüências relacionadas a elevados valores de COT. O máximo transgressivo/superfície de inundação máxima (SIM) poderia ser posicionado no último destes ciclos, que apresenta uma excursão positiva dos valores de $\delta^{13}\text{C}$ (fig. 18).

O aumento da proporção dos moretanos – em direção à SIM associada à ausência de gamacerano – sugere o declínio da salinidade. Entretanto, a partir da SIM se registra a diminuição da proporção de moretanos, aumento da razão Ts/Tm e presença de gamacerano no topo do Membro Mcnb, indicando novo ciclo de aumento de salinidade.

As inundações, durante o trato de sistema transgressivo, representariam a entrada de água, normalmente de menor salinidade, facilitando a estratificação e a formação de fundos disaeróbicos/anóxicos, mais adequados à preservação da matéria orgânica autóctona.

Na Formação Leme de, apesar de não terem sido realizadas análises de biomarcadores, os valores mais elevados de $\delta^{18}\text{O}$ indicam a continuação do ciclo de aumento de salinidade iniciado na SIM, que perduraria pelo restante do trato de sistema de mar alto.

agradecimentos

Somos gratos ao grupo da Petrobras/Cenpes/Pdexp/Geoq pelas análises de COT, RI e pirólise, principalmente a Luiz Antonio Freitas Trindade, Jorge Teixeira Silva, Eduardo Siqueira de Araújo Conde, Antônio Dionísio de Andrade Neto, Maurílio Lahora Martins, Ligia Jeremias Lemos de Aquino e Maria de Fátima Barbosa de Almeida. Também agradecemos a Edison José Milani e Oscar Strohschoen Júnior pelo apoio, a Heriberto Valladares dos Santos e Adelino Teixeira Dias, pelo grande auxílio na parte gráfica e a Laury Medeiros de Araújo, Mitsuru Arai e José Roberto Cerqueira pela apurada revisão do texto. Também expressamos a nossa gratidão à equipe dos Laboratórios de Geoquímica da Faculdade de Geologia da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), especialmente a Carmem Lúcia Pereira Alferes e João Luís Freixo pelas análises de biomarcadores e ao Centro de Geociências da Universidade de Coimbra.

referências bibliográficas

ABDULLAH, F. H. A.; Kinghorn, R. R. F. A preliminary evaluation of lower and mid-Cretaceous source rocks in Kuwait. **Journal of Petroleum Geology**, Beaconsfield, v. 19, n. 4, 461-480, Oct. 1996.

AZERÊDO, A. C.; DUARTE, L. V.; HENRIQUES, M. H.; MANUPPELLA, G. **Da dinâmica continental no Triássico aos mares do Jurássico Inferior e Médio**. Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, 2003. 43 p. (INETI. Cadernos de Geologia de Portugal).

BARROWS, M. H.; CLUFF, R. M. New Albany Shale Group (Devonian-Mississippian) source rocks and hydrocarbon generation in the Illinois Basin. In: DEMAISON, G.; MURRIS, R. J. (Ed.). **Petroleum geochemistry and basin evaluation**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1984. p. 111-138. (AAPG. Memoir, 35).

BOILLOT, G.; AUXIÈTRE, J. L.; DUNAND, J. P.; DUPEUBLE, P. A.; MAUFFRET, A. The northwestern iberian margin: a Cretaceous passive margin deformed during the Eocene. In: TALWANI, M.; HAY, M.; RYAN, W. B. F. (Ed.). **Deep drilling results in the Atlantic Ocean: continental margins and paleoenvironment**. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1979. p. 138-153. (Maurice Ewing, 3).

BORREGO, A. G.; HAGEMANN, H. W.; BLANCO, C. G.; VALENZUELA, M.; SUAREZ DE CENTI, C. The Pliensbachian (Early Jurassic) "anoxic" event in Asturias, northern Spain: Santa Mera Member, Rodiles Formation. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 25, n. 5, p. 295-309, 1996.

CHOU, M. M.; DICKERSON, D. R. Organic geochemical characterization of the New Albany Shale Group in the Illinois Basin. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 8, n. 6, p. 413-420, 1985.

COLE, G. A.; REQUEJO, A. G.; ORMEROD, D.; CLIFFORD, A.; YU, Z. Petroleum geochemical assessment of the Lower Congo Basin. In: MELLO, M. R.; KATZ, B. J. (Ed.). **Petroleum systems of the South Atlantic**

Margin. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2000. p. 325-339. (AAPG. Memoir, 73).

CONNAN, J.; BOUROULLEC, J.; DESSERT, D.; ALBRECHT, P. The microbial input in carbonate-anhydrite facies of a sabkha palaeoenvironment from Guatemala: a molecular approach. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 10, n. 1/3, p. 29-50, 1986.

DIAS, A. J. G. **Reavaliação do potencial petrolífero do onshore da Bacia Lusitaniana, Portugal**. Porto: Universidade do Porto. Faculdade de Ciências. Departamento de Geologia, 2005. 142 p. Tese (Doutorado).

DROSTE, H. Depositional cycles and source rock development in an epeiric intra-platform basin: the Hanifa Formation of the Arabian Peninsula. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 69, n. 3/4, p. 281-296, Dec. 1990.

DUARTE, L. V. **O Toarciano da Bacia Lusitaniana: estratigrafia e evolução sedimentogenética**. Coimbra: Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia. Departamento de Ciências da Terra, 1995. 349 p. Tese (Doutorado).

DUARTE, L. V. Facies analysis and sequential evolution of the Toarcian-Lower Aalenian series in the Lusitanian Basin (Portugal). **Comunicações do Instituto Geológico e Mineiro**, Lisboa, v. 83, p. 65-94, 1997.

DUARTE, L. V. Variações de fácies, litostratigrafia e interpretação seqüencial do Liássico médio e superior ao longo da transversal Tomar – Peniche (Portugal). **Ciências da Terra**, Lisboa, 2003. Número especial 5. A53-A56. 1 CD-ROM.

DUARTE, L. V. The geological heritage of the Lower Jurassic of Central Portugal: selected sites, inventory and main scientific arguments. **Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia**, Milan, v. 110, n. 1, p. 381-387, 2004.

DUARTE, L. V. The Jurassic of the Peniche Peninsula (Central Portugal): an internacional reference point of great scientific value and educational interest. In:

INTERNATIONAL SYMPOSIUM PROGEO ON THE CONSERVATION OF THE GEOLOGICAL HERITAGE, 4., 2005, Braga. **Jurassic heritage and geoconservation in Portugal**: selected sites: field trip guide book. Braga: University of Minho. Earth Sciences Centre, 2005. p. 23-31.

DUARTE, L. V. (Coord.); WRIGHT, V. P.; FERNANDÉZ-LOPÉZ, S.; ELMÍ, S.; KRAUTTER, M.; AZERÉDO, A. C.; HENRIQUES, M. H.; RODRIGUES, R.; PERILLI, N. Early Jurassic carbonate evolution in the Lusitanian Basin: (Portugal) facies, sequence stratigraphy and cyclicity. In: INTERNATIONAL ASSOCIATION SEDIMENTOLOGISTS MEETING OF SEDIMENTOLOGY, 23., 2004, Coimbra. **Field trip guide book**: carboniferous and Jurassic carbonate platforms of Iberia. Coimbra: International Association Sedimentologists, 2004. p. 45-71.

DUARTE, L. V.; SOARES, A. F. **Litostratigrafia das séries margo-calcárias do Jurássico Inferior da Bacia Lusitânica (Portugal)**. Lisboa: Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, 2002. p. 135-154. (INETI. Comunicações, 89).

DUARTE, L. V.; RODRIGUES, R.; OLIVEIRA, L. C. V.; SILVA, F. Avaliação preliminar das variações do carbono orgânico total nos sedimentos margosos do Jurássico Inferior da Bacia Lusitânica (Portugal). In: CONGRESSO DE GEOQUÍMICA DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 8., 2005, Aveiro. **Actas...** Aveiro: Universidade de Aveiro, 2005. v. 1, p. 39-43.

EGLINTON, G.; CALVIN, M. Chemical fossils. **Scientific American**, New York, v. 261, p. 32-43. 1967.

ELMI, S. Some general data on the Pliensbachian – Toarcian boundary: problems of biostratigraphic correlations. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE JURASSIC SYSTEM, 6., 2002, Mondello, Palermo. **Abstracts...** Palermo: International Subcommission on Jurassic Stratigraphy, 2002. p. 56-57.

ELMI, S.; GOY, A.; MOUTERDE, R.; RIVAS, P.; ROCHA, R. Correlaciones bioestratigráficas en el Toarciense de la Península Ibérica. **Cuadernos de Geología Ibérica**, Madrid, v. 13, p. 265-277. 1989.

ELMI, S.; MOUTERDE, R.; ROCHA, R.; DUARTE, L. V. La limite Pliensbachien-Toarcien au Portugal: intérêt de la coupe de Peniche. **Aalenews**, n. 6, p. 33-35, Sep. 1996. Trabalho apresentado no Toarcian and Aalenian Working Groups Meeting, Fuentelsaz and Freiburg, 1996.

ESPITALIÉ, J.; DEROO, G.; MARQUIS, F. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications: partie 1. **Revue de l'Institut Français du Pétrole**, Paris, v. 40, n. 5, p. 563-579, 1985.

ESPITALIÉ, J.; LAPORTE, J. L.; MADEC, M.; MARQUIS, F.; LEPLAT, P.; AULET, J. Méthode rapide de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur alignement d'évolution. **Revue de l'Institut Français du Pétrole**, Paris, v. 32, n. 1, p. 23-43, 1977.

ESPITALIÉ, J.; MARQUIS, F.; SAGE, L.; BARSONY, I. Géochimie organique du Bassin de Paris. **Revue de l'Institut Français du Pétrole**, Paris, v. 42, n. 3, p. 271-302, 1987.

ESTRELLA, G. O.; GAGLIANONE, P. C.; MELO, M. R. The Espírito Santo Basin (Brazil) source rock characterization and petroleum habitat. In: DEMAISON, G.; MURRIS, R. J. (Ed.). **Petroleum geochemistry and basin evaluation**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1984. p. 253-271. (AAPG. Memoir, 35).

GAGLIANONE, P. C.; TRINDADE, L. A. F.; NASCIMENTO, M. M. do. Avaliação geoquímica das bacias marginais ao sul da Bahia, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 1987, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica, 1987. v. 2. p. 467-491.

GEOLOGIA do Petróleo de Portugal: as bacias sedimentares meso-cenozóicas. Lisboa: Divisão para a Pesquisa e Exploração de Petróleo, [entre 2000 e 2006]. Disponível em: <http://www.dge.pt/dpep/pt/geology_pt.htm>. Acesso em jun. 2006.

GUARDADO L. R. Petroleum system of the Campos Basin. In: MELLO, M. R.; KATZ, B. J. (Ed.). **Petroleum systems of South Atlantic margins**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, p. 317-324, 2000. (AAPG. Memoir, 73).

- MAUFFRET, A., MOUGENOT, D., MILES, P. R.; MALOD, J. A. Cenozoic deformation and Mesozoic abandoned spreading centre in Tagus Abyssal Plain (west of Portugal): results of a multichannel seismic survey. **Canadian Journal of Earth Science**, Ottawa, v. 26, p. 1101-1123, 1989.
- MOLDOWAN, J. M.; SEIFERT, W. K.; GALLEGOS, E. J. Relationship between petroleum composition and depositional environment of petroleum source rocks. **American Association of Petroleum Geologists**, Tulsa, v. 69, n. 8, p. 1255-1268, 1985.
- MOUTERDE, R. Le lias de Peniche. **Comunicações dos Serviços Geológicos de Portugal**, Lisboa, v. 36, p. 87-115, 1955.
- OGG, J. G. The Jurassic Period. In: GRADSTEIN, F. M.; OGG, J. G.; SMITH, A. G. (Ed.). **A geological timescale 2004**. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. p. 307-343.
- OLIVEIRA, L. C. V. **Bioestratigrafia de nanofósseis e estratigrafia química do Pliensbaquiano-Toarciano inferior (Jurássico Inferior) da região de Peniche (Bacia Lusitânica, Portugal)**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências, 2007. 356 p. Tese (Doutorado). No prelo.
- OLIVEIRA, L. C. V.; DUARTE, L. V.; RODRIGUES, R.; PERILLI, N. Calcareous nannofossils biostratigraphy and oxygen isotope composition of belemnites: Pliensbachian – lowermost Toarcian of Peniche (Lusitanian Basin, Portugal). In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE JURASSIC SYSTEM, 7., 2006, Kraków, Poland. **Abstract volume: session 4: integrated stratigraphy**. Warszawa: Warsaw University. Faculty of Geology. Institute of Geology, 2006. p. 219
- PALACAS, J. G.; ANDERS, D. E.; KING, J. D. South Florida Basin: a prime example of carbonate source rocks in petroleum. In: PALACAS, J. C. (Ed.). **Petroleum geochemistry and source rock potential of carbonate rocks**. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1984. p. 71-96. (AAPG. Studies in Geology, 18).
- PHELPS, R. A refined ammonite biostratigraphy for the Middle and Upper Carixian (ibex and davoei zones, lower Jurassic) in North-west Europe and stratigraphical details of the Carixian-Domerian boundary. **Geobios**, Lyon, v. 18, p. 321-362, 1985.
- PRICE, L. C.; Daws, T.; PAWLEWICZ, M. Organic metamorphism in the Lower Mississippian – Upper Devonian Bakken Shales. **Journal of Petroleum Geology**, Beaconsfield, v. 9, p. 125-162, 1986.
- QUESADA, S.; ROBLES, S. Organic geochemistry, distribution and depositional dynamics of the Liassic organica facies of the Basque-Cantabrian Basin (Northern Spain). In: GRIMALT, J. O.; DORRONSORO, C. (Ed.). **Organic geochemistry: developments and applications to energy, climate, environment and human history**. Spain: Itxaso Estornes, 1995. p. 464-465.
- RIBEIRO, A.; ANTUNES, M. T.; FERREIRA, M. P.; ROCHA, R. B.; SOARES, A. F.; ZBYSEWSKI, G.; ALMEIDA, F. M. de; CARVALHO, D.; MONTEIRO, J. H. **Introduction à la géologie générale du Portugal**. Lisboa: Serviços Geológicos de Portugal, 1979. 114 p.
- ROCHA, R. B.; MARQUES, B. L.; KULLBERG, J. C.; CAETANO, P. S.; LOPES, C.; SOARES, A. F.; DUARTE, L. V.; MARQUES, J. F.; GOMES, C. R. **The 1st and 2nd rifting phases of the Lusitanian Basin**: stratigraphy, sequence analysis and sedimentary evolution. Lisboa: Universidade de Lisboa. Faculdade de Ciências e Tecnologia; Brüssel: Commission for the European Communities, 1996. 4 v. (Project MILUPOBAS, Contract nº J0U2-CT94-0348).
- RODRIGUES, R. Aplicação da geoquímica ao problema de geração de hidrocarbonetos na Bacia Amazônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27., 1973, Aracaju. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1973. v. 3. p. 53-66.
- RODRIGUES, R. **A geoquímica orgânica na Bacia do Parnaíba**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências, 1995. 225 p. Tese (Doutorado).

- ROSALES, I.; QUESADA, S.; ROBLES, S. Paleotemperature variations of Early Jurassic seawater recorded in geochemical trends of belemnites from the Basque – Cantabrian basin, northern Spain. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 203, n. 3/4, p. 253-275, Feb. 2004.
- RULLKÖTTER, J.; MARZI, R. Natural and artificial maturation of biological markers in a Toarcian shale from northern Germany. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 13, p. 639-645, 1988.
- SEIFERT, W. K.; MOLDOWAN, J. M. Paleoreconstruction by biological markers. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, London, v. 45, p. 783-794, 1981.
- SILVA, F.; DUARTE, L. V.; OLIVEIRA, L. C. V.; COMAS-RENGIFO, M. J.; RODRIGUES, R. A Formação de Vale das Fontes no sector norte da Bacia Lusitânica (Portugal): caracterização e avaliação preliminar da distribuição do carbono orgânico total. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 7., 2006, Évora. **Livro de resumos**. Estremoz: Universidade de Évora, 2006. v. 2. p. 669-672.
- SILVA, L. T. **A Formação Abadia no contexto evolutivo tectono-sedimentar da Bacia Lusitânica (Portugal)**: considerações sobre o seu potencial como rocha reservatório de hidrocarbonetos. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências, 2003. 125 p. Dissertação (Mestrado).
- SOARES, A. F.; ROCHA, R. B.; ELMI, S.; HENRIQUES, M. H.; MOUTERDE, R.; ALMERAS, Y.; RUGET, C.; MARQUES, J.; DUARTE, L. V.; CARAPITO, C.; KULLBERG, J. C. Le sous-bassin nord-lusitanien (Portugal) du Trias au Jurassique moyen: histoire d'un "rift avorté". **Comptes Rendus De L' Academie Des Sciences de Paris**: serie II: sciences de la terre et des planetes, Montrouge, v. 317, p. 1659-1666, 1993.
- SPEERS, G. C.; WHITEHEAD, E. V. Crude petroleum. In: EGLINTON, G.; MURPHY, M. T. J. (Ed.). **Organic geochemistry**: methods and results. New York: Springer-Verlag, 1969. p. 638-675.
- TOARCIAN WORKING GROUP; FIELD TRIP MEETING, 2005, Peniche, Portugal. **The Peniche Section (Portugal) candidate to the Toarcian Global Stratotype Section and Point**. Caparica: International Subcommission on Jurassic Stratigraphy, 2005. 51 p.
- UPHOFF, T. L. Subsalt (pré-Jurassic) exploration play in the northern Lusitanian basin of Portugal. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, 89(6), 699-714, 2005.
- VANNEY, J. R.; MOUGENOT, D. La Plateforme continentale du Portugal et les provinces adjacentes: analyse geomorphologique. **Memorias dos Serviços Geológicos de Portugal**, Lisboa, v. 28, 86 p., 1981.
- WHITTLE, G. I.; ALSHARHAN, A. S. Diagenetic history and source rock potential of the Upper Jurassic Diyab Formation, offshore Abu Dhabi, United Arab Emirates. **Carbonate and evaporites**, New York, v. 11, n. 2, p. 145-154, Dec. 1996.
- WILSON, R. C. L. Atlantic opening and Mesozoic continental margin basins of Iberia. **Earth And Planetary Science Letters**, Amsterdam, v. 25, p. 33-43, 1975.
- WILSON, R. C. L. Mesozoic development of the Lusitanian Basin, Portugal. **Revista de la Sociedad Geologica de Espana**, Madrid, v. 1, p. 393-407, 1988.
- WRIGHT, V. P.; WILSON, R. C. L. A carbonate submarine-fan sequence from the Jurassic of Portugal. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 54, p. 394-412, 1984.

expanded abstract

The Lusitanian Basin (Portugal) is located on the western margin of the Iberian Plate, and belongs to a group of Atlantic Ocean marginal basins that began to be formed during the rift phase at the upper Triassic. With a NE-SW orientation it is almost 300 km long and 150 km wide, including the offshore segment, with a maximum thickness of 5 km. These sediments belong to the upper Triassic – upper Cretaceous, with a Tertiary cover and it is mainly formed by Jurassic sediments.

The lower Jurassic is particularly well represented in the Lusitanian Basin with various important geological outcrops. The Peniche region is one of the most important sections because of the continuous series of carbonates found there; which are more than 450 m deep, deposited between the Sinemurian and the Toarcian. In 2005 the International Subcommission on Jurassic Stratigraphy indicated the Pliensbachian – Toarcian boundary section in the Peniche profile (Ponta do Trovão) as the main candidate to the Toarcian GSSP (Global Stratotype Section and Point).

Traditionally, stratigraphic intervals with source rocks in the Lusitanian Basin include the Sinemurian – Pliensbachian (lower Jurassic), Oxfordian (upper Jurassic) and the lower Cretaceous. In spite of the promising petroleum systems and a hundred wells present in the basin, its hydrocarbon generation potential has not been fully evaluated yet.

The present study included the Vale das Fontes Formation, with the marls and limestones members with *Uptonia* and *Pentacrinus* (Mlup), lumpy marls and limestones (Lml) and marls and limestones with bituminous facies (Mlbf), Lemedé Formation, and Cabo Carvoeiro Formation (CC 1 and CC 2 Members), of the Pliensbachian – lower Toarcian section of Peniche. Total organic carbon (TOC), Rock-Eval pyrolysis and biomarker analyses were performed. Available data of oxygen and carbon stable isotopes were also used in the paleoenvironmental interpretation. The Mlup Member presented low TOC values, mostly below 1%, type III kerogen, medium HI (101.55 mg of HC/g TOC), while S_2 is below 2 mgHC/g rock. In the Lml Member only one sample presented high TOC values, 3.64% (in the *ibex* ammonites zone and NJ4a nannofossils biozone), and kerogen in this unit is predominantly type III. The Mlbf Member presented the highest TOC values in the section, which spreads over 25 m with values always above 2%, up to a maximum of 14.95% (*ibex*,

upper part, *davoei* and *margaritatus* ammonites zones and part of the NJ4a and NJ4b nannofossils biozones – Pliensbachian). The Rock-Eval pyrolysis analyses have shown that many samples of the Mlbf Member have S_2 values above 10 mgHC/g rock together with HI values over 200 mg of HC/g TOC and T_{max} below 440°C. This pattern suggests that Mlbf sediments with high TOC have high hydrocarbon generation potential (with an indication of petroleum and gas) and immature organic matter. Kerogen in the Mlbf Member is mainly type II in different stages of preservation and it's probably related to marine organic matter. In the Lemedé Formation only one sample has shown high TOC (2.8%) in the *spinatum* ammonites zone and NJ5a nannofossil biozone. S_2 values in this unit are below 2 mg of HC/g rock, with HI averages of 58.58 mg of HC/g TOC that indicates oxidized organic matter and type III kerogen. All the CC 1 Member samples (lower Toarcian) showed TOC below 1%, low HI average (68.16 mg of HC/g TOC) and type III kerogen. A sample was found in CC 2 Member with TOC equal to 2.6% (*levisoni* ammonites zone and NJ5b nannofossils biozone) with high hydrocarbon generation potential (S_2 of 8.52 mg of HC/g rock), HI of 327.7 mg of HC/g TOC and T_{max} of 427°C. Most of the kerogen in the CC 2 Member is type III. Usually $\delta^{18}O$ variations recorded in the Iberian Peninsula basins can be explained by temperature changes. This paper presents an alternative interpretation, correlating $\delta^{18}O$ variations with biomarkers data to indicate salinity changes. In the Mlup Member, $\delta^{18}O$ values tend to increase towards the upper part of the member, which indicate two possibilities: a temperature decrease of the water or an increase in salinity. In spite of the small quantities of gammacerane found in the middle part of this section, its presence suggests an environment with salinity above normal. This fact indicates that the increase of $\delta^{18}O$ values towards the upper part of the unit would be more related to a period of increased salinity than to temperature reduction. In the Lml Member $\delta^{18}O$ values also tend to increase towards the upper part of this unit and the presence of gammacerane suggests that the increase of the isotopic values would be due to salinity increase and not to temperature decrease. In the Mlbf Member the good correlation of TOC and HI (values of up to 500 mgHC/g TOC), indicates an environmental sedimentation; which was suitable for organic matter preservation. The good positive correlation between the TOC data and $P/In_{C_{17}}$ and steranes (C_{27}/C_{29}), in the Mlbf

Member might suggest anoxia conditions and an increase of the algae contribution in relation to the terrestrial organic-matter input, respectively. Moretanes data indicates salinity decrease towards the maximum flood surface (MFS) positioned in the $\delta^{13}\text{C}$ positive excursion in the upper part of Mlbf Member (margaritatus ammonites zone and NJ4b nanofossils biozone). The Mlbf Member shows the most negative $\delta^{18}\text{O}$ values of the section, which is an indication of low salinity, consistent with a shaly section, represented by several flood events, in the carbonate section. Originating in the MFS, there is an inversion of the moretanes ratios, which might mean an event of increased salinity. This interpretation is supported by the presence of gammacerane in the upper Mlbf Member and by the more positive $\delta^{18}\text{O}$ values in the Lemedé Formation. Furthermore, tetracyclic/pentacyclic terpanes and trisnorneohopane/trisnorhopane (C_{27} Ts/Tm) ratios showed inverse distribution in relation to the moretanes. This means that

these ratios increase towards the Lemedé Formation and are possibly related to the salinity increase or to the anoxia reduction in the carbonate sections. This way, the transgressive system tract (Vale das Fontes Formation, except in the upper part of Mlbf Member) would be represented by parasequences of high salinity ($\delta^{18}\text{O}$ increase and gammacerane presence), with a general tendency to salinity decrease towards the MFS. Marls and black shales were deposited at the base of these parasequences during the period of salinity decrease, while carbonates were formed during periods of increased salinity. On the other hand, the highstand system tract (the Mlbf Member upper part and the Lemedé Formation) would have a general increase of salinity, from the MFS to the upper sequence boundary. The floods during the transgressive system tract would represent a lower salinity water supply, thus creating an anoxic environment and good conditions to preserve the autochthonous organic matter.

autor principal



Luiz Carlos Veiga de Oliveira

Centro de Pesquisas da Petrobras (Cenpes)

Gerência de Bioestratigrafia e Paleocologia

e-mail: lcveiga@petrobras.com.br

Luiz Carlos Veiga de Oliveira nasceu no Rio de Janeiro (RJ) em 1960 e graduou-se em Geologia pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) em 1982. Antes de ingressar na Petrobras em 1987, trabalhou em acompanhamento geológico de poços e *mudlogging*, atuando nas bacias de Campos, Santos, Espírito Santo e Potiguar. Já na Petrobras, trabalhou na Bacia do Espírito Santo, primeiramente em acompanhamento de poços e, a partir de 1989, com a bioestratigrafia dos nanofósseis calcários. Em 1992 foi transferido para o Setor de Bioestratigrafia e Paleocologia do Cenpes. Obteve grau de Mestre em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 1997, estudando os nanofósseis calcários do Albo-Maastrichtiano da Bacia de Campos e as suas relações com marcos elétricos – estratigráficos e a estratigrafia química. Em 2002 concluiu o MBA em Management pela Fundação Getúlio Vargas. Durante o ano de 2003 foi assistente do Gerente Executivo do Cenpes. Atualmente trabalha na Gerência de Bioestratigrafia e Paleocologia do Cenpes com nanofósseis calcários e estratigrafia química e realiza Doutorado pela UFRGS, tendo como tema a bioestratigrafia de nanofósseis e estratigrafia química do Pliensbaquiano – Toarciano inferior (Jurássico inferior) da região de Peniche (Bacia Lusitânica, Portugal).