

Controle alocíclico (escala de Milankovitch) na sedimentação siliciclástica, mista e carbonática albiana no centro-leste da Plataforma de Regência (Bacia do Espírito Santo, Brasil)

Allocyclic control (Milankovitch's scale) on the siliciclastic, mixed and carbonate Albian sedimentation in the Central-Eastern portion of the Regência Platform (Espírito Santo Basin, Brazil)

Claudio Vinicius Tagliari | Josemar Santos Pereira Filho | Renata Guimarães Netto | Paulo Sérgio Gomes Paim

resumo

O intervalo de estudo (Sequência A) abrange uma sequência deposicional do Albiano Inferior caracterizada por estratos ciclicamente organizados que estão presentes em cinco poços perfurados em uma estrutura do tipo rollover situada em um bloco alto vizinho à Falha Cedro-Rio Doce, no centro-leste da Plataforma de Regência. Este artigo se propõe a apresentar um modelo paleoambiental que explique a alternância cíclica de estratos composicionalmente distintos. Esse modelo está baseado na descrição e interpretação de fácies e associações de fácies presentes em 180m de testemunhos distribuídos em distintos níveis da Sequência A. Apesar de fundamentado na análise faciológica, o modelo deposicional se propõe a explicar tanto a alternância cíclica de estratos de composição distinta como a disposição paleogeográfica das fácies siliciclásticas, híbridas e carbonáticas. Em sua elaboração foram considerados tanto os processos autogênicos, tais como aporte terrígeno derivado de descargas fluviais efêmeras, produção *in situ* de sedimentos carbonáticos e redistribuição de ambos por correntes litorâneas e eventos de tempestade, como os alogênicos, nessa classe incluindo

variações climáticas controladas por ciclos orbitais. Como os testemunhos também revelaram um nítido padrão cíclico, optou-se por proceder a uma análise em redes neurais de cinco curvas de perfis de poços (raios gama, densidade, fator fotoelétrico, sônico e neutrão) devidamente calibradas à descrição das fácies. Esse procedimento permitiu estender a descrição faciológica dos testemunhos aos intervalos não testemunhados da Sequência A. Foi assim possível correlacionar o empilhamento das fácies descritas nos testemunhos, onde formam repetitivos episódios transgressivos-regressivos (T-R), com o arranjo das litologias ao longo de toda a Sequência A, que se organizam na forma de ciclos de alta frequência com períodos estimados de 100 mil anos (excentricidade curta na escala de Milankovitch). Ao longo da Sequência A observou-se a superposição de vários ciclos T-R cuja porção siliciclástica tende a incorporar, no sentido ascendente das camadas, sedimentos cada vez mais finos (baixa energia) em detrimento de fácies de mais alta energia, configurando, assim, um afogamento do sistema sedimentar na escala de terceira ordem.

Palavras-chave: alociclicidade | sistemas deposicionais mistos | siliciclásticos e carbonáticos | Albiano | Bacia do Espírito Santo

abstract

The studied interval (Sequence A) comprises a Lower Albian depositional sequence composed of cyclically arranged strata. These sedimentary deposits were cored in five wells drilled in a rollover structure present in an uplifted block located near the Cedro-Rio Doce Fault (Central-East portion of the Regência Platform). This paper presents a paleoenvironmental model able to explain the cyclic alternation of compositionally distinct strata. This model is based on the description and interpretation of the facies and facies associations recorded along 180m of cores that represent distinct intervals of Sequence A. Although founded on facies analysis, the sedimentological model should also be able to explain the cyclic intercalation of compositionally distinct strata as well as the paleogeographical distribution of the siliciclastic, hybrid and carbonate facies. During its elaboration, both autogenic (terrigenous input delivered to the coast by ephemeral fluvial floods, in situ production of carbonate particles, and the redistribution of both by longshore currents and storm events) and allogenic (climate changes controlled by orbital cycles) processes were taken into account. Since the cores have also revealed a striking cyclic arrangement, a neural network analysis was performed along five well logs (gamma rays, density, photoelectric factor, sonic factor, and neutron) previously calibrated to lithologies. This procedure has extended the discrimination of the main types of sediments to the non-cored intervals of Sequence A. Therefore, it was possible to correlate the stacking of the facies discriminated in the core analysis, where they form repeated transgressive-regressive (T-R) cycles, with the cyclic arrangement of the main lithologies along the entire Sequence A, which are organized as high-frequency, 100 Ky cycles (short eccentricity in the Milankovitch's scale). In Sequence A it is possible to observe a superposition of several T-R cycles whose siliciclastic composition becomes finer-grained upwards at the expense of higher energy facies, therefore configuring a drowning of the sedimentary succession at the 3rd order scale.

(Expanded abstract available at the end of the paper).

Keywords: *allocyclicity | mixed (siliciclastic and carbonate) depositional systems | Albian | Espírito Santo Basin*

introdução

A Bacia do Espírito Santo (fig. 1) é uma das bacias marginais do litoral leste brasileiro de características das bacias denominadas de margem “passiva”. A fase de relativa quiescência tectônica que se estabeleceu a partir do Neooaptiano nessas bacias, sucedendo a uma de rifteamento (Neocomiano a Eooaptiano) e a outra (Neooaptiano) de nivelamento por erosão e entulhamento (Chang *et al.*, 1988), permitiu incursões marinhas mais francas do que as que ocorreram durante as fases anteriores. A partir do Albiano, com a progressiva dispersão do assoalho e continuada subsidência decorrente do estiramento litosférico, foram desfeitas as condições de restrição que permitiram a deposição de espessa seção de sedimentos evaporíticos no então golfo, correspondente ao proto-oceano Atlântico-Sul. Como decorrência disto, a Bacia do Espírito Santo passou a ser dominada por ambientes marinhos francos nas porções centrais e distais, ambientes esses propícios à deposição de carbonatos, e ambientes fluviais, deltaicos e litorâneos siliciclásticos dominados por ondas nas porções mais proximais.

É, pois, neste contexto que este artigo aborda a sucessão sedimentar basal do Grupo Barra Nova (Albiano Inferior; fig. 2), denominada informalmente de Sequência A (Tagliari *et al.*, 2012; Tagliari *et al.*, 2013) na porção *onshore* da Plataforma de Regência, uma província geológica localizada na região centro-oeste da Bacia do Espírito Santo (fig. 1). Esse intervalo estratigráfico compreende uma alternância cíclica de sedimentos siliciclásticos, híbridos e carbonáticos que representam um contexto paleogeográfico de sedimentação terrígena, nas porções proximais, e transicional a marinha, nas porções medianas e distais da Plataforma de Regência (figs. 3 e 4). Este trabalho tem seu foco na análise faciológica dos testemunhos dos poços denominados 2, 3 e 5, situados na porção centro-leste dessa plataforma (fig. 1). Foram descritos cerca de 180m de testemunhos, com 14 fácies sedimentares e oito associações de fácies discriminadas. O caráter cíclico da sedimentação ensejou que fosse aplicada a técnica de redes neurais nos perfis geofísicos obtidos de um grande número de poços distribuídos por toda a porção *onshore* da bacia, devidamente calibrados à descrição dos testemunhos. Isto viabilizou estender a interpretação

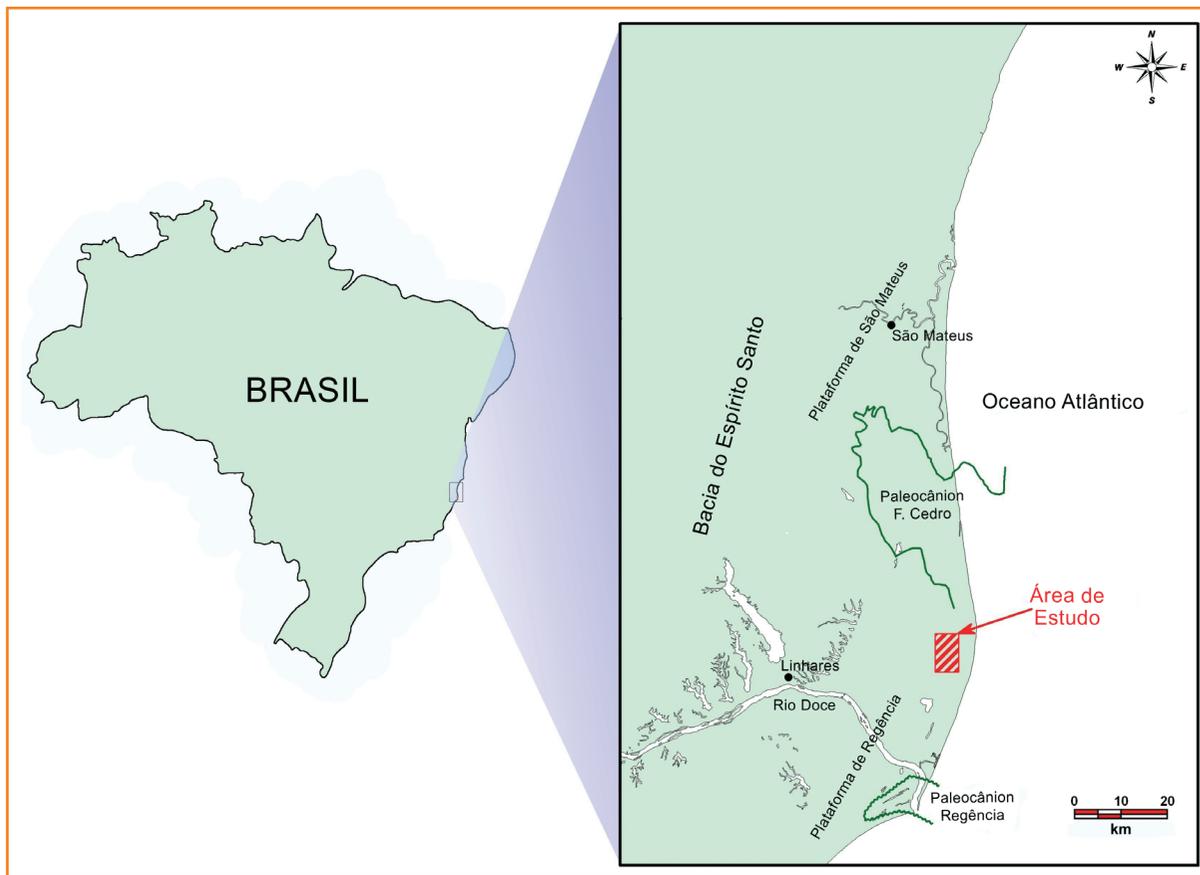


Figura 1
Mapa de localização da área de estudo.

Figure 1
Location map of the studied area.

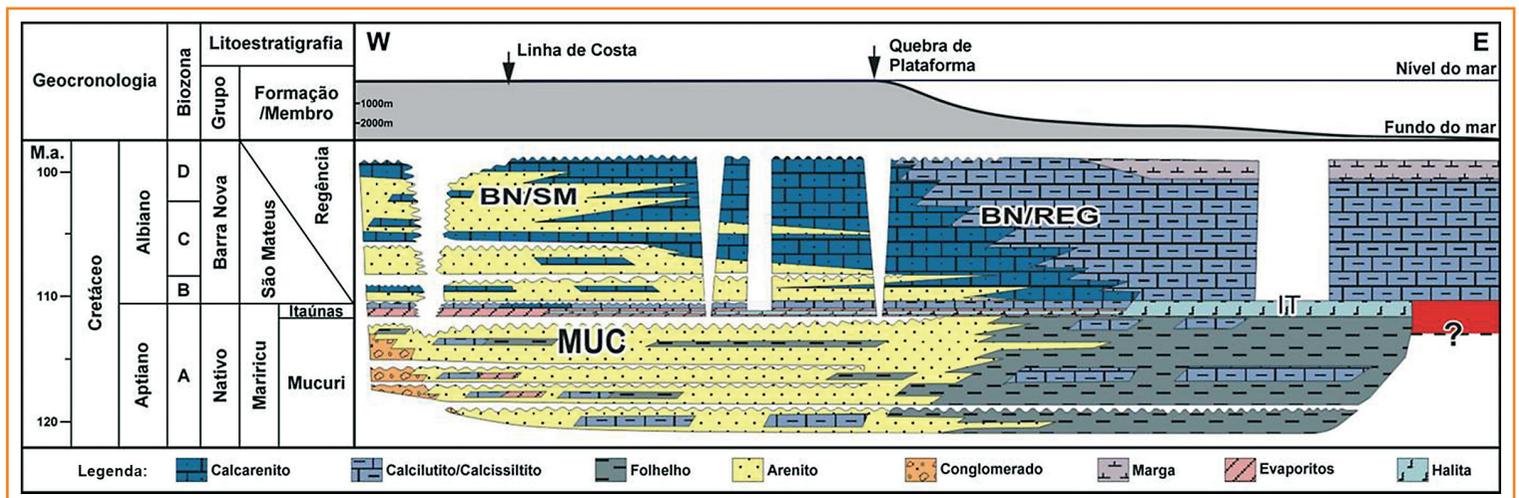


Figura 2 – Detalhe da carta estratigráfica da Bacia do Espírito Santo (Andares alboaptianos). A unidade estudada (Sequência A) corresponde à primeira sequência deposicional acima da seção evaporítica (Biozona B de Botelho Neto, 1996). Adaptado de Tagliari et al. (2012).

Figure 2 – Detail of the Espírito Santa Basin stratigraphic chart (Albian and Aptian). The studied unit (Sequence A) comprises the first depositional sequence above the evaporites (Biozone B of Botelho Neto, 1996). Adapted from Tagliari et al. (2012).

litológica para os intervalos não testemunhados da Sequência A.

A análise do conteúdo paleoicnológico forneceu importantes informações paleoambientais que subsidiaram a interpretação das associações

de fácies (AFs). Além disso, este estudo auxiliou no diagnóstico das variações paleoclimáticas (alternância entre condições mais ou menos secas) responsáveis pela ciclicidade (empilhamento faciológico) a partir do estudo de fatores responsáveis pelo

estresse ambiental (salinidade da água, oxigenação, taxa de sedimentação, entre outros).

Este artigo deve ser visto como complemento de um trabalho integrado (três manuscritos) que considerou mais de uma centena de poços perfurados na porção *onshore* da Plataforma de Regência e dados sísmicos 3D desta mesma região, quando foi, então, possível caracterizar, em nível regional, a disposição paleogeográfica dos principais tipos litológicos contidos no intervalo em apreço permitiu, também, discriminar uma assinatura climática vinculada a ciclos orbitais

controlando o empilhamento de alta frequência destes mesmos tipos litológicos (Tagliari *et al.*, 2012). Na vizinha Bacia de Campos (Azevedo, 2001), também foram constatadas influências climáticas creditadas a frequências orbitais na escala de alta frequência. As deduções paleoambientais ora apresentadas, derivadas fundamentalmente da análise faciológica de testemunhos de sondagem de uma pequena área (fig. 1), respeitaram padrões paleogeográficos claros e inferências climáticas significativas, que serão abordados na sequência do artigo.

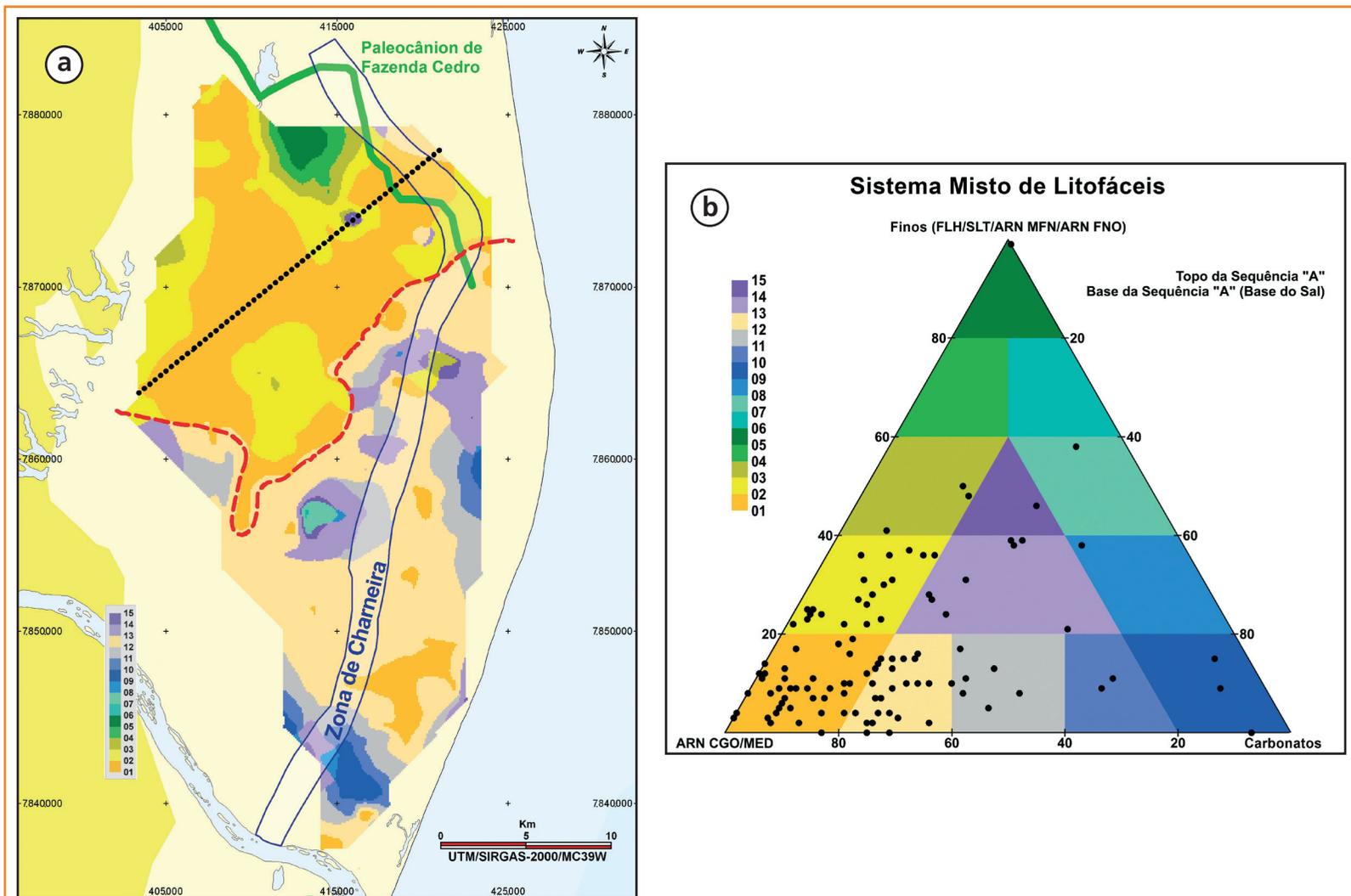


Figura 3 – Sequência A (adaptado de Tagliari *et al.*, 2012): (a) mapa de litofácies (a zona estudada situa-se dentro do círculo desenhado); (b) diagrama ternário de composição percentual das litofácies; (c) mapa paleogeográfico concebido a partir do mapa de litofácies: os ambientes proximais (sistema fluvial entrelaçado, planície deltaica e planície costeira dominada por ondas – cores laranja e verde) e elementos arquiteturais associados (canais fluviais e distributários ativos e abandonados; cordões litorâneos; e canais e vales incisos) têm no Rio Doce e planície deltaica associada, no estado do Espírito Santo, análogos modernos; (d) legenda do mapa paleogeográfico (a área em branco no mapa não foi amostrada por poços nem tampouco pela sísmica 3D); (e) imagem de satélite do delta do Rio Doce (Google Maps; acesso em 2012).

Consideramos como uma das principais contribuições deste artigo a proposição de um modelo deposicional capaz de explicar tanto a alternância cíclica como a disposição paleogeográfica dos principais tipos litológicos (fácies siliciclásticas, híbridas e carbonáticas). Na sua concepção são considerados tanto processos autocíclicos (sedimentos terrígenos trazidos por descargas fluviais efêmeras, produção *in situ* de sedimentos carbonáticos e redistribuição de ambos por correntes litorâneas e eventos de tempestade), como alocíclicos (variações climáticas e eustáticas controladas por ciclos

orbitais). Julgamos também significativo o modo sinérgico como foram abordados tópicos como a sedimentação mista (siliciclástica e carbonática) e a influência das variações orbitais na escala de alta frequência (Ciclos de Milankovitch) na sua gênese, bem como a interação entre halocinese e sedimentação. Todos esses aspectos ensejaram um estudo de múltipla abordagem, constituindo um estudo de caso singular, que não encontra paralelo na bibliografia consultada, sobretudo em função da escala de detalhe (decimétrica a dezenas de metros) com que o assunto foi tratado.

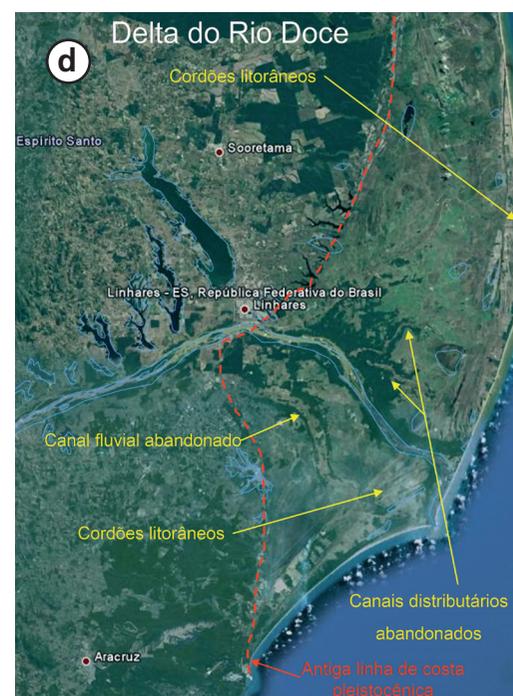
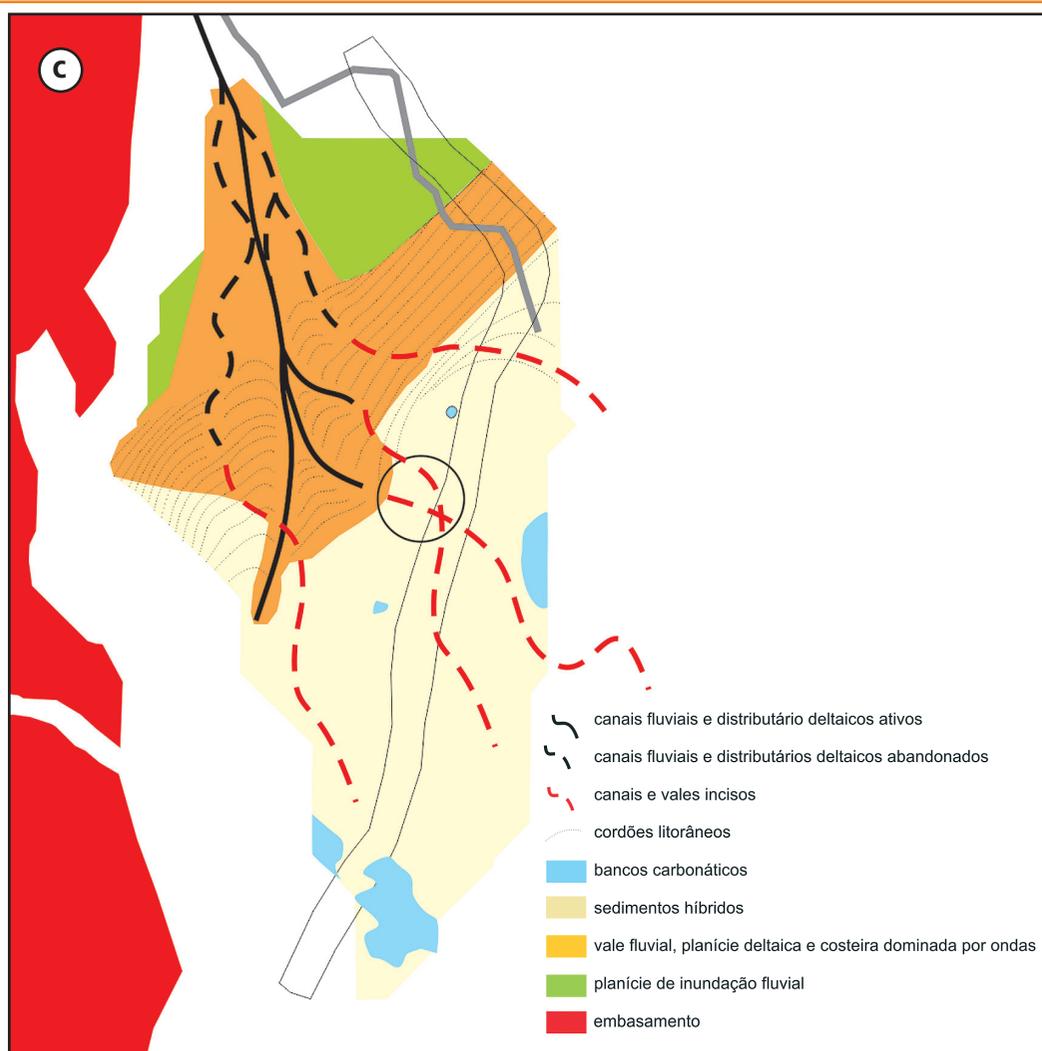


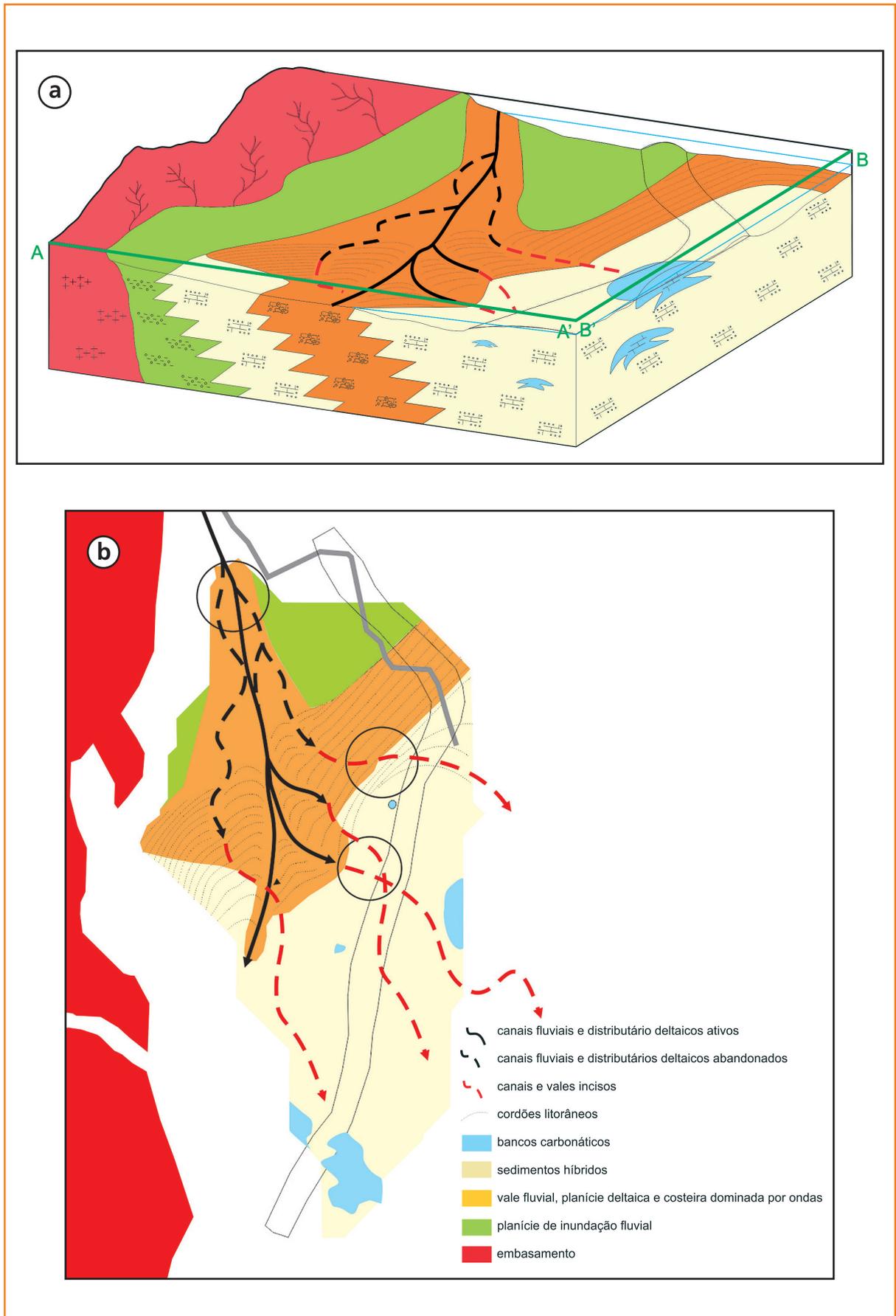
Figure 3 – Sequence A (adapted from Tagliari et al., 2012): (a) lithofacies map (circle delineates the studied area); (b) lithology ternary diagram; (c) paleogeographical map conceived from the lithofacies map: the proximal facies (fluvial, delta and strand plain – orange and green colors) and associated architectural elements (fluvial braided channels, active and abandoned distributary channels, coastal sand ridges and incised channels and valleys) have the Doce River fluvial and delta plain as modern analogues; (d) paleogeographical map legend (white area in the map has neither well nor 3D seismic data); and (e) satellite image of the Rio Doce delta plain and associated coastal strand plain (Google Maps, 2012 view).

Figura 4

(a) Bloco-diagrama com evolução paleogeográfica simplificada da Sequência A indicando uma retrogradação das fácies siliciclásticas associada a uma paulatina tomada do espaço de acomodação por sedimentos de composição híbrida e, subsequentemente, carbonática; (b) localização no mapa paleogeográfico da Sequência A da área representada no bloco-diagrama; (c) legenda.

Figure 4

(a) Simplified paleogeographical evolution (block diagram) of Sequence A showing a facies retrogradation defined by the gradual replacement of the siliciclastic rocks by hybrid and subsequently carbonate rocks; (b) location in the paleogeographical map of Sequence A of the area represented in the block diagram; and (c) legend. Source: Tagliari et al., 2013).



metodologia

Foram descritos e interpretados quase 180m de testemunhos provenientes de distintos intervalos estratigráficos (fig. 5) coletados de forma contínua (67,55m do Poço 5) ou semicontínua, como nos poços 2 (54,15m) e 3 (56,55m). As litologias descritas nos poços estão devidamente correlacionadas aos perfis elétricos e radioativos, bem como aos dados sísmicos. A descrição dos testemunhos é apresentada no formato utilizado pela Petrobras (Anassete – Análise Sequencial de Testemunhos; fig. 6) em duas escalas. Numa escala de maior detalhe, apenas os testemunhos 02 e 03 do Poço 2 são mostrados de modo a salientar o padrão de empilhamento das fácies no interior das associações de fácies (fig. 6 – Poço 2). Por outro lado, todo o intervalo amostrado dos poços 3 e 4 é apresentado em uma escala de menor detalhe para fornecer uma visão mais abrangente da sucessão vertical das associações de fácies (fig. 6 – poços 3 e 5).

A descrição dos testemunhos permitiu a discriminação de nove fácies siliciclásticas, duas fácies híbridas e três fácies carbonáticas (tabela 1; fig. 7), que foram agrupadas em oito associações de fácies (AF). As litologias, neste trabalho classificadas como híbridas, pressupõem um conteúdo de grãos carbonáticos situado entre 33% e 66% do total.

As fácies foram definidas e codificadas com base na granulometria dominante, composição (no caso das rochas híbridas e carbonáticas) e feição sedimentar característica (estrutura sedimentar ou fábrica), sempre se utilizando letras derivadas do termo em inglês, de mais fácil reconhecimento internacional. Assim, as letras H e L indicam composição híbrida e carbonática, respectivamente, enquanto a falta destas indica composição siliciclástica. As letras G, S e F indicam as classes cascalho, areia e lama, respectivamente, enquanto as demais letras maiúsculas representam subdivisões destas classes, tal como conglomerado de matacão, blocos ou seixos (B, C ou P), arenito conglomerático, médio a muito grosso, médio a fino, e fino a siltico (G, C, M ou F), pelito carbonoso (CO) e, por fim, tipos de carbonatos (R, P e G para *rudstones*, *packstones* e *grainstones*, respectivamente). Por fim, as letras minúsculas ao final dos códigos indicam aspectos característicos que permitem distinguir as fácies e que estão relacionados à fábrica ou às estruturas sedimentares dominantes (tabela 1).

Composição	Rocha	Granulometria	Código
Siliciclástica (<33% de carbonato) ou Híbrida (H) (33% a 66% de carbonato)	Conglomerado (G, GH)	Matacão (B)	GB (GHB)
		Blocos (C)	GC (GHC)
		Seixos (P)	GP (GHP)
	Arenito (S, SH)	Conglomerático (G)	SG (SHG)
		Médio a muito grosso (C)	SC (SHC)
		Médio a fino (M)	SM (SHM)
		Fino, muito fino a siltico (F)	SF (SHF)
Pelito (F)	Siltito	F (FH)	
	Folhelho carbonoso	FCO	
Carbonática (> 66% de carbonato)	Carbonato (L)	Rudstone (R)	LR
		Packstone (P)	LP
		Grainstone (G)	LG

No geral, mesmo que pertencendo a distintos intervalos estratigráficos, as mesmas fácies foram reconhecidas nos testemunhos dos três poços (figs. 5 e 6). A descrição dos testemunhos permitiu ratificar as conclusões das análises espectrais baseadas no perfil de raios gama (Tagliari *et al.*, 2012), ou seja, que a sucessão dos tipos litológicos da Sequência A possui um caráter repetitivo.

Considerando esta característica, procurou-se associar aos intervalos não testemunhados informações correlatas àquelas obtidas na descrição dos testemunhos. Essa vinculação foi realizada através de estudos com redes neurais (Petrel, 2012) baseada na correlação da descrição do intervalo testemunhado com as respectivas curvas dos perfis geofísicos de poços utilizados, a saber: raios gama, densidade, fator fotoelétrico (PEF), sônico e neutrão. O programa utiliza o algoritmo backpropagation. Foram realizados 50 treinamentos com variadas suítes dos perfis acima referidos, tendo sido escolhida aquela suíte com a série mais completa dos perfis (os cinco já citados). A seguir, foi aplicado o módulo de treinamento através da rede neural não supervisionada do algoritmo Competitive and Selective Learning (CSL), com testes com 20, 14, 12, 10 e, finalmente, sete classes geradas pela correlação dos perfis. A versão com sete classes mostrou-se mais coerente com o observado nos testemunhos. Foi aplicada, então, agora com o modo supervisionado algoritmo Sigmoidal Basis Function Regression Network (SBFRN), a versão com sete classes, que foi a escolhida, produzindo ótima correlação e justificando plenamente a aplicação do método.

Paralelamente, é importante lembrar que a classificação atribuída na coluna de “Associação de Fácies” (fig. 6) contemplou, para sua denominação, estratos com espessura superior a 2m. Assim, em

Tabela 1

Principais classes de fácies descritas nos testemunhos e respectivos códigos. Essas fácies foram posteriormente subdivididas em subclasses tendo por base sua feição sedimentar (fábrica ou estrutura sedimentar) característica.

Table 1

Main classes of facies described in the cores and their respective codes. Those facies were further subdivided into subclasses according to their distinctive sedimentary feature.

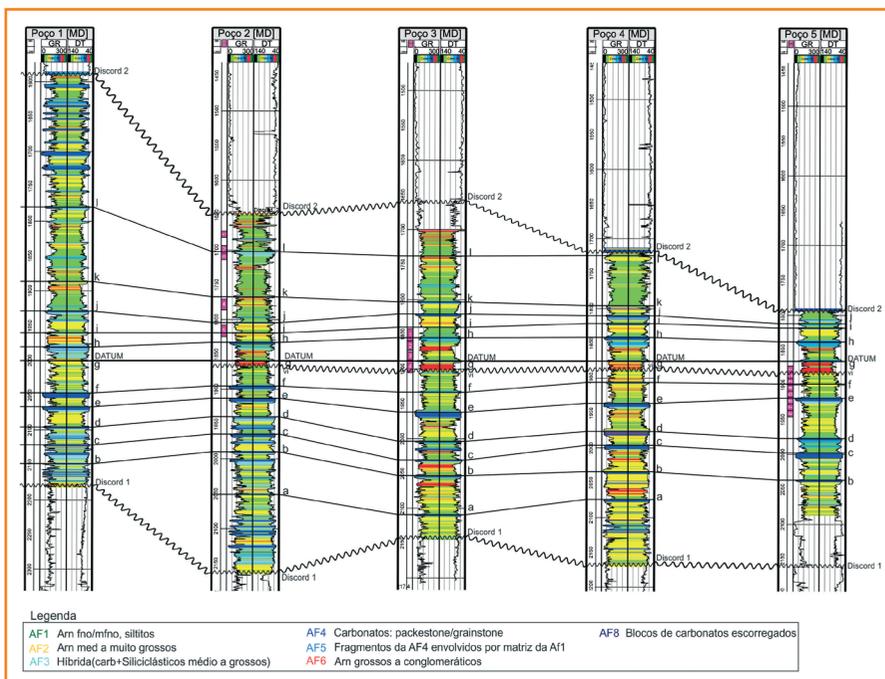


Figura 5

Seção estratigráfica oeste-leste utilizando os perfis raios gama e sônico dos poços 1, 2, 3, 4 e 5. O Marco "G" foi utilizado como datum. As cores indicam associações de fácies (AF) descritas nos testemunhos e passíveis de serem detectadas na escala apresentada. As descrições das AF foram extrapoladas para todo o intervalo da Sequência A por meio da aplicação de redes neurais nos perfis geofísicos de poços.

Figure 5

West-East stratigraphic section using gamma ray and sonic logs from wells 1, 2, 3, 4 and 5. Marker "G" was used as datum. Colors represent those facies associations (AF) described in the cores and visible at the adopted scale. The AF descriptions were extrapolated to the entire Sequence A through the application of neural networks on well logs.

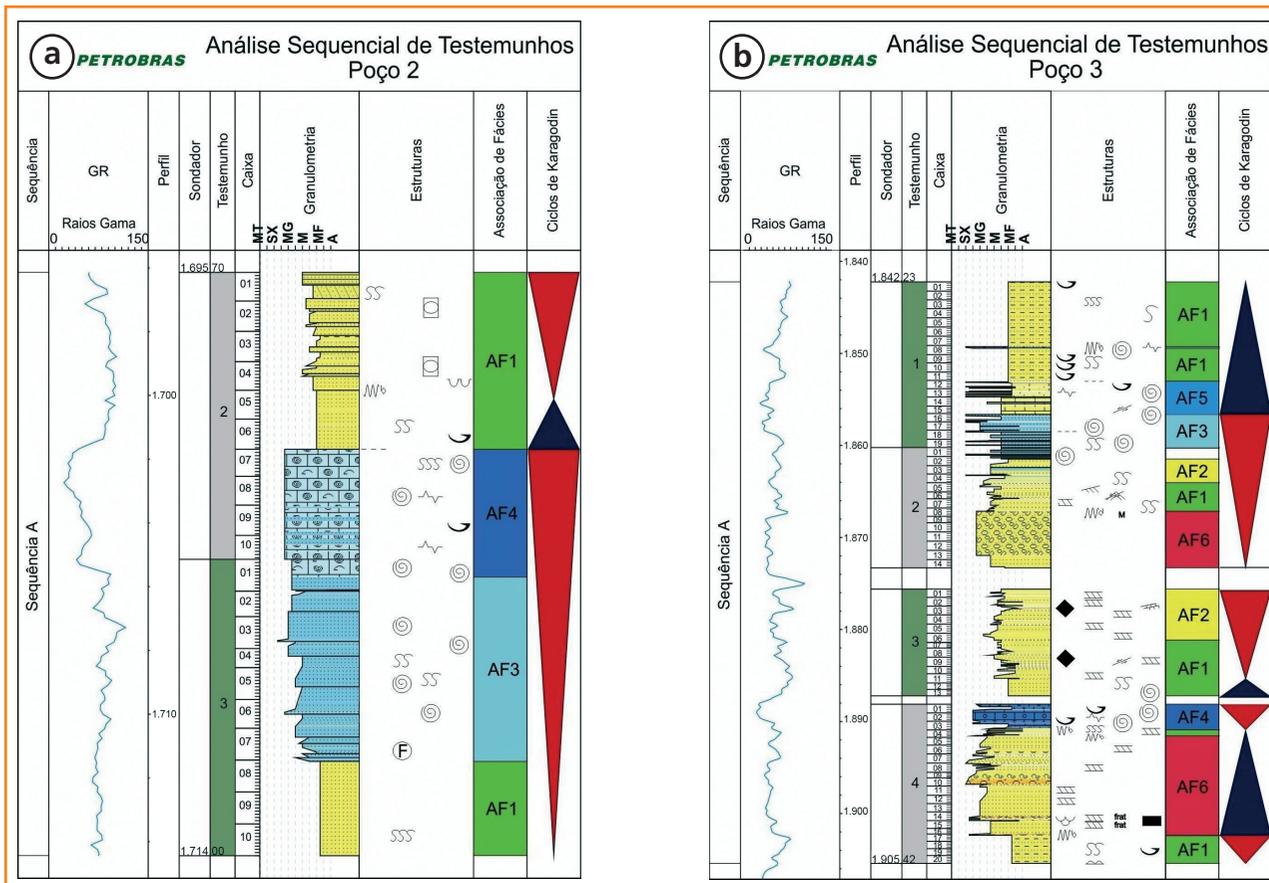


Figura 6 – Descrição de testemunhos: (A) Poço 2 – pacote grano- e estratocrescente ascendente (testemunhos 3 e 2) com a AF1 (rochas siliciclásticas finas de shoreface inferior/offshore) na base passando para a AF3 (fácies híbridas de shoreface superior) e culminando com a AF4 (carbonatos de shoreface), esta recoberta pela AF1 de um novo ciclo; (B) Poço 3 – sucessão grano- e estratodecrescente ascendente (testemunho 4) com os depósitos fluviais de vale inciso (AF6) sendo recobertos por fácies de planície de inundação da AF7; (C) Poço 5 – ciclo grano- estratocrescente ascendente definido pela sucessão das associações de fácies 1, 2 e, 3 seguido pela superposição das associações de fácies carbonáticas (AF 4 e 5) – testemunhos 08, 07 e 06.

função das escalas utilizadas, optou-se por simplificar a representação das escalas. É possível que estratos pertencentes à AF1, por exemplo, estejam intercalados com estratos da AF2 (fig. 6, Poço 5, T07 e T08), que empresta o nome ao intervalo em questão por conter espessuras mais significativas de estratos dessa associação. Do mesmo modo, isto pode ocorrer em outros intervalos. Em virtude da significativa amostragem dos vários ciclos, foi obtida uma interpretação preditiva da gênese dos mesmos (Tagliari *et al.*, 2012). Os perfis raios gama e fator fotoelétrico (PEF) mostraram-se os mais apropriados na distinção das fácies carbonáticas, mistas e siliciclásticas, mas optou-se pelo perfil raios gama no estudo do "ciclo ideal" (ver item: o " ciclo ideal") porque o PEF se apresentou como seria esperado, com aparência mais serrilhada, respondendo à composição mineralógica de distintos minerais presentes. A partir da descrição das fácies sedimentares presentes nos testemunhos, foram identificadas associações de fácies geneticamente

relacionadas (contatos transicionais) que se sucedem na escala da excentricidade curta (100 Ma).

Cabe realçar que várias camadas de arenito e algumas de carbonato que aparentam ter aspecto maciço na análise macroscópica mostraram-se laminadas, como pode ser percebido pela visualização de seções delgadas (fig. 8a). Além disso, o tratamento de fotos digitais dos testemunhos com o uso de ferramenta de pseudoiluminação sob diferentes intensidades e ângulos de incidência para salientar o relevo (Corel Photo Paint) mostrou ser a laminação uma feição conspícua em fácies aparentemente maciças (figs. 8b, 8c e 8d). Nesse segundo caso, cuidou-se para submeter ao mesmo tratamento fotos de amostras com laminação bem definida, de modo a demonstrar que o procedimento salientava orientações preexistentes, tanto as visíveis como as não visíveis a olho nu (fig. 8e).

Para o entendimento da gênese da sucessão faciológica foi de fundamental importância a sua

correlação com o mapa de litofácies da Sequência A. Esta sequência deposicional retrata na escala temporal de terceira ordem (2 a 3 Ma; Tagliari *et al.*, 2012) a distribuição faciológica obtida através da utilização de perfis compostos de mais de 90 poços exploratórios produzidos a partir dos perfis geofísicos, dos tempos de penetração da broca e das descrições de amostras de calha. O mapa de litofácies e o mapa paleogeográfico a partir do primeiro interpretado resumem, como um “instantâneo fotográfico”, a paleogeografia que controlou a sedimentação ocorrida ao longo do intervalo de tempo supracitado. O bloco-diagrama (fig. 4) foi confeccionado com base tanto no mapa de litofácies quanto em seções sísmicas contendo colunas geológicas de poços devidamente a elas ajustadas (às seções), obtidas no sentido do mergulho da bacia (fig. 9).

As seguintes abreviaturas são usadas no texto: AF – Associação de Fácies; T – Testemunho; P – Poço; e Cx – Caixa.

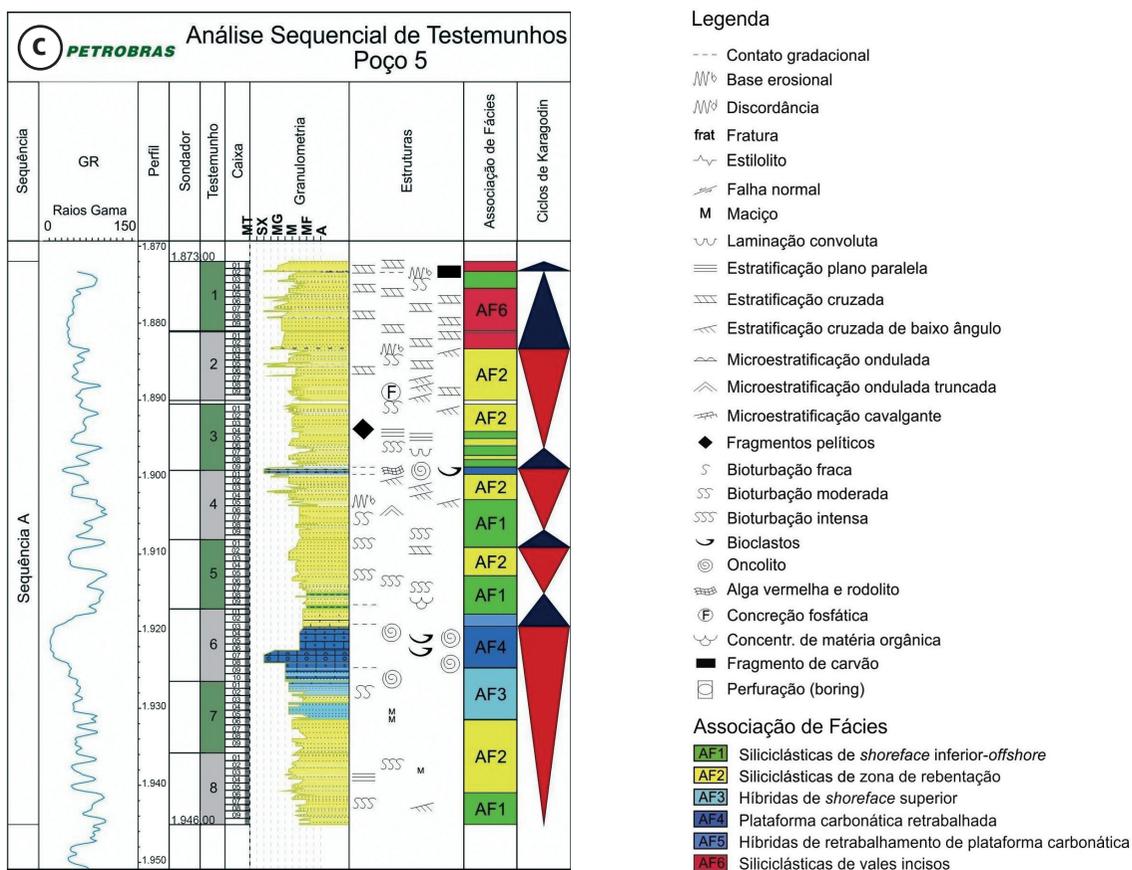


Figure 6 – Cores descriptions: Well 2: coarsening- and thickening-upward succession (cores 3 and 2) defined by AF1 (fine-grained siliciclastic facies of lower shoreface/offshore) being overlain by AF3 (upper shoreface hybrid rocks) and lastly by AF4 (upper shoreface carbonates), the latter being covered by the AF1 (new cycle). Well 3: fining- and thinning-upward succession (Core 04) of fluvial facies ascribed to incised valley fill (AF6) drowned by flood-plain facies (AF7); and Well 5: coarsening- and thickening-upward succession (AF1, AF2, AF3) followed by carbonates (AF4 and AF5) – cores 08, 06 and 07.

Figura 7

Exemplos de fácies: (1) siliciclásticas – (a) GPm, (b), SGt, (c) Sct, (d) SMCl (biot), (e) SMpp, (f) Smm, (g) SFl, (h) SFw, (i) HetSF (biot), (j) SFm, (k) SF (biot) e (l) FCm; (2) híbridas – (m) ShG-M e (n) SHf; (3) carbonáticas – (o) LR, (p) LPG e (q) LG.

Figure 7

Facies examples: (1) siliciclastic – (a) GPm, (b), SGt, (c) Sct, (d) SMCl (biot), (e) SMpp, (f) Smm, (g) SFl, (h) SFw, (i) HetSF (biot), (j) SFm, (k) SF (biot) and (l) FCm; (2) hybrid – (m) ShG-M and (n) SHf; and (3) carbonate – (o) LR, (p) LPG and (q) LG.

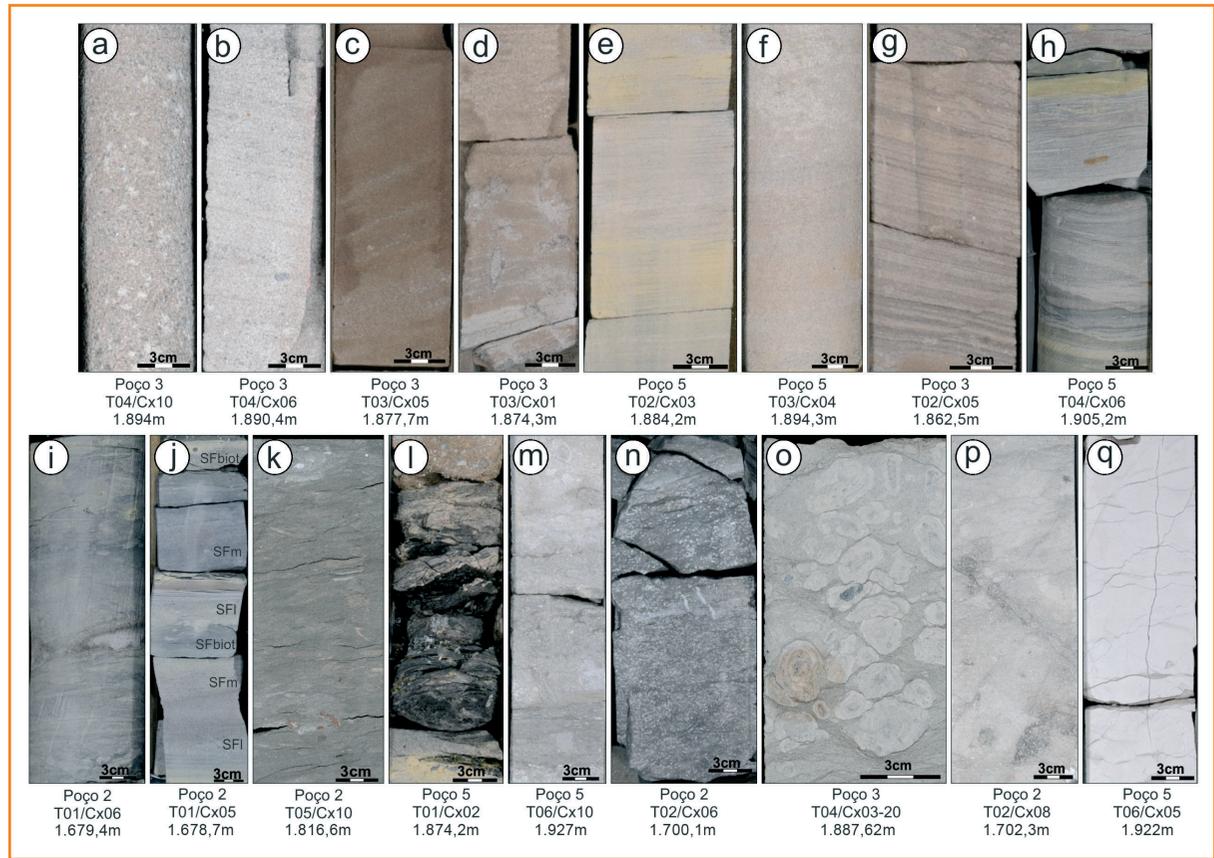
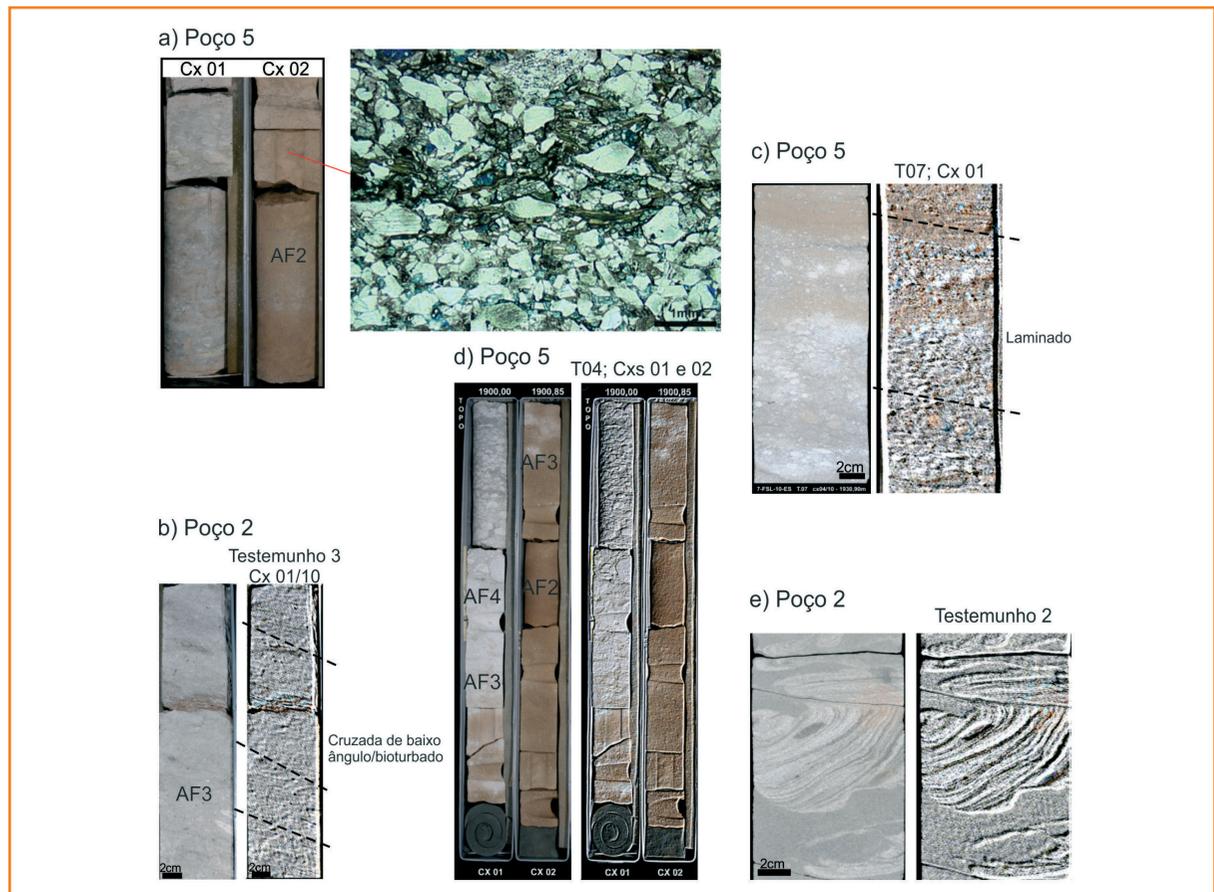


Figura 8

(a) Visão macro e microscópica de arenito médio, micáceo e mal selecionado da AF2; (b), (c), (d) e (e): pares de fotos de rochas siliciclásticas (AF2), híbridas (AF3) e carbonáticas (AF4) com aspecto maciço nas imagens sem tratamento (fotos à esquerda de cada par) e estratificado nas imagens submetidas à pseudoiluminação (fotos à direita).

Figure 8

(a) Macro and microscopic view of medium-grained, micaceous and poorly sorted sandstone of AF2; (b), (c); (d), (e): pairs of photos of siliciclastic (AF2), hybrid (AF3), and carbonate (AF4) rocks with massive (not processed photos in the left hand side) and stratified (photos under pseudo-illumination in the right hand side) appearance.



contexto geológico

Segundo Azevedo (2001), que abordou a evolução do paleo Atlântico Sul do Aptiano ao Mesoalbio, o ambiente geológico da região do Mar Vermelho, e porções continentais adjacentes, configura-se como um análogo moderno ao Atlântico Sul durante o Eoalbio. O lineamento formado pelo Alto de Florianópolis e a Dorsal de São Paulo constituía-se na barreira restritiva à circulação de água entre o Atlântico Sul Meridional (ASM) e Atlântico Sul Central (ASC), o qual incorporava as bacias da margem leste brasileira (incluindo o Espírito Santo). Essa barreira só foi superada de modo efetivo no Eoalbio. Até então, o ASC era alimentado fundamentalmente por águas vindas do Atlântico Norte, na época ligado ao Mar de Tethys. O ASC estava, então, inserido em um cinturão climático árido, submetido a um balanço hídrico negativo, com salinidades superiores à média. A tectônica que envolve o embasamento, movimentações halocinéticas eustáticas na escala de terceira ordem e, talvez, também na alta frequência, orbitalmente induzidas, foram responsáveis pelas oscilações do espaço deposicional. Esses fatores proporcionaram o empilhamento de dezenas de ciclos de raseamento de diferentes magnitudes.

Ainda segundo Azevedo (2001), interpretação baseada em dados de traços de fissão de apatita levantados na margem sudeste do Brasil e sul da África (Gallagher e Brown, 1999 apud Azevedo, 2001) aponta intensa denudação durante o Albiano, indicando presença de relevo escarpado na costa. Assim, cadeias montanhosas bordejavam este mar restrito, o que é corroborado pela ocorrência de uma transição de clásticos terrígenos, nas áreas proximais, para fácies carbonáticas no sentido das porções mais distais. A presença de sedimentos imaturos de primeiro ciclo constatada em testemunhos coletados em poços da área de estudo é condizente com esse contexto paleogeográfico e paleoclimático.

Nesse ambiente é que foi depositada a Sequência A, objeto de estudo do presente artigo. Essa sequência está limitada na base pelo horizonte sísmico que corresponde à porção basal dos evaporitos do Membro Itaúnas da Formação Mariricu (Neoaptiano), e no topo, por um horizonte sísmico correspondente a um truncamento erosional (fig. 9). A Sequência A caracteriza-se por rochas

siliciclásticas (siltitos, arenitos e conglomerados), híbridas e, subordinadamente, carbonatos (*packstones a grainstones* oncolíticos) e anidrita (França *et al.*, 2007).

O mapa de litofácies da Sequência A (fig. 3) sintetiza a paleogeografia dominante na escala de terceira ordem na porção *onshore* da Bacia do Espírito Santo e espelha o predomínio de depósitos siliciclásticos nas porções mais proximais (NW da Plataforma de Regência) e de fácies híbridas e carbonáticas nas áreas mais distais (fig. 3; a linha pontilhada em preto indica o *strike* deposicional (SW/NE) das fácies proximais, e a linha vermelha separa as fácies siliciclásticas das fácies mistas, estas, mais distais. Em maior detalhe, é percebida uma área com domínio de arenitos médios a conglomeráticos (cor laranja) na porção proximal, que indica uma evidente direção de transporte sedimentar para SE. Ao longo do limite com os depósitos híbridos marinhos, essas fácies siliciclásticas se alinham na direção NE/SW, sugerindo um retrabalhamento por ondas em uma zona litorânea sujeita à ação de correntes de deriva (*longshore currents*). Mais distalmente, já em contexto amplamente marinho, observa-se o predomínio de fácies híbridas e, localmente, carbonáticas, principalmente nas proximidades da zona de Falha Cedro/Rio Doce, interpretada como um paleoalto sindeposicional (Tagliari *et al.*, 2013). Vários estudos têm abordado sistemas mistos em ambientes plataformais, dentre os quais os de Doyle e Roberts (1987), Budd e Harris (1990) e Lomando e Harris (1991) constituem coletâneas “clássicas”.

Esta disposição paleogeográfica resultaria de um aporte siliciclástico derivado de descargas fluviais efêmeras provenientes de NW combinado com a produção *in situ* de sedimentos carbonáticos em altos estruturais relativos. Enquanto os altos em contexto marinho favoreceriam a produção carbonática, os sedimentos siliciclásticos tenderiam a se acomodar nos sítios mais baixos (Wilson, 1975). Concomitantemente ocorreria a redistribuição e mistura parcial de ambas as fontes (siliciclástica e carbonática) por ação de ondas e correntes de deriva litorânea na direção SW/NE, principalmente durante frequentes eventos de tempestade, conforme sugerido pelo retrabalhamento observado nas fácies carbonáticas e híbridas.

Fazendo-se uma analogia do ponto de vista da assembleia ecológica dos organismos secretores de carbonato do Recente, situados entre o Equador

e as latitudes 60° N e 60° S (Lees e Buller, 1972; Lees, 1975), com seus correlatos albianos das bacias da margem sudeste brasileira, estes últimos pertencem à assembleia denominada *foramol*, composta principalmente por foraminíferos e moluscos. Esses organismos ocorrem em ambientes com variados valores de salinidade e temperatura. São justamente esses componentes carbonáticos aqueles mais comumente presentes nos sistemas mistos, por sua maior tolerância ao estresse ambiental, o qual também inclui o sedimento em suspensão na coluna d'água que obstrui os mecanismos de alimentação de organismos (Mount, 1984). A composição dos sedimentos mistos é, provavelmente, controlada pela natureza dos processos que possibilitam a mistura dos componentes siliciclásticos e carbonáticos (Mount, 1984). As outras assembleias ecológicas carbonáticas são mais seletivas. A do tipo *chlorozoan* é dominada por algas verdes e corais,

restritas a ambientes com salinidade moderada e temperatura quente da água. A do tipo *cloralgal* comporta algas verdes e é restrita a ambientes de alta salinidade e águas quentes.

A área estudada situa-se na porção centro-leste da Plataforma de Regência, nas imediações da Falha Cedro/Rio Doce, a qual divide a plataforma em bloco alto e baixo. O pacote estudado, situado no bloco alto da plataforma, corresponde à Sequência A e abrange estratos ciclicamente dispostos e presentes em cinco poços perfurados em uma estrutura em *rollover* (fig. 9).

Segundo Duarte (2003), *rollover* é um anticlinal de compensação comumente associada às falhas de crescimento, formada no bloco baixo, paralelo à superfície da falha, como resultado da rotação do bloco baixo. Como consequência, o mergulho contra a superfície de falha se apresenta contrário ao do efeito de arrasto.

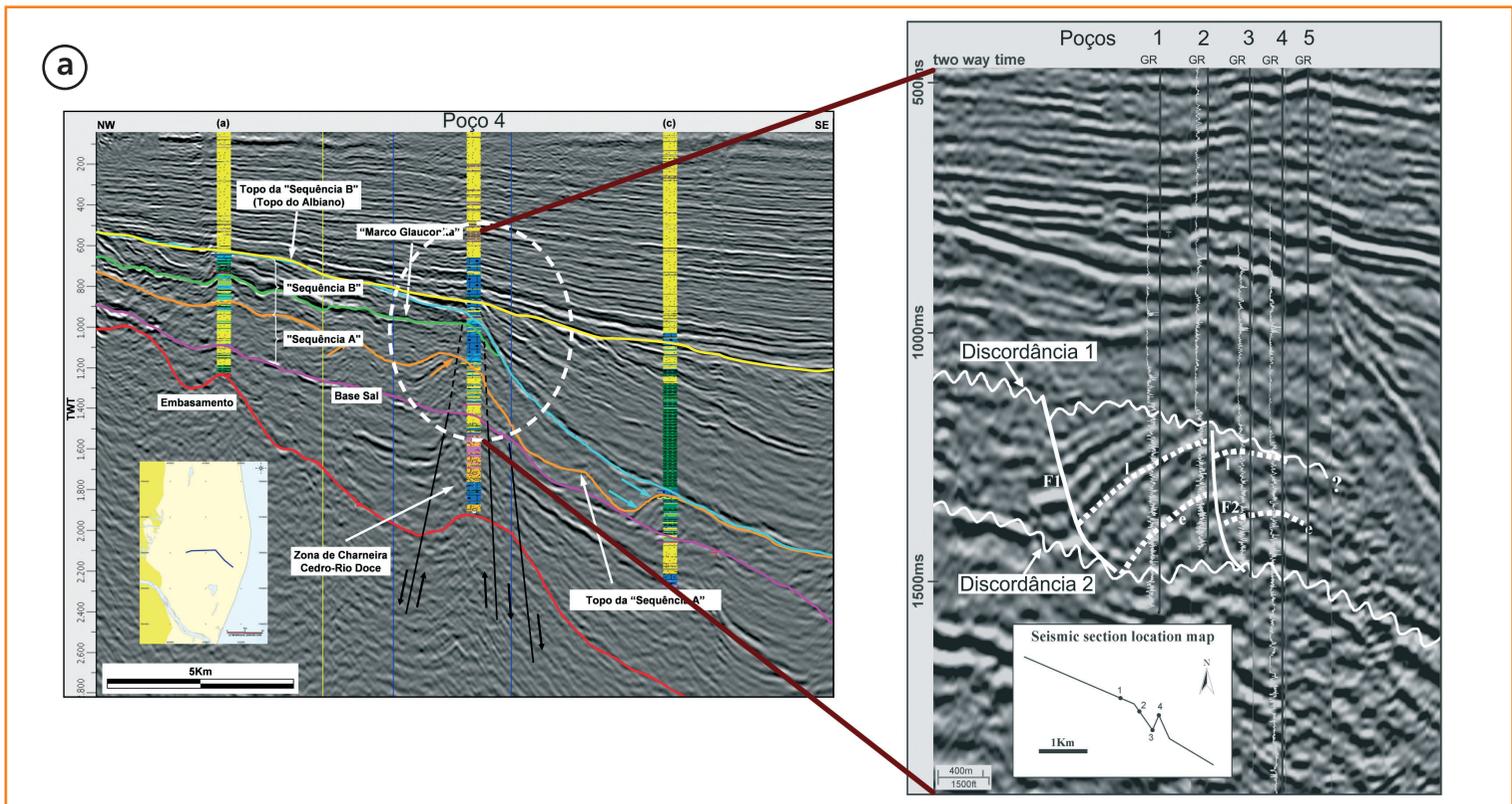


Figura 9 – Seção sísmica regional *dip* salientando, entre outros aspectos, a unidade objeto deste estudo (Sequência A) e a localização do Poço 4. Nota-se um aumento na quantidade relativa de carbonatos (cor azul nas colunas geológicas dos poços) para oeste. No detalhe (à direita na figura), é mostrada uma parte da seção sísmica com localização dos poços 1, 2, 3, 4 e 5 em uma estrutura de *rollover* formada durante a deposição da Sequência A (os refletos tracejados em branco mostram os marcros "e" e "l" – ver também fig. 5). Fontes: Tagliari et al., 2012; Tagliari et al., 2013.

Figure 9 – Regional *dip* seismic section (Tagliari et al., 2013) highlighting the studied interval (Sequence A) and the location of Well 4, among other features. Note the increment of the relative amount of carbonate (blue color in the logs) to the West. A detail of the seismic section (to the right in the figure) displays the location of wells 1, 2, 3, 4 and 5 that were drilled in a *rollover* structure formed during the deposition of Sequence A (white-dashed reflectors point to the location of the "e" and "l" markers - see Figure 5). Sources: Tagliari et al., 2012; Tagliari et al., 2013.

As fácies siliciclásticas, híbridas e carbonáticas ocorrem ciclicamente empilhadas. Esse padrão é bem demonstrado pelas sucessões verticais das fácies nos testemunhos de sondagem e pelo padrão cíclico perceptível quando da aplicação de redes neurais aos perfis geofísicos dos poços 1 a 5 (fig. 5), padrão esse já previamente reconhecido (Tagliari *et al.*, 2012) e que ora é ratificado. Esses ciclos compostos pela superposição de estratos siliciclásticos, híbridos e carbonáticos (fig. 5) são entendidos como resultantes da alternância de condições climáticas mais secas e menos secas (relativamente mais úmidas). O perfil de raios gama foi o que melhor conseguiu distinguir as fácies tipicamente carbonáticas (valores <50 API) das fácies híbridas e siliciclásticas. O perfil fator fotoelétrico (PEF) também se mostrou útil, porém com aparência mais serrilhada. Observa-se uma transição frequentemente contínua das fácies

siliciclásticas, passando para as fácies híbridas e destas para as carbonáticas. À medida que, gradativamente, aumenta o conteúdo carbonático em meio às fácies híbridas, até a franca ocorrência das fácies carbonáticas, registra-se uma tendência de diminuição paulatina nos valores de raios gama (fig. 6: P02/T02/cxs 01 a 03 e 07 a 10), que são mais altos nas fácies puramente siliciclásticas (arenitos arcoseanos). Esta configuração é repetida com muita frequência ao longo da amostragem obtida nos cinco poços descritos, assim como em outros poços situados no mesmo *strike* deposicional (fig. 10), o que sugere uma origem aloclíca para o empilhamento faciológico referido. A maior espessura da seção correspondente à Sequência A nas imediações do Poço 7 (fig. 10) é interpretada como fruto de escape de sal concomitante ao aporte sedimentar e subsidência mais expressivos.

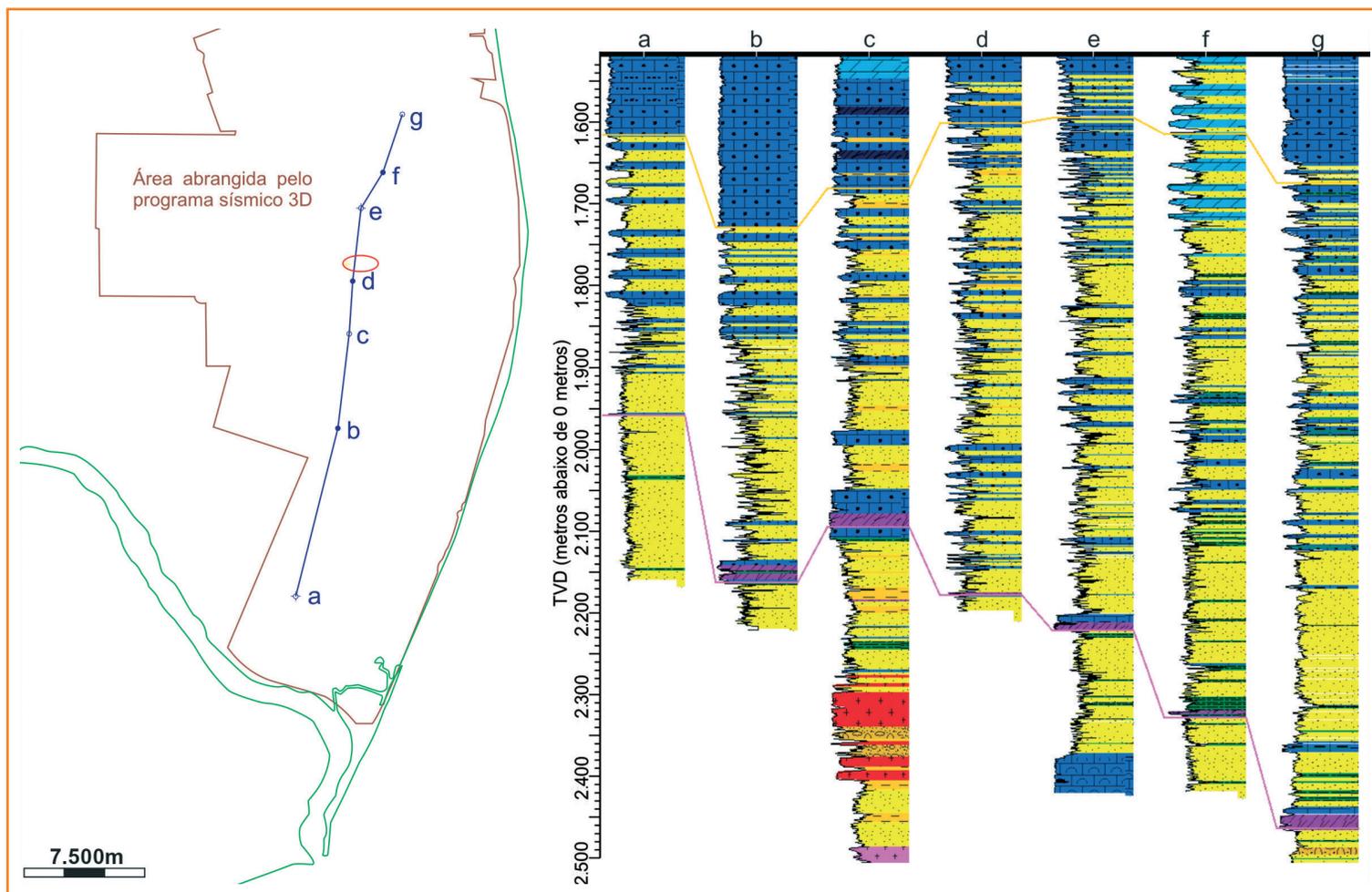


Figura 10 – Ciclicidade exibida na Sequência A ao longo de poços situados no mesmo strike deposicional (escala regional) dos poços da área estudada.

Figure 10 – Cyclicity of Sequence A recorded in wells drilled along the same depositional strike (regional scale) of the studied wells.

De acordo com Tagliari *et al.* (2012), o padrão cíclico dos estratos possui uma origem climática. Padrões de ciclicidade induzida por variações climáticas estão descritos em diversas localidades ao redor do globo, incluindo sucessões permianas da Permian Basin, no Texas e Novo México (Borer e Harris, 1991); pensilvanianas da Paradox Basin, também nos Estados Unidos (Frakes *et al.*, 1992; Goldammer *et al.*, 1991); albianas na Bacia de Umbria-Marche (Grippio *et al.*, 2004) e das formações Marne e Fucoidi (Giorgioni *et al.*, 2012), ambos os casos nos Apeninos italianos; neoptianas a neoalbianas em Oman (Immerhauser *et al.*, 1999); mesoalbianas na Bacia da Baixa Saxônia, no NW da Alemanha (Prokoph e Thurow, 2001; Tyszka, 2009); aptianas na Sierra Madre Oriental no NE do México (Montanez *et al.*, 2006); e aptiano-albianas nas regiões de Hannover, no norte da Alemanha (Heldt *et al.*, 2010), e de Piobbico, na Itália central (Silva *et al.*, 1989), entre outros casos. Além disso, várias evidências sugerem um clima árido a semiárido para o intervalo estudado. Dados palinológicos (Chumakov *et al.*, 1995) indicam um período predominantemente seco durante o Eoalbiano das bacias da margem sudeste brasileira. As lâminas delgadas e os testemunhos mostram arenitos finos e siltitos ricos em biotita sem evidências marcantes de alteração por intemperismo químico sindeposicional. Além disso, é quase completa a ausência de folhelhos nessa porção do Neoalbiano (Sequência A). A imaturidade textural e mineralógica, identificada macro e microscopicamente, sugere a presença de sistemas deposicionais siliciclásticos nas proximidades de uma área-fonte topograficamente elevada, similar à atual margem oeste da própria Bacia do Espírito Santo. Muito embora a ausência de feições indicativas da atuação de intemperismo químico possa, em princípio, ser em parte explicada por reduzido tempo de residência dos sedimentos na plataforma (grãos angulosos de siliciclásticos), causada por um rápido soterramento provocado por altas taxas de sedimentação, parece-nos altamente improvável que, ao longo de cerca de todo o intervalo testemunhado, este processo possa, por si só, explicar os exíguos 30cm de espessura que são constituídos de folhelhos. Esse pacote corresponde a mais de 180m em três níveis estratigráficos distintos da Sequência A, equivalendo a algumas centenas de ka. É mais crível pensar que o clima também foi o fator importante no sentido de evitar a presença significativa de pelitos na Plataforma de Regência.

Ademais, todas as informações climáticas supracitadas apontam um paleoclima árido a semiárido, correlato ao Eoalbiano no Atlântico sul primitivo.

O panorama acima descrito se assemelha ao que hoje vemos às margens do Mar Vermelho (Tucker, 2003), em particular na margem norte do Golfo de Eilat (também conhecido como Golfo de Aqaba), fronteiro à Península do Sinai (fig. 11; Friedman, 1987). Ali se observa uma fonte de origem ígneo-metamórfica, topograficamente elevada, submetida a um regime de clima desértico. Os sedimentos siliciclásticos chegam até um litoral bastante estreito, através dos rios temporários de alta energia (*wadis*), que descem das áreas montanhosas, formando leques (intemperismo físico) aluviais e leques deltaicos (*fan deltas*) que mantêm contato litológico direto com o mar e com sedimentos carbonáticos cujos constituintes mais importantes são corpos recifais. Estradas de rodagem pavimentadas foram construídas por sobre alguns dos *wadis* próximos à linha de costa (fig. 11), bem como obras portentosas (estradas e grandes hotéis, por exemplo) que estão situadas sobre os próprios *wadis* e leques. Isto indica que a descarga aluvial capaz de produzir a sedimentação de primeiro ciclo nos *wadis* é bastante efêmera, ocorrendo em intervalos de centenas, talvez alguns milhares de anos.

O *background* do sistema sedimentar é inferido como sendo carbonático, ou seja, durante a maior parte do tempo ocorre deposição de carbonato, e há taxas de acumulação mais baixas do que os siliciclásticos, que apenas muito esporadicamente aportam no litoral através dos *wadis* durante chuvas torrenciais. Nesse ambiente prepondera o intemperismo físico sobre o químico. A presença de argilominerais e finos em geral é secundária, pouco turvando a água do mar. Quando isso acontece, correntes litorâneas atuando paralelas à linha de costa rapidamente “limpam” o mar, deixando o ambiente outra vez favorável ao crescimento dos recifes de corais.

Nesse sentido, podemos traçar um paralelo climático e, em parte, paleogeográfico, com o Albiano da Plataforma de Regência, lembrando, porém, quão distintos são os ambientes tectônicos que caracterizam as duas áreas, a Plataforma de Regência durante o Albiano e o atual Golfo de Eilat. Este último ocupa um estreito vale tectônico com 10km a 26km de largura, limitado por falhas que formam taludes submarinos, ou seja, uma área em processo de rifteamento, exibindo plataformas



descontínuas, bastante estreitas, localizadas em pontos esparsos e comprimidas entre montanhas e o mar adjacente e profundo. Já no Albiano, a Bacia do Espírito Santo desenvolvia-se em uma margem passiva caracterizada por uma ampla plataforma em rampa, limitada a oeste por uma área elevada que também servia de fonte para deposição de sedimentos de primeiro ciclo. Tomando por base o que ocorre na margem norte do Golfo de Eilat, a alternância entre fácies siliciclásticas e carbonáticas na Plataforma de Regência sugere um *background* de sedimentação carbonática cujos depósitos eram periodicamente soterrados por sedimentos siliciclásticos, sem evidência marcante de intemperismo químico (e.g. raros e delgados estratos de folhelhos, restritos e delgados pacotes vinculados a turfeiras/manguezais e grãos de feldspato sem evidência de alteração sindeposicional), produzindo ciclos de sedimentação na escala de Milankovitch.

resultados

descrição macroscópica das fácies

Este item apresenta a descrição macroscópica das fácies sedimentares. Os termos sublinhados realçam os aspectos descritivos mais importantes e que, por isso, foram utilizados na composição

das siglas específicas adotadas para todas as fácies descritas.

siliciclásticas

a) Conglomerados (fácies G)

Fácies GPM (fig. 7): Conglomerado maciço, clasto-suportado, mal selecionado e polimítico. Composto por seixos ($\phi < 3\text{cm}$) e grânulos subangulosos a angulosos de quartzo, feldspato, líticos e intraclastos pelíticos. Ocorre na forma de camadas decimétricas a métricas com base erosiva e até 2m de espessura que, de forma usual, gradam verticalmente para arenitos conglomeráticos estratificados.

b) Arenitos (fácies S)

Fácies SGt (fig. 7b): Arenito conglomerático a muito grosso, mal selecionado, com matriz areno-argilosa, em camadas com base erosiva e gradação normal. Alguns níveis ricos em granada por vezes realçam a presença de estratificação cruzada. O arcabouço é composto por grânulos e seixos ($\phi < 2\text{cm}$), subangulosos a angulosos, de quartzo, feldspato e líticos (granitos e metamorfitos), dispersos no interior ou concentrados na base das camadas.

Fácies Sct (figs: 7c; 14h): Camadas decimétricas (0,4m a 0,7m) de arenito médio (fig. 12a), eventualmente fino, a grosso, mal a moderadamente selecionado, rico em granadas, com grânulos de

Figura 11

Imagens de satélite (Google Maps, acesso em 2011) da margem norte do Golfo de Eilat (Península do Sinai – Egito): (a) área-fonte de sedimentos siliciclásticos erodida por rios efêmeros, wadi e leque deltaico siliciclástico, este último bordejado por uma franja de recifes de corais; (b) wadi sobre o qual foi construída uma rodovia asfaltada.

Figure 11

Satellite image (Google Maps accessed by 2011) of the north margin of the Eilat Gulf (Sinai Peninsula, Egypt) (a) source area of siliciclastic sediments scoured by ephemeral streams, wadi and fan-delta, the latter bordering a coral reefs fringe; (b) a wadi along which a paved highway was built.

quartzo e feldspato, níveis micáceos e fragmentos carbonosos que ajudam a salientar a presença de estratificação cruzada tangencial de pequeno porte.

Fácies SCI (bio, biot) - figuras: 7d; 14a: Arenito médio a grosso, mal selecionado, micáceo, com grânulos subangulosos a angulosos de quartzo e feldspato, frequentes intraclastos pelíticos tamanho seixo e, localmente, fragmentos carbonosos e bioclásticos (bivalves, oncolitos). Apresenta laminação plano-paralela a cruzada de baixo ângulo. O fato de usualmente estar muito bioturbado lhe confere um aspecto macroscópico maciço. Essa fácies comumente se intercala de forma abrupta com camadas centimétricas a decimétricas (<30cm) das fácies SF, S(?) e SFI.

Fácies SMpp (fig. 7e): Camadas com base abrupta, por vezes de natureza erosiva, com 0,5m a 1,5m de espessura de arenito fino a médio, quartzoso, micáceo, com laminação plano-paralela e bioturbação difusa.

Fácies SMm (fig. 7f): Camadas decimétricas a métricas de arenito fino a muito grosso, quartzofeldspático, por vezes micáceo, com aspecto maciço devido à intensa bioturbação, eventualmente contendo nódulos de pirita e fragmentos carbonosos. Apresenta contatos transicionais com fácies de granulometria fina, normalmente passando de arenitos laminados na base e gradando para arenitos bioturbados no topo. Já os contatos com as fácies de maior granulometria são normalmente abruptos.

Fácies SFI (fig. 7g): Camadas com 5cm a 40cm de espessura de arenito fino a siltico, micáceo, com laminação plano-paralela a cruzada de baixo ângulo, por vezes com detritos carbonosos dispostos ao longo das laminações. Apresenta passagem transicional para as demais fácies arenosas finas e contatos abruptos com os arenitos médios a grossos e conglomerados.

Fácies SFw (fig. 7h): Camadas (0,1m a 0,3m de espessura) de arenito fino a siltico, micáceo, por vezes rico em fragmentos carbonosos, com laminação ondulada bidirecional, por vezes de natureza cavalgante, parcialmente bioturbados. Usualmente apresenta contatos abruptos com as demais fácies.

Fácies SFm (fig. 7j): Arenito fino, muito fino a siltito, maciço, quartzofeldspático, micáceo, cinza/castanho-escuro quando rico em material carbonoso.

Fácies SF (biot) (figs. 7k e 14b): Arenito fino, muito fino a siltico, quartzofeldspático, micáceo, cinza a castanho-escuro, maciço, muito bioturbado,

localmente apresentando resquícios de laminação original preservada.

c) Pelitos (fácies F)

Fácies HetSF (biot) – figura 7i: Camadas delgadas (milimétricas a centimétricas) de arenito fino a muito fino, quartzofeldspático e esbranquiçado, com estratificação plano-paralela e ondulações, intercaladas com camadas também delgadas de siltito cinza a castanho-escuro (heterolitos com acamadamento *wavy*, *linsen* e *flaser*). Esses heterolitos apresentam-se comumente muito bioturbados, mascarando total ou parcialmente o acamadamento, e com isto produzindo um aspecto mosqueado.

Fácies Fcm (fig. 7l): Argilito preto, carbonoso, maciço.

d) Híbridas

Fácies SHG-M (bio, biot) – figura 7m: Arenito híbrido, conglomerático a fino, quartzofeldspático, granatífero, frequentemente micáceo e mal selecionado, com níveis com concentração de distintas faixas granulométricas. Contém abundantes bioclastos (equinoides, bivalves) e oncolitos com núcleos frequentemente compostos por siliciclásticos, principalmente quartzo, também bioclastos e intraclastos carbonáticos. Peloides, intraclastos carbonáticos, fragmentos carbonosos dispersos e estilólitos também compõem estas fácies. Esses depósitos ocorrem frequentemente bioturbados e com aparência maciça. No entanto, quando submetidos à pseudoiluminação, mostram-se claramente estratificados (cruzada e plano-paralela – figs. 8b, 8c, 8d e 8e). Os constituintes carbonáticos indicam expressivo retrabalhamento (fig. 12d). Frequentemente gradam de fácies siliciclásticas médias a grossas (SM e SC), geralmente subjacentes, e transicionam para as fácies carbonáticas (C), normalmente sobrejacentes. Apresentam contato tanto gradado como abrupto com as fácies siliciclásticas finas.

Fácies SHF (bio, biot) – figuras 7n e 12g: Arenito híbrido, muito fino a siltico, quartzofeldspático, micáceo, com bioclastos (principalmente bivalves), oncolitos e intraclastos de até 2cm de diâmetro, dispersos. Constituem depósitos maciços devido à bioturbação, apresentando contatos gradacionais/abruptos com as fácies siliciclásticas finas, normalmente sobrejacentes, e carbonáticas, que geralmente lhes são subjacentes (fig. 13a - T02; cxs 06 e 07).

e) Carbonáticas

Fácies LR (fig. 7o): Rocha de granulação grossa, clasto-suportada, mal selecionada, muito bioturbada, o que acaba por produzir um aspecto maciço, com contato basal normalmente gradacional e de topo abrupto. Matriz bioclástica peloidal e grãos de quartzo (areia fina a grânulos) que envolvem intraclastos; oncolitos (tamanho grânulo a seixo com até 1cm de diâmetro), em parte retrabalhados, com núcleos frequentemente compostos por siliciclásticos, principalmente quartzo, bioclastos e intraclastos carbonáticos; e bioclastos (bivalves, equinoides). É comum a presença de estilólitos.

Fácies LPG-biot (figs. 7p e 12e): *Packestone* a *grainstone*, fino a grosso, mal selecionado, por vezes com matriz peloidal, com bioclastos e oncolitos (tamanho grânulos a seixos com núcleos siliciclásticos e/ou bioclásticos e/ou intraclásticos) cimentados por calcita micrítica. Aspecto macroscópico maciço que, em muitos casos, é apenas aparente, pois a laminação se torna visível em imagens processadas (fig. 8d). Contatos (base e topo) transicionais. Frequente preenchimento dos estilólitos por lama carbonática. Bioturbação generalizada.

Fácies LG (fig. 7q): *Grainstone* peloidal, maciço (muito bioturbado), com bioclastos e intraclastos carbonáticos, fragmentos carbonosos e grãos detríticos cimentados por calcita micrítica. Tanto o contato basal como o de topo podem ser gradacionais ou erosionais. Essa fácies possivelmente se associa à própria fábrica carbonática, visto que em seção delgada (fig. 12e) se visualiza um *grainstone* cimentado, sem matriz e sem indícios de redeposição.

descrição e interpretação das associações de fácies

AF1 - Associação de fácies siliciclásticas de shoreface inferior-transição offshore

Associação siliciclástica que inclui arenitos (SF1, SFm, SF (biot – fig. 12b), SFw e SMm), heterolitos (HetSF(biot)) e pelitos (F(biot) e Fcm). É caracterizada pela superposição de camadas centimétricas a métricas, comumente gradadas, de arenitos finos a siltitos, micáceos, laminados, maciços ou bioturbados (fig. 7j). As camadas se iniciam com arenito fino a muito fino com estratificação cruzada de baixo ângulo e/ou plano-paralela (Sf1) que grada para arenito fino

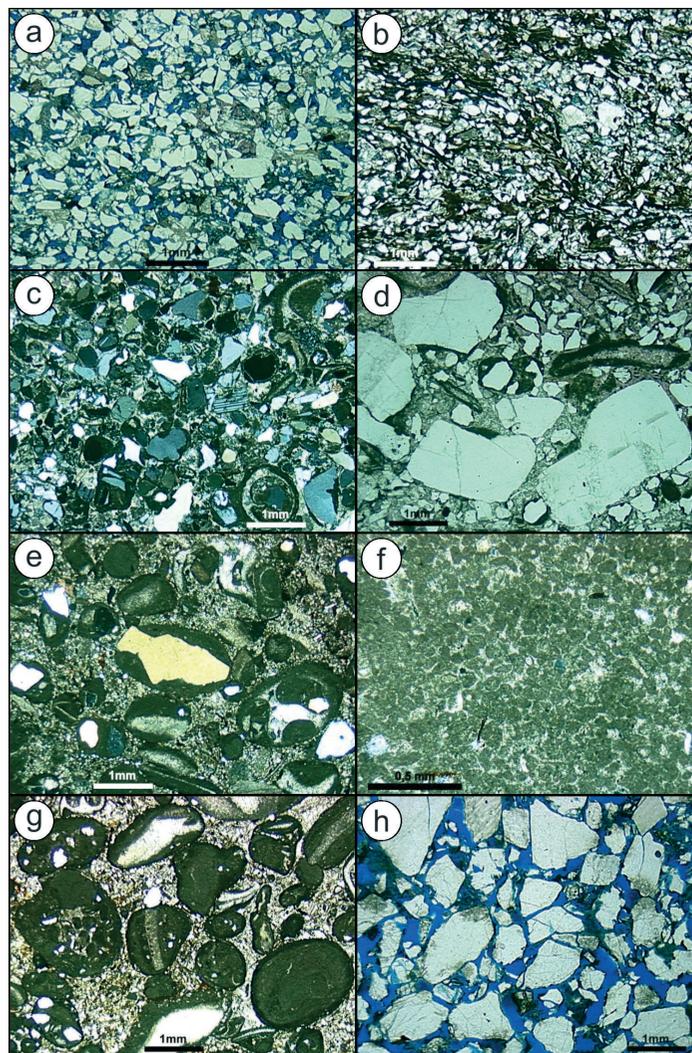


Figura 12 – Feições microscópicas das principais associações de fácies: (a) AF2 (Poço 5; 1.893,35m; T03) – arenito grosso a muito grosso, seleção regular, grãos de quartzo angulosos a subangulosos (//P); (b) AF1 (Poço 3; 1.880,15m; T03) – arenito muito fino, grãos de quartzo angulosos a subangulosos, micáceo, laminado (//P); (c) AF4 (Poço 2; 1.701,45m; T02) – packstone oncolítico, com oncolitos apresentando núcleos de fragmentos de bioclastos e quartzo (//P); (d) AF3 (Poço 2; 1.707,10m; T03) – arenito híbrido fino a muito grosso, mal selecionado, com oncolitos retrabalhados apresentando núcleos de quartzo, bioclastos, oncolitos e feldspatos (//P); (e) AF4 (LG) (Poço 5; 1.921,70m; T06) – grainstone peloidal (XP); (f) AF6 (Poço 3; 1.866,9m; T02) – arenito grosso a muito grosso, quartzoso, laminado (//P).

Figure 12 – Microscopic features of the main facies associations: (a) AF2 (Well 5; 1,893.35 m; Core 3) – coarse to very coarse-grained, angular to subangular regular-sorted sandstone (//P); (b) AF1 (Well 3 1,880.15m; Core 3) – very fine-grained sandstone with angular to subangular quartz grains, micaceous, laminated (//P); (c) AF4 (Well 2; 1,701.45m; Core 2) – oncolithic packstone with oncoliths displaying nucleous with bioclasts and quartz fragments (//P); (d) AF3 (Well 2; 1,707.10m; Core 3) – fine to very coarse-grained, poorly-sorted hybrid sandstone, with reworked oncoliths showing nucleous composed of quartz, bioclasts, oncoliths and feldspar fragments (//P); (e) AF4 (Well 5; 1,921.70m; Core 6) – peloidal grainstone(XP); (f) AF6 (Well 3; 1,866.90m; Core 2) – coarse to very coarse quartz-grained laminated sandstone (//P).

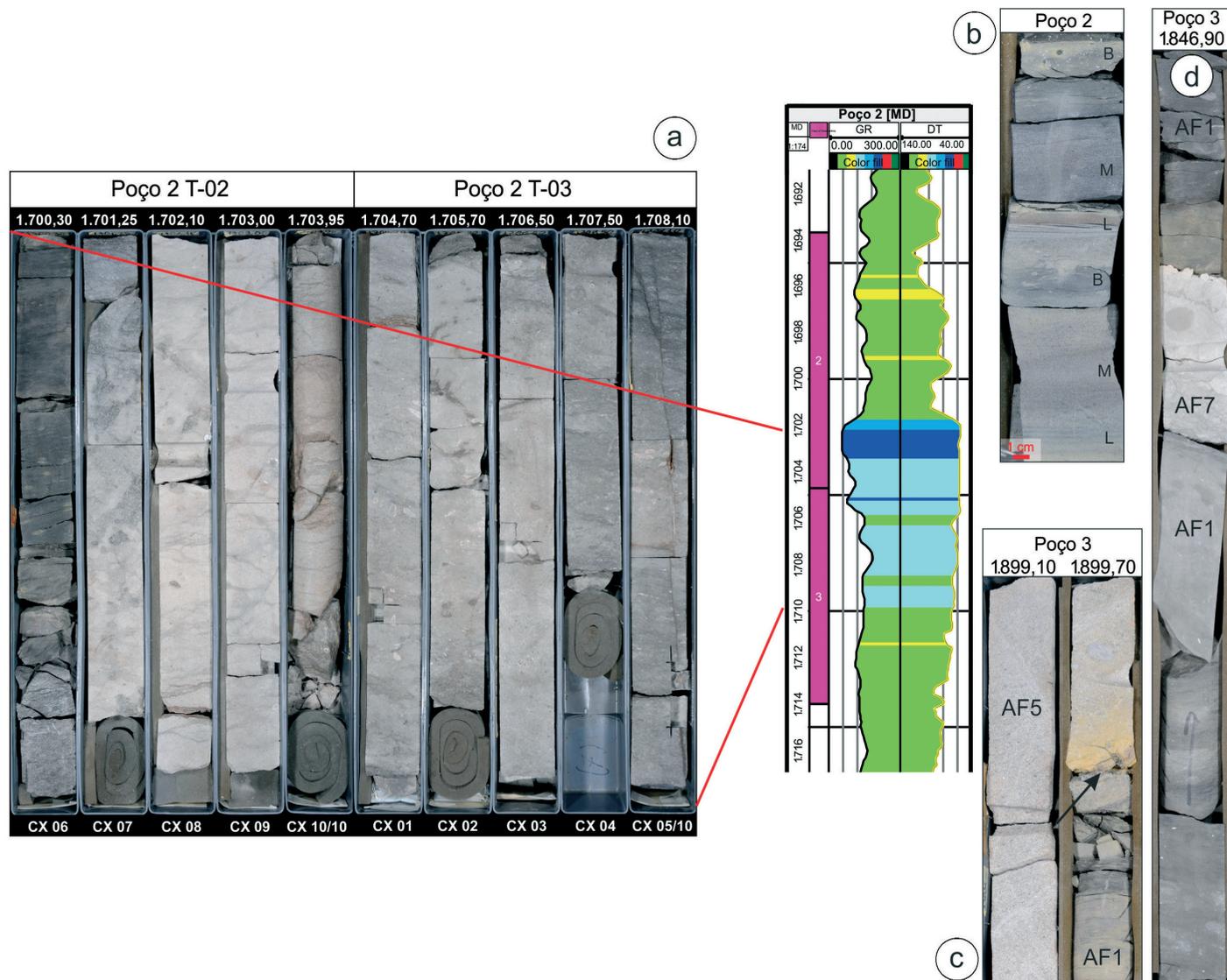


Figura 13 – Relações de contato entre várias associações de fácies: (a) contato gradual desde fácies siliciclásticas finas com bioclastos e oncolitos (AF1) passando para híbridas médias a grosseiras e destas para carbonatos (ver posição do intervalo em detalhe na seção estratigráfica da fig. 5); (b) intercalação cíclica de arenitos finos a siltitos apresentando-se, no sentido ascendente no interior de cada camada, laminados (L), maciços (M) ou bioturbados (B); (c) contato erosivo (seta) da base da AF5 (arenitos fluviais) sobre depósitos da AF1 (sedimentos mais distais); (d) contatos erosivos na base e topo de camada de carbonato alóctone com sedimentos siliciclásticos finos de AF1.

Figure 13 – Contact relationships of several facies associations: a) gradual passage from fine-grained, bioclastic/oncolithic siliciclastic facies (AF1) through medium-grained, hybrid facies to carbonates (see location of the zoomed interval in the stratigraphic section - figura 5); b) cyclical intercalation of fine-grained sandstone to siltstone presenting an upward change from laminated (L) through massive (M) to bioturbated aspect; c) erosive contact (arrow) at the base of AF5 (fluvial sandstones) scoured on more distal, AF1 strata; d) erosive, lower and upper contacts of the allochthonous carbonate with fine-grained, siliciclastic deposits of AF1.

a muito fino maciço (SFm) e culmina com intercalações bioturbadas de arenito muito fino a siltito (HetSF(biot)). Localmente a base apresenta laminação cruzada bidirecional (SFw), por vezes de caráter cavalgante; a porção intermediária inclui arenitos médios maciços (SMm); e o topo inclui siltitos maciços bioturbados (F (biot)) e carbonosos (FCm). Com

frequência, a base laminada é ausente, e os pelitos são representados por siltitos bioturbados (F(biot)).

Cada camada gradada registra um evento de sedimentação (fig. 13b): sua base contém estruturas sedimentares primárias que sugerem alta taxa de sedimentação por suspensão em regime de fluxo superior (estratificação horizontal) ou transicional/

inferior (estratificação cruzada de baixo ângulo). Os sets cruzados de baixo ângulo foram vinculados a estratificações cruzadas *hummocky* (Harms *et al.*, 1975; Dott e Burgeois, 1982; Hunter e Clifton, 1982) ou *swaly* (Leckie e Walker, 1982). Essa interpretação é reforçada pela presença de laminações cruzadas com feições indicativas da ação de ondas (SFw), conforme critérios propostos por de Raaf *et al.* (1977), no lugar das cruzadas de baixo ângulo. A porção massiva intermediária indica uma acentuada desaceleração dos fluxos oscilatórios causando um aumento nas taxas de sedimentação por suspensão e, assim, a fluidização das areias. Já o nível de topo denota a desaceleração final dos fluxos, propiciando a sedimentação de material de natureza mais fina e heterolítica, sugerindo oscilações de altíssima frequência (minutos a horas), propiciando a decantação intercalada de areia muito fina e silte. Após o evento deposicional, organismos bentônicos bioturbavam os níveis heterolíticos e pelíticos de topo da camada gradada. A presença de estruturas convolutas, de escape de fluidos e de carga reforça a ideia de eventos deposicionais frequentes (estruturas de carga) com altas concentrações de sedimentos em suspensão (escape de fluidos e feições de convolução). Em conjunto, esses atributos sugerem retrabalhamento frequente por fluxos oscilatórios carregados de sedimentos em suspensão (ondas de tempestade) em ambiente situado abaixo do nível de base de ação das ondas normais, portanto em contexto de *shoreface* inferior e de transição para *offshore*. A presença de pelitos reflete momentos em que as ondas de tempestades não moviam o fundo, e condições calmas, e mesmo anóxicas, se faziam presentes. A AF1 alcança 15m de espessura e comumente é intercalada, e grada seção acima, com a também siliciclástica AF 2 (fig. 6-P03 e 05) ou 3, esta de natureza híbrida (fig. 13a-T03/cxs 04 e 05). Além disso, eventualmente passa de forma abrupta para AF3 (fig. 6-P02). Já o contato com os carbonatos é normalmente abrupto e situado no topo das camadas de carbonato da AF4 (fig. 13a-T02/base da cx 06), onde ocorrem pequenos fragmentos dispersos de oncolitos, bioclastos e intraclastos que aumentam em quantidade em direção ao contato.

Thalassinoides, *Planolites*, *Palaeophycus*, *Helminthopsis*, *Rhizocorallium* e *Chondrites* (fig. 14; tabela 2) são frequentes e compõem suítes de traços fósseis pouco diversificadas, com escavações comprimidas e pequenas.

Esse padrão de bioturbação sugere águas salobras, normalmente polihalinas a oligohalinas, a

doces (Pemberton *et al.*, 1992; Buatois *et al.*, 2005), fruto de uma significativa afluência de água doce em um meio salino (oceano), padrão esse também registrado em estratos coevos da Bacia de Kwanza em Angola (Eichenseer *et al.*, 1999). O consequente estresse ambiental se manifesta em formas menos desenvolvidas, escavações pequenas, algumas vezes de baixa diversidade ou até monoespecíficas. Tais aspectos sugerem salinidade relativamente baixa (Pemberton e Wightman, 1992), oxigenação não raro também baixa e turbidez média a alta em função de sedimentos finos ricos em mica em suspensão na coluna d'água. Tais formas e particularidades apontam para a Icnofácies Cruziana empobrecida, a qual se forma em ambiente litorâneo situado entre o nível de base de ação das ondas normais e de tempestades impactado pela incursão de águas doces e de finos em suspensão. Esses fatores são responsáveis pelo estresse ambiental e, assim, pelo caráter empobrecido da icnofauna. A eventual presença de águas com salinidade normal (poli-halinas/esteno-halinas) é registrada pela icnofábrica *Teichichnus* com *spreite* bem desenvolvido (fig. 14e).

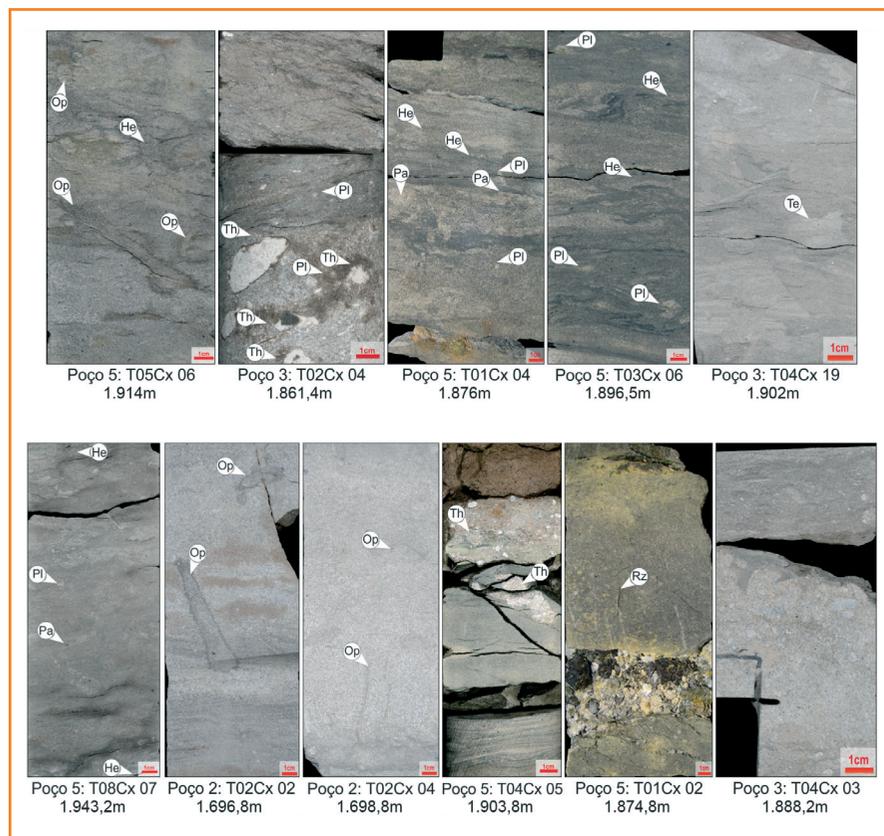


Figura 14 – Fotos de testemunhos com diversos exemplos de icnofácies.

Figure 14 – Core photos presenting several types of ichnofacies.

Figura	Poço	Testo/Cx	Prof (M)	Icnofábrica	Bi	Suite	Icnofácies	Substrato	Interpretação
a	5	5/6	1.914,00	Ophiomorpha	2	Ophiomorpha	Skolithos	Arenito médio a fino	Colonização oportunista, em águas salinas, pelo menos mixohalinas.
b	3	2/4	1.861,00	Planolites Thalassinoides	3		Cruziana empobrecida	Arenito fino softground	<i>Thalassinoides</i> discretos e achatados e baixíssima icnodiversidade sugerem condições de águas salobras (mixohalinas).
c	5	1/4	3.291,00	Planolites Palaeophycus Helminthopsis	2	Planolites		Arenito fino/argilito softground	Colonização incipiente por <i>Planolites</i> e <i>Palaeophycus</i> , nos arenitos finos, e por <i>Helminthopsis</i> , nos argilitos. A ocorrência pontual e em contexto isolado dessas icnofábricas sugere condições de baixa salinidade, possivelmente água doce.
d	5	3/6	3.284,00	Helminthopsis Planolites	2		Cruziana empobrecida	Arenito fino softground	Colonização incipiente e pontual, oportunista. Sugere águas pouco salinas, podendo ser até oligohalinas.
e	3	4/19	3.220,00	Teichichnus	3	Teichichnus	Cruziana	Arenito fino softground	Icnofábrica monoespecífica de <i>Teichichnus</i> . Escavações grandes, spreite longos. Sugere colonização em ambiente com águas de salinidade normal (polihalino-estenohalino), mas sujeito a estresse por algum outro fator.
f	5	8/7	3.260,00	Planolites Palaeophycus Helminthopsis	4	Cruziana	Cruziana empobrecida	Arenito fino softground	Colonização mais permanente, apesar de pouco diversa. Indica atividade de fauna residente, mas oportunista. Sugere condições de moderada a baixa energia e baixa salinidade da água, podendo ser, inclusive, oligohalina (água doce).
g	2	2/2	3.206,00	Ophiomorpha	2	Ophiomorpha	Skolithos	Arenito softground	Colonizações oportunistas, em águas salinas, pelo menos mixohalinas; sugere o estabelecimento de condições de maior energia, como uma praia ou mesmo canais de maré.
h	2	2/4	3.203,00	Ophiomorpha	2	Ophiomorpha	Skolithos	Arenito softground	
i	5	4/5	3.281,00	Thalassinoides	3		Glossifungites	Argilito firmground	<i>Thalassinoides</i> em <i>firmgrounds</i> indica exposição ou exumação de pelitos compactados; a ausência de suítes pré-omissão sugere pelitos formados em ambientes costeiros (magues).
j	5	1/2	3.293,00	Rizobioturbação	1			Arenito fino/argilito softground	Paleossolo.
k	3	4/3	3.229,00	Planolites Helminthopsis	2	Planolites	Cruziana	Arenito fino softground	Associação pobre, baixíssima icnodiversidade e pontual, sugere disaerobia do substrato e possivelmente condições pouco salinas ou de águas doces.

Tabela 2 – Classificação e interpretação das icnofábricas e icnofácies descritas em testemunhos (fig. 14).

Table 2 – Classification and interpretation of the ichnofabric and ichnofacies described in the cores (fig. 14)

Grãos siliciclásticos angulosos a subangulosos (figs. 12a, 12b, 12d e 12f) sugerem área-fonte soerguida e próxima, associada com taxas de acumulação sedimentar suficientemente altas (Tagliari

et al., 2012), concomitantes a um curto tempo de residência na plataforma e que podem justificar a presença disseminada de grãos siliciclásticos angulosos e subarredondados presentes em proporções

variadas em todas as fácies siliciclásticas descritas. É interpretado um transporte curto e pequeno tempo de residência dos sedimentos no ambiente deposicional. Micas, transformadas em argilominerais quando a alteração química meteórica é intensa, são abundantes e muito bem preservadas, o que sugere paleoclima oscilando entre semiárido (sedimentação siliciclástica) e árido (deposição carbonática). Estes aspectos composicionais e texturais estão também presentes nas associações 2 e 3, nas quais ainda são observados feldspatos muito bem preservados, permitindo, assim, extrapolar a interpretação paleogeográfica e paleoclimática proposta para AF1 para todo o intervalo estudado e, pelo menos, para o mesmo *strike* deposicional na Plataforma de Regência. Em alguns níveis estratigráficos delgados das fácies siliciclásticas foram descritos fragmentos carbonosos que indicam esporádicas condições climáticas relativamente mais úmidas.

AF2 - Associação de fácies siliciclásticas de zona de arrebenção/*shoreface* superior

Associação siliciclástica composta por camadas (<2m de espessura) de arenito predominantemente médio, variando de fino a grosso, localmente conglomerático. A composição é quartzo-feldspática, mas inclui fragmentos líticos e, subordinadamente, bioclastos. Estratificações cruzadas tangenciais de pequeno a médio porte (SCt), de baixo ângulo (SMI) e plano-paralelas (SMpp), são comuns. Alguns arenitos médios a grossos estão bioturbados (SC (biot)) com icnofábrica *Ophiomorfa*/icnofácies *Skolithos* (fig. 14; tabela 2) por vezes de forma tão intensa que leva à completa homogeneização do depósito (SMm). Por outro lado, depósitos com aspecto macroscópico maciço se mostram, muito amiúde, estratificados em imagens processadas (fig. 8e).

A granulometria mais grossa (relativa à AF1) dessa associação, somada às relações transicionais com a AF1 e AF3 e feições hidrodinâmicas presentes (estratificação plano-paralela e cruzada tangencial de alto e baixo ângulo) e paleoicnológicas (icnofácies *Skolithos*) sugerem ambiente com salinidade normal, águas agitadas e rasas vinculadas a fluxos oscilatórios, combinados e unidirecionais de moderada a alta energia. Nesse sentido, a AF2 foi vinculada a um contexto deposicional de zona de arrebenção/*shoreface* superior situado próximo à zona de arrebenção. Ambas as associações siliciclásticas aludidas (AF1 e AF2) apresentam um

aumento de componentes carbonáticos (oncolitos, bivalves, equinoides) no sentido ascendente quando transicionam para a AF3, esta de natureza híbrida.

Extensos afloramentos contínuos, por dezenas de quilômetros, de arenitos litorâneos da Formação Lajas (Jurássico Superior) na Bacia de Neuquén (Argentina) descritos por Paim *et al.* (2008; 2010) apresentam fácies e sucessão de fácies similares às AF1 e AF2 que podem servir como análogos de afloramento para as sucessões albianas descritas nos poços. Pacotes de arenito fino, com laminação ondulada de grande comprimento de onda (escala métrica), similar àquela reproduzida em experimentos com fluxos combinados por Arnott e Southard (1990) e descrita por diversos autores em ambientes marinhos rasos (e.g. de Raaf *et al.*, 1977; Kreisa, 1981), contendo esporádicos níveis com cruzadas de alto ângulo, são sobrepostos por arenitos médios, eventualmente grossos a conglomeráticos. Eles são organizados na forma de sets de estratificação cruzada bidirecional com feições internas associadas à reversão de fluxo de curto período (segundos a minutos). Essa sucessão vertical de fácies também pode ser acompanhada lateralmente ao longo dos afloramentos e representa uma porção distal/basal dominada por fluxos oscilatórios e/ou fluxos combinados (*shoreface* inferior) e uma porção proximal/superior dominada por fluxos combinados (*shoreface* superior).

AF3 - Associação de fácies híbridas de zona de arrebenção/*shoreface* superior

Essa associação comporta grãos siliciclásticos (arenito conglomerático a fino) combinados com oncolitos (com núcleos compostos predominantemente de quartzo) e bioclastos (33% a 66% dos depósitos) provenientes de bancos carbonáticos. Muitas vezes, os pacotes apresentam aspecto maciço SHG-M (bio, biot) e SHF (bio, biot). No entanto, quando não intensamente bioturbados, mostram-se bem estratificados ao serem submetidos à pseudoiluminação (figs. 8b; 8c; 8d e 8e), indicando a ação de correntes trativas na deposição destas fácies (regime de fluxo inferior e superior). Além da frequente presença de bioclastos, os oncolitos, na maioria dos casos, apresentam-se retrabalhados (fig. 12d). As fácies estão organizadas como sucessões grano- e estratocrescentes (fig. 6 – P02 e O3) que incorporam quantidades crescentes de oncolitos e bioclastos no sentido ascendente e culminam com o implante da plataforma carbonática (AF4).

Os constituintes e as estruturas sedimentares, assim como o retrabalhamento dos oncolitos e bioclastos, denotam domínio de processos trativos em contexto deposicional com moderada a alta energia e influenciado pelo aporte intra (carbonatos) e extrabacinal. Essa origem híbrida é realçada pelas relações de contato com as fácies siliciclásticas subjacentes (AF1 e AF2) e carbonáticas sobrejacentes (AF4). Assim, um ambiente de zona de arrebatamento/*shoreface* superior de moderada a alta energia, eventualmente sujeito a eventos de tempestades (porção expressiva dos oncolitos e de bioclastos estão quebrados) e situado próximo a incipientes bancos carbonáticos nos parece uma interpretação lógica para acomodar todas as evidências.

AF4 - Associação de fácies de plataforma carbonática retrabalhada

Essa associação se distingue nos perfis de poços por valores de raios gama inferiores a 50 API. A AF4 comporta camadas com 0,2m a 1,5m de espessura de *rudstones*, *grainstones* e *packstones* oncolíticos (ricos em núcleos siliciclásticos), bioclásticos, peloidais e intraclásticos, com matriz peloidal. Esses carbonatos possuem baixa proporção de grãos siliciclásticos dispersos (principalmente quartzo) e estilólitos frequentes. A intensa bioturbação das fácies carbonáticas lhes empresta um caráter maciço. Como no caso anterior, os fragmentos carbonáticos estão comumente retrabalhados, mas ao menos um pacote preserva a fábrica carbonática *in situ* (fig. 7 – T06/cx 05; figs. 7q e 12f). A AF4 marca o topo de ciclos grano- e estratocrescentes que, quando completos, envolvem a superposição das associações de fácies 1, 2, 3, 4 e/ou 5 (fig. 6 – P2/T02 e 03, P3/T01 e 02; e fig. 6 – P5/T06 a 08). A análise microscópica não revelou indícios de exposição subaérea no topo dos ciclos (AF4 e/ou AF5), apesar de poder estar mascarada pela intensa diagênese visível em micro- e macroescala.

A presença de grãos siliciclásticos (quartzo, feldspato e fragmentos líticos) angulosos a subangulosos, dispersos na matriz e como núcleos dos oncolitos, nos pacotes carbonáticos indica fonte siliciclástica próxima e atuante, mas com aporte mais reduzido do que quando da fácies híbrida, viabilizando o crescimento carbonático. A morfologia angular dos fragmentos carbonáticos sugere retrabalhamento por ondas. A intensidade da bioturbação, mais intensa que nos depósitos siliciclásticos, sugere baixa taxa de sedimentação

e consequente mais prolongada residência dos grãos próximos à superfície deposicional. O mapa de litofácies (fig. 3), apesar de simular uma imagem média da configuração paleogeográfica de toda a Sequência A, permite-nos inferir que a área dos poços estudados não foi um sítio preferencial de formação de bancos carbonáticos, mas uma área interbancos onde dominava a sedimentação híbrida. O retrabalhamento das fácies carbonáticas endossa essa assertiva. As fácies oolíticas, ausentes nos poços descritos, mas reconhecidas no mesmo intervalo estratigráfico em outras áreas da Plataforma de Regência, sugerem ambientes rasos e de moderada a alta energia (LR e LPG) e de moderada a baixa energia (LG). Tais fácies, somadas às profusas bioturbações e à baixa biodiversidade nos carbonatos, indicam presença de águas hipersalinas no ambiente deposicional (Azevedo, 2001; Dias-Brito, 1982; Spadini *et al.*, 1988).

AF5 - Associação de fácies híbridas de retrabalhamento da plataforma carbonática

Esta associação abarca arenitos finos a muito finos da AF1 com fragmentos dispersos de carbonatos de mesma composição da AF4 (fig. 6 – P03 e P05/T06/cx 02; e fig. 7n). Seus depósitos são, na maioria das vezes, muito bioturbados, o que lhes empresta um caráter maciço. Com frequência se associam ao retrabalhamento do topo de camadas carbonáticas da AF4 (fig. 13a), o que sugere um vínculo com o afogamento da plataforma carbonática (superfície transgressiva de ravinamento). Seu contato com as fácies siliciclásticas médias a grossas (AF2) e híbridas (AF3) é abrupto, nesses casos indicando variações de alta frequência do nível de base, conjugadas com mudança de clima seco para menos seco, com provável aumento da precipitação pluviométrica.

AF6 - Associação de fácies siliciclásticas de vales incisivos

A associação compreende conglomerados maciços (GPm – fig. 7a) e arenitos muito grossos (fig. 12e) a conglomeráticos com estratificação cruzada realçada por grânulos ao longo dos estratos cruzados (SGt –fig. 7b). Essas fácies estão organizadas na forma de sucessões granodecrescentes de base erosiva que ocorrem intercaladas na AF1 ou, de forma mais rara, na AF2 (fig. 6 – P03/T04, e P05/T01 e 02). A ocorrência dessa associação dá-se de forma aleatória, sendo mais rara do que aquelas

de origem marinha. A AF6 foi descrita em testemunhos dos poços 3 e 5 (fig. 5), e, através do uso de redes neurais, foi prognosticada a sua presença em outros intervalos dos mesmos poços, assim como no Poço 4, na forma de pacotes com mais de 5m de espessura. A espessura máxima registrada para esta associação foi de 12m no Poço 3.

Pacotes arenoconglomeráticos granodrecrescentes, com base erosiva, geometria lenticular (fig. 5) e com feições sedimentares que indicam fluxos trativos sugerem sistemas fluviais entrelaçados preenchendo canais ou vales. O fato de apresentarem feições erosivas (fig. 13c) e serem recobertos de forma abrupta por fácies litorâneas sugere incisões geradas durante fases de rebaixamento do nível relativo do mar e consequentes regressões forçadas (Gibling, 2006; Maynard *et al.*, 2010; Zaitlin *et al.*, 1994; Reijenstein *et al.*, 2011). A baixa resolução do sinal sísmico não permite a detecção das feições de vales incisos, cuja interpretação é feita com base na descrição litológica e na sua correlação por perfis, que permitem inferir sua expressão areal. O vale inciso detectado logo abaixo do Marco G (figs. 5 e 6 – P03/T04 e P05/T01) é o de maior continuidade lateral/longitudinal (>1km), com seus depósitos apresentando um padrão em caixote no perfil raios gama, com valores médios mais baixos do que os encontrados nas outras fácies siliciclásticas.

AF7 - Associação de fácies siliciclásticas finas de decantação

Essa associação é composta por camadas (10cm a 40cm de espessura) de arenito fino/muito fino a siltito maciço (SFm) e folhelho carbonoso com eventuais lâminas de vitrênio (FCm – fig. 7l). Estão associadas às icnofábricas de *Thalassinoides* (fig. 14i) e *Glossifungites*, desenvolvidas em *firmground*.

A AF7 ocorre associada e sempre no topo da AF6, marcando o preenchimento final dos vales incisos. As icnofábricas presentes indicam exposição ou exumação de pelitos compactados, possivelmente em ambientes costeiros (mangues), tendo em vista a ausência de suítes pré-omissão. A presença de vitrênio e rizobioturbação (fig. 14j) reforça a presença de ambientes de mangues e vegetação terrestre *in situ*. Seu vínculo com fácies fluviais, a presença de matéria orgânica terrestre (folhelhos carbonosos) e a ocorrência de traços fósseis indicativos de exposição subaérea em ambiente paludial, em conjunto, sugerem que foram

formados em ambientes de extravasamento de canais fluviais durante a colmatção final de vales incisos. Turfeiras foram desenvolvidas em ambientes parálicos, rasos, calmos, de águas doces a mixo-halinas. Isto aponta um gradativo aumento na taxa de geração de espaço de acomodação durante o preenchimento dos vales incisos. A presença de siltitos e arenitos finos, bioturbados, em contato erosivo sobre fácies mais grossas de origem fluvial indica um abrupto afogamento do sistema (superfície transgressiva de ravinamento) e consequente disaerobia do substrato (herança da fase anaeróbica de formação das turfeiras) e condições de águas possivelmente pouco salinas ou mesmo doces (ambiente estuarino).

AF8 - Associação de fácies carbonática alóctone

Aparecem como pacotes com até 2m de espessura de carbonatos de plataforma intercalados de forma abrupta com depósitos de *shoreface* inferior e de transição para *offshore* da AF1 (fig. 6 – P05, no limite dos T02 e 03; fig. 13d). Esse contexto não é compatível com as fácies carbonáticas descritas, as quais necessitam de águas límpidas e de mais alta energia. Isto sugere tratar-se de blocos deslizados/ressedimentados até a zona de *shoreface* inferior/*offshore*.

empilhamento faciológico

A seção estudada é caracterizada por ciclos bem definidos (20m a 30m de espessura sem correção da compactação) relacionados a variações orbitais na escala de Milankovitch detectadas por análise espectral em perfis de raios gama (Tagliari *et al.*, 2012), ou seja, alociclos, provavelmente com variações eustáticas associadas. Os ciclos compreendem a alternância de rochas siliciclásticas, híbridas e carbonáticas, usualmente com as primeiras na base, as híbridas no meio e os carbonatos no topo. O topo de algumas camadas de carbonato foi nominado em ordem alfabética no sentido ascendente para fins de correlação estratigráfica e análise do padrão de empilhamento (Tagliari *et al.*, 2012). Foi gerada uma seção estratigráfica sendo utilizado o *datum* Marco G, uma camada carbonática que ocorre em todos os poços estudados (fig. 5). A seção está devidamente ajustada a uma seção sísmica *dip* (fig. 9, zoom da seção sísmica), o que solidifica a

correlação feita. As camadas nominadas (marcos estratigráficos) são aquelas que ocorrem em todos os poços estudados, exceto o Marco L, que não está presente no Poço 5. Há outras camadas de carbonatos de expressão areal mais restrita, que não foram nominadas e talvez representem ciclos de mais alta frequência.

As associações de fácies previamente apresentadas foram definidas não apenas pela descrição das fácies nos testemunhos, mas também por seu padrão de empilhamento. Esse ponto é também de fundamental importância no estabelecimento de um arcabouço estratigráfico de alta frequência, sobretudo quando não se dispõe de boas exposições, apenas de testemunhos. Os dados derivados dos testemunhos descritos, somados aos perfis dos poços 1 a 5, permitiram discriminar e estender as associações de fácies 01 a 06, e 08, para toda a Sequência A através do uso de redes neurais. Por ser muito delgada, a AF7 não foi interpretada via redes neurais na escala de perfis utilizada neste estudo, não sendo, portanto, apresentada na seção estratigráfica (fig. 5).

halocinese e discriminação das fácies através da aplicação de redes neurais

A discriminação das fácies a partir da aplicação de redes neurais (utilizado o aplicativo Petrel da Schlumberger) para todo o intervalo da Sequência A possibilitou constatar que a seção de crescimento sedimentar mais conspícua, justaposta à Falha 1 e posterior ao marco “K” no Poço 1 (fig. 5), também evidente na seção sísmica (seção pós-marco “h” que aproximadamente corresponde ao primeiro pico preto abaixo do marco “I” no bloco baixo da F1, fig. 9), contém maior percentual de siliciclásticos grossos (AF2), indicador de ambiente com energia mais alta, do que o constatado na seção correlata do Poço 2, onde ocorre clara predominância das fácies AF1, mais finas, de mais baixa energia. Isso é o que se espera nesses sítios. A visualização da seção estratigráfica também permite notar que a seção pré-marco “K” não mostra crescimentos de seção do mesmo porte, o que explica a presença disseminada de fácies de energia mais alta (AF2) ao longo de toda a atual estrutura, que, nessa fase, ainda não se configurava como um anticlinal de compensação (*rollover*) como agora o vemos.

o “ciclo ideal”

O “ciclo ideal” (fig. 15) usualmente se inicia pela superposição das fácies siliciclásticas de *shoreface inferior/offshore* (AF1) sobre os carbonatos de plataforma retrabalhada (AF4). Esse contato fica registrado pelo abrupto aumento dos valores de raios gama da AF1 (>120 API) em relação àqueles medidos na camada de carbonato imediatamente subjacente (<50 API). É bom lembrar que as AFs foram interpretadas através das redes neurais por meio de cinco perfis. Por outro lado, esse afogamento é por vezes marcado pela presença da AF5, uma mistura de sedimentos siliciclásticos com clastos provenientes do retrabalhamento da plataforma carbonática, entre as associações de fácies carbonáticas (AF4) e siliciclástica (AF1). Assim, a superfície transgressiva pode ser delineada na passagem da AF4 para a AF1, quando então registra uma passagem abrupta, ou uma transição para a base da AF5, neste caso delineando um afogamento mais gradual com erosão (ravinação) associada.

Quando da instalação da AF1, os valores de raios gama costumam aumentar até valores maiores do que 150 API devido a mais altas concentrações de matéria orgânica (e pirita associada), permitindo-nos interpretar a formação de uma superfície de inundação máxima (superfície de condensação). A partir desta superfície ocorre um gradativo aumento granulométrico e de espessura das camadas (grano- e estratocrescência), com a AF1 intercalando-se com a AF2 e AF3, e sendo gradacionalmente, e nesta ordem, substituída. Paralelamente uma diminuição dos valores de raios gama é observada. À medida que se aproxima da AF4 (plataforma carbonática), a AF3 tem seu conteúdo carbonático gradativamente aumentado (fig. 13a – T03/cxs 01 a 03; e T02/cx 10). Os valores de raios gama decaem paulatinamente até atingir valores menores do que 50 API, quando então se implanta a plataforma carbonática (fig. 13a – T02/cxs 07 a 09), viabilizada pela redução expressiva no aporte de siliciclásticos. No entanto, núcleos dos oolitos, compostos preferencialmente por quartzo, ainda atestam a influência, agora mais reduzida, de uma área-fonte siliciclástica.

Como exceções à regra (“ciclo ideal”), ocorre a presença dos depósitos de preenchimento de vales incisos em contato erosivo por sobre as fácies siliciclásticas da AF1 (*Shoreface inferior – Offshore* – fig. 13c) ou da AF2 (zona de arrebentação). De modo mais raro, ocorrem blocos de carbonato

alóctones (AF8) imersos (contatos abruptos) na AF1 (fig. 13d). Além disso, é frequente a intercalação (escala métrica a decimétrica) da AF1 e AF2 em meio a um ciclo maior, limitado por dois registros de implantação de plataforma carbonática. Por

vezes, também, as camadas de carbonato não se acham presentes em determinado intervalo de determinado poço. Estes desvios do “ciclo ideal” são creditados à superposição de alo Ciclos de mais alta frequência e/ou a fatores autogênicos.

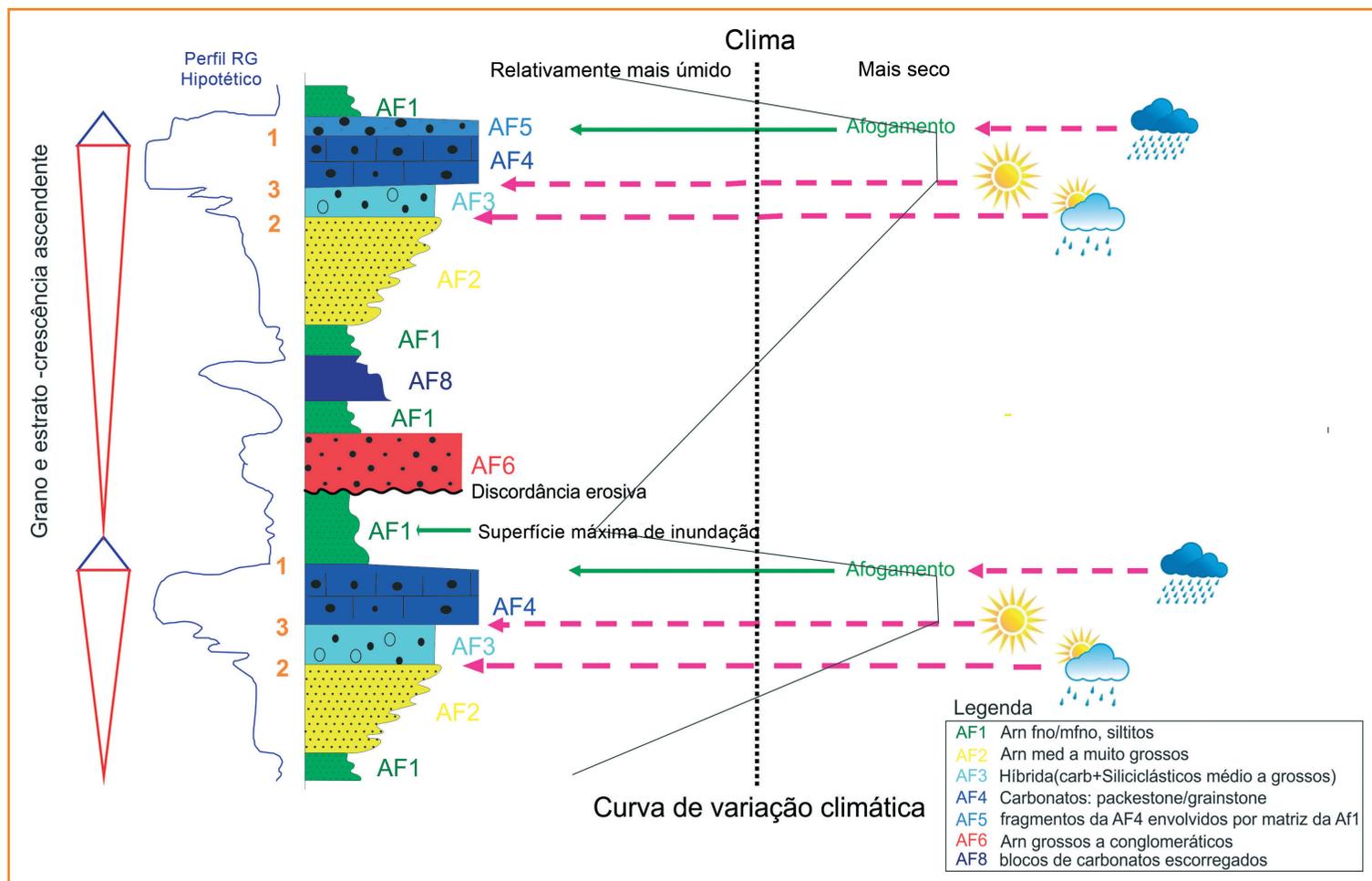


Figura 15 – Modelo simplificado da sucessão de fácies (“ciclo ideal”) – ciclo transgressivo-regressivo constituído no sentido ascendente pelas associações de fácies (AFs) 1, 2, 3, 4 e, de forma esporádica, a AF5. Inclui todas as associações de fácies descritas nos testemunhos dos poços 2, 3 e 5 discerníveis na escala utilizada para a confecção da seção estratigráfica (fig. 5). A AF7, representativa das fácies de afogamento dos vales incisos, não está mostrada neste esquema devido à escala de representação e por não ser distinguível da AF1 via uso de redes neurais. O perfil de raios gama, na área da Plataforma de Regência, foi o mais confiável na distinção das fácies carbonáticas das siliciclásticas e híbridas. O perfil de raios gama foi o mais confiável na distinção das fácies carbonáticas das siliciclásticas e híbridas, embora outros quatro tipos de perfis (sônico, densidade, fator fotoelétrico e neutrão) também tenham sido utilizados. É muito frequente uma diminuição gradativa dos valores de raios gama desde fácies tipicamente siliciclásticas (valores maiores), passando para as fácies híbridas (valores intermediários) e chegando até as fácies carbonáticas (valores menores do que 50 API), configurando um padrão cíclico em toda a seção estudada. De forma muito esporádica, ocorrem as associações de fácies 6 e 8, que não mostram nenhum padrão cíclico.

Figure 15 – Simplified model of facies succession (“ideal cycle”) – transgressive-regressive cycle characterized from base to top by facies associations 1, 2, 3, 4 and, seldom, AF5. It includes all facies associations described in the cores (wells 2, 3 and 5) and visible in the stratigraphic section scale (Figure 5). The AF7, which represents the final stages (drowning) of the incised valleys fill, is not represented in the basic cycle due to its scale and for being impossible to distinguish it from AF1 through the use of neural networks. Gamma ray well logs were the most reliable sort of well log to discriminate carbonate from hybrid and siliciclastic facies, however other four log types (sonic, density, photoelectric factor and neutron) were also used. Quite usually a gradual decrease on gamma ray values marks the transition from typically siliciclastic rocks (higher values) through hybrid facies (intermediate values) to carbonates (smaller than 50 API), configuring a cyclic facies arrangement along the entire studied interval. Although rare and non-cyclical, eventually it is also possible to observe the presence of facies associations 6 and 8.

origem e evolução do “ciclo ideal”

Ao longo da seção estratigráfica (fig. 5), a Sequência A apresenta espessuras que variam entre 350m (Poço 5) e 580m (Poço 1) e compreende vários ciclos superpostos de quarta e quinta ordens. Na escala de terceira ordem, quando se considera a distribuição paleogeográfica dos distintos sistemas deposicionais ao longo da deposição da Sequência A, os poços analisados estão situados em uma região dominada pelas fácies mistas (figs 3; 10). No entanto, na quarta e quinta ordens (escala métrica a algumas dezenas de metros), esses mesmos poços mostram a intercalação de pacotes siliciclásticos, mistos e carbonáticos. A presença de carbonatos neste contexto deposicional é um bom indicador de que o ambiente marinho já se fazia presente, diferentemente do que se pode pressupor para o sítio mais proximal, a oeste, onde somente siliciclásticos médios a grosseiros são reportados devido a maior influência fluvial. Os elementos icnológicos mais amiúde mencionados reforçam esse cenário cíclico ao indicarem a periódica alternância entre ambientes marinho franco e aqueles influenciados por água doce. A icnofácies *Skolithos* domina nos contextos deposicionais marinhos de *shoreface* superior (siliciclástico, híbrido e carbonático), enquanto as icnofácies Cruziana ou Cruziana empobrecida dominam nos ambientes de *shoreface* inferior/*offshore* influenciados por águas mixo-halinas.

Um “ciclo ideal” se inicia (fig. 15, ponto 1) pela superposição abrupta (fig. 6 – P02) das fácies siliciclásticas mais finas (AF1) por sobre as fácies carbonáticas (AF4), o que reflete um incremento episódico nas taxas pluviométricas. A passagem da AF4 para as fácies híbridas carbonáticas (AF5; lags transgressivos) denota uma variante desses eventos de afogamento. Um escoamento superficial aumentado erodia uma área-fonte soerguida (fig. 4), composta por rochas plutônicas e metamórficas submetidas a intemperismo físico, causando um incremento no aporte siliciclástico e na turbidez das águas marinhas, e, por consequência, um esgotamento da capacidade de crescimento das fácies carbonáticas.

Após a inundação máxima (fig. 15), a diminuição na taxa de acomodação propicia a progradação dos sistemas deposicionais siliciclásticos (fluviais, deltaicos e praias), registrada por sucessões grano- e estratocrescentes que, na área dos testemunhos descritos, se fazem representar por

fácies vinculadas à zona de arrebentação (AF2). O clima, então mais seco que na fase anterior, ainda produzia descargas fluviais esporádicas, mas já não influenciava a ponto de causar uma diminuição significativa da salinidade do corpo de água, que, então, apresentava condições predominantemente esteno-halinas, como denota a icnofácies *Skolithos* diagnosticada.

A partir de certo momento (fig. 15, ponto 2), começam a aparecer, de forma crescente, fragmentos carbonáticos aloquímicos, formando as fácies híbridas de *shoreface* superior (AF3) que fazem parte das sucessões grano- e estratocrescentes mencionadas no parágrafo precedente. Essa mudança composicional indica um paulatino incremento na produtividade da fábrica carbonática supostamente devido a um gradual decréscimo no aporte siliciclástico (maior aridez).

Na continuação do “ciclo” (fig. 15, ponto 3), o aporte de siliciclásticos diminui consideravelmente, fruto de condições climáticas mais restritivas (mais seco), viabilizando assim o estabelecimento mais franco de uma plataforma carbonática com o aparecimento da AF4. Núcleos de oncolitos compostos por quartzo indicam aporte, agora mais reduzido, de siliciclásticos.

Considerando que na escala de terceira ordem os carbonatos dominam as áreas distais, e os siliciclásticos as áreas mais proximais (fig. 3), e que tanto as fácies híbridas (AF3) como as carbonáticas (AF4) foram influenciadas pela ação de ondas, é entendido que durante a deposição da AF3, apesar de os sistemas deposicionais siliciclásticos continuarem a progredir, os sistemas carbonáticos passaram a se expandir tanto em direção ao mar como para o continente, favorecendo assim a deposição das fácies híbridas na área onde os testemunhos foram descritos. A partir do início da deposição da AF4, praticamente apenas a plataforma carbonática se expandia, sem evidências de aumento ou diminuição significativa na lâmina d’água. A deposição ocorria sob a ação de ondas, aparentemente desprovida de feições de exposição subaérea, a menos que a intensa diagênese registrada nas lâminas delgadas tenha prejudicado sua detecção. Por fim, acontece a recorrência das fácies finas AF1 ou AF5, marcando o início de um novo ciclo.

O “ciclo ideal” é composto pelo par de eventos T-R, onde a transgressão é composta pelas AF1 e AF5 (esta última de forma esporádica) e a regressão composta pelas AF2, AF3, AF4 e AF5 (esta

última de forma muito esporádica). Eventualmente, depósitos vinculados ao preenchimento de canais fluviais incisivos (AF5), ao ambiente parálico, à planície de inundação (AF8) e a blocos alóctones de carbonato (AF7), os dois últimos de forma bastante subordinada, “quebram”, de forma aleatória, o ciclo ideal acima descrito.

A hipótese de que variações eustáticas na escala de alta frequência, considerando-se um aporte terrígeno constante ao longo do tempo, constituam a causa do padrão cíclico constatado apresenta-se como bastante improvável, já que o empilhamento relatado neste item (“ciclo ideal”) não pode ser reproduzido. Não se descarta, no entanto, que variações eustáticas tenham ocorrido.

análogos paleogeográficos

A paleogeografia albiana da Plataforma de Regência é característica de plataformas em rampa tropicais com sedimentação híbrida associada (Brooks *et al.*, 2003; McNeill *et al.*, 2004; 2010; Mount, 1984; Pilkey *et al.*, 1988; Wright *et al.*, 2005). Nessas, as camadas de carbonato apresentam tendência a serem depositadas nas porções mais distais, menos suscetíveis ao aporte de siliciclásticos, principalmente os mais finos, que controlam a turbidez da água.

Testa e Bosence (1999) estudaram a atual plataforma continental do estado do Rio Grande do Norte, em frente às cidades litorâneas de Touros e Rio do Fogo, onde constataram a presença de sedimentos siliciclásticos (areias), em condições de baixo aporte, e carbonáticos (halimeda e algas vermelhas coralíneas entre os constituintes principais), sendo retrabalhados por correntes marinhas, inclusive de marés, e ondas, compondo um complexo regime hidráulico. Esse regime gera uma alternância de faixas de formas de leito com tamanhos diversos, dunas e interdunas, que viabilizam a ocorrência de uma sedimentação híbrida, com graus variáveis de conteúdo carbonático, dependendo do grau de retrabalhamento do substrato.

considerações estratigráficas

A utilização de um arcabouço estratigráfico de alta frequência para a Sequência A seguindo os preceitos da Moderna Estratigrafia (Catuneanu, 2006; Catuneanu *et al.* 2009, Hunt e Tucker,

1992; VanWagoner *et al.*, 1988; Galloway, 1989; Posamentier e Allen, 1999) foi dificultada pelo difícil rastreamento dos refletores e marcadores de um *rollover* para outro, principalmente no sentido *dip*, em um intervalo estratigráfico dominado por intensa halocinese. Além disso, as seções sísmicas disponíveis não apresentam conteúdo de resolução suficientemente alto para permitir discriminar padrões de terminação de refletores sísmicos na 4ª e 5ª ordens (escala de fácies – métrica a dezenas de metros). Esses padrões, se perceptíveis, poderiam auxiliar na determinação das principais superfícies estratigráficas (superfícies regressiva máxima, de inundação máxima, de ravinamento transgressivo, discordância subaérea) correlativas às flutuações do nível de base, nesse caso viabilizando um estudo sismoestratigráfico mais apurado.

A descrição dos testemunhos e a interpretação dos perfis de poços mostraram que as descontinuidades erosivas registradas nos canais incisivos (AF6), que poderiam indicar exposições subaéreas de alta frequência, não ocorrem, nos poços analisados, de forma cíclica, impossibilitando sua utilização como superfícies delimitadoras de sequências de alta frequência. Optou-se, assim, pelo uso das superfícies transgressivas (base da AF5) ou de afogamento (base da AF1) que recobrem os carbonatos de plataforma (AF4), como limites de parassequências, estas últimas compostas por uma sucessão basal transgressiva (AF5 e AF1) e uma sucessão superior regressiva (AF1, AF2, AF43 e AF4).

conclusões

A sucessão vertical de fácies que compõe o padrão apontado pelo “ciclo-base” indica que siliciclásticos e carbonatos, membros extremos da mistura, predominaram na sedimentação em fases distintas, coexistindo de forma subordinada sob a ótica da escala temporal de alta frequência. O estudo foi embasado na análise faciológica dos poços denominados 2, 3 e 5, situados na porção centro-leste da Plataforma de Regência, tendo sido analisados cerca de 180m de testemunhos, resultando em 14 fácies sedimentares descritas, sendo nove fácies siliciclásticas, duas fácies híbridas e três fácies carbonáticas. Foram interpretadas oito associações de fácies vinculadas a ambientes siliciclásticos de *shoreface* inferior-transição *offshore* (AF1) e de zona

de arrebentação/*shoreface* superior (AF2); híbridos, incluindo a zona de *shoreface* superior (AF3) e de retrabalhamento da plataforma carbonática (AF5); e carbonáticos, na forma de sedimentos plataformais retrabalhados (AF4). Além dessas, inclui também associações de fácies siliciclásticas de preenchimento fluvial (AF6) e estuarino (AF7) de vales incisivos, bem como de carbonato alóctone (AF8), imersos na AF1.

A descrição dos testemunhos permitiu ratificar o que a análise espectral do perfil raios gama (Tagliari *et al.*, 2012) já havia evidenciado (Ciclos de Milankovitch na escala da excentricidade curta – 100 Ma), ou seja, que a sucessão dos tipos litológicos da Sequência A apresenta um caráter notadamente cíclico. As evidências obtidas sugerem que a sucessão estratal possui, fundamentalmente, uma origem climática que denota a alternância entre clima semiárido a árido. Os ciclos são caracterizados por uma transição das fácies siliciclásticas (AF1 e AF2) na base, passando para as fácies híbridas (AF3) e, destas, para as carbonáticas (AF4) no topo. Fenômenos de origem autocíclica, ou mesmo de alociclicidade de mais alta frequência, podem “perturbar” essa ciclicidade, como seria de se esperar em um ambiente sedimentar altamente dinâmico como o plataformais/transicional.

Os dados provenientes da descrição dos testemunhos, coletados em distintos intervalos estratigráficos e devidamente calibrados aos perfis geofísicos dos poços, permitiram identificar e estender sete associações de fácies (AF1 a AF6 e AF8) para todo o pacote não testemunhado da Sequência A, através da aplicação do estudo de redes neurais. A exceção foi a AF7, que possui espessuras centimétricas a decimétricas, portanto abaixo da resolução utilizada pelos perfis geofísicos de poços. Isso proporcionou a confirmação do padrão cíclico ao longo da amostragem obtida nos cinco poços analisados, assim como em outros poços situados no mesmo *strike* deposicional, o que reforça a interpretação de uma influência alocíclica no empilhamento faciológico. Outro resultado importante é a possibilidade de estender a discriminação das sete associações de fácies para outros poços da área que não foram testemunhados, caracterizando, portanto, um estudo de caráter preditivo.

A imaturidade textural e mineralógica, identificada macro- e microscopicamente, sugere a presença de sistemas deposicionais siliciclásticos nas proximidades de uma área-fonte topograficamente elevada. Algumas características do ambiente

deposicional que ocorre em algumas plataformas de pequena extensão situadas na margem norte do Golfo de Eilat – tal como o *background* de sedimentação carbonática, cujos depósitos são periodicamente soterrados por sedimentos siliciclásticos, desprovidos de evidência da atuação de um intemperismo químico (clima árido a semi-árido) – constituem um análogo climático para o presente estudo.

Na escala de alta frequência observa-se uma superposição de inúmeros ciclos do tipo T-R (transgressivo-regressivo), cuja composição siliciclástica tende a comportar cada vez mais sedimentos finos (baixa energia) em detrimento de fácies de mais alta energia para o topo da Sequência A, configurando um afogamento do sistema sedimentar dessa sequência, na escala de terceira ordem.

agradecimentos

Este manuscrito compõe parte de um projeto de doutoramento patrocinado pela Petrobras e desenvolvido por Claudio Vinicius Tagliari no Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos). Aos gerentes Fernando Taboada e Renato Gonzales, pelo apoio e incentivo. Ao colega Jairo Rios Brandão, pela revisão e troca de ideias. Aos colegas Nívea Carramal da Silva e Lucas Beggato, pelas discussões técnicas. À Cristina H. Almeida e a Joel Reina, pelas discussões e apoio na utilização do *software* Petrel (Petrel, Schlumberger). A Diógenes Lessa, Rosana Gabriela, Jean Giuriatto e Vanessa Vengelke, pelos trabalhos de edição. Renata Guimarães Netto agradece ao CNPq a bolsa de produtividade em pesquisa (processo nº 305208/2010-1). À minha esposa Denise, companheira de todas as horas, pela dedicação, apoio e compreensão.

referências bibliográficas

ARNOTT, R. W.; SOUTHARD, J. B. Exploratory flow-duct experiments on combined-flow bed configurations, and some implications for interpreting storm-event stratification. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 60, n. 2, p. 211-219, Mar. 1990

- AZEVEDO, R. L. M. **O Albiano no Atlântico Sul: estratigrafia, paleoceanografia e relações globais.** 2001. 401 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- BORER, J. M.; HARRIS, P. M. Lithofacies and cyclicity of the Yates Formation. Permian Basin: implications for Reservoir Heterogeneity. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 75, n. 4, p. 726-779, Apr. 1991.
- BOTELHO NETO, J. **Porção Norte da Plataforma de Regência - Bacia do Espírito Santo: caracterização palinoestratigráfica e evolução paleoambiental.** 1996. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1996.
- BROOKS, G. R.; DOYLE, L. J.; DAVIS, R. A.; DEWITT, N. T.; SUTHARD, B. C. Patterns and controls of surface sediment distribution: West-Central Florida inner shelf. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 200, n. 1-4, p. 307-324, June 2003.
- BUATOIS, L. A.; GINGRAS, M. K.; MACEACHERN, J.; MÁNGANO, G. M.; ZONNEVELD, J. P.; PEMBERTON, S. G.; NETTO, R. G.; MARTIN, A. Colonization of brackish-water systems through time: evidence from the trace-fossil record. **Palaios**, Tulsa, v. 20, n. 4, p. 321-347, 2005.
- BUDD, D. A.; HARRIS, P. M. **Carbonate-siliciclastic mixtures.** Tulsa: SEPM, 1990. 272 p. (Reprint Series Number, 14).
- CATUNEANU, O. **Principles of sequence stratigraphy.** Amsterdam: Elsevier, 2006. 375 p. (Developments in Sedimentology).
- CATUNEANU, O.; ABREU, V.; BHATTACHARYA, J. P.; BLUM, M. D.; DALRYMPLE, P. G. Towards the standardization of sequence stratigraphy. **Earth-Science Reviews**, Amsterdam, v. 92, n. 1-2, p.1-33, Jan. 2009.
- CHANG, H. K.; KOWSMANN, R. O.; FIGUEIREDO, A. M. F. New concepts on the development of east Brazilian marginal basins. **Episodes**, Kolkata, v. 11, n. 3, p. 194-202. Sept. 1988.
- CHUMAKOV, N. M.; ZHARKOV, M. A.; HERMAN, A. B.; DULUDENKO, M. P.; KALANDADZE, N. N.; LEBEDEV, E. L.; PONOMARENKO, A. G.; RAUTIAN, A. S. Climatic belts of the Mid-Cretaceous Time. **Stratigraphy and geological correlation**, New York, v. 3, n. 3, p. 241-260. 1995.
- DIAS-BRITO, D. Evolução paleoecológica da Bacia de Campos durante a deposição dos calcilutitos, marga, e folhelhos da Formação Macaé (Albiano e Cenomaniano). **Boletim Técnico da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 84-97, abr./jun. 1982.
- DOTT, R. H.; BURGEIS, J. Hummocky cross-stratification: significance of its variable bedding sequences. **Geological Society of American Bulletin**, Tulsa, v. 93, p. 663-680, Aug. 1982.
- DOYLE, L. J.; ROBERTS, H. H. **Carbonate-Classic Transitions.** Amsterdam: Elsevier, 1987. 304 p. (Developments in Sedimentology, 42).
- DUARTE, O. O. **Dicionário Enciclopédico Inglês-Sociedade Português de Geofísica e Geologia.** 2. ed. Rio de Janeiro: SBG, 2003. p. 207.
- EICHENSEER, H. T.; WALGENWITZ, F. R.; BIONDI, P. J. Stratigraphic control on facies and diagenesis of dolomitized oolitic siliciclastic ramp sequences (Pinda Group, Albian, Offshore Angola). **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 83, n. 11, p. 1729 - 1758, Nov. 1999.
- FRAKES, L. A.; FRANCIS, J. E.; SYKTUS, J. I. **Climatic Modes of the Phanerozoic.** Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 285 p.
- FRANÇA, R. L.; DEL REY, A. C.; TAGLIARI, C. V.; BRANDÃO, J. R.; FONTANELLI, P. R. Bacia do Espírito Santo. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 501-510. maio/nov. 2007.
- FRIEDMAN, G. M. Case histories of coexisting reefs and terrigenous sediments: the Gulf of Eilat (Red Sea), Java and Neogene Basin of Negev, Israel. In: DOYLE, L. J.; ROBERTS, H. H. **Carbonate-Clastic Transitions.** Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 36-77. (Developments in Sedimentology, 42).
- GALLAGHER, K.; BROWN, R. W. The Mesozoic denudation history of the Atlantic margins of southern Africa and south-east Brazil and their relationship to offshore sedimentation. In: CAMERON, N. R.; BATE, R.H.; CLURE, V. S. (Ed.). **Oil and Gas Habitats of the South Atlantic. Geological Society Special Publication**, London, n. 153, p. 41-54, 1999.

GALLOWAY, W. E. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 73, p.125-42. 1989.

GIBLING, M. R. Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: a literature compilation and classification. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 76, n. 5, p. 731-770, May 2006.

GIORGIONI, M.; WEISSERT, H.; BERNASCONI, S. M.; HOCHULI, P. A.; COCCIONI, R.; KELLER, C. E. Orbital control on carbon cycle and oceanography in the mid-Cretaceous greenhouse. **Paleoceanography**, Washington DC, v. 27, n. 1, p. 1-12, Mar. 2012.

GOLDHAMMER, R. K.; OSWALD, E. J.; DUNN, P. A. High-frequency, glacio-eustatic cyclicity in the Middle Pennsylvanian of the Paradox Basin: an evaluation of Milankovitch forcing. In: BOER, P. L.; SMITH, D. G (Ed.). **Orbital Forcing and Cyclic Sequences**. Belgium: International Association of Sedimentologists, 1991, p. 243-283. (Special Publication, 19).

GOOGLE EARTH. **Detailed satellite image of the Northern coast of the Eilat Gulf, Sinai Peninsula**. Available on: <https://maps.google.com.br/maps?q=microscopic%20&psj=1&bav=on.2,or.r_qf.&bvm=bv.49967636,d.cGE,pv.xjs.s.en_US.jOYpRJj4zMA.O&biw=1920&bih=1136&um=1&ie=UTF-8&hl=pt-BR&sa=N&tab=wl>. Access in: 2011.

GOOGLE MAPS. **Imagem de satélite da área do Delta do Rio Doce**. Disponível em: <https://maps.google.com.br/maps?q=microscopic%20&psj=1&bav=on.2,or.r_qf.&bvm=bv.49967636,d.cGE,pv.xjs.s.en_US.jOYpRJj4zMA.O&biw=1920&bih=1136&um=1&ie=UTF-8&hl=pt-BR&sa=N&tab=wl>. Acesso em: 2012.

GOOGLE EARTH. **Imagens de satélite de detalhe da costa setentrional do Golfo de Eilat, Península do Sinai**. Disponível em: <https://maps.google.com.br/maps?q=microscopic%20&psj=1&bav=on.2,or.r_qf.&bvm=bv.49967636,d.cGE,pv.xjs.s.en_US.jOYpRJj4zMA.O&biw=1920&bih=1136&um=1&ie=UTF-8&hl=pt-BR&sa=N&tab=wl>. Acesso em: 2011.

GOOGLE MAPS. **Satellite image of the Doce River Delta**. Available on: <https://maps.google.com.br/maps?q=microscopic%20&psj=1&bav=on.2,or.r_qf.&bvm=bv.49967636,d.cGE,pv.xjs.s.en_US.jOYpRJj4zMA.O&biw=1920&bih=1136&um=1&ie=UTF-8&hl=pt-BR&sa=N&tab=wl>. Access in: 2012.

GRIPPO, A.; FISCHER, A. G.; HINNOV, L. A.; HERBERT, T. D.; SILVA, I. P. Cyclostratigraphy of the Albian Stage (Piobbico core, Italy). In: D'ARGENIO, B.; FISCHER, A. G.; SILVA, I. P.; WEISSERT, H.; FERRERI, V. (Ed.). **Cyclostratigraphy: approaches and case histories**. New Jersey: SEPM, 2004. p. 57-81. (Special Publication, 81).

HARMS, J. C.; SOUTHARD, J. B.; SPEARING, D. R.; WALKER, R. G. **Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences**. Dallas: SEPM, 1975. 161 p. (SEPM Short Course Notes, 2).

HELDT, M.; LEHMANN, J.; WILLEMS, H. Calcareous dinoflagellate cysts from the Aptian/Albian boundary interval of northern Germany: abundance patterns related to orbital forcing? **News Letter on Stratigraphy**, Stuttgart, v. 44, n. 1, p. 37-55. 2010.

HUNT, D.; TUCKER, M. E. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 81, p. 1-9. Nov. 1992.

HUNTER, R. E.; CLIFTON, H. E. Cyclic deposits and hummocky cross-stratification of probable storm origin in upper Cretaceous rocks of the Cape Sebastian area, Southwestern Oregon. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 52, n. 1, p. 127-143. Mar. 1982.

IMMERHAUSER, A. W.; SCHLAGER, W.; BURNS, S. J.; SCOTT, R. W.; GELL, T.; LEHMANN, J. S.; GAAST, T. V. D.; SCHRIVER, L. J. A. B. Late Aptian to Late Albian sea level fluctuations constrained by geochemical and biological evidence (Nahr Umr Formation, Oman). **Science**, Washington DC, v. 69, n. 2, p. 434-446. 1999.

KREISA, R. D. Storm-generated sedimentary structures in subtidal marine facies with examples from the Middle and Upper Ordovician of southwestern Virginia. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 51, n. 3, p. 823-848. 1981.

LECKIE, D. A.; WALKER, R. G. S. Storm- and tide-dominated shorelines in Cretaceous Moosebar – lower Gates interval – outcrop equivalents of deep basin gas trap in western Canada. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 66, p. 138-157, Feb. 1982.

LEES, A. Possible influences of salinity and temperature on modern shelf carbonate sedimentation. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 19, n. 3, p. 159-198, Aug. 1975.

LEES, A.; BULLER, A. T. Modern temperature-water and warm-weather shelf carbonate sediments contrasted. **Marine Geology**, Amsterdam, v. 13, p. M67-M73, Dec. 1972.

LOMANDO, A. J.; HARRIS, P. M. **Mixed carbonate-siliciclastic sequences**. Tulsa: SEPM, 1991.

MAYNARD, J. R.; HOWARD, R. F.; ALWAYS, R. From bars to valleys: the sedimentology and seismic geomorphology of fluvial to estuarine incised valley fills of the Grand Rapids Formation (Lower Cretaceous), Iron River Field, Alberta, Canada. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 80, n. 7, p. 611-638, July 2010.

MCNEILL, D. F.; CUNNINGHAM, K. J.; GUERTIN, L. A.; ANSELMETTI, F. S. Depositional themes of mixed carbonate-siliciclastics in the South Florida Neogene: application to ancient deposits. In: GRAMMER, G. M.; HARRIS, P. M.; EBERLI, G. P. **Integration of outcrop and modern analogs in reservoir modeling**. Tulsa: AAPG, 2004. p. 23-43. (AAPG Memoir, 80).

MCNEILL, D. F.; JANSON, X.; BERGMAN, K. L.; EBERLI, G. P. Belize: a modern example of a mixed carbonate-siliciclastic shelf. In: WESTPHAL, H., EBERLI, G. P., RIEGL, B. (Ed). **Carbonate Depositional Systems: Assessing Dimensions and Controlling Parameters**. New York: Springer, 2010. p. 81-143.

MONTANEZ, I. P.; LI, Y.; OSLEGER, D. A.; BRALOW, T. J. Orbitally tuned C and N isotopic records of Aptian oceanic anoxic event 1a in Northeastern Mexico and Deep Sea Drilling Project Site 398, North Atlantic Ocean. **American Geophysical Union**, São Francisco, California, Fall Meeting Abstract, Dec. 11-15, 2006.

MOUNT, J. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. **Geology**, Tulsa, v. 12, n. 7, p. 432-435, July 1984.

PAIM, P. S. G.; LAVINA, E.; FACCINI, U. F.; SILVEIRA, A. S. **Estratigrafia física e modelagem sísmica dos turbidíticos e flúvio-deltaicos das bacias de Neuquén e Ischigualasto (Republica Argentina)**, Relatório Final, v.1, 200p. 2008

PAIM, P. S. G.; LAVINA, E.; FACCINI, U. F.; KERN, H. P. **Projeto regional Cuyano I: estratigrafia e modelo deposicional do sistema turbidítico da Formação Los Molles e sua relação genética com o sistema marinho e flúvio – deltaico da Formação Lajas no setor sul da dorsal de Huincul**. Relatório Final. 2010.

PEMBERTON, S. G.; MACEACHERN, J. A.; FREY, R. W. Trace fossils facies model: environmental and allostratigraphic significance. In: WALKER, R. G.; JAMES, N. P. (Ed.). **Facies models: response to sea level change**. St. John's: Geological Association of Canada. St. John's. 1992. p. 47-72.

PEMBERTON S. G.; WIGHTMAN D. M. Ichnological characteristics of brackish water deposits. In: PEMBERTON, S. G. (Ed.). **Applications of Ichnology to Petroleum Exploration: A Core Workshop**. Tulsa: SEPM, 1992. p. 141-167. (Core Workshop, 17).

PETREL. Litho ToolKit Facies Classification Course. In: **GeoFrame – LithoToolKit User Guide, versão 4.5, appendix B Neural Network and MD Histogram** (RockCell) Summary, 2012. p. 130.

PETREL. Manual Neural Nets. In: **Petrel Well Correlation Course**. Schlumberger, 2012. p. 335. (Módulo 8).

PILKEY, O. H.; BUSH, D. H.; RODRIGUEZ, R. W. Carbonate-terrigenous sedimentation on the North Puerto Rico shelf. In: DOYLE, L. J.; ROBERTS, H. H. (Ed.). **Carbonate-clastic transitions**. Amsterdam: Elsevier, 1988. p. 231-250. (Developments in sedimentology, 42.)

POSAMENTIER, H. W.; ALLEN, G. P. **Siliciclastic Sequence Stratigraphy: concepts and applications**. Tulsa: SEPM, 1999. (Concepts in Sedimentology and Paleontology, 7)

PROKOPH, A.; THUROW, J. Orbital forcing in a 'Boreal' Cretaceous epeiric sea: high-resolution analysis of core and logging data (Upper Albian of the Kirchrode I drill core-Lower Saxony basin, NW Germany). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 174, n. 1-3, p. 67-96, Sept. 2001.

- RAAF, J. F. M.; BOERSMA, J. R.; GELDER, A. V. Wave generated structures and sequences from a shallow marine succession. Lower Carboniferous, County Cork, Ireland. **Sedimentology**, New Jersey, v. 24, n. 4, p 1-52. Aug. 1977
- REIJENSTEIN, H. M.; POSAMENTIER, H. W.; BHATTACHARYA, J. P. Seismic geomorphology and high-resolution seismic stratigraphy of inner-shelf fluvial, estuarine, deltaic, and marine sequences, Gulf of Thailand. **AAPG Bulletin**, Tulsa, v. 95, n. 11, p. 1959-1990, 2011.
- SILVA, I. P.; RIPEPE, M.; TORNAGHI, M. E. Planktonic foraminiferal distribution record productivity cycles: evidence from the Aptian-Albian Piobbico core (Central Italy). **Terra Nova**, New Jersey, v. 1, n. 5, p. 443-448, Sept. 1989.
- SPADINI, A. R.; ESTEVES, F. R.; DIAS-BRITO; AZEVEDO, R. L. M.; RODRIGUES, R. The Macaé Formation, Campos Basin, Brazil: its evolution in the context of the initial history of the South Atlantic. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 261-272, 1988.
- TAGLIARI, C. V.; CUNHA, A. S.; PAIM, P. S. Orbital-driven cyclicity and the role of halokinesis on accommodation within siliciclastic to carbonate, shallow-water Albian deposits in the Espírito Santo Basin (Southeastern Brazil). **Cretaceous Research**, Amsterdam, v. 35, p. 22-32, June 2012.
- TAGLIARI, C. V., FONTANELLI, P. R.; BRANDÃO, J. R.; PAIM, P. S. G. Evolução geológica das sequências mistas (siliciclásticas e carbonáticas) sob influências da tectônica que envolve o embasamento e da halocinese durante o Albiano-Plataforma de Regência - Bacia do Espírito Santo. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, nov. 2012/maio 2013.
- TESTA, V.; BOSENCE, D. W. J. Physical and biological controls on the formation of carbonate and siliciclastic bedforms on the North-East Brazilian shelf. **Sedimentology**, New Jersey, v. 46, n. 2, p. 279-301, 1999.
- TUCKER, M. Mixed clastic-carbonate cycles and sequences; Quaternary of Egypt and Carboniferous of England. **Geologica Croatica**, Croatia, v. 56, n. 1, p. 19-37, 2003.
- TYSZKA, J. Foraminiferal response to seasonality modulated by orbital cycles in the Cretaceous mid-latitudes: the Albian record from the Lower Saxony Basin. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 276, n. 1-4, p. 148-159, May 2009.
- ZAITLIN, B. A.; DALRYMPLE, R. W.; BOYD, R. The stratigraphic organization of incised-valley systems associated with relative sea-level change. In: DALRYMPLE, R. W.; BOYD, R.; DAMPLE, B. A. (Ed.). **Incised-Valley Systems: origin and sedimentary sequences**. Tulsa: SEPM, 1994. p. 45-60. (Special Publication, 51).
- VAN WAGONER, J. C.; POSAMENTIER, H. W.; MITCHUM, R. M.; VAIL, P. R.; SARG, J. F.; LOUTIT, T. S.; HARDENBOL, J. An overview of the fundamentals of Sequence Stratigraphy and key definitions. In: WILGUS, C. H.; HASTINGS, B. S.; POSAMENTIER, H.; WAGONER, J. V.; ROSS, C. A.; KENDALL, C. G. S. C. (Ed.). **Sea-level changes: an integrated approach**. Tulsa: SEPM, 1988. p. 39-46. (Special Publication, v. 42).
- WILSON, J. L. **Carbonate facies in geologic history**. Belin: Springer, 1975. 266 p.
- WRIGHT, E. E.; HINE, A. C.; GOODBRED, S. L.; LOCKER, S. D. The effect of sea-level and climate change on the development of a mixed siliciclastic-carbonate, deltaic coastline: Suwannee River, Florida, U.S.A. **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 75, n. 4, 621-635, July 2005.

expanded abstract

This paper discusses several topics in a synergistic way, such as mixed sedimentation (carbonate/siliciclastic) in continental to shelf environments under the influence of high frequency orbital variations (Milankovitch cycles) and halokinesis. Some unique geological features demanded a multiple-approach study, a case history that apparently has no parallel in the bibliography, especially due to the detailed, centimeter- to meter-scale description. The studied interval comprises a Lower Albian depositional sequence (Sequence A) composed of cyclically arranged strata. This succession was cored in five wells drilled in a rollover structure that occurs in an uplifted block located near the Cedro - Rio Doce Fault (Central-East portion of the Regência Platform).

The study was based on facies analysis of boreholes from wells 2, 3 and 5. More than 180m of cores were described and subdivided into 14 sedimentary facies, being nine siliciclastic, two hybrids and three carbonate. These facies were grouped into eight facies associations, most of them ascribed to siliciclastic sedimentation in the following depositional settings: lower shoreface/offshore (AF1), surf zone of an upper shoreface (AF2) and incised river valley fill (AF6), the latter including final-stage, fine-grained deposits (AF7). Other facies associations encompasses hybrids rocks related to the surf zone of an upper shoreface (AF3) and reworked, lower shoreface/offshore (AF5) settings as well as carbonate strata associated with reworked carbonate platform (AF4) and allochthonous carbonate blocks (AF8) immersed in the midst of AF1 strata. Facies associations were defined and interpreted not only by their internal features, but also by their stacking style. This point is fundamental in the establishment of a high frequency stratigraphic framework, especially when only cores, cuttings and geophysical logs are available. The authors see the proposition of a depositional model able to explain both the cyclical alternation and the paleogeographical distribution of the main lithologies (siliciclastic, hybrid and carbonate) as the most important contribution of this article. The model incorporates autogenic processes, such as sediments delivered to the coast during ephemeral river floods, in situ production of carbonate sediments and redistribution of both

sort of sediments by coastal currents and storm events. It also includes allogenic mechanisms, such as climate changes controlled by orbital cycles.

Data from the cored intervals (wells 2, 3 and 5) represent different stratigraphic levels and were calibrated to well logs. This procedure has allowed the extension of seven of eight facies associations to the entire Sequence A through the application of neural networks, i.e. all facies associations thick enough to be sampled in the adopted scale (AF7 being the only exception). This procedure was facilitated by the remarkable cyclic nature of the interval as well as by the fact that the described well cores represent distinct stratigraphic intervals, therefore increasing results reliability. This procedure enabled us to predict the presence of seven facies associations in other wells located along the same depositional strike of the wells here presented.

Core description has supported previous spectral analysis of the gamma ray logs, i.e. that the stacking trend along Sequence A has a clear cyclical nature, more specifically related to orbital changes (Milankovitch cycles) on the scale of short eccentricity (100,000 years) (Tagliari et al., 2012). The cycles are characterized by a usually continuous transition from siliciclastic through hybrid to carbonate facies. This trend is recurrent along the five analyzed wells as well as in other wells located in the same depositional strike, so reinforcing the interpretation of an external control on facies stacking. Direct evidence obtained from the rock record suggests that the recurrent facies arrangement is directly related to climate changes (alternating arid and less arid climate). Textural and mineralogical immaturity, identified both macro- and microscopically, suggests siliciclastic depositional systems in the vicinity of a highland. Taking the north margin of the Gulf of Eilat (Sinai Peninsula) as an approximately modern climatic and in part paleogeographical analogous, the alternation between siliciclastic and carbonate facies, with no evidence of significant chemical weathering, suggests a background of carbonate sedimentation periodically perturbed by the influx of siliciclastic sediments. The most common ichnofacies supports this scenario by indicating periodic influence of fresh water in a marine environment, producing the intercalation of mixohaline, lower shoreface to offshore facies bearing Cruziana or impoverished Cruziana ichnofacies with normal marine, siliciclastic and hybrid upper shoreface facies including the Skolithos ichnofacies.

The discrimination of the main facies groups for the whole of Sequence A through the use of a neural network analysis along well logs (gamma rays, density, photoelectric factor, sonic factor, and neutron) made it possible to correlate the stacking of the facies identified through core analysis, i.e. successive transgressive-regressive (T-R) cycles, to the cyclic arrangement of the main types of rocks along the entirety of Sequence A, i.e. high-frequency, 100 Ky cycles (short eccentricity in the Milankovitch's scale). Sequence A displays the superposition of several T-R cycles whose siliciclastic composition becomes finer-grained upwards at the

expense of higher energy facies, therefore configuring a drowning of the sedimentary succession at the 3rd order scale. Therefore, facies discrimination (core description) extrapolated to the entire Sequence A to a 3rd order retrogradation.

Facies distribution (paleogeography) and succession (high-frequency cycles) are typical of ramp platforms with mixed sedimentation deposited in tropical, hot areas. Carbonate production was higher in shallow, but more distal area (Cedro-Rio Doce Fault) where the fine-grained terrigenous influx that control water turbidity was lessened.

autor



Claudio Vinicius Tagliari

E&P Sul-Sudeste

Unidade de Operações e Produção do Espírito Santo

Avaliação de Blocos e Interpretação Geológica e Produção do Espírito Santo

tagliari@petrobras.com.br



Josemar Santos Pereira Filho

Claudio Vinicius Tagliari é graduado em Geologia (1979), Mestre em Estratigrafia (1993) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e doutor em Geologia Sedimentar: Estratigrafia e Evolução de Bacias pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Ingressou na Petrobras em 1980. Desde 1987 exerce atividades de interpretação geológica na elaboração de prospectos (locações exploratórias) e de estudos de caráter regional, tendo trabalhado nas bacias de Campos, Espírito Santo, Mucuri, Jequitinhonha e Ceará-Mundaú. Atua no segmento de exploração na Unidade de Operação do Espírito Santo. Professor do curso Estudo dos Sistemas Mistos Carbonáticos e Siliciclásticos na Universidade Petrobras.



Renata Guimarães Netto



Paulo Sérgio Gomes Paim