

Maiana Cláudia Kreff Avalone

**ESTRUTURAS SEDIMENTARES MICROBIANAS EM ARENITOS DA
FORMAÇÃO SERGI (JURÁSSICO), BACIA DO RECÔNCAVO, BAHIA,
BRASIL**

Dissertação de Mestrado (Geologia)

**UFRJ
Rio de Janeiro
2013**



Maiana Cláudia Kreff Avalone

ESTRUTURAS SEDIMENTARES MICROBIANAS EM ARENITOS DA FORMAÇÃO
SERGI (JURÁSSICO), BACIA DO RECÔNCAVO, BAHIA, BRASIL

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências (Geologia).

Área de concentração:

Paleontologia e Estratigrafia

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

Anderson Andrade Cavalcanti Iespa

Rio de Janeiro
2013

AVALONE, Maiana Cláudia Kreff Avalone

Estruturas Sedimentares Microbianas em Arenitos da Formação Sergi (Jurássico), Bacia do Recôncavo, Bahia, Brasil/ Maiana Cláudia Kreff Avalone- - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2013.

Viii, 114 f., apênd.; 30cm

Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, 2013.

Orientadores: Leonardo Borghi; Anderson Iespa.

1. Geologia. 2. Paleontologia e Estratigrafia –
Dissertação de Mestrado. I. Leonardo, Borghi. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia.
III. Estruturas Sedimentares Microbianas em Arenitos da
Formação Sergi (Jurássico), Bacia do Recôncavo, Bahia,
Brasil

Maiana Cláudia Kreff Avalone

ESTRUTURAS SEDIMENTARES MICROBIANAS EM ARENITOS DA FORMAÇÃO
SERGI (JURÁSSICO), BACIA DO RECÔNCAVO, BAHIA, BRASIL

Dissertação de Mestrado submetida ao
Programa de Pós-graduação em
Geologia, Instituto de Geociências, da
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, como requisito necessário à
obtenção do grau de Mestre em Ciências
(Geologia).

Área de concentração:

Paleontologia e Estratigrafia

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida

Anderson Andrade Cavalcanti Iespa

Aprovada em: 20 de março de 2013

Por:

Presidente: Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos, UFRJ

Dra. Loreine Hermida da Silva e Silva, UERJ

Dr. Patrick Francisco Führ Dal' Bó, UFRJ

Rio de Janeiro
2013

Aos meus avós e pais, que sempre confiaram e
incentivaram minhas escolhas.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao meu orientador, **Dr. Leonardo Borghi**, pela oportunidade em trabalhar neste projeto, por sua paciência e orientações tão válidas. Ao **Luís Carlos de Lima** (CETEM) pelo acompanhamento na leitura de lâminas no MEV. Ao **Thiago Barbosa** e **Dra. Joalice de Oliveira Mendonça** (LAFO) pela feitura e ajuda na leitura de plugues, respectivamente. Não posso deixar de expressar minha gratidão aos colegas, acima de tudo amigos, que pelo carinho contribuíram com artigos, indicações de livros e apoio em todos os momentos desta jornada (**Msc. Aline Ghilardi, Juliana da Rosa, Victor Dominato, Clarissa Mattana, Felipe Sobral, Michelle Uchôa**). Ao apoio e ajuda dos meus amigos e colegas de laboratório, **Bruno Rafael Santos, Msc. João Paulo Porto Barros, Bernard Fernandez, Thiago Carelli**, que sempre que possível, sanaram dúvidas relacionadas à geologia e auxiliaram na confecção deste trabalho. Aos professores da Pós-graduação do Instituto de Geologia da UFRJ (IGeo), **Dr. Claudio Limeira, Dr. Aristóteles Rios Netto, Dra. Cláudia Vilela, Dra. Valesca Eilert, Dra. Jane Nobre Lopes** que através de aulas tão válidas contribuíram para esta formação. Ao meu querido companheiro **Aldael Rizzo**, que com carinho e paciência, colaborou com revisão do texto e buscas bibliográficas. Gostaria de agradecer, por último e honradamente, à pesquisadora e “mãe” do tema deste trabalho, **Dra. Nora Noffke**, por sua atenção e colaboração quando precisei. Este trabalho não poderia ser realizado sem auxílio financeiro do **CNPq** (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e apoio do **Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro** (IGeo/UFRJ).

Resumo

AVALONE, Maiana. **Estruturas Sedimentares Microbianas em Arenitos da Formação Sergi (Jurássico), Bacia do Recôncavo, Bahia, Brasil**. Rio de Janeiro, 2013, 114f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

A Biossedimentologia é uma nova área de conhecimento nas Geociências que estuda a influência de organismos microbianos nos processos de sedimentação. Dentro dessa nova área, encontram-se mais tradicionalmente estudos em rochas carbonáticas; porém, mais recentemente, um novo enfoque sobre a gênese de certas estruturas sedimentares em arenitos e folhelhos que ocorrem desde o Pré-cambriano ao Recente tem aberto novas possibilidades de estudo biossedimentológico em sedimentos e rochas terrígenas. O presente trabalho buscou identificar a influência microbiana na gênese de algumas estruturas sedimentares em arenitos eólicos da Formação Sergi, Jurássico da bacia do Recôncavo. Diversas estruturas foram reconhecidas nessa formação, similares às que vem sendo identificadas na literatura como *elephant skin*, *pinnacles*, *wrinkle marks*, *exfoliating sand laminae* e domal buildups, além de estruturas microscópicas, como laminações peculiares, petrotramas características e concentração de minerais pesados, todos os quais associados à gênese microbiana. A correta diagnose dessas estruturas não só amplia a capacidade descritiva de litofácies sedimentares para a Formação Sergi, como também a capacidade interpretativa paleoambiental da formação, através da possibilidade de reconhecimento de sistemas deposicionais eólicos úmidos (paleoambientes de interdunas/lençol de areia), o que não fora ainda aventado na literatura da bacia.

Palavras-chave: Esteira microbiana; MISS; Formação Sergi

Abstract

AVALONE, Maiana. **Microbial Sedimentary Structures in Sandstones of the Sergi Formation (Jurassic), Reconcavo Basin, Bahia, Brazil**. Rio de Janeiro, 2013, 114f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

The Biosedimentology is a new area of knowledge in geosciences which studies the influence of microbial organisms in sedimentological processes. Within this new area, there are more traditional studies in carbonate rocks, but more recently, a new focus on the genesis of certain structures in sedimentary sandstones and shales that occur from the precambrian to recent has opened new possibilities for studying biosedimentology in terrigenous sediments and rocks. This study aims to identify the microbial influence in the genesis of some sedimentary structures in eolian sandstones of Sergi Formation, Jurassic of Recôncavo basin. Several structures have been recognized in this formation, similar to those which has been identified in the literature as elephant skin, pinnacles, wrinkle marks, exfoliating sand laminae and domal buildups, and microscopic structures such as laminations with peculiar spatial arrangement of grains and heavy mineral concentration, all which are associated with microbial genesis. The correct diagnosis of these structures not only increases the descriptive capacity of sedimentary lithofacies for the Sergi Formation, as well as the paleoenvironmental interpretative ability of the formation, through the possibility of recognition of humid aeolian depositional systems (paleoenvironments of interdune / sand sheet), that had not yet been hypothesized in the literature of the basin.

Key Words: Microbial mat, MISS, Sergi Formation

Sumário

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE QUADROS	viii
1 INTRODUÇÃO	1
2 MATERIAIS E MÉTODOS	3
2.1 Levantamento bibliográfico	3
2.2 Saída de campo	3
2.3 Fase laboratorial	5
2.4 Interpretação dos dados	6
3 CONTEXTO BIOSSEDIMENTOLÓGICO	7
3.1 Cianobactérias	7
3.1.1 Biofilmes e esteiras microbianas	9
3.1.2 Substância Polimérica Extracelular (EPS)	11
3.2 Estruturas sedimentares microbianas induzidas (MISS)	12
3.2.1 O que é MISS?	12
3.2.2 Processos genéticos na formação de esteiras microbianas (MISS)	19
3.2.3 MISS na caracterização paleoambiental	22
4 SISTEMAS EÓLICOS	25
4.1 Dunas e draas	25
4.2 Interdunas	26
4.3 Lençol de areia	28
4.4 Vida e fósseis em desertos	29
5 CONTEXTO GEOLÓGICO	31
5.1 A bacia do Recôncavo	31
5.2 Formação Sergi	35
5.2.1 Fácies e paleoambiente da Formação Sergi	38
6 RESULTADOS	45
6.1 Caracterização das estruturas microbianas	45
6.1.1 Afloramento 3	47

6.1.2 Afloramento 4	57
6.2 Caracterização microscópica	63
6.2.1 Microscópio petrográfico	63
6.2.2.1 Lâmina SER-02	63
6.2.2.2 Lâmina SER-04	63
6.2.2.3 Lâmina SER-06	65
6.2.2 Microscópio Eletrônico de Varredura	66
6.3 Considerações paleoambientais	68
6.4 MISS no Brasil	69
6.5 Considerações finais	670
7 CONCLUSÃO	72
Referências Bibliográficas	73
Apêndice A -- Estruturas microbianas da Formação Sergi e suas equivalentes descritas na literatura	
Apêndice B – Figuras complementares de estruturas microbianas na Formação Sergi	
Apêndice C – Resumo enviado/apresentado à Reunião Anual Regional da Sociedade Brasileira de Paleontologia, Paleo RJ/ES, 2012	
Apêndice D – Artigo completo publicado em livro [Paleontologia: Caminhando pelo tempo, 2011,pp. 170-171]	
Apêndice E – Perfis estratigráficos completos dos afloramentos 3 e 4 da Formação Sergi (modificado de Torres Ribeiro, 2002)	

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localização dos afloramentos visitados.	4
Figura 2. (A) cianobactéria unicelular esférica. (B) cianobactéria filamentosa.MEV.	8
Figura 3. Esteira microbiana e seus diferentes grupos bacterianos representados por camadas de coloração diferenciada.	11
Figura 4. Demonstração da formação diferenciada de estromatólitos e MISS.	14
Figura 5. Nivelamento.	16
Figura 6. Biostabilização.	16
Figura 7. Impressão.	17
Figura 8. Separação de grãos sedimentares.	17
Figura 9. Agarramento e aglutinamento.	18
Figura 10. Exemplos de esteiras vivas e fósseis.	19
Figura 11. As estruturas microbianas foram separadas em diferentes zonas em planície de maré do Neoproterozóico de Lushan, China, por Tang <i>et al.</i> (2002).	23
Figura 12. Seções horizontais e transversais mostrando as estruturas internas de uma duna.	26
Figura 13. Concentração de sedimento no fluxo.	27
Figura 14. Pegadas de dinossauros em estratos de dunas da Formação Botucatu. (A) pista com quatro pegadas, (B) detalhes da pegada	30
Figura 15. Mapa de localização da Bacia do Recôncavo.	31
Figura 16. Diagrama estratigráfico da bacia do Recôncavo.	33
Figura 17. Seção geológica da bacia do Recôncavo. Fonte: ANP.	34
Figura 18. Sequências deposicionais de Scherer <i>et al.</i> (2005).	37
Figura 19. Modelo deposicional da Formação Sergi proposto por Torres Ribeiro e Borghi (2003).	40

Figura 20. Perfil litológico completo da bacia do Recôncavo mostrando a posição dos afloramentos em que foram identificados MISS.	46
Figura 21. A e B pertencentes ao afloramento 3, sendo este composto por pacotes eólicos da Formação Sergi.	47
Figura 22. Pegadas de dinossauros em estratos de dunas da Formação Botucatu. (A) pista com quatro pegadas, (B) detalhes da pegada.	49
Figura 23. Estruturas domais envolvidas por gretas de ressecamento.	51
Figura 24. Pináculos, estrutura ligada ao crescimento de esteira.	52
Figura 25. Icnitos associados às estruturas microbianas.	53
Figura 26. Lâmina de areia esfoliada, camada bioestabilizada parcialmente erodida. Estrutura de destruição física por erosão.	54
Figura 27. Pele de elefante, estrutura formada por crescimento de esteira.	56
Figura 28. Marcas de rugas, assim como pele de elefante, é uma feitura originada do crescimento de esteira.	56
Figura 29. Visão geral do afloramento 4. Pacotes eólicos da Formação Sergi.	57
Figura 30. Impressões em forma senoidal.	58
Figura 31. Intervalo estratigráfico do afloramento 4 indicando a ocorrência de MISS. Modificado de Torres Ribeiro (2002).	59
Figura 32. Fragmentos de areia encrespada (<i>mud curled</i> ; seta vermelha) associada a biolaminações (seta preta). Vista transversal.	61
Figura 33. Lama encrespada (<i>mud curled</i>) em registro geológico (A) e seu análogo recente (B).	62
Figura 34. Lâmina SER-02.	64
Figura 35. Lâmina SER-04.	65
Figura 36. Lâmina SER-08.	66
Figura 37. Possível fossilização de bactérias esféricas e filamentosas em estruturas pináculos. Imagem em MEV.	67

Lista de quadros

Quadro 1. Descrição e localização dos afloramentos visitados em campo.	4
Quadro 2. Fácies de Lanzarini e Terra (1989).	39
Quadro 3. Fácies de Torres Ribeiro e Borghi (2003).	40
Quadro 4. Fácies de Bongioiolo e Scherer (2010).	42
Quadro 5. Fácies de Adegas <i>et al.</i> (2012).	44
Quadro 6. Grupos “sistemáticos” e estruturas microbianas encontradas em seus respectivos afloramentos.	45

1 INTRODUÇÃO

Para De Vrind-de Jong e De Vrind (1998), a Geomicrobiologia é a ciência que estuda a influência de microorganismos na precipitação e dissolução mineral. Essa ação de microorganismos leva à formação de esteiras organossedimentares, que estruturalmente são laminadas e desenvolvem-se em superfícies sólidas (VAN GEMERDEN, 1993).

Dentro desta ciência, *Microbially Induced Sedimentary Structures* ou MISS foi o termo criado por Noffke *et al.* (1996, 2001a) destinado a estudos descritivos e interpretativos de estruturas sedimentares construídas por cianobactérias, preferencialmente em rochas e sedimentos siliciclásticos.

Diferentemente das estruturas estromatolíticas que são mineralizações induzidas por organismos microbianos, através de precipitação, normalmente de carbonato de cálcio, por processos metabólicos (Mann, 2001) as MISS se dão pela interação de fatores físicos do meio e cianobactérias epibentônicas (NOFFKE *et al.*, 2001a), as quais modificam ou induzem o substrato a uma variedade de estruturas primárias (GERDES *et al.*, 2000).

Estruturas sedimentares microbianas podem ser observadas em rochas e sedimentos siliciclásticos, e são pouco conhecidas e só recentemente levadas em consideração em estudos geológicos e microbiológicos (NOFFKE, 2001a; BORGHI e PAULA-FREITAS, 2010). Segundo Noffke *et al.* (2001b), estruturas sedimentares microbianas podem ser usadas para reconstrução de fácies em pequena escala, inferindo as condições paleoclimáticas, hidrológicas e sedimentológicas.

Recentemente, Catuneanu (2007) propôs que a influência de esteiras microbianas em registro sedimentar pode ser analisada pela sedimentologia e sob

perspectivas estratigráficas. Segundo o autor, a distribuição de esteiras microbianas em bacias sedimentares podem ser usadas para inferir mudanças na natureza e energia relativa de processos físicos que operam em diferentes ambientes deposicionais ao longo do tempo geológico.

A Formação Sergi, área de estudo do presente trabalho, é uma unidade da bacia do Recôncavo que foi depositada sob paleoambiente fluvio-eólico-lacustre, durante a fase Pré-rifte da abertura do oceano Atlântico, no final do Jurássico. Em ambientes eólicos, interdunas, bem como a região extraduna e lençóis de areia, podem apresentar-se secas ou úmidas; estas quando o lençol freático posiciona-se próximo a superfície. Na Formação Sergi, a literatura pouco trata dessa natureza nas suas fácies associadas às antigas interdunas ou lençóis de areia.

Estruturas microbianas foram primeiramente identificadas em depósitos eólicos de interdunas/ lençóis de areia na unidade em questão, por Borghi e Paula Freitas (2010). A partir de então criou-se a proposta de que as fácies em que tais estruturas foram identificadas depositaram-se sob um paleoambiente úmido.

Desta forma, o presente trabalho objetivou levar em frente esta proposição inicial de Borghi e Paula Freitas (2010), coma identificação, descrição e classificação de estruturas microbianas em afloramentos da Formação Sergi. A interpretação de MISS em depósitos de interdunas/lençol de areia pode vir como mais um atributo para diagnose de fácies, identificando paleoambientes eólicos úmidos.

2 MATERIAL E MÉTODO

2.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

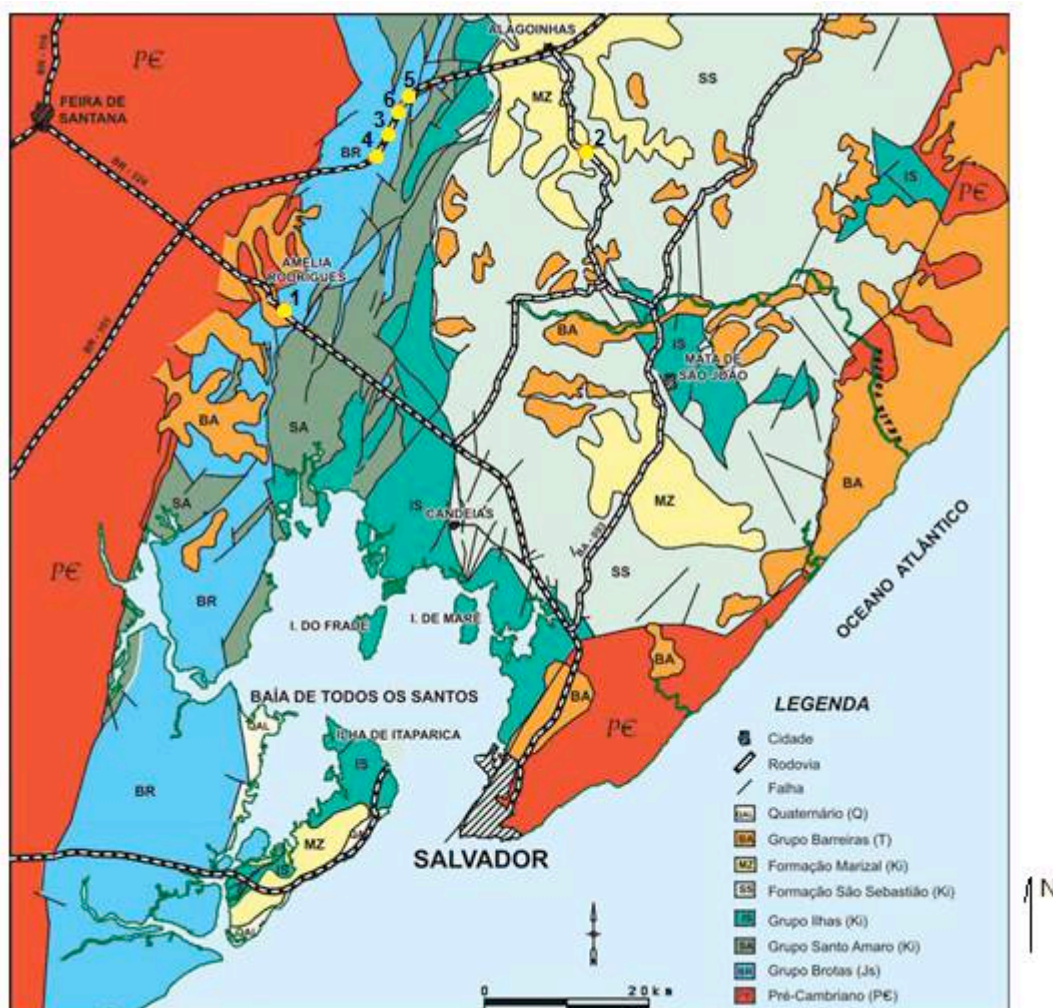
Inicialmente foram efetuadas buscas bibliográficas de artigos/livros baseados em tópicos que envolviam cianobactérias, esteiras microbianas, MISS, bacia do Recôncavo, Formação Sergi e sistemas eólicos. Para o entendimento sobre os temas “organismos microbianos” (cianobactérias, esteiras, biofilmes), “MISS” e “classificação de estruturas microbianas” os trabalhos de maior destaque foram de Noffke *et al.* (2001a, 2001b), Noffke (2009, 2010), Schieber (1999, 2004) Schieber *et al.* (2007a, 2007b), Gerdes *et al.* (2000), Gerdes (2007). Para o contexto geológico foram principalmente consultados os trabalhos de Brunh e De Ross (1987), Lanzarini e Terra (1989), Scherer *et al.* (2005, 2006, 2010), Magnavita *et al.* (2005), Torres Ribeiro (2002); Um entendimento geral sobre sistema eólico foi obtido a partir de trabalhos de Kocurek (1981a, 1981b), Ahlbrandt e Fryberger (1981), Fryberger *et al.*, 1983.

2.2 TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo foi realizado na região do Recôncavo Baiano, onde foram visitados seis afloramentos nas rodovias BR 324 (Município de Amélia Rodrigues) e BR 101 (entre o cruzamento da BR 324 com Alagoinhas), os quais são apresentados sinteticamente no Quadro 1 e Figura 1. Neles foram efetuados observações de estruturas de possível origem microbiana e registros fotográficos, sendo que as coletas de amostras foram feitas em somente dois dos afloramentos (3, 4), nos quais foi identificada a presença de estruturas microbianas.

Quadro 1 – Localização dos afloramentos da Formação Sergi visitados em campo

Afloramento	Localização		Amostra/ Lâmina
	Rodovia	Coordenadas	
Afloramento 1	BR 324/Km 548	---	---
Afloramento 2	---	0540092/ 8646534 / 24 L	SER-01
Afloramento 3	BR 101 km 143,3	0533107/ 8644754 / 24L	SER-02 SER-03 SER-04
Afloramento 4	BR 101 km 147,4	0534520/ 8643084 / 24L	SER-05 SER-06 SER-07
Afloramento 5	BR 101 km 139,8	---	---
Afloramento 6	BR 101 km 140,2	---	---

**Figura 1:** Mapa geológico com as localizações dos afloramentos visitados (Modificado de Maganavita et al., 2005).

2.3 FASE LABORATORIAL

Em laboratório as amostras foram analisadas microscopicamente, sendo selecionadas três amostras para Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV, FEI modelo Quanta 400) e sete para confecção de lâminas petrográficas delgadas para análise em microscópio óptico (ZEISS *Imager A2m*) sendo que duas delas (SER-04 e SER-06) foram aproveitadas para análise mineralógica por microsonda eletrônica (JEOL, modelo JXA-8230)

Para a petrografia foram selecionadas amostras que apresentaram filmes, bioturbação ou intensa oxidação que pudessem estar associados a atividade bacteriana. Embora tenham sido descritas nove lâminas, somente três foram discutidas neste trabalho (Lâminas SER-02, SER-04, SER-06), uma vez que seis delas (lâminas SER-01, SER-SER-03, SER-05, SER-07, SER-08, SER-09) não apresentaram nenhuma microestrutura que pudesse estar associada à atividade bacteriana.

As amostras analisadas e fotografadas por Microscopia Eletrônica de Varredura acoplada a espectroscopia de energia dispersa de raios-X EDS (MEV-EDS) foram aquelas em que estruturas microbianas foram visíveis em planta – pele de elefante, estruturas domais, pináculos (outras estruturas também foram reconhecidas e serão discutidas, porém não foram coletadas no campo por sua fragilidade). Estas passaram por tratamento de sopro de nitrogênio para eliminação de poeiras e partículas e metalização com ouro. Na análise, esperava-se localizar e apontar possíveis estruturas microbianas em escala microscópica, que corroborasse sua participação na formação de tais estruturas sedimentares.

Através da microsonda equipada com EDS, procurou-se detectar possíveis minerais que estivessem ligados a esteiras microbianas, como pirita, óxido de ferro,

minerais pesados. As lâminas petrográficas reutilizadas nesta fase passaram por tratamento de carbonização. Além dessas metodologias, foram confeccionados plugues de pedaços de rochas as quais contivessem filmes argilosos para análise em fluorescência e detecção de possível matéria orgânica.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS

As lâminas e amostras foram classificadas de acordo com o objetivo do trabalho (*vide* introdução), usando como referências principais os trabalhos de Noffke *et al.* (1996; 1997a,b; 2001a,b), Gerdes (2000; 2007), Schieber *et al.* (2007a), Noffke (2010), entre outros.

3 CONTEXTO BIOSSEDIMENTOLÓGICO

3.1 CIANOBACTÉRIAS

Cianobactérias são organismos procariontes que possuem atributos tanto de algas como de bactérias. Como as algas, elas possuem similaridade em tamanho e pigmentos verdes e azuis para realização da fotossíntese, compondo uma porcentagem significativa do fitoplâncton e contribuindo com grande parte da produtividade primária de seu ecossistema (FERRÃO FILHO *et al.*, 2009). As ultraestruturas e composição de suas membranas são similares às bactérias gram-negativas (THIEL e WOLK, 1987). Seus fósseis ou registro de atividade são achados desde há 3,5 bilhões de anos, e são consideradas as responsáveis pelo início da formação de oxigênio da atmosfera primitiva (VINCENT, 2009).

Esse grupo inclui cerca de 2000 espécies e 150 gêneros, com variados tipos e estruturas celulares, e estratégias fisiológicas (COSTERTON e STOODLEY, 2003). Morfologicamente, podem ser esféricas ou filamentosas (Figura 2), sendo estas últimas simples ou ramificadas. Tanto as esféricas como as filamentosas, quando agregadas, podem originar as esteiras microbianas (MUSSA, 2004). São considerados seres onipresentes, e crescem especialmente em planícies de maré, lagunas, em ambientes de água rasa, em profundidades onde a luz solar consiga atingir o substrato (COSTERTON e STOODLEY, 2003).

As cianobactérias são consideradas como os procariontes mais bem sucedidos na formação de esteiras e biofilmes, uma vez que possuem uma ampla variedade morfológica e fisiológica e capacidade de bioestabilização em sedimentos com abundante ou suficiente luminosidade (GERDES, 2007; SCHIEBER *et al.*, 2007b;

VINCENT, 2009). Van Germerdem (1993) define esteiras como estruturas organossedimentares que se desenvolvem sobre superfícies sólidas. Sendo as cianobactérias os principais agentes biológicos componentes de esteiras, são responsáveis pelo aprisionamento e retenção de sedimento que as compõe. Suas formas podem variar apresentando diferentes modelos, como tufos, formas enoveladas e retículos (SILVA E SILVA *et al.*, 2003)

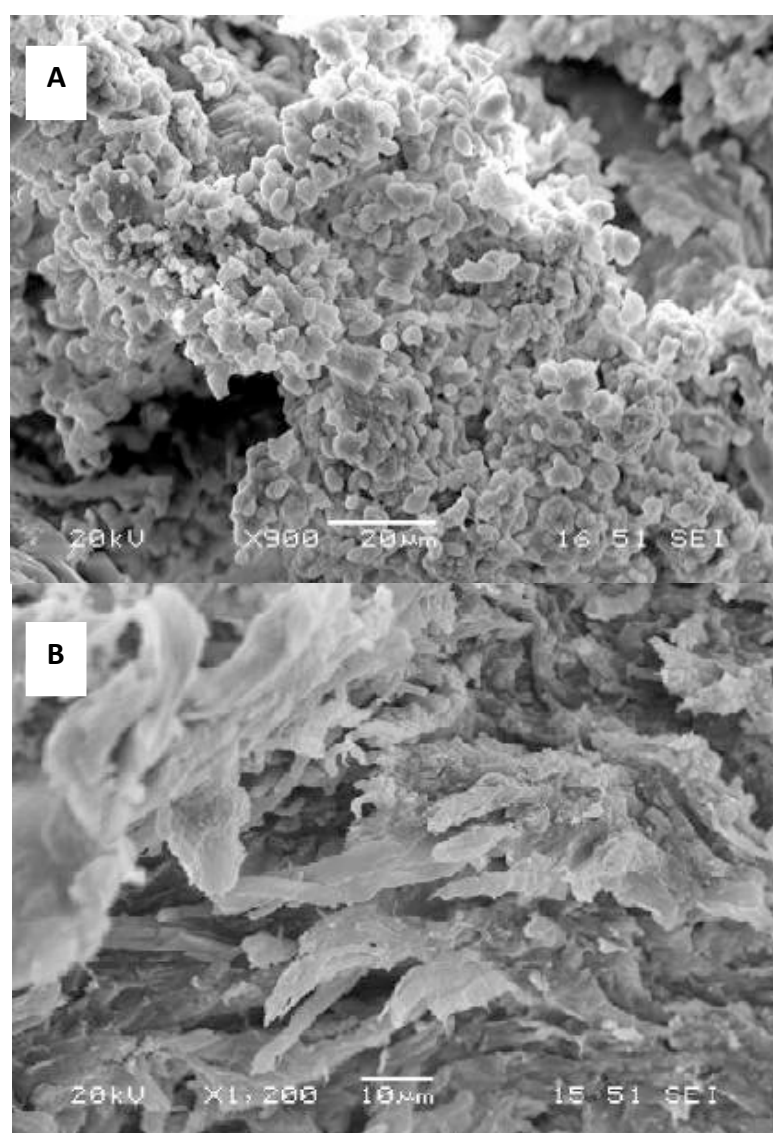


Figura 2 – (A) cianobactéria unicelular esférica. (B) Cianobactéria filamentosa. MEV, aumento respectivo de 900x e 1200x (Fonte: Iespa, 2006).

Os primeiros registros fósseis de cianobactérias são achados em carbonatos no Arqueano (SCHOPF, 2006; TICE e LOWE, 2006), e são preservados na forma de laminações de ondas ou rugas sub-paralelas, com camadas em torno de 0,5-2 cm, separadas por bandas de quartzo microcristalino ou por camadas detríticas. Em alguns casos, as laminações são deformadas, quebradas e dobradas sobre elas mesmas. São considerados registros de cianobactérias por evidências texturais e químicas da sua colonização nas rochas (WALSH, 2010), além de comparação a análogos atuais onde há crescimento desses organismos na forma de construções estromatolíticas e esteiras.

3.1.1 Biofilmes e esteiras microbianas

As esteiras microbianas também são conhecidas como esteiras algais, tapete algal, esteiras de cianobactérias, pois as cianobactérias são os principais organismos responsáveis pela formação das estruturas laminadas no sedimento (STOLZ, 2000; NOFFKE *et al.*, 2001a).

Os estágios iniciais de formação de esteira microbiana são simples biofilmes. As cianobactérias se espalham pelo substrato e liberam EPS (*Extracellular Polymeric Substance*), sendo bem adaptados e respondendo facilmente às mudanças ambientais (NOFFKE, 2010).

Visto que as cianobactérias são os principais componentes dos biofilmes, fatores extrínsecos (luz, umidade, pH) também irão influenciar na forma em que os mesmos se desenvolverão, até chegar num estágio mais complexo que são as esteiras.

Os biofilmes são camadas submilimétricas de populações ou comunidades de bactérias numa matriz de EPS, que se desenvolvem sobre um substrato em ambientes úmidos ou aquáticos (LAWRENCE *et al.*, 1994).

Suas células quando agregadas formam uma rede tridimensional separadas por um sistema de canais mantidos por correntes de água que também atua como condutora de nutrientes, oxigênio e material solto. As pequenas estruturas e dimensões dos biofilmes podem ser observadas apenas por microscópio eletrônico (RIDING, 2000).

As esteiras são estruturas mais complexas formadas por organismos tais quais cianobactérias filamentosas, esféricas, diatomáceas, algas diversas, as quais formam uma verdadeira comunidade (RIDING, 2000). Para Dupraz *et al.* (2009), esteiras microbianas são definidas como biofilmes organossedimentares, dominados por cianobactérias, que exibem ciclos firmemente acoplados. Interações complexas entre essas cianobactérias e seu ambiente circular podem resultar em organominerais.

Na comunidade de uma esteira, encontram-se tipicamente cianobactérias fototróficas na superfície, bactérias púrpuras sulfurosas logo abaixo e na camada mais profunda as bactérias verde sulfurosas, que não necessitam de luz ou oxigênio (NICHOLSON *et al.*, 1987), as quais delegam, às esteiras, estratificações em diferentes cores (Figura 3). Cada grupo de organismo desempenha uma função crucial para o desenvolvimento da esteira.

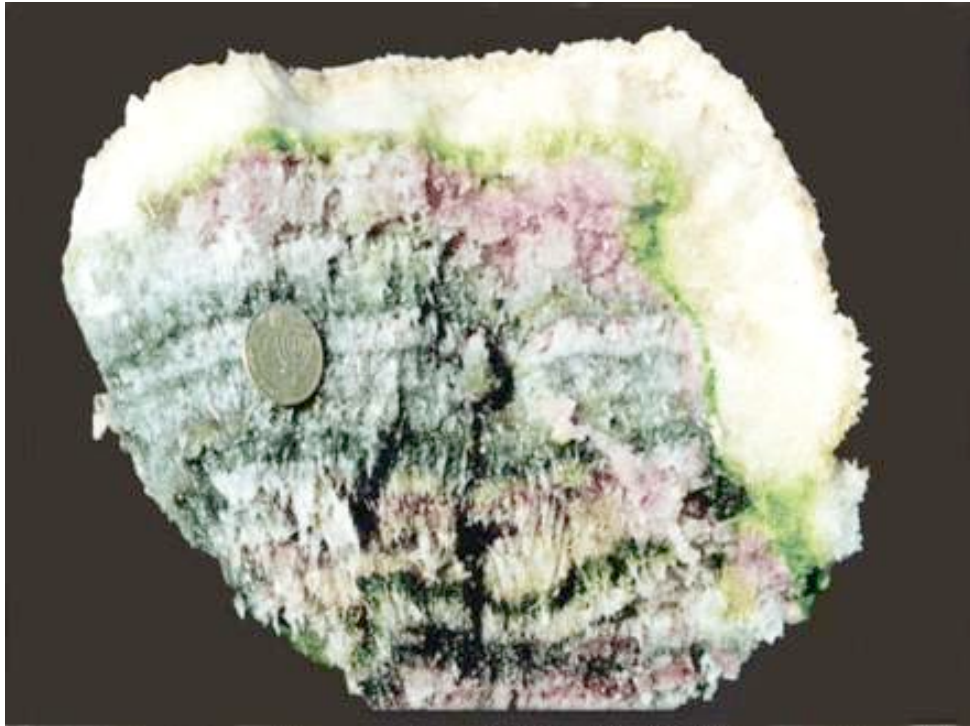


Figura 3: Esteira microbiana e seus diferentes grupos bacterianos representados por camadas de coloração diferenciada. (Fonte: Canfield *et al.*, 2004).

3.1.2 Substância Polimérica Extracelular (EPS)

EPS ou *Extracellular Polymeric Substance* é uma substância polimérica extracelular produzida por diferentes organismos, incluindo bactérias, algas e fungos. Dependendo dos espécimes produtores e do ambiente específico, o EPS pode ser formado por inúmeros tipos de polissacarídeos, proteínas, ácidos nucleicos ou uma mistura deles (SUTHERLAND, 1990; WINGENDER *et al.*, 1999). Por esta composição química diferenciada, as moléculas de EPS podem estar envolvidas em diversas funções no biofilme (WOLFAARDT *et al.*, 1999).

Para Decho (1990), essa substância é crítica na formação de estromatólitos e é componente chave em biofilmes. Ela é capaz de estabilizar as células microbianas e oóides de carbonatos em ambientes de alta energia (ondas, correntes de maré; REID *et al.*, 1995), previne, em algumas situações, a precipitação de CaCO_3

(PENTECOST e RIDING, 1986) assim como também induz a precipitação deste carbonato devido a outros fatores (DUPRAZ *et al.*, 2009).

Por sua característica negativa, o EPS tem o atributo de “agarrar” cátions mono e divalentes. Desta forma, ele retira os cátions de cálcio do ambiente e inibe sua união ao CO_2 do meio, e a consequente precipitação de carbonato de cálcio (SUTHERLAND, 2001). Em outra mão, quando o ambiente se satura de ions Ca^+ , o EPS deixa de agregar essas partículas e então há a precipitação. Além disso, a degradação de EPS por fatores ambientais (como fortes radiações UV), leva o microambiente a ficar mais alcalino, sendo este um fator contribuinte para a precipitação de CaCO_2 . A união dos fatores de saturação de Ca^+ e degradação do EPS é chamado de Mineralização Induzida Biologicamente (DECHO *et al.*, 1990; VISSCHER *et al.*, 2000), ou seja, os microorganismos indiretamente influenciam na precipitação mineral através da produção de EPS. Contudo, cabe destacar que o EPS não é o único fator de contribuição para precipitação mineral, há outros fatores abióticos que não serão aqui tratados.

Além do que foi decorrido, outras funções do EPS atuam na proteção contra dessecação, exposição ao UV, estresses ambientais, além da adesão das comunidades no substrato e estabilização das células microbianas em regimes hidrodinâmicos (Decho, 2000).

3.2 ESTRUTURAS SEDIMENTARES MICROBIANAS INDUZIDAS (MISS)

3.2.1 O que é MISS?

Hoje em dia é indiscutível a importância da vida microbiana para o entendimento da origem da vida e os processos geológicos da Terra. Os processos

geológicos, vida microbiana, e o registro de rocha sedimentar foram intimamente relacionados desde o reconhecimento dos estromatólitos como produto da atividade microbiana por E. Kalkowski no século XX (BORGHI e AVALONE, 2011). O entendimento desses processos é essencial como ferramenta para o entendimento da história do Planeta (SCHIEBER *et al.*, 2007a).

Os organismos microbianos são agentes importantes na produção de estruturas sedimentares primárias, contribuindo nos estudos paleoambientais e sendo indicadores de fácies (NOFFKE *et al.*, 2001a). Segundo Borghi e Avalone (2011), o reconhecimento de estruturas microbianas amplia a capacidade descritiva e interpretativa de sucessões sedimentares terrígenas ou siliciclásticas.

Publicações clássicas descrevem esteiras microbianas em depósitos siliciclásticos como estromatólitos (KALKOWSKY, 1908), sedimentos algálicos (BLACK, 1933), cama de crescimento (PETTIJHON e POTTER, 1964), estromatólitos potenciais (BROCK, 1976), biohermas de algas azuis (RICHTER *et al.*, 1979).

Em meados de 1980, a estrutura “pele de elefante” foi sugerida como de origem microbiana em fósseis de Ediacara, dando desta forma, início ao estudos de esteiras microbianas modernas e estruturas por elas formadas (*e.g.*, NOFFKE, 2010).

Noffke *et al.* (1996, 2001a), nomearam uma série de estruturas sedimentares ocorrentes em areias e arenitos como estruturas sedimentares microbianas induzidas (*Microbially Induced Sedimentary Structures* – MISS). Este termo foi criado com o intuito de agrupar tais estruturas numa categoria própria dentro da classificação de estruturas primárias de Pettijonh e Potter (1964; *e.g.*, NOFFKE *et al.*, 2001a e Noffke, 2010). Em outras palavras, MISS são estruturas sedimentares primárias originadas da interação de biofilmes ou esteiras microbianas com

dinâmicas físicas sedimentares, em sedimentos siliciclásticos - o que as diferem em forma e origem dos estromatólitos.

Segundo Noffke *et al.* (2006), estromatólitos são formados por esteiras algais que mediam a precipitação de minerais em ambientes rasos hipersalinos, sendo dominante os fatores químicos, diferindo desta forma de MISS, cujo processo de formação é influenciado por dinâmicas físicas do meio (ondas, oscilação da maré, vento, etc; Figura 4).



Figura 4: Demonstração da formação diferenciada de estromatólitos e MISS (Fonte: Noffke, 2010).

Desta forma, para uma melhor organização dos registros microbiais que são encontrados nos sedimentos e rochas sedimentares, Noffke *et al.* (2001a) classificaram cinco principais processos tafonômicos na formação de MISS: (1) nivelamento (*leveling*), (2) bioestabilização (*biostabilization*), (3) impressão

(*imprinting*), (4) Separação microbiana de grãos (*microbial grain separation*), e (5) Agarramento e aglutinamento (*baffling, trapping, and binding*).

Nivelamento (Figura 5) é o processo de pavimentação do substrato, em que, por exemplo, marcas de ondas, são encobertas e preenchidas em suas lacunas por esteiras microbianas, diminuindo desta forma a amplitude da marca ondulada (NOFFKE *et al.*, 2001a). Bioestabilização (Figura 6) pode ocorrer de três diferentes maneiras, pela fixação de grãos de sedimentos soltos; suavizando superfícies ásperas evitando erosão; e vedando o sedimento como uma capa protetora (NOFFKE *et al.*, 2001a). Impressão (Figura 7) são marcas deixadas quando o biofilme encobre partículas do sedimento, e esse biofilme formado é posteriormente soterrado, podendo ser observado nos testemunhos apenas por cortes transversais como estruturas senoidais (NOFFKE *et al.*, 2001a). Separação microbiana de grãos (Figura 8) acontece quando os grãos sedimentares vão sendo recobertos individualmente por biofilme até formar uma esteira única sobre o substrato (NOFFKE *et al.*, 2001a). Agarramento e aglutinamento (Figura 9) ocorre em três etapas: na primeira, filamentos algais orientam-se perpendicularmente em relação ao substrato, formando redes de captura; na segunda etapa, grãos são capturados por essas “redes” pelo decréscimo do fluxo da corrente que passa pelos filamentos; por último, os grãos vão sendo encobertos por EPS, e então se desenvolve a esteira conforme cresce a comunidade bacteriana.

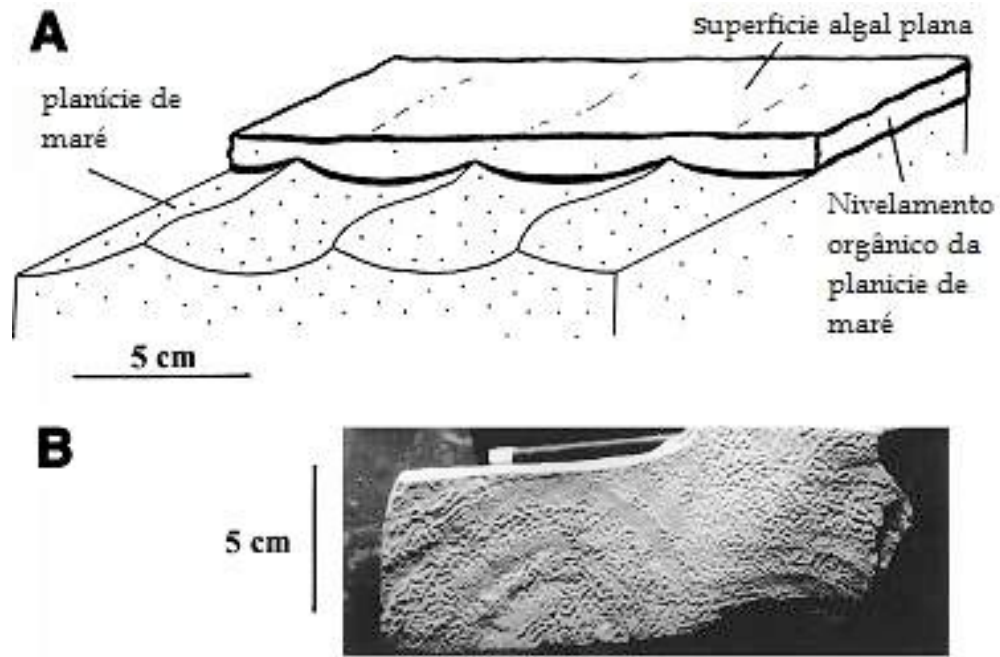


Figura 5: Nivelamento. Marcas de ondas niveladas por esteiras microbianas. Escala: 10cm. (Fonte: Noffke *et al.*, 2001a).

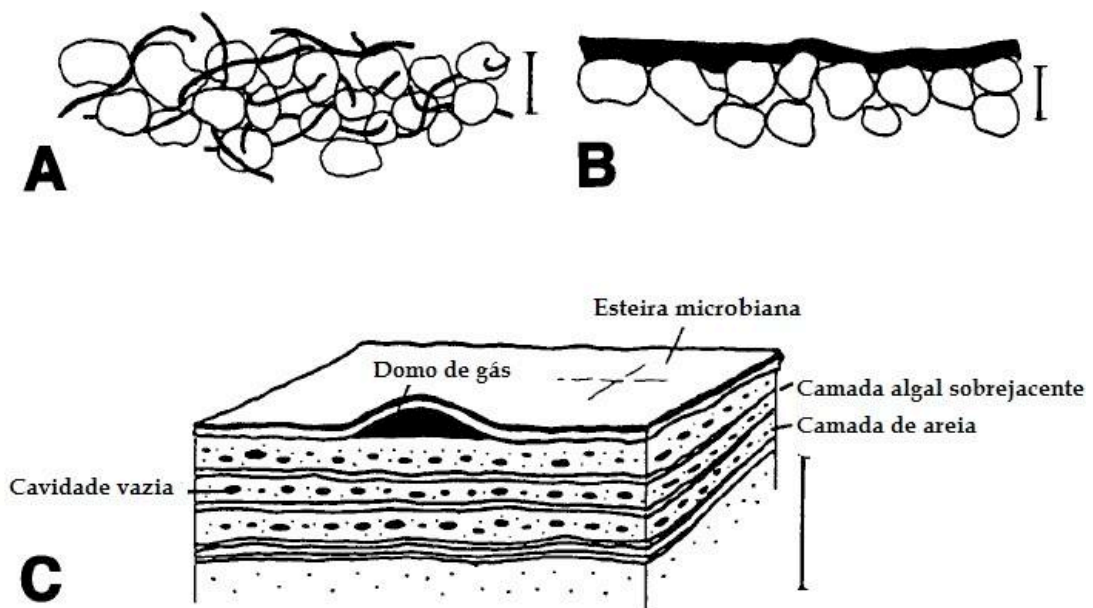


Figura 6: Bioestabilização. A: Filamentos de cianobactérias envolvendo grãos sedimentares. B: Diminuição da rugosidade superficial. C: Gases intrasedimentares presos pela esteira algal. Escala: 10cm. (Fonte: Noffke *et al.*, 2001a).

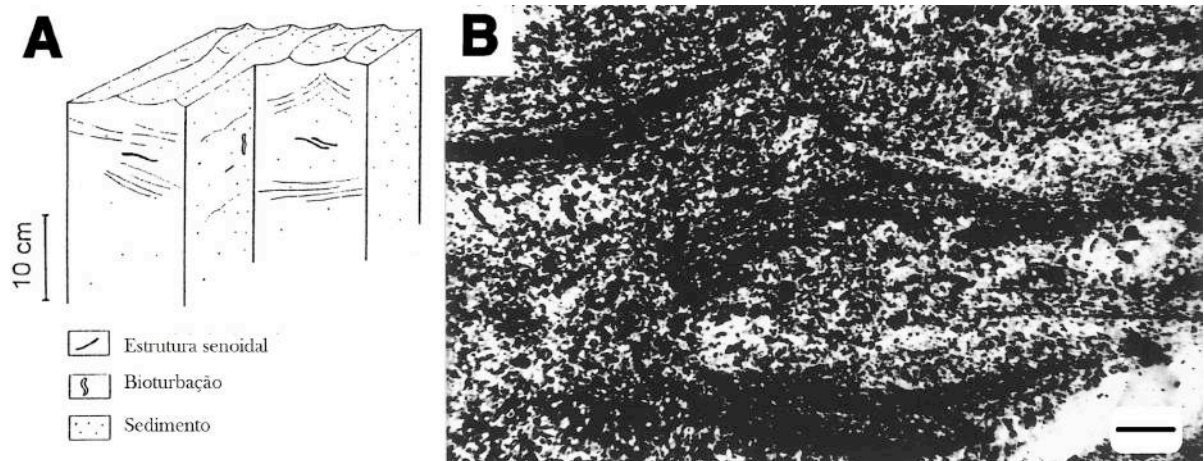


Figura 7: Impressão. A: Corte vertical mostrando as estruturas senoidais, que são revestimentos de marcas onduladas. B: Estruturas senoidais. Escala: 0,5cm. (Fonte: Noffke et al., 2001a).

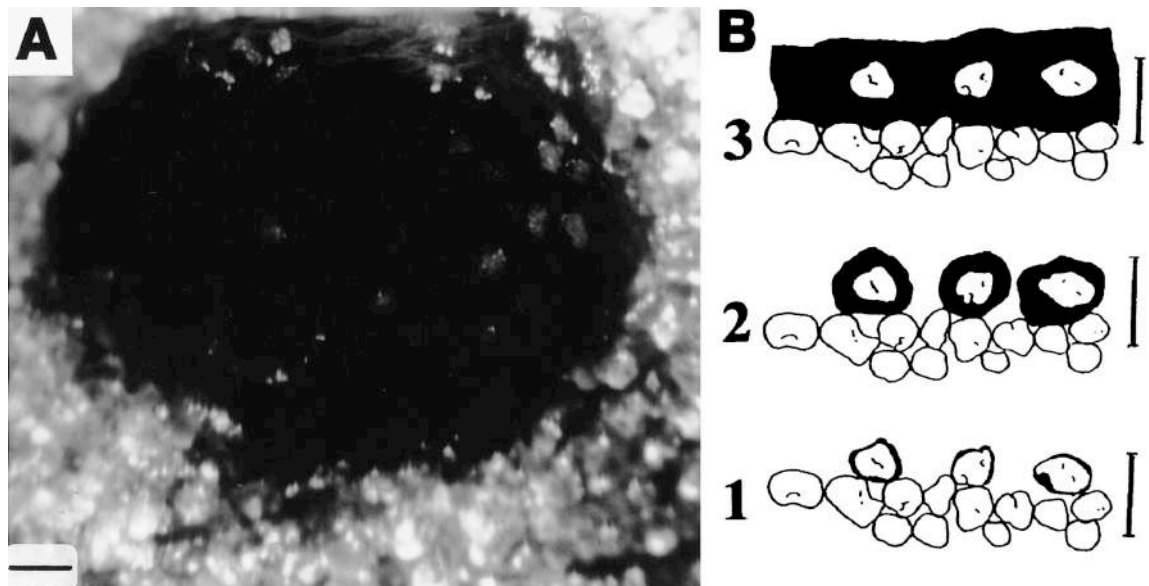


Figura 8: Separação microbiana de grãos. A: desenvolvimento da esteira microbiana sobre o sedimento. B: Esquema do progressivo desenvolvimento da separação de grãos no biofilme. Escala: 2mm. (Fonte: Noffke et al., 2001a).

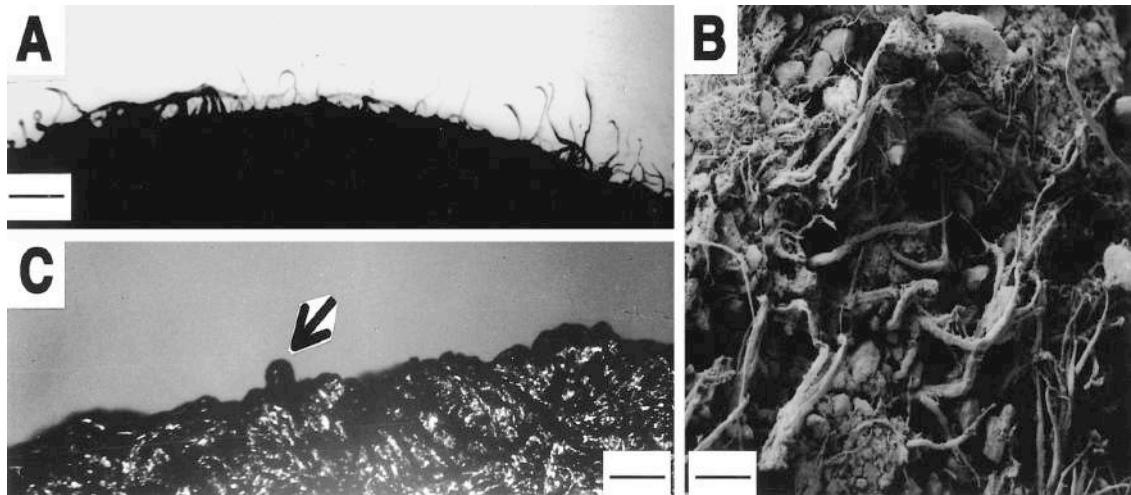


Figura 9: Agarramento e aglutinamento. A: Orientação perpendicular dos filamentos em relação ao substrato. B: Grãos minerais sendo capturados pela diminuição do fluxo da corrente. C: Grão mineral sendo encoberto por esteira microbiana em crescimento. Escala: 1mm. (Fonte: Noffke *et al.*, 2001a).

Dentro dos processos biológicos e tafonômicos que foram discutidos, há a formação de diferentes feições por biofilmes e esteira microbianas que dependem dos fatores ambientais em que ocorrem. As feições mais facilmente reconhecidas são biolaminações crenuladas, margens encrespada de fendas de dessecação (*mud curled*), laminas rugosas (*wrinkle marks*), bolsos de erosão (*erosional pockets*), pele de elefante (*elephant skin*) e esteira lascada (*chips marks*) (NOFFKE *et al.*, 1996, 1997a,b; GERDES *et al.*, 2000).

Estudos de esteiras e biofilmes atuais (Figura 10) são de grande importância para se entender o processo de formação dos registros fossilíferos. Para Noffke (2010), o princípio do atualismo é essencial para o estudo de esteiras algais e é de indubitável importância para os estudos geomicrobiológicos.

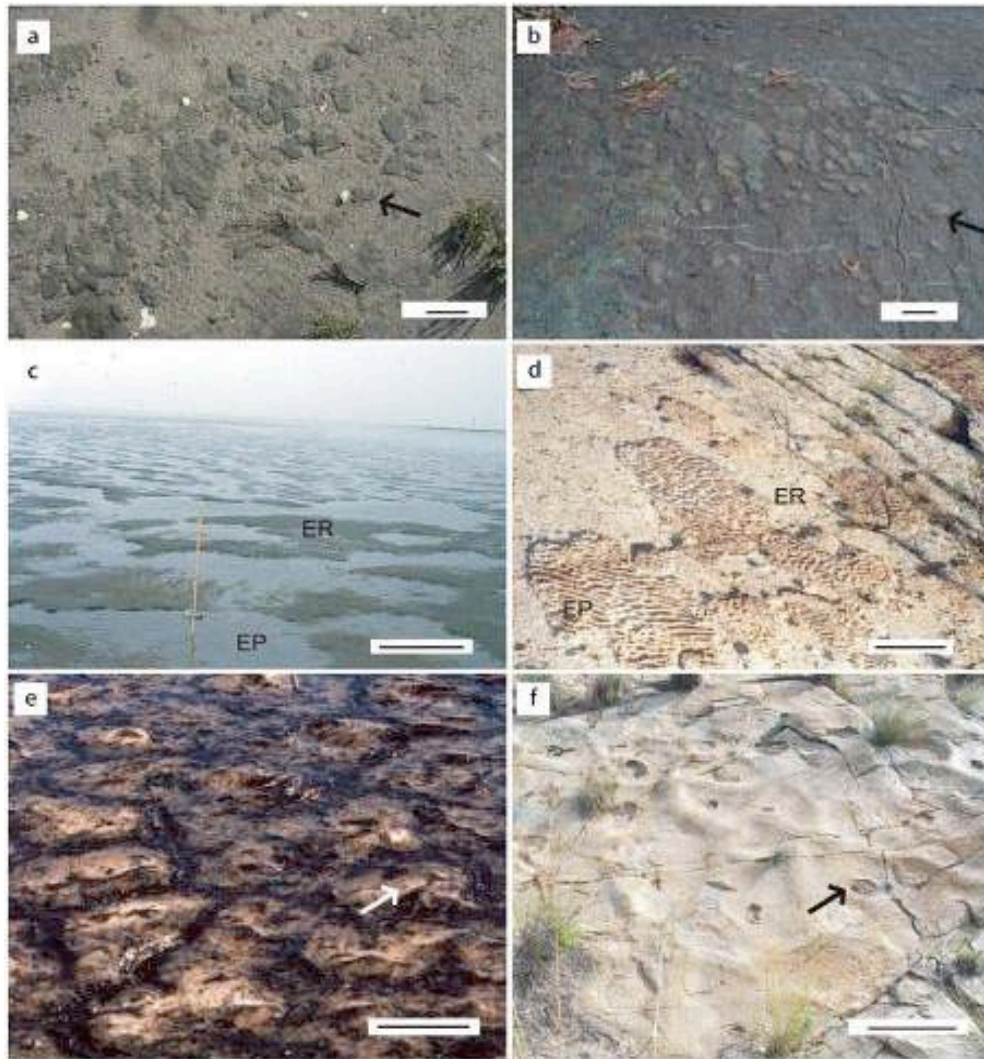


Figura 10: Exemplos esteiras vivas e fósseis. A) lâminas de areia esfoliada (*exfoliating sand laminae*). B) fóssil de fragmentos de esteiras (*sand chips*). C) restos erosionais (ER – *erosional remnants*) e bolsos (EP – *erosional pockets*). D) fóssil de bolso de erosão (EP) em esteira estabilizada em superfície sedimentar (ER). E) padrão de quebra poligonal com bolhas de ar no centro (*polygonal cracks and domes*). F) mesma quebra poligonal com cúpula de gás no centro. Escala 30cm (Fonte: Noffke, 2010).

3.2.2 Processos na formação de estruturas sedimentares microbianas induzidas

Inúmeras evidências macroscópicas para MISS já foram descritas e ajudam-nos na identificação em campo. Porém, esta tarefa pode não ser algo trivial, uma vez que decomposição de matéria orgânica e compactação da fábrica podem levar a completa obliteração das características genuínas da esteira. Para ter qualquer

chance em provar evidências de estruturas organossedimentares, em primeiro lugar deve-se identificar localidades onde esteiras possam prosperar. Posteriormente, estabelecer qual característica sedimentológica e textural pode indicar a presença de esteiras microbianas (SCHIEBER, 1998).

Além da proposta tafonômica de Noffke *et al.* (2001), Schieber (2004) sumariza diferentes feições de origem microbiana que podem ser identificadas em arenitos. Cada estrutura está conectada ao tipo de processo que formou, sendo eles: crescimento da esteira, efeitos metabólicos, destruição física da esteira, decaimento e efeitos diagenéticos.

O processo de crescimento da esteira é uma resposta a fatores físicos, tais quais luz, profundidade da água e sombreamento (SCHIEBER, 2004). As estruturas mais comuns na literatura são biscuits, nódulos, biolaminações, pináculos, tufos e nivelamento de ondulações (*e.g.*, NOFFKE *et al.*, 2001; GERDES *et al.*, 2000;)

Esteiras microbianas representam ecossistemas em que crescimento primário e degradação da matéria orgânica estão intimamente ligadas a vias bioquímicas que são excretadas por um grupo e usadas e transformadas por outro. Estruturas originadas de processos metabólicos bacterianos são bolhas, padrões semelhantes a *kinneya*, laminação enriquecida em ferro e precipitação carbonática (*e.g.*, PFLÜGER, 1999, SUR *et al.*, 2006).

Um exemplo singular para destruição física da esteira são quebras em areias puras na presença de esteiras, conhecidos com *shrinkage cracks*. Além desta feição, temos lama encrespada (*mud curled*), bordas de erosão (*erosional edges*) e fragmentos de esteira (*mat chips*; *e.g.*, SAKAR 2006).

Feições derivadas de decaimento de esteira e efeitos pós-deposicionais levam ao desenvolvimento de gás e consequente alteração física do sedimento e

rompimento da superfície da esteira. Outra influência do decaimento de esteiras leva a cimentação de arenitos por minerais anóxicos, tais quais pirita, siderita e dolomita férrica, o qual é nomeado como mineralização “por decaimento de esteira” (SCHIEBER, 1998).

Para Tang *et al.* (2012), a MISS relacionada ao crescimento de esteira, metabolismo e decaimento são raramente preservados e/ou de difícil identificação devido a propriedade porosa do arenito e sua formação em ambientes óxidos rasos. Segundo os autores, estruturas de destruição são mais comuns. Porém, neste trabalho, descreveremos diversas estruturas de crescimento e decaimento.

Além destas características macroscópicas, bioassinaturas químicas são deixadas pelos microbianas através da interação mineral-microbial, facilitando a identificação de esteiras que tiveram suas morfologias obliteradas por ação diagenética. Embora seja difícil o reconhecimento de como os microrganismos levam a precipitação química, sabe-se que eles são essenciais para que este processo ocorra, em se tratando de alguns minerais.

Segundo Schieber (2004), uma vez que a matéria orgânica dificilmente se preserva em arenitos como evidência bacteriana, o decaimento anaeróbico de esteira favorece a formação de minerais anóxicos tais quais pirita, siderita e dolomita férrica.

Tomando como exemplo, só recentemente atividade bacteriana vem sendo elucidada como atuante no ciclo do ferro na Terra. Em ambientes com pH acima de 4, o Fe^{+3} reage quimicamente e instantaneamente com água para precipitar como um óxido mineral, geralmente a ferridrita (FeOOH). Estes óxidos podem posteriormente ser submetidos à diagênese para uma forma mais cristalizada, como a hematita (Fe_2O_3). Alternativamente, esses óxidos quando entram em ambiente

anóxico, podem ser reduzidos quimicamente ou por respiração anaeróbica microbiana. Este último mecanismo é agora reconhecido como dominante na oxidação do Ferro (EMERSON e WEISS, 2004)

3.2.3 MISS na caracterização paleoambiental

A maior parte dos trabalhos atuais sobre esteiras microbianas foi realizada em ambientes marinhos rasos e planícies de maré, primeiramente pelo seu fácil acesso (GERDES *et al.*, 2000; ERIKSSON *et al.*, 2010), sendo raros trabalhos em lagoas de interdunas/lençóis de areia, destacando-se o de Eriksson *et al.* (2000).

Estudos ambientais que tentam relacionar diferentes feições microbianas em suas respectivas posições ambientais são limitados. Um trabalho de destaque é o de Parizot *et al.* (2005) que utiliza-se de diferentes feições microbianas para inferir profundidade da coluna da água em bacia paleoproterozoica, a partir de análogos recentes. Outros trabalhos também de bastante vigor são os de Kendall e Skipwith (1969 *apud* ERIKSSON *et al.*, 2000), Logan *et al.* (1974), Bose e Chafetz (2012) e Tang *et al.* (2012) cujos resultados evidenciam que diferentes tipos de esteira microbiana desenvolvem-se de acordo com suas posições em regiões de supramaré ao inframaré raso (Figura 11).

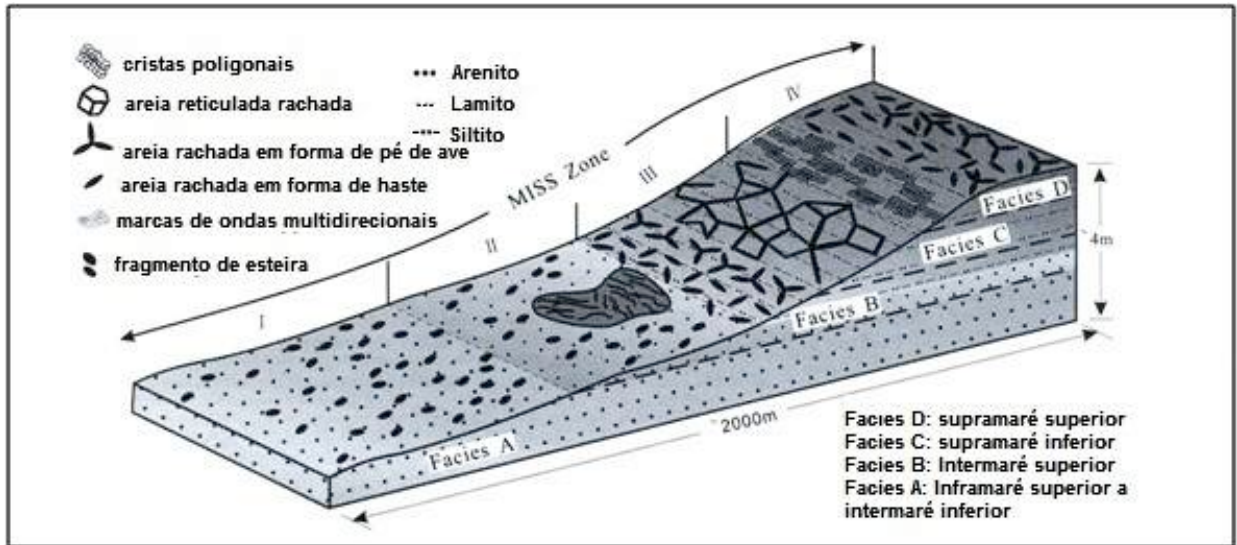


Figura 11: As estruturas microbianas foram separadas em diferentes zonas em planície de maré do Neoproterozóico de Lushan, China, por Tang *et al.* (2002), o qual propõe que tais feições possam ser utilizadas para reconhecimento de fácies em depósitos característicos deste ambiente.

Eriksson *et al.* (2010) atentam para a necessidade de maiores estudos de estruturas microbianas associadas a seus ambientes específicos fazendo disto um fator corroborativo a estudos paleoambientais.

Catuneanu (2007) propõe a discussão de que a distribuição de estruturas microbianas em bacias sedimentares podem ser usadas para inferir mudanças na natureza e energia de processos físicos que operaram em diferentes ambientes deposicionais durante o tempo geológico. O autor explana que a erosão por onda da costa à antepraia no Proterozoico era muito maior em comparação com o Fanerozoico, levando a uma melhor preservação de estruturas microbianas na parte de sistema plataformar, abaixo do nível de ação de ondas de tempo bom. Porém, a tendência moderna é diferente, no qual a maior evidência de atividade microbiana é preservada na porção de antepraia.

Catuneanu (2007) e Noffke (2009) inferem que estruturas microbianas, preservação e proliferação de MISS são identificadas e ocorrem em períodos de inversão de transgressão e regressão, justificando que em períodos transgressivos,

esteiras microbianas prosperam uma vez que largas áreas da margem continental passiva são alagadas constituindo um ambiente apropriado para crescimento de esteiras algálicas (e.g., CARMONA *et al.*, 2012).

4 SISTEMAS EÓLICOS

Nos sistemas eólicos, os processos geológicos operantes são controlados por mudanças na competência do agente de transporte e na concentração dos sedimentos deslocados (OLIVEIRA, 2005). A acumulação de sedimento é consequência da migração e cavalgamento de formas de leitos, tendo como requisito um aporte maior de sedimento que entra na bacia do que o que sai (MOUNTNEY e HOWELL, 2000).

A acumulação do sedimento em sistemas eólicos se dá pela desaceleração e expansão do fluxo ou expansão da circulação atmosférica ou ainda devido à topografia, sendo que a preservação desses sedimentos e o espaço de acumulação são controlados pela subsidência da bacia ou/e pelo nível freático (OLIVEIRA, 2005). As formas de leito que serão criadas irão depender do regime do vento, taxa de acumulação e tamanho de grão (LANCASTER, 1988), podendo gerar feições como marcas de ondas em lençóis de areia, interdunas, dunas e draas (WILSON, 1972).

4.1 DUNAS E DRAAS

Dunas são formas de leito de comprimento de onda que variam de 3 metros a 300 metros e altura que varia de 0,1 a 100 metros. Draas são consideradas formas de leito de escalas maiores, formadas por processos geológicos diferentes, com seu comprimento de onda variando de 300 a 5500 metros, e altura de 20 a 450 metros (Mountney, 2006).

Dunas de origem eólica são caracterizadas pelos estratos cruzados que formam suas estruturas internas. Os processos deposicionais das dunas podem ser

os de fluxo trativo dos grãos, dando a forma de marcas onduladas em suas superfícies e os gravitacionais, que dão forma a sua face frontal, sendo queda de grão livre (*grainfall*) ou fluxo de grão (*grainflow*; ANDERSON, 1988). A primeira acontece por saltação e suspensão que se deposita do barlavento para o sotavento, depois que perde velocidade de transporte pelo vento. Os estratos de fluxo de grão se formam com o deslizamento não coesivo dos grãos na face frontal da duna (SCHERER, 2004). Assim é comum encontrar em cortes transversais de dunas dois tipos diferenciais de estratos cruzados (Figura 12)

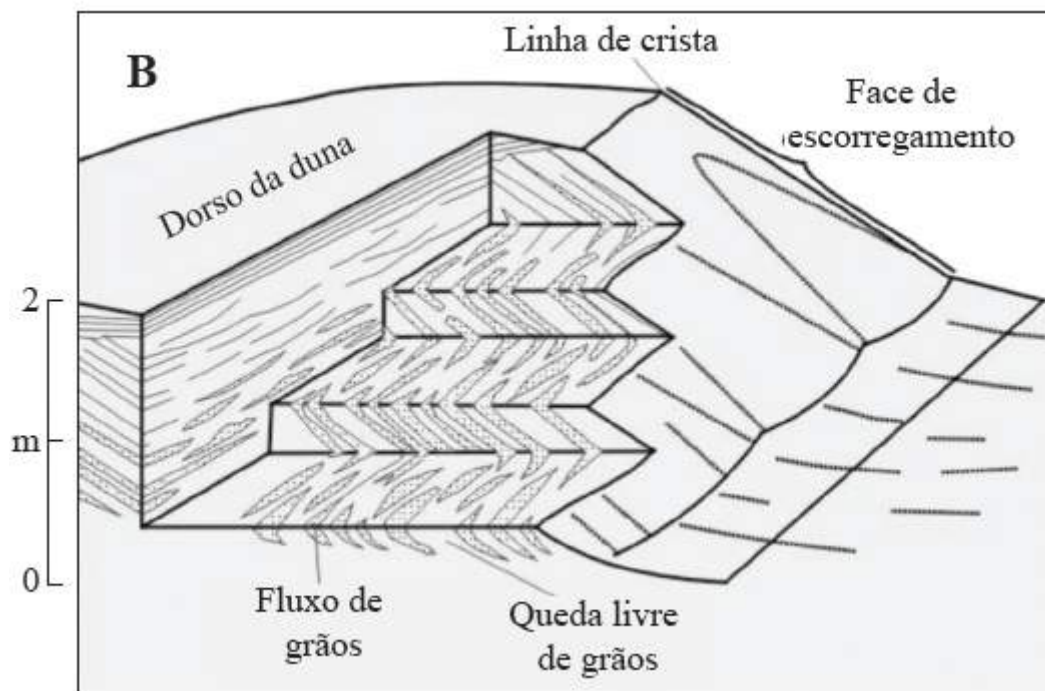


Figura 12: Seções horizontais e transversais mostrando as estruturas internas de uma duna (Adegas *et al.*, 2012 modificado de Hunter, 1977)

4.2 INTERDUNAS

Interdunas são depressões entre dunas ou draas, com extensão e geometria variando de acordo com a saturação de areia do sistema (Figura 13). Em zonas subsaturadas, o fluxo de areia tem valor inferior ao crítico para esboçamento das

formas de leito. Zonas metassaturadas caracterizam-se por pequenas dunas espaçadas entre si, ou seja, possuem cobertura incompleta de areia, em que o fluxo de areia atual é menor que o potencial, porém maior que o valor crítico para desenvolver formas de leito. Por fim, as zonas saturadas são identificadas por cavalgações em dunas e draas, em que há cobertura total de areia, com fluxo realizado semelhante ao potencial (SCHERER, 2004).

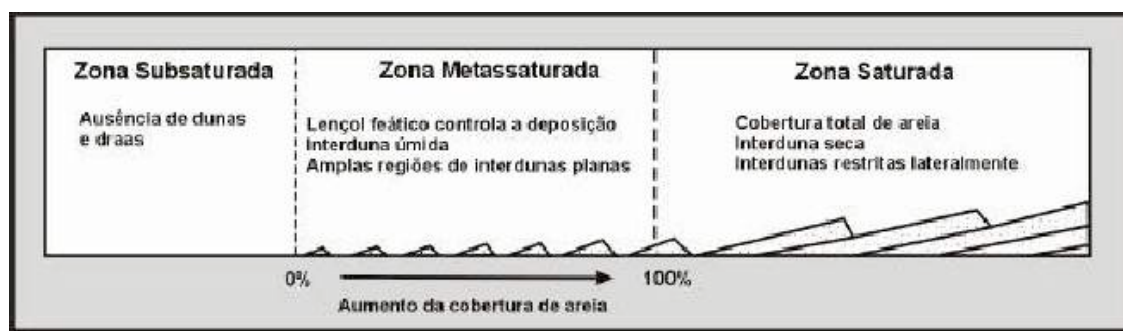


Figura 13: Concentração de sedimento no fluxo (Fonte: Wilson, 1971).

Interdunas podem ser classificadas por deposição ou deflação. A deflação ocorre predominantemente em zonas saturadas, em que a areia é removida para construção de dunas eólicas. As interdunas deposicionais ocorrem preferencialmente em zonas metassaturadas, podendo ser subdivididas em três tipos principais: depósitos de interdunas secas, depósitos de interdunas encharcadas e depósitos de interdunas úmidos (AHLBRANDT e FRYBERGER, 1981).

Nos depósitos de interdunas secos, a superfície deposicional é seca (AHLBRANDT e FRYBERGER, 1981). Seus estratos são predominantemente formados por marcas onduladas eólicas de dois tipos, as transladantes cavalgantes e as formas de leitos isoladas, de espessura variando de 1 centímetro a 10 centímetros, composta de areia grossa e grânulos (SCHERER, 2004).

Depósitos de interdunas encharcadas se formam quando o lençol freático ou franjas capilares encontram-se próximos a superfície deposicional (AHLBRANDT e FRYBERGER, 1981). Segundo Kocurek e Fielder (1982), as estruturas sedimentares encontradas nesse tipo de depósito são as de adesão, em que grãos de areia se aderem a leito plano, incluindo marcas onduladas e domos de adesão.

Os depósitos de interdunas úmidos têm configuração marcada por inundações periódicas por fluxo fluvial ou alto nível do lençol freático (AHLBRANDT e FRYBERGER, 1981). Esses depósitos podem ser evaporíticos com precipitação de calcita, dolomita, gipso e anidrita (FRYBERGER *et al.*, 1983), ou depósitos siliciclásticos, originados em ambientes lacustres e fluvial, com variadas feições deformativas como laminações contorcidas e bioturbação (MCKEE, 1979; KOCUREK, 1981b).

4.3 LENÇOL DE AREIA

Lençóis de areia são massas acumulativas em movimento, onde não há dunas com faces de avalanche devido a diversos fatores, como vegetação esparsa, baixo suprimento de areia, nível do lençol freático elevado (KOCUREK e NIELSON, 1986). Ocorrem marginalmente a campos de dunas, embora ambos depósitos possam existir independentemente (AHLBRANDT e FRYBERGER, 1982). As estruturas mais comuns em serem encontradas nesse tipo de depósito são as estratificações planas de baixo ângulo ($<15^{\circ}$) e as marcas onduladas pelo vento, com granulometria que varia de areia muito fina a areia muito grossa (KOCUREK e NIELSON, 1986).

4.4 VIDA E FÓSSEIS EM DESERTOS

Ambientes desérticos são habitats de muitas formas de vida, apesar do seu clima seco e escassez de água em superfície. A fauna predominante neste tipo de ambiente se dá por roedores, répteis e alguns insetos, os quais, assim como as plantas, possuem excelentes adaptações a falta de água. (CORRÊA, 2010).

Em geral, áreas de interdunas são ambientes mais favoráveis em suportar vida, pois nelas podem ser formados lagos temporários quando águas subterrâneas encontram-se próximas à superfície. Quanto aos fósseis, a sua escassez advém do fato de ambientes eólicos serem altamente oxidantes; então plantas e animais são dificilmente preservados por sua completa decomposição. Pegadas e traços de animais também são dificilmente preservados, uma vez que este tipo de ambiente sofrem retrabalhamento pelo vento e/ou processos fluviais; porém é possível que pegadas e outros icnos sejam mais bem preservadas em sedimentos finos de interdunas e lençóis de areia, principalmente quando houver umidade em superfície (NICHOLS, 2009; CARVALHO *et al.*, 2010) e presença de organismos microbianos (*e.g.* CARVALHO *et al.*, 2010; ERIKSSON *et al.*, 2000)

Um exemplo bem próximo de excelente preservação fóssil em ambientes desérticos, são as pegadas de dinossauros preservadas em estratos de antigas dunas da Formação Botucatu, bacia do Paraná (Figura 14), a qual constitui uma das maiores deposições áridas contínuas do Mundo. Nesta unidade, além das pegadas, alguns corpos fósseis estão preservados, como troncos e conchostráceos (FERNANDES *et al.*, 2001).

Inúmeras espécies de algas também são identificadas em desertos, como é relatado em trabalhos como FRIEDMANN *et al.* (1967), porém estruturas sedimentares por elas deixadas não constam na bibliografia.

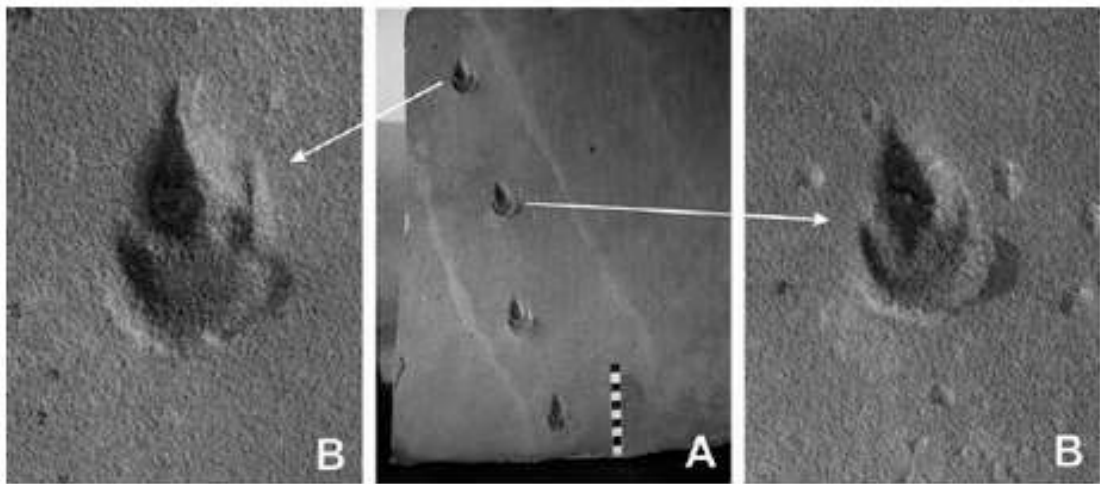


Figura 14: Pegadas de dinossauros em estratos de dunas da Formação Botucatu. (A) pista com quatro pegadas, (B) detalhes da pegada (Fernandes *et al.*, 2001).

5 CONTEXTO GEOLÓGICO

5.1 A BACIA DO RECÔNCAVO

A bacia do Recôncavo (Figura 15) possui uma área de aproximadamente 10.000km², sendo considerado um rifte alongado de direção NE- SW. Seus limites adjacentes se dão a NW pelo Alto do Aporá, avizinhandose à bacia do Tucano; ao sul, seu limite com a bacia de Camamu ocorre na parte mediana da Ilha de Itaparica e a leste e oeste é limitada pelo embasamento metamórfico Pré-Cambriano, com suas camadas apresentando mergulho no sentido SE (e.g.,BRAGA, 1987; TORRES RIBEIRO, 2002).

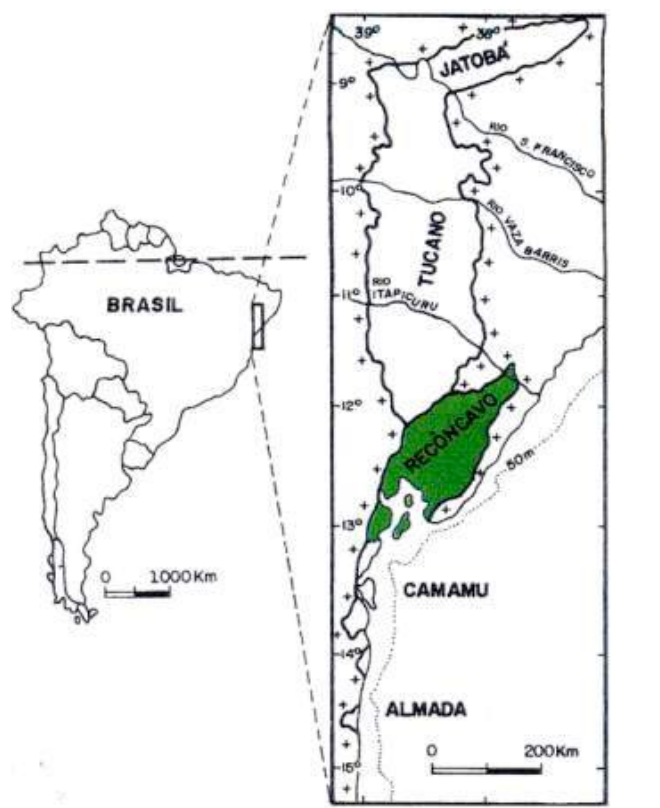


Figura 15: Mapa de localização da Bacia do Recôncavo (Fonte: Torres Ribeiro, 2002, modificado de Figueiredo *et al.*, 1994).

A bacia do Recôncavo é classificada como sendo um “rifte abortado” do final do Jurássico ao Cretáceo, formada com a abertura do oceano Atlântico Sul. Sua história geológica pode ser dividida em duas fases tectônicas, a Pré-rifte e Rifte (e.g., LANZARINI e TERRA, 1989; CAIXETA *et al.*, 1994; TORRES RIBEIRO, 2002; MAGNAVITA *et al.*, 2005). A primeira está representada pelas formações Aliança, Sergi, Itaparica e o Membro Tauá da Formação Candeias. A fase Rifte, pelas formações Candeias, Marfim, Pojuca, Taquipe, São Sebastião e Salvador (BRAGA, 1987). O diagrama estratigráfico e a seção geológica da bacia podem ser observada nas figuras 16 e 17, respectivamente.

Os sedimentos da sequência Pré-rifte foram depositados por sistemas complexos de leques aluviais e sedimentação argilosa em um lago raso. Na fase Rifte, os sedimentos se depositaram em lago profundo por um sistema de leques gravitacionais subaquasos, no qual a taxa de subsidência era maior que a taxa de sedimentação. Sua finalização se deu pelo sistema fluvio-deltáico progradante em um corpo de água raso (BRAGA, 1987).

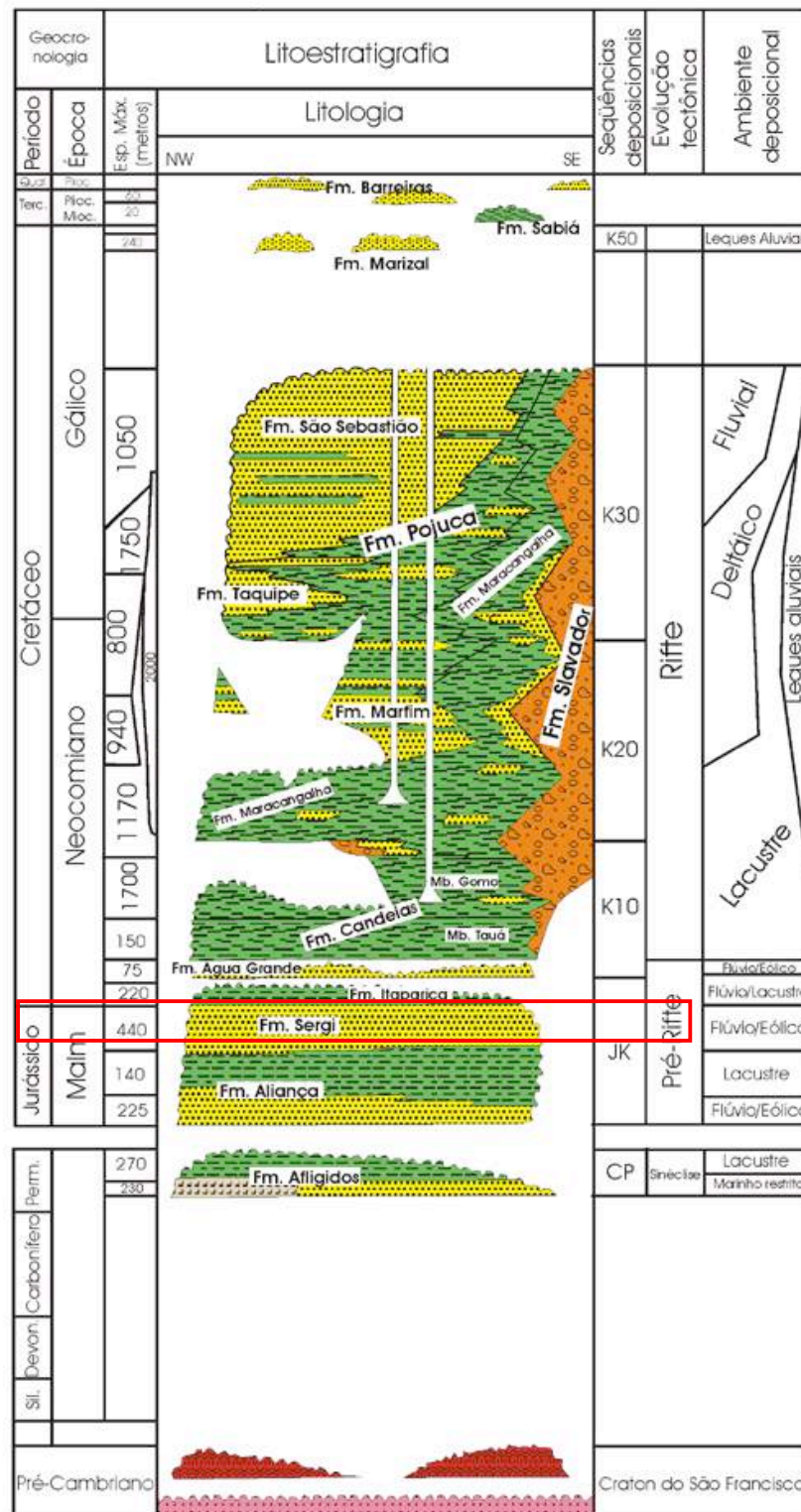


Figura 16: Diagrama estratigráfico da bacia do Recôncavo. (Fonte: CPRM, http://www.cprm.gov.br/gis/carta_reconcavo.htm, acesso em: 22/01/2013)

SEÇÃO GEOLÓGICA ESQUEMÁTICA DA BACIA DO RECÔNCAVO RECÔNCAVO BASIN SCHEMATIC CROSS-SECTION

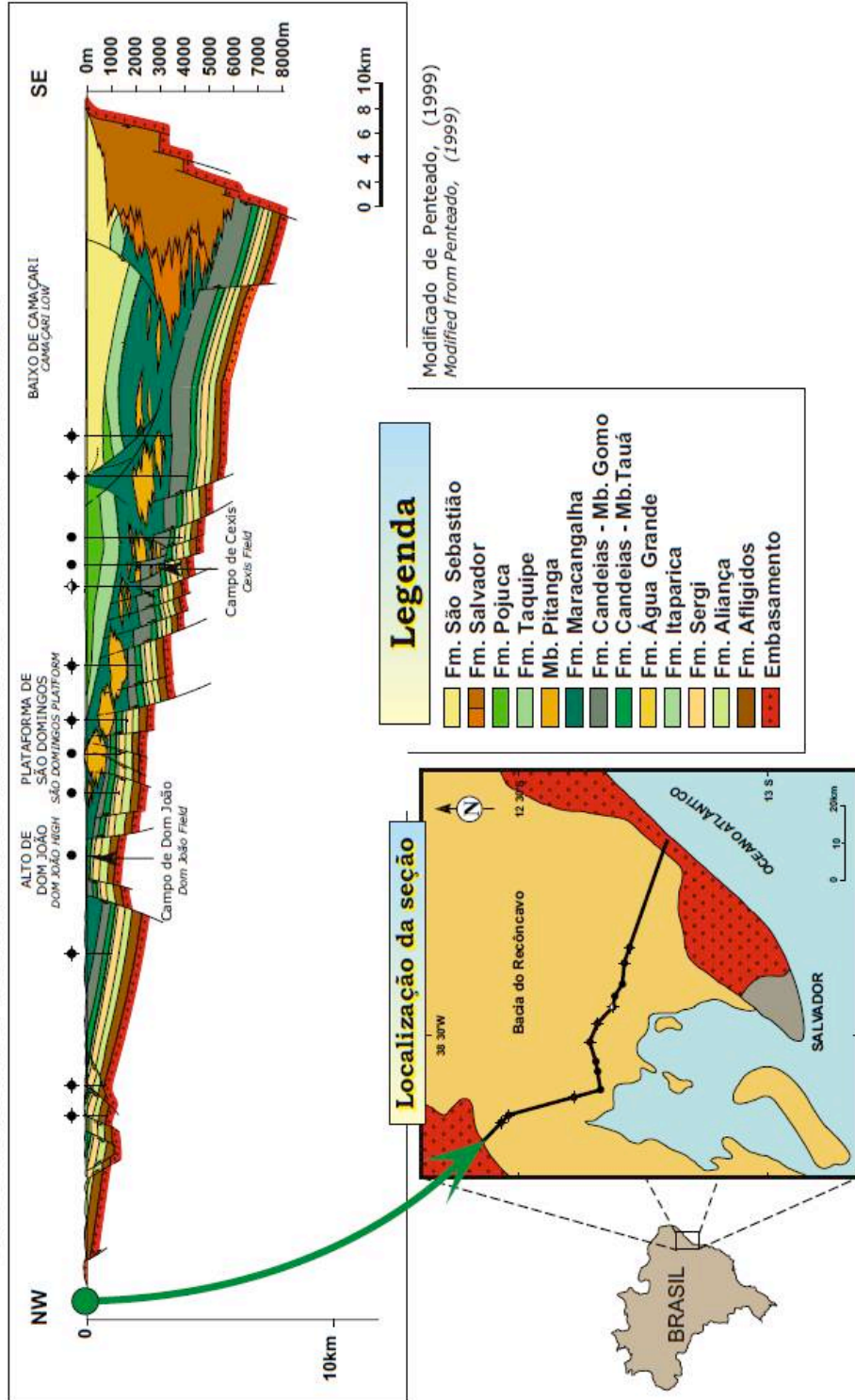


Figura 17: Seção geológica da bacia do Recôncavo. (Fonte: ANP, modificado de Penteadó, 1999. http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round4/atividades_exploratorias/cartas_secoes/index.htm, acesso em 22/01/2013).

5.2 FORMAÇÃO SERGI

A Formação Sergi é uma unidade amplamente estudada por constituir o principal reservatório de hidrocarbonetos da bacia do Recôncavo (BRUHN e DE ROS, 1987).

Os depósitos incluídos na Formação Sergi foram depositados durante a fase Pré-rifte da bacia, equivalente ao andar Dom João no Jurássico final (LANZARINI e TERRA, 1989). Esta idade foi inferida através de ostracodes encontrados na Formação Aliança, sotoposta a Sergi, devido a ausência de fósseis guias nesta última (TORRES RIBEIRO, 2002). Juntamente com a Formação Aliança, a Formação Sergi pertence ao Grupo Brotas e encontra-se em toda a bacia, aflorando porém, somente nas bordas norte e oeste. Seu pacote sedimentar é composto essencialmente por arenitos quartzosos com granulometria variando de fino a conglomerático com espessura média de 250m (SCHERER *et al.*, 2005). Através da literatura, sabe-se que a unidade registra um sistema fluvio-eólico, depositado sob condições áridas/semi-áridas

Scherer *et al.* (2005) subdividiram o pacote sedimentar da Formação Sergi em três sequências deposicionais, baseados em dados de afloramentos e testemunhos. A Sequência I é formada por depósitos eólicos e fluviais, sendo o primeiro interpretado pela presença de arenitos finos a médios bem selecionados, estratificações horizontais e estratificações cruzadas tangenciais com laminações transladantes em marcas onduladas eólicas na primeira, e alternância de lâminas de fluxo de grão e queda de grão na segunda; os pacotes fluviais são caracterizado por serem depósitos areníticos maciços de granulometria fina a média, podendo ser maciço ou laminado (estratificações cruzadas acanaladas, estratificações cruzadas de baixo-ângulo e/ou laminação plano-paralela). A Sequência II é interpretada como

depósitos de um sistema fluvial entrelaçado, devido à presença de arenitos grossos e conglomeráticos e estratificações cruzadas acanaladas e planares. A Sequência III caracteriza os depósitos arenosos eólicos, pelas laminações de baixo ângulo de marcas onduladas eólicas e/ou estratos cruzados tangenciais, compostos por lamina de fluxo de grão e marcas onduladas, no topo e na base do set, respectivamente. As três sequências estratigráficas podem ser consultadas na Figura 18, a qual apresentada o perfil estratigráfico, os ambientes deposicionais e as respectivas sequências propostas por Scherer *et al.* (2005).

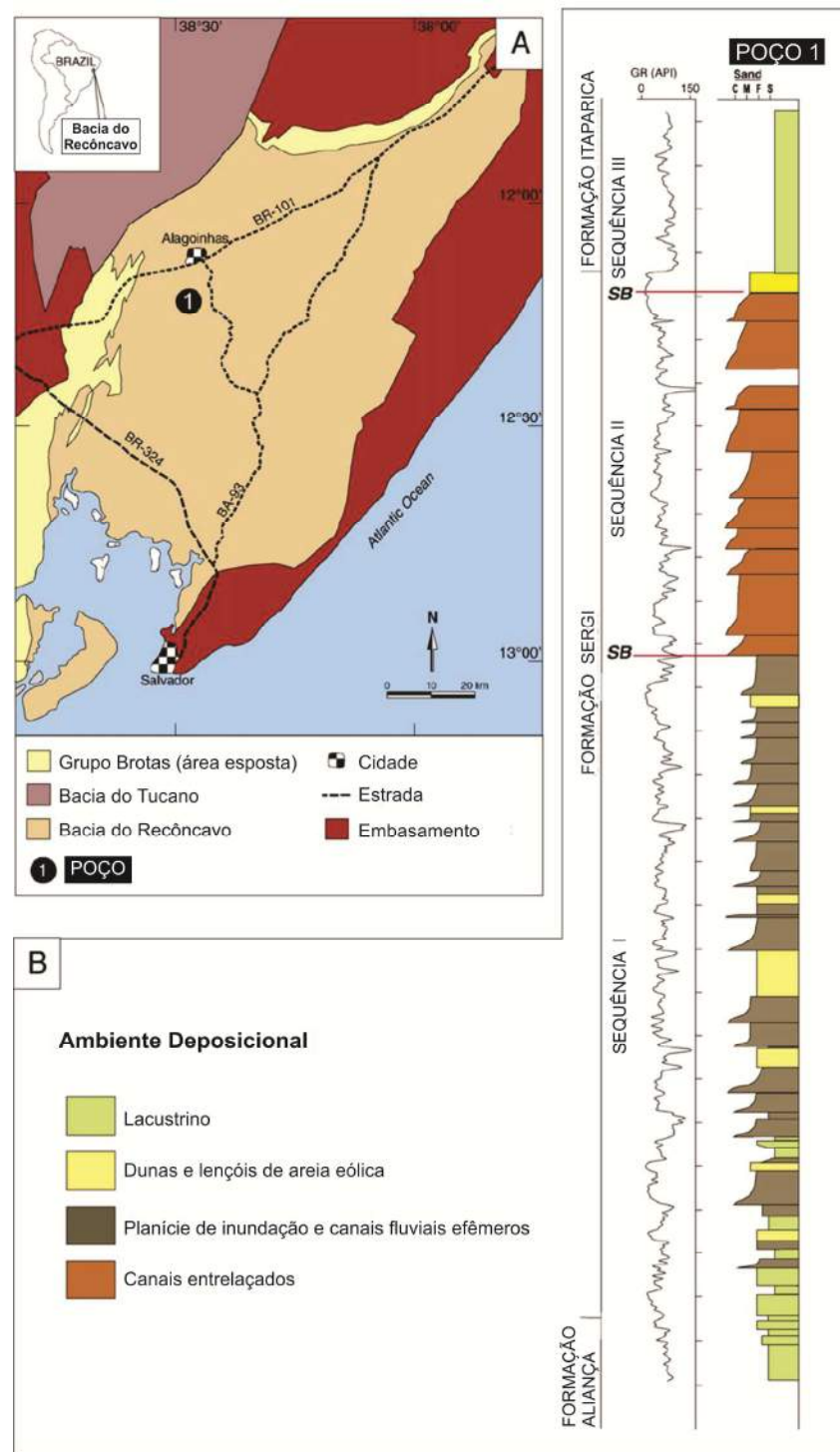


Figura 18: Sequências deposicionais de Scherer *et al.* (2005). A) Mapa de localização da bacia do Recôncavo e localização do poço perfurado; B) Ambientes deposicionais e as sequências estratigráficas da Formação Sergi. Os pacotes eólicos se encontram nas sequências I e III. (Fonte: Scherer e Goldberg, 2010).

5.2.1 Fácies e paleoambiente da Formação Sergi

Conforme a divisão em sequências deposicionais de Scherer *et al.* (2006), o pacotes deste estudo estão inseridos nas sequências I e III, cujas associações de fácies de interdunas e lençóis de areia são interpretadas, respectivamente, como *"camadas horizontais delimitadoras e estratificações cruzadas compostas (em vista paralela a paleocorrente) são interpretadas como superfícies de interdunas resultantes de cavalgamentos sucessivos de dunas eólicas"* e *"a estratificação cruzada paralela ou de baixo ângulo é interpretada como lençol de areia formado pela migração cavalgante de ondulações eólicas em uma superfície deposicional seca"*.

Além dos trabalhos de Scherer *et al.* (2005, 2006), outros trabalhos clássicos e atuais da literatura da Formação Sergi foram consultados, buscando um entendimento a partir da evolução de conhecimentos sobre tal unidade. Entre estes trabalhos, destacam-se Bruhn e De Ros (1986), Lanzarini e Terra (1989), Torres Ribeiro e Borghi (2003), Bongioiolo e Scherer (2010) e Adegas *et al.* (2012). Além do entendimento geral sobre tal unidade, buscou-se identificar quais trabalhos tratavam do paleoambiente de interdunas/lençol de areia, visto que a identificação de MISS se deu em depósitos característicos destes subambientes.

Bruhn e De Ros (1986) tratam da compilação e evolução dos trabalhos até então publicados sobre a Formação Sergi, relatando somente "pacotes eólicos" e "retrabalhamento eólico de sistemas fluviais".

Lanzarini e Terra (1989) descrevem cinco fácies em testemunhos de um poço na localidade de Fazenda de Boa Esperança (BA). Os mesmo autores apresentam um modelo de sistema evoluindo de fácies fluviais nas porção basal e mediana da formação, para um progressivo abandono do sistema fluvial no topo, onde

predominam fácies de retrabalhamento eólico. O sub-ambiente de interdunas está representada na fácies E. A descrição de fácies realizada pelos autores podem ser consultadas na Tabela 1.

Tabela 1: Fácies de Lanzañini e Terra (1989) da Formação Sergi, em testemunho de poço na Fazenda Boa Esperança, BA.

Fácies	Descrição	Interpretação
A	Arenito grosso a conglomerático	Depósitos de preenchimento de canais
B	Arenito grosso com estratificação cruzada acanalada	Depósitos de barra de canais
C	Arenito fino a muito fino, por vezes com nódulos de calcita e ondulas cavalgantes	Lençóis de extravasamento
D	Lamitos com nódulos de calcita	Associando a lençóis de extravasamento ou preenchimento de canais abandonados
E	Arenito bimodal fino a grosso	Depósitos eólicos de dunas e interdunas

Trabalhos mais antigos pouco tratam das fácies eólicas em se tratando de diferenciá-las em úmidas ou secas. Os mesmos tratam, de forma geral, o paleoambiente da Formação Sergi, do registro eólico, como tendo períodos de escassez de chuvas, onde se desenvolveriam campos de dunas e áreas de lençóis de areia, como resultado do retrabalhamento de canais fluviais pela ação de ventos, como é advogado por Medeiros e Ponte (1981) e Da Rosa e Garcia (2000).

Trabalhos mais recentes, como de Torres Ribeiro e Borghi (2003), no qual foram realizadas descrições faciológicas em afloramentos em diversos pontos pela BR-324 e BR-101, cânion do Rio Sergi e Ilha de Itaparica (Tabela 2), estende uma discussão para um modelo de interdunas ora úmido ora seco; contudo, sem maiores detalhes de atributos para essa conclusão. Estes mesmos autores apresentam um modelo deposicional (Figura 19), o qual admite um sistema flúvio-eólico formado por extensos campos de dunas de grande porte e interdunas extensas, ora secos e ora úmidos, reelaborados por rios entrelaçados efêmeros

(*wadis*), o qual coexiste com um sistema fluvial. Estes sistemas relacionam-se lateral e verticalmente, ou seja, com fortes interações entre eles. O modelo proposto por tais autores difere dos trabalhos publicados anteriormente, nos quais a Formação Sergi apresenta-se como resultado da evolução de um sistema flúvio-eólico tornando-se árido progressivamente.

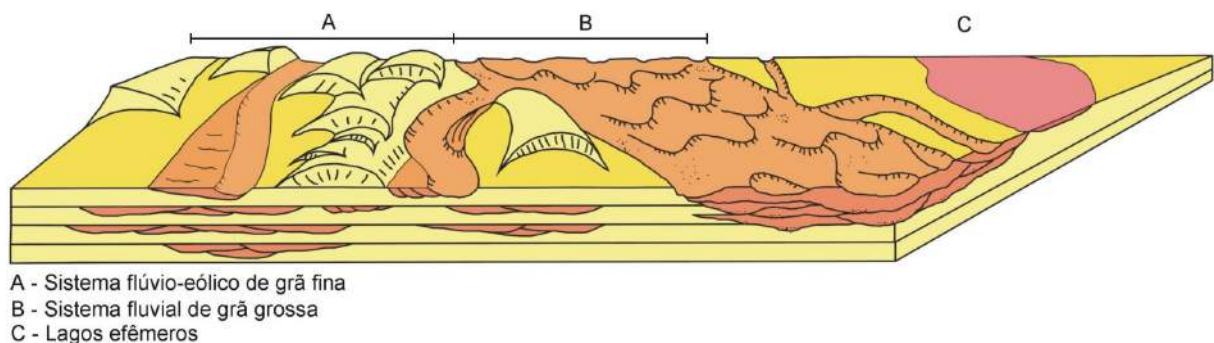


Figura 19: Modelo deposicional da Formação Sergi proposto por Torres Ribeiro e Borghi (2003)

Tabela 2: Fácies de Torres Ribeiro e Borghi (2003) em testemunhos e afloramentos na Br 101, cânion do rio Sergi e ilha de Itaparica (BA)

Fácies	Descrição	Interpretação
Gt	Conglomerado fino com estratificação cruzada acanalada.	Meso- ou macroformas-de-leito depositadas por traçãosub-aquosa, relacionada a barras fluviais de crista sinuosa.
St	Arenito fino a médio (subfácies St1) ou grosso a muito grosso, por vezes seixoso (subfácies St2), com estratificação cruzada acanalada de porte pequeno a médio.	Meso- ou macroformas-de-leito depositadas por traçãosub-aquosa, relacionada a barras fluviais de crista sinuosa.
Sm	Arenito fino a muito grosso, maciço. Pode conter intraclastos de argila (subfácies Smi).	Fluxo de detrito durante inundação. O caráter maciço também pode ser função de alterações pós-deposicionais, como bioturbação ou variações no lençol freático.
Sr	Arenito fino a médio, lamoso, com ondulações e laminação cruzada. Pode ocorrer bioturbação (subfácies Srb).	Microformas-de-leito depositadas por tração sub-aquosa durante inundação fluvial.
Sh	Arenito fino a médio com laminação plano-paralela	Leito plano depositado por tração sub-aquosa sob regime de fluxo superior. Relaciona-se a depósitos de planície de inundação e topo de barras fluviais
Al	Arenito fino a médio, laminado	Saltação e arraste de grãos, sob condições subaéreas, formando lâminas plano-paralelas ou de ângulo baixo (ondulação transladante). Representam depósitos de interduna ou de lençóis de areia.
Ac	Arenito fino a grosso inferior, bimodal, com estratificação cruzada de porte médio a muito grande.	Fluxo e queda de grãos, que desenvolvem a face desotavento de dunas eólicas.
Ad	Arenito fino a médio, bimodal, com laminação convoluta ("camada desorganizada").	Deformação sinsedimentar de estratos causada por mudanças na poro-pressão dos sedimentos gerado pela variação do nível do lençol freático.
Fm	Lamito arenoso, maciço, podendo apresentar bioturbação.	Decantação em ambiente subaquoso de baixa energia ou com tração fraca, empaleo ambiente lacustre, de planície de inundação fluvial ou canais abandonados.
P	Silcrete	Precipitação química de sílica em <i>sabkha</i> continental / <i>playalakes</i> sob condições de pH alto.

Bongiolo e Scherer (2010) estudaram fácies de reservatórios flúvio-eólicos e trazem uma descrição mais minuciosa de fácies (Tabela 3) e associação de fácies eólicas para a Formação Sergi, considerando uma interação dos sistemas fluvial-eólico-lacustre e seus pacotes ocorrendo de forma intercalada. Estes últimos autores ainda advogam dois tipos de associações de fácies eólicas para a unidade: associação de fácies de dunas eólicas e associação de fácies de lençóis de areia.

Na associação de fácies de dunas eólicas, as estratificações cruzadas transladantes, com milímetros de espessura e cavalgamento subcrítico são interpretadas como áreas de interdunas (BONGIOLO e SCHERER, 2010).

As associações de fácies de lençóis de areia são interpretadas com intercalações de estratos úmidos e secos, pois há alternância de estruturas de adesão e marcas onduladas, devido as alterações na flutuação do lençol freático. Não são consideradas áreas de interdunas, pois os pacotes não estão associados a depósitos com estratificações cruzadas de dunas eólicas (BONGIOLO e SCHERER, 2010).

Quadro 3: Fácies de Bongioiolo e Scherer (2010) em poços de diferentes localizações na Formação Sergi (BA)

Fácies	Descrição	Estruturas	Interpretação
Gm	Conglomerado clasto-suportado (0.1 a 0.3 m de espessura), pobremente selecionado, contendo lama e intraclastos de carbonato (0.1 a 7 cm de diâmetros)	Estratificação cruzada massiva ou difusa	Depósitos de conglomerados tardios
Gt	Conglomerado clasto-suportado (0.1 a 0.3 m de espessura), pobremente selecionado, contendo lama de intraclastos de carbonato (0.2 a 5 cm de diâmetros)	Gradação normal com estratificação cruzada acanalada	Dunas de cascalho 3D
St	Areia fina a conglomerados, moderadamente sorteados, contendo intraclastos de lama dispersos ou paralelos a estratificação (0.1 a 0.6 m de espessura)	Estratificação cruzada acanalada	Dunas subaquáticas 3D (regime de fluxo inferior)
Sp	Areia fina a conglomerático, moderadamente selecionado, contendo intraclastos de lama (0.2 a 0.5 m de espessura)	Estratificação cruzada planar	Dunas sub-aquáticas 2D (Regime de fluxo inferior)
Sl	Areia fina a conglomerático, moderadamente selecionado. Contendo intraclastos de lama (0.2 a 0.5 m de espessura)	Estratificação cruzada de baixo ângulo	Deposição planar sob regime de fluxo superior alto ou baixo.
Sh	Arenitos finos a muito grossos, moderadamente selecionados, contendo intraclastos de lama dispersos (0.2 a 0.5 m de espessura)	Estratificação horizontal	Deposição em camada superior
Sr	Areia fina, pobremente selecionada. 1 a 5 cm de espessura podendo chegar a 1.5 m de espessura	Laminação cruzada de ondulações cavalgantes (supercrítico a subcrítico). Massiva	Ondulação 2D ou 3D em regime de fluxo inferior
Sm	Areia fina a conglomerática, moderadamente selecionado, contendo intraclastos de lama. 0.1 a 5.5 m de espessura	Laminação horizontal e ondulas muito pequenas. Massivo	Deposição rápida de fluxos hiperconcentrados ou fluidização
Fl	Argilitos e siltitos, pobremente a intensamente bioturbado. .0.1 a 1m de espessura	Estratificação cruzada de grande porte	Sedimentação gravitacional, deposição de sedimentos de grãos finos por correntes de suspensão
Fm	Lamitos e siltitos, pobremente a intensamente bioturbado, podendo ocorrer fosseis de ostracodes e fragmentos de plantas. 0.1 a 4 m de espessura	Estratificação cruzada de baixo ângulo	Sedimentação gravitacional, deposição de sedimentos de grão finos por suspensão em correntes. Ausência de laminação devido a flocculação de argila em suspensão ou falta de laminação associado a fluidização ou intensiva bioturbação
St(eo)	Areia fina a média, bem selecionado, com grãos bem arredondados e altamente esféricos. 0.2 a 2.5 m de espessura. Os afloramentos são compostos por fluxo de grãos.	Estratificação cruzada de larga escala	Dunas eólicas
Sl(eo)	Areia fina a média, bem selecionado com grãos arredondados e altamente esféricos. Laminas onduladas de vento. Camadas tabulares de 8m de espessura	Estratificação cruzada de baixo ângulo	Estratos transladantes produzidos pela migração e cavalgamento subcrítico de ondas de vento em superfícies deposicionais secas
As(eo)	Arenitos finos a muito finos com laminação de ondulas horizontais (0.3 a 1cm de espessura), intercalado com laminas irregulares de lamito, definindo uma textura plissada.	Laminação horizontalondulada	Estruturas de adesão
Sm (eo)	Areia fina a média, bem selecionada com grãos bem arredondados e altamente esféricos. 0.1 a 4.5 m de espessura.	Massivo	Processo pós deposicional de escape de fluidos (fluidização)

Adegas (2012), estudando a Formação Sergi na bacia de Almada descreveu várias litofácies (Quadro 4), entre as quais incluiu interdunas numa associação de fácies de interdunas eólicas e lençóis de areia em associação de fácies de lençóis de areia. Segundo o autor, a associação de fácies de interdunas é composta por *“arenitos finos, bem selecionados, possuindo grãos arredondados e com alta esfericidade. (...) são arenitos com estratificação plano paralela e cruzada de baixo ângulo compostas por laminações de marcas onduladas eólicas e intercaladas aos sets de dunas eólicas”*. A associação de fácies de lençóis de areia é por ele descrita como *“arenitos com laminações cruzadas de baixo ângulo com gradações inversas internas aos estratos podem ser interpretadas como lençóis de areia eólicos (...) sobre uma superfície deposicional seca.”*

Pelo fato de a Formação Sergi ser considerada um reservatório petrolífero, os estudos da unidade, aqui apresentados e outros consultados (e.g. DIAS, 2003), abordam assuntos mais específicos como aspectos diagenéticos e de reservatório. Desta forma, estruturas microbianas, mesmo se já identificadas, podem ter sido interpretadas como estruturas de origem física primária; ou então, passaram despercebidas, se presentes nos afloramentos e testemunhos estudados pelos diversos autores.

Quadro 4: Fácies de Adegas *et al.* (2012) em afloramentos e poços na bacia de Almada (BA)

Fácies	Ocorrência	Descrição	Interpretação
Gt	47,7 m 13 pts	Conglomerados clasto-suportados com moda em grânulos a blocos, seixos e blocos arredondados a sub-arred., e grânulos e areia sub-angulosos a angulosos. Organizados em sets de estratificação cruzada com ou sem gradação normal de 0,3 até 3m de espessura. Por vezes ocorrem como lagscentimétricos na base de ciclos de gradação normal.	Preenchimento de pequenos canais.
Gh	8m 7pts	Conglomerados clasto-suportados como moda de grânulos a seixos, pobremente selecionados, clastos sub-arredondados a sub-angulosos. Organizados em sets de estratificação plano-paralela com ou sem gradação normal, de 0,3 a 1,5 m de espessura.	Formas de leito longitudinais, depósitos residuais (lags)
Gm	3,75m 9pts	Conglomerados clasto-suportado, maciço, com moda em grânulos a seixos, clastos sub-arredondados a arredondados, moderadamente selecionados. Dispostos em camadas tabulares com 10 a 50 cm de espessura, na maioria das vezes na base de ciclos de gradação normal.	Fluxo de detritos
St	73m 15pts	Arenitos finos a conglomeráticos, bem a moderadamente selecionados, dispostos em sets de estratificação cruzada acanalada com 0,1 a 1m de espessura, com gradação normal.	Dunas 3D, cristas sinuosas ou linguóides
Sl	13,8m 7pts	Arenitos finos a conglomeráticos, bem a moderadamente selecionados, dispostos em sets de estratificação cruzada de baixo ângulo com ou sem gradação normal, de 0,5 a 3,5m de espessura.	Preenchimentos de suaves depressões (scourfills), dunas atenuadas, antidunas
Sh	12,5m 5pts	Arenitos finos a conglomeráticos, bem selecionados, dispostos em sets de estratificação plano paralela de 0,3 a 2m de espessura, com gradação normal.	Formas de leito plano (regime de fluxo superior/crítico)
Sm	25m 4pts	Arenitos finos a grossos, bem selecionados, dispostos em camadas com gradação normal ou sem organização interna, de 1,5 até 3,5 m de espessura.	Depósitos de fluxos hiperconcentrados, fluidizações ou intensa bioturbação
Sr	20m 1pt	Arenito muito finos com ripples de corrente, disposto em camada tabular de 20 cm de espessura com gradação normal.	Marcas onduladas (regime de fluxo inferior)
Fl	7,3m 4pts	Pelitos de colocação marrom e cinza escuro, com laminação plano-paralela, dispostos em camadas tabulares de menos de 10cm até 1,5 m de espessura.	Decantação de partículas em suspensão
Fr	2,3m 1pt	Siltitos marrons com marcas onduladas de pequeno porte, dispostos em camadas tabulares de 0,4 a 1,5 m de espessura.	Marcas onduladas (regime de fluxo inferior)
Flc	3m 1pt	Folhelhos cinzentos com laminação plano-paralela, ricos em M.O., com restos vegetais dispostos em camadas tabulares com 5 a 30cm de espessura.	Decantação de partículas em suspensão ricas em M.O
St (eólico)	72m 1pt	Arenitos finos a médios bem a muito bem selecionado, grãos arredondados e com esfericidade alta, dispostos em sets de estratificação cruzada acanalada de grande porte, com 1 a 4m de espessura, compostos por depósitos de fluxo de grão e por laminações de marcas onduladas eólicas.	Dunas eólicas
Sl (eólico)	5m 1pt	Arenitos finos, muito bem selecionados, disposto em sets de estratificação cruzada de baixo ângulo com espessuras de 40 cm até 4,5 m. Os estratos cruzados são compostos por laminações de marcas onduladas eólicas.	Lençóis de areia eólicos
Sh (eólico)	2m 1pt	Arenitos finos muito bem selecionados, dispostos em camadas tabulares de estratificação plano-paralela de 30 a 50 cm de espessura.	Depósitos de interdunas

6 RESULTADOS

6.1 CARACTERIZAÇÃO DAS ESTRUTURAS MICROBIANAS

Neste tópico serão apontados as localizações dos afloramentos que apresentaram evidências microbianas, discutindo-se quais as estruturas descritas e seus significados. Os pacotes em questão são interpretados pela literatura como depósitos eólicos de interdunas/lençol de areia, como discutido no tópico 4.2.1. Além das estruturas discutidas neste tópico, figuras complementares são apresentadas no Apêndice B.

Conforme foi relatado no tópico Materiais e Métodos, seis afloramentos foram visitados, porém os de número 1, 2, 5 e 6 apresentaram-se estéreis quanto a presença de MISS, sendo desta forma discutidos somente os afloramentos 3 e 4. Tais afloramentos são indicados no perfil de Magnavita *et al.* (2005, Figura 20).

As estruturas macroscópicas serão aqui classificadas de acordo com a “sistemática” proposta por Schieber (2004; estruturas de destruição de esteira, decaimento, metabolismo e crescimento; *vide* tópico 3.2.2), concebidas neste trabalho como grupos, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Grupos “sistemáticos” e estruturas microbianas encontradas em seus respectivos afloramentos

Afloramento	Grupo	Estrutura Microbiana
3	Crescimento, destruição, decaimento	Aglomerados domais, pináculos, icnitos associados à esteira, lâmina de areia esfoliada, pele de elefante, marcas de rugas.
4	Crescimento, destruição	Impressões, margens de lama ondulada, crenulações e biolaminações.

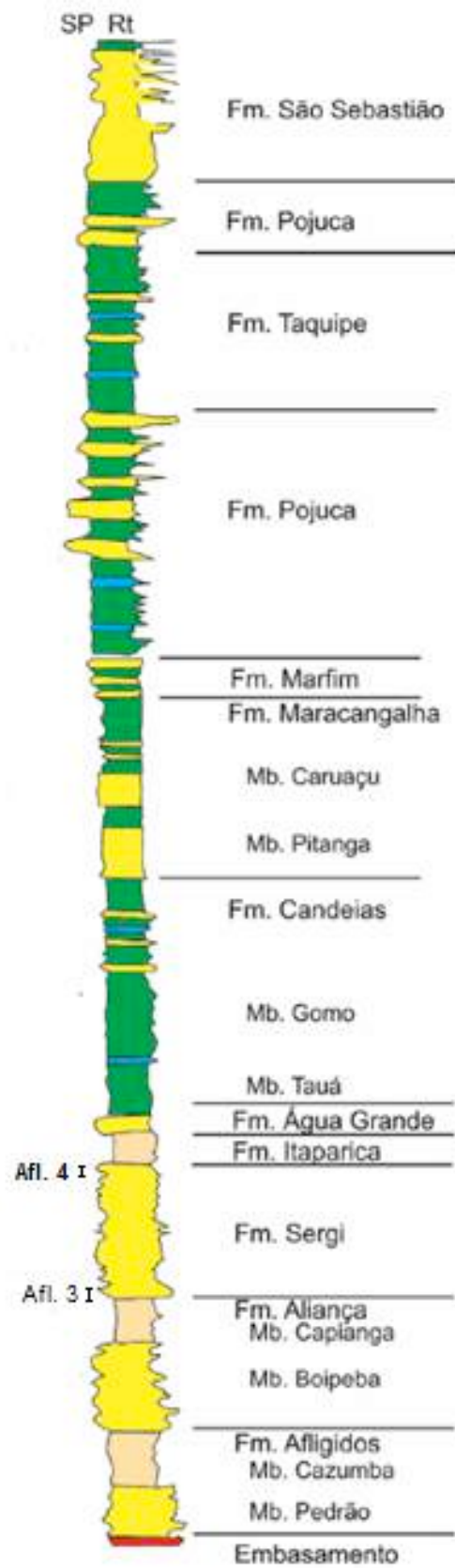


Figura 20: Perfil geofísico completo da bacia do Recôncavo mostrando a posição dos afloramentos nos quais foram identificados estruturas microbianas (Modificado de Magnavita *et al.*, 2005)

6.1.1 Afloramento 3

Localização. – Rodovia BR-101 (cruzamento com a BR 324 – Alagoinhas), km 143,3.

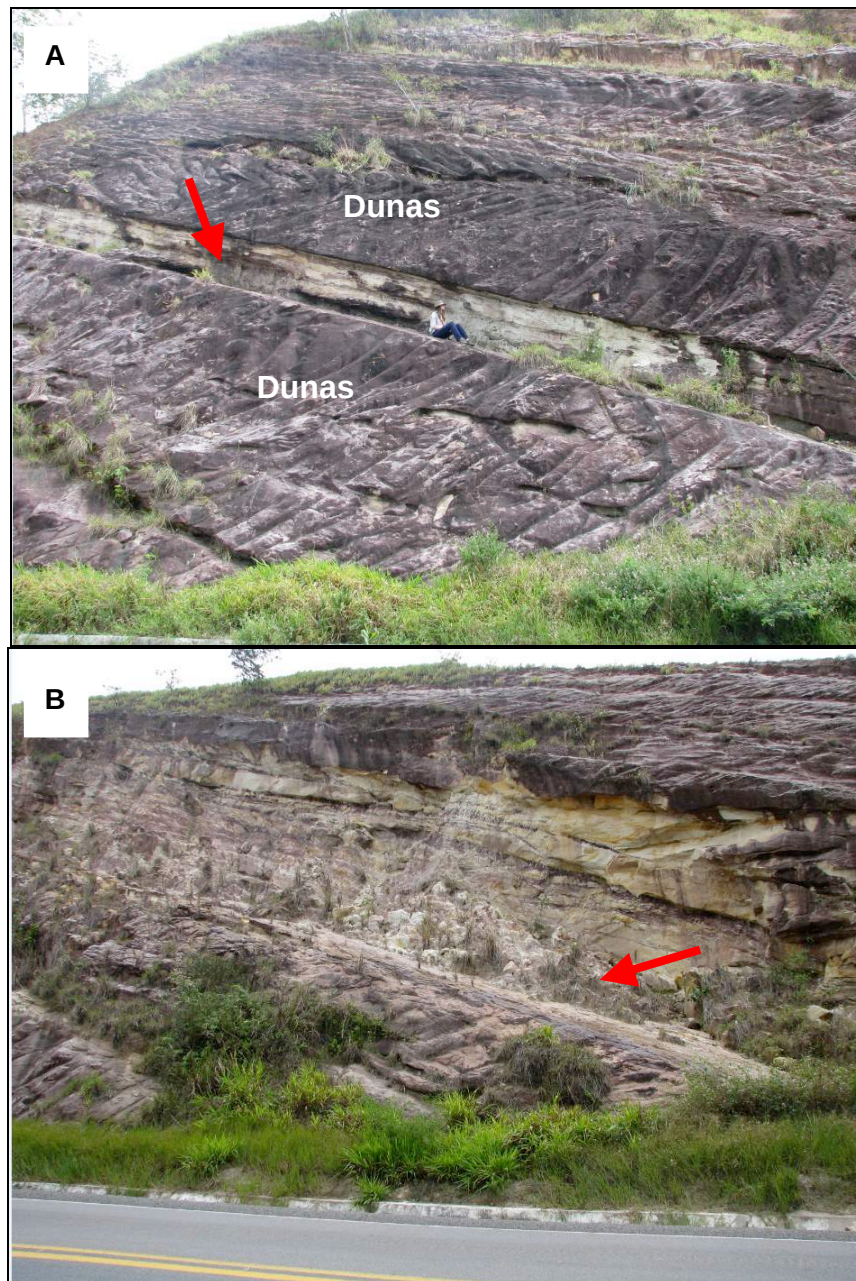


Figura 21: A e B pertencentes ao afloramento 3, Sendo composto por pacotes eólicos da Formação Sergi. Observa-se um acamamento plano paralelo entre estratificações cruzadas de grande porte. Setas indicam interdunas ou lençóis de areia, onde foram realizadas coletas de MISS.

Descrição do afloramento. – Este afloramento é equivalente ao ponto 3 de Magnavita *et al.* (2005) e ao ponto BA-8 de Torres Ribeiro (2002). Utilizando-se dos dados do último autor, este afloramento é constituído pelas fácies Sm, St₁, St₂, Sr, Al, Ac. As MISS encontram-se no elemento arquitetural Eid (interdunas) de Torres Ribeiro (2002), o qual é caracterizado por geometria de camada tabulares, espessura centimétrica a decimétrica, com largura hectométrica a quilométrica, sendo este elemento constituído pela fácies Al. O intervalo estratigráfico com a indicação de MISS pode ser consultado na Figura 22 e o perfil completo no Apêndice E.

Ocorrência de MISS. – Seguido nomes atribuídos pela literatura, as estruturas de origem microbiana encontradas nesse afloramento foram: gretas de ressecamento entre aglomerados domais (*domal buildups*; Figura 23), pináculos (*pinnacles*; BOUOUGRI *et al.*, 2007. Figura 24), lâminas de areia esfoliada (*exfoliating sand laminae*; Figura 26), pele de elefante (*elephant skin*; RUNNEGAR e FEDONKIN, 1992. Figura 27), marcas de rugas (*wrinkle marks*; WALCOTT, 1916; HANTZSCHEL e REINECK, 1968. Figura 28). Além das estruturas relatadas, este afloramento apresentou pegadas de dinossauros (icnitos) relacionadas a elas (Figura 25).

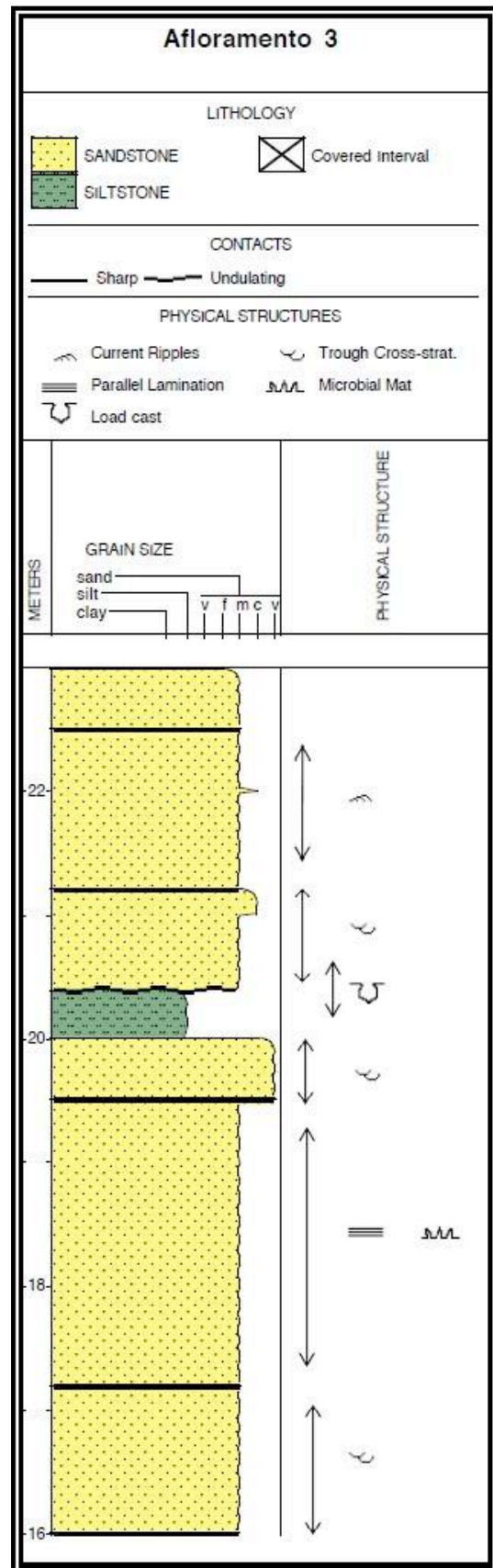


Figura 22: Intervalo estratigráfico do afloramento 3 com a indicação da ocorrência de MISS. Modificado de Torres Ribeiro (2002).

ESTRUTURA DE CRESCIMENTO / DECAIMENTO E DESTRUIÇÃO
Aglomerados domais (domal buildups)
(Figura 23; Apêndice A, figuras A1A e A1B)

São estruturas também conhecidas como estromatólitos de areia (BOTTJER e HAGADORN, 2007). A ideia de sua gênese é o desenvolvimento local de biofilme, o qual é acrescido verticalmente por processos de aglutinamento (*binding*) de grãos de quartzo (BOTTJER e HAGADORN, 2007). A estrutura em questão não apresentou qualquer laminação, o que o diferencia dos estromatólitos carbonáticos. Em outra mão - explicação esta mais aceita para este caso - é a de de Schieber (2004) e Noffke *et al.* (1996), os quais descrevem-na como uma estrutura ligada ao decaimento da esteira com consequente formação de gases que ficam retidos abaixo da esteira (e.g. bioestabilização; NOFFKE *et al.*, 2001), concebendo a feição domal, e suas gretas associadas à destruição física por desidratação. Sua localização é esperada na região marginal lacustre, devido as gretas de ressecamento. Para aglomerados domais, foi realizada análise em MEV para buscar qualquer evidência microbiana (fibras orgânicas, filamentos bacterianos), porém nada foi encontrado. A atribuição de origem bacteriana para essa feição advém da comparação morfológica com a literatura, como pode ser observado na Figura A1A, do apêndice A.



Figura 23: Estruturas domais envolvidas por gretas de ressecamento. Estruturas domais estão ligadas ao crescimento vertical ou decaimento da esteira com consequente formação de gases (?) e gretas resultante de destruição física por desidratação (vista em planta).

ESTRUTURA DE CRESCIMENTO *Pináculos (Pinnacles)* (Figura 24; Apêndice A, figuras A1E e A1F)

Microestromatólitos (*microstromatolite*) e microdomos (*microdomes*) também podem ser usados para estruturas conhecidas como pináculos. Segundo Gerdes (2007), filamentos de cianobactérias são capazes de mudar suas direções de crescimento em uma posição vertical, alguns centímetros acima da esteira. Isto resulta em tufos, que quando estabilizados pelo EPS e aglutinados por sedimento, se transformam em pináculos rígidos. A imagem em MEV desta estrutura também apresentou o que possivelmente são considerados bactérias filamentosas e esféricas preservadas (Figura 36, tópico 5.2.2) A sua associação com gênese

bacteriana também provém de analogia com a literatura, conforme observa-se na Figura A1C, do Apêndice A.



Figura 24: Pináculos (setas em vermelho), estrutura ligada ao crescimento de esteira.

Ignitos associado à esteiras domais (Figura 25; Apêndice B, figura B3)

Neste afloramento, pegadas de dinossauros são visíveis e associadas a estruturas em domos. Tal associação pode estar ligada na preservação do icnofóssil, pois o biofilme ou a esteira fornece maior coesão ao substrato, prevenindo-o desta forma contra a erosão. O sedimento é estabilizado pela cimentação precoce assim como pelo aprisionamento dos grãos sobre as pegadas (Carvalho *et al.*, 2010).

Outros trabalhos, como o de Callow e Brasier (2009) e de Carmona *et. al* (2012), também discutem esta questão preservacional.



Figura 25: Pegada de dinossauro associada às estruturas microbianas.

ESTRUTURA DE DESTRUIÇÃO
Lâmina de areia esfoliada (exfoliating sand laminae)
(Figura 26; Apêndice A, figuras A2I e A2J)

São sucessivas folhas de arenito com algumas regiões lascadas. A falta de qualquer lama separando as folhas de areia e qualquer marca de “pele de elefante” sugere que cada lâmina foi resistente a erosão, processo de carga e recobrimento areia devido a presença de um biofilme acima de cada camada (BOTTJER e

HAGADORN, 2007). A formação da esteira pode estar ligada ao processo biológico de bioestabilização do sedimento (e.g., Noffke *et al.*, 2001a)



Figura 26: Lâminas de areia esfoliada, camada bioestabilizada parcialmente erodida. Estrutura de destruição física por erosão.

ESTRUTURA DE CRESCIMENTO
Pele de elefante (elephant skin)
(Figura 27; Apêndice A, figuras A1C e A1D)

Estruturas que apresentam padrões reticulados em esteiras são chamadas de *old elephant skin texture*, nome atribuído Runnegar e Fedonkin em 1992 ou simplesmente *elephant skin*, atribuído por Gehling em 1999 (*apud* Porada e Bouougre, 2007). Segundo descrição de Bottjer e Hagadorn (2007), sua feição é formada quando um biofilme separa dois leitos arenosos finos, sendo estes

submetidos a processo de carga, levando a uma estrutura rugosa com depressões côncavas e cristas convexas. Para Gerdes *etal.* (2000), alguns tipos de bactérias filamentosas, como as atuais *Microcoleus chthonoplastes* e *Lyngbya aestuarii*, respondem as mudanças fóticas do ambiente, orientando os filamentos ou movendo suas células criando pequenos acúmulos na superfície. Estes acúmulos formam um padrão reticulado na superfície com polígonos de menos 0,5 cm (Porada e Bouougre, 2007). Vale considerar que pele de elefante é um “tipo” de *wrinkle structure*, sendo diferenciado pelo seu padrão reticulado. Em MEV, esta estrutura apresentou filamentos fúngicos oriundos de contaminação. Nenhuma evidência bacteriana foi detectada.

ESTRUTURA DE CRESCIMENTO *Marcas de ruga (wrinkle marks)* (Figuras 28; Apêndice A, figuras A2G e A2H)

Também conhecido como *Hunzelmarkn*, são superfícies de arenito ou arenitos lamosos, tanto a camada de topo como a camada de base apresentando um padrão reticulado com pequenas cristas levantadas. Sua gênese pode ser reflexo da topografia original do substrato ou pode ser interpretada como um destacamento parcial da esteira no substrato devido a correntes de tração (HAGADORN e BOTTJER, 1999; BOTTJER e HAGADORN, 2007). A feição é semelhante a pele de elefante, porém apresenta cristas maiores e mais empinadas. Marcas de rugas ainda é um assunto não unificado, visto que dentro dessa classe de estruturas encontram-se diferentes acamamentos enrugados com diversos nomes interpretados por diferentes autores. Gerdes (2007) agrupa este tipo de estrutura no grupo de crescimento de esteira.



Figura 27: Pele de elefante, estrutura formada por crescimento de esteira.



Figura 28: Marcas de rugas, assim como pele de elefante, é uma feitura de crescimento de esteira.

6.1.2 Afloramento 4

Localização. – Rodovia BR-101 (cruzamento com a BR 324 – Alagoinhas), km 147,4 (afloramento BA-3 de TORRES RIBEIRO, 2002).



Figura 29: Visão geral do afloramento 4, pacotes eólicos da Formação Sergi.

Descrição do afloramento. – Este afloramento é equivalente ao ponto BA-3 de Torres Ribeiro (2002). Utilizando-se dos dados do último autor, este afloramento é constituído pelas fácies Sr, Al, Ac, Fm. As MISS encontram-se no elemento arquitetural Eid (interdunas) de Torres Ribeiro (2002), o qual é caracterizado por geometria de camada tabulares, espessura centimétrica a decimétrica, com largura hectométrica a quilométrica, sendo este elemento constituído pela fácies Al. O

intervalo estratigráfico com a indicação de MISS pode ser consultado na Figura 31 e o perfil completo no Apêndice E.

Ocorrência de MISS. – Foram identificadas estruturas senoidais (*imprintings*, e.g. NOFFKE, 2009) e fragmentos de esteira com margens onduladas ou lama enrespada (*mud curled*s), crenulações e biolaminação (e.g., HORODYSKI, 1982).

CRESCIMENTO DE ESTEIRA
Impressões senoidais (imprintings)
(Figura 30)

Imprinting é uma classificação tafonômica criada por Noffke (2001), em que acamamentos ondulados são recobertos por esteiras, e com o processo de erosão, somente uma das faces se preserva (e.g., tópico 3.2.1).



Figura 30: Impressões em forma senoidal. Esteiras que recobriram micro-ondulações originadas do vento, sendo apenas uma de suas faces preservadas. Relacionada ao crescimento de esteira.

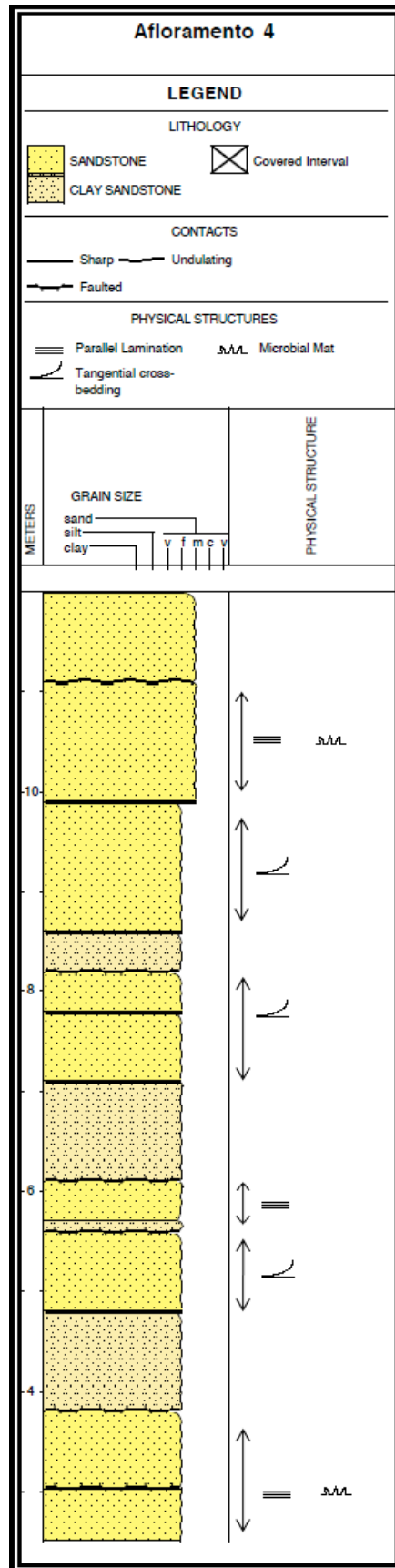


Figura 31: Intervalo estratigráfico do afloramento 4 indicando a ocorrência de MISS. Modificado de Torres Ribeiro (2002).

DESTRUIÇÃO/CRESCIMENTO
Fragmentos de esteira encrespada (mud curled)
(Figuras 32A e B, 33A e B; Apêndice B, figura B1)

Lamas encrespadas são consideradas estruturas sedimentares primárias, geradas por fatores físicos de dessecação. Desta forma, entra-se em discussão a influência de organismos microbianos como principais agentes na formação desse tipo de estrutura, visto que *mud curls* foram descritas na Formação Sergi, associados a biolaminações consideradas aqui de origem microbiana. Além das biolaminações crenuladas, sobre a mesma unidade observam-se biofilmes recentes com margens onduladas conforme mostrado na Figura 32B. Segundo Eriksson *et al.* (2007), *mud curls* ocorre quando a dessecação da esteira demonstra suficiente elasticidade havendo ondulação ou involução nas margens quebradas. A esteira microbiana proporciona desta forma uma coesão que enrola a esteira de uma forma que não aconteceria se houvesse somente lama na superfície (ERIKSSON *et al.*, 2000). Além disso, segundo Eriksson (1998) fragmentos, que são destacados da esteira e se ressedimenta em outro local, são coesivos o suficiente para manter juntos os grãos durante o transporte até a deposição. Estrutura semelhante foi encontrada e interpretada por Horodyski (1982) como impressão de fragmentos de esteira microbiana, comparando-a com análogos recentes (Figura 31B). Além dos fragmentos de esteira, observa-se uma série de laminações crenuladas e onduladas, o que pode ser atribuído as características genuínas da esteira ou formadas perante estresses ambientais. Estas feições encontram-se inseridas na fácies Sm de Torres Ribeiro (2002).

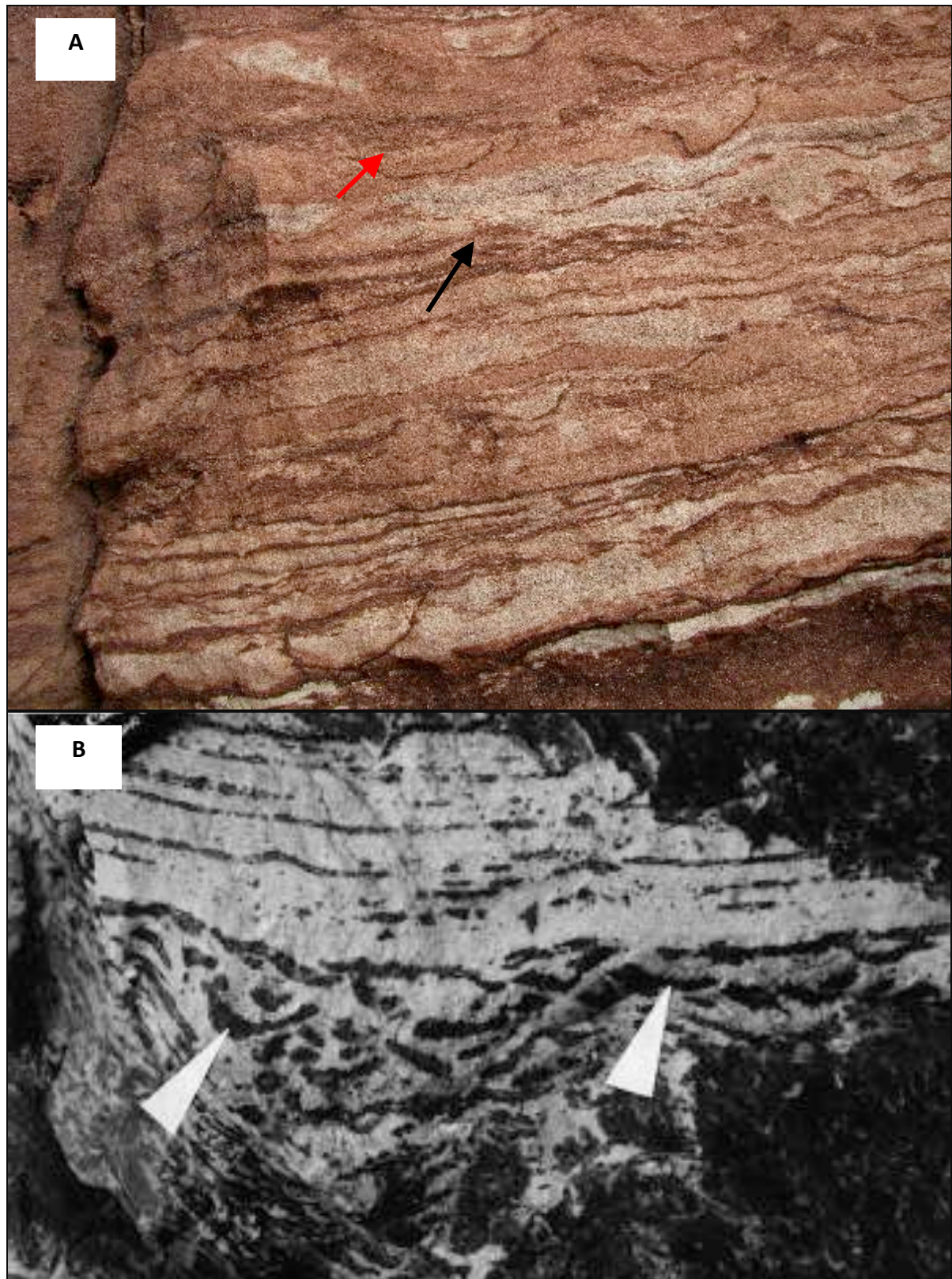


Figura 32: A) Fragmentos de areia encrespada (*mud curled*; seta vermelha) associada a biolaminações (seta preta). Vista transversal. B) Manchas de limonita como fragmentos de esteira da Formação Revett descrita por Horodyski (1982). Esta última apresenta estruturas comparativas àquelas encontradas na Formação Sergi..

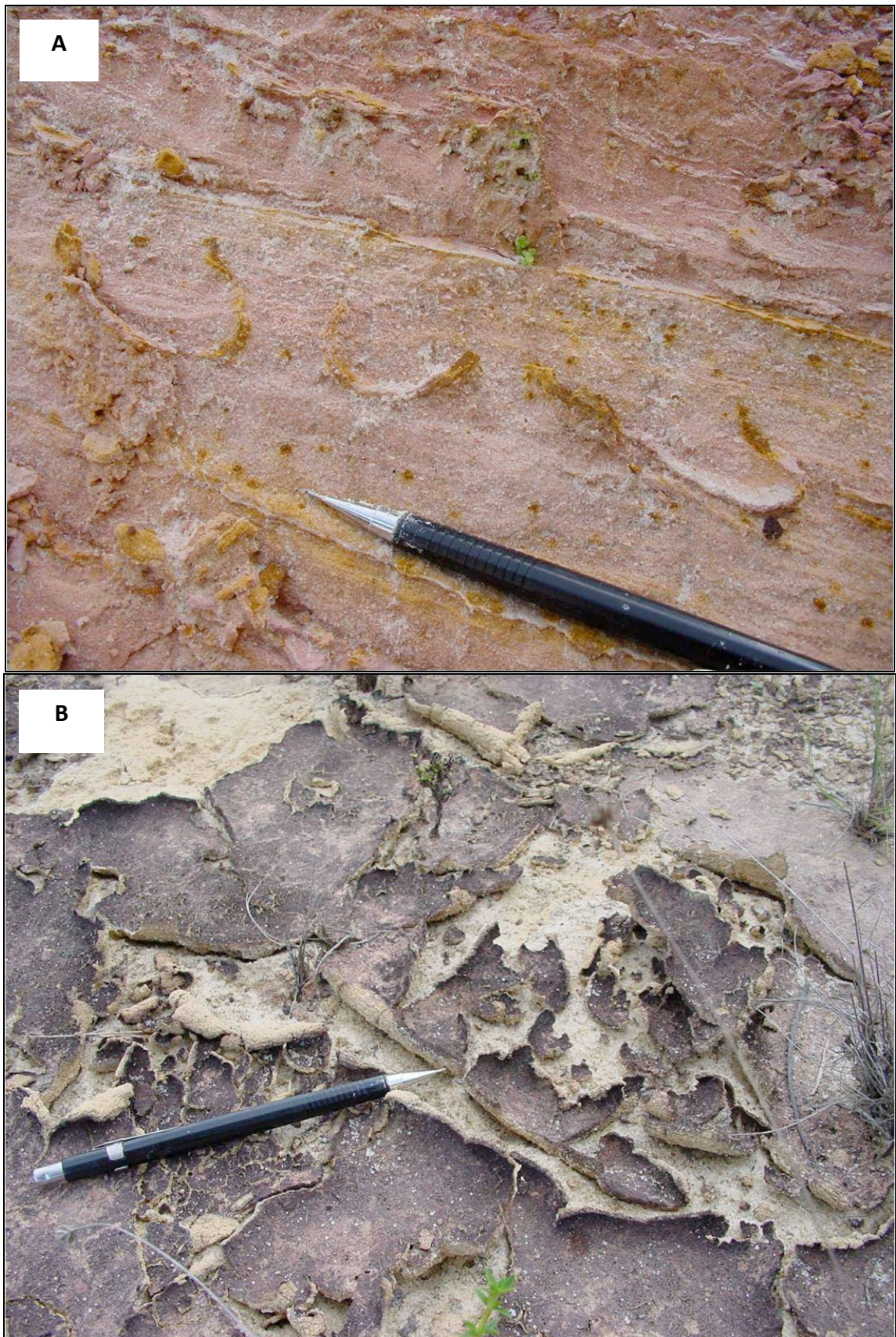


Figura 33: Lama encrespada (*mud curled*) em registro geológico (A) e seu análogo recente (B). A primeira se encontra em estratos da Formação Sergi, e a segunda em sedimento sobre a mesma.

6.2 CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA

6.2.1 Petrografia

As lâminas petrográficas que apresentaram algum fator como evidência microbiana serão aqui discutidas. Nesta seção será utilizado e inferido, em alguns casos, a classificação tafonômica de Noffke *et al.* (2001a).

6.2.1.1 Lâmina SER-02

Localização. – Afloramento 3.

Descrição. – Segundo McBride (1963) esta lâmina é composta por quartzo arenito, de bem a mal selecionado, com granulometria variando entre areia muito fina a areia grossa. Os grãos apresentam-se sub-arredondados, sendo a mineralogia composta predominantemente por quartzo e raras muscovitas além de cimento de óxido/hidróxido de ferro e silicatos.

Interpretação. – É possível observar três níveis granulométricos diferenciados. O nível central apresenta uma granulometria muito fina e bastante oxidada. A presença de esteira ou biofilme nesta amostra poderia estar relacionada ao armadilhamento de grãos de areia muito finos e intensa oxidação na região representada pelos pontilhados (Figura 34).

6.2.1.2 Lâmina SER-04

Localização. – Afloramento 3.

Descrição. – Quartzo arenito (MCBRIDE, 1963), bem selecionado, com granulometria variando entre areia muito fina a areia média. Os grãos apresentam-se sub-arredondados, sendo a mineralogia composta predominantemente por

quartzo e raras muscovitas além de cimento de óxido/hidróxido de ferro, silício e alumínio.

Interpretação. – Segundo Gerdes (2007), um dos efeitos de agarramento e aglutinamento (*trapping and binding*) é a seleção de minerais pesados por superfícies de esteiras microbianas. A Figura 35A evidencia laminações dadas por minerais pesados (predominantemente de zircônio e alumínio) e óxidos de ferro da Formação Sergi, seguida pelas figuras 35B e C, usadas como parâmetro de comparação de Gerdes (2007). Esta lâmina foi também analisada em microsonda para determinação de tais minerais, os quais eram compostos basicamente de óxido de titânio e óxido de ferro.

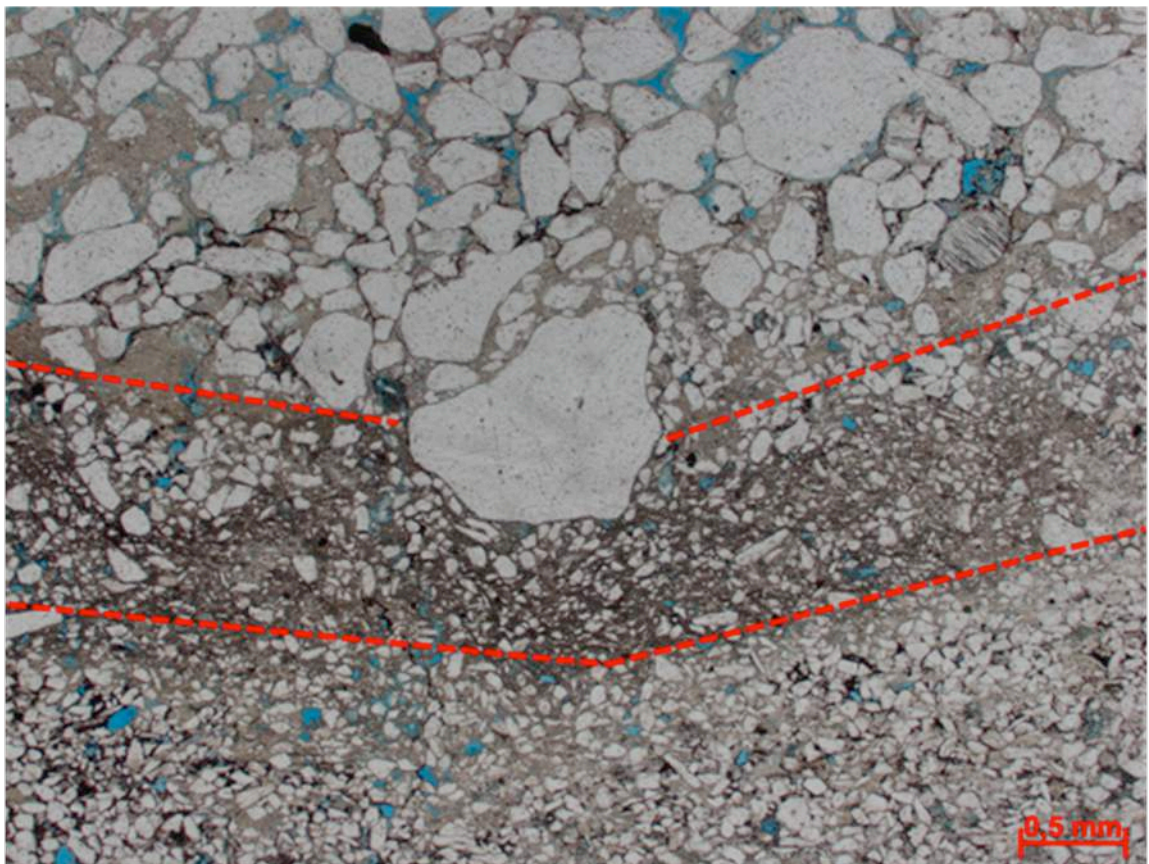


Figura 34: Lâmina SER-02. Aparente trapeamento de areia muito fina (representados por pontilhados vermelhos) por esteiras ou biofilmes microbianos (?). Notar o cimento bastante oxidado. Nicóis paralelos.

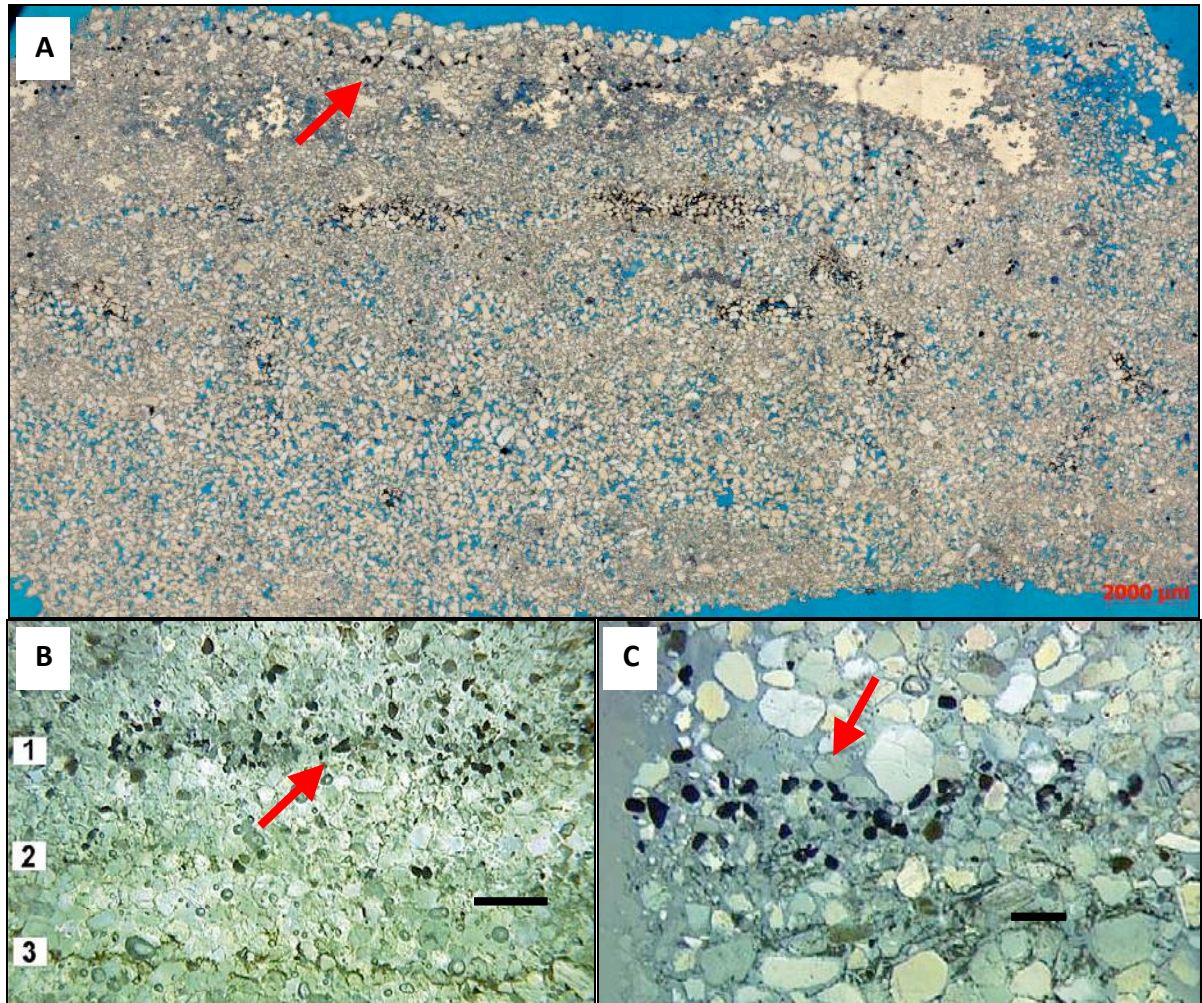


Figura 35: A) Lâmina SER-04. Foto panorâmica com fraca evidência de esteiras microbiana por laminações de minerais pesados e óxidos de ferro. Nicóis Paralelos; B e C) Laminações de minerais pesados e óxidos de ferro em planícies de maré. B) Laminação 1 composta por minerais pesados e Laminações 2 e 3 por óxidos de ferro. Escala 1mm; C) Laminação microbiana com grãos de minerais pesados em planície de maré siliciclástica. Escala 200µm. B e C são fotos apresentadas a fim de comparação, retiradas de Gerdes (2007).

6.2.1.3 Lâmina SER-06

Localização. – Afloramento 4

Descrição. – Quartzito arenito (MCBRIDE, 1963), moderadamente selecionado, com granulometria variando entre silte e areia média. Os grãos apresentam-se subarredondados, sendo a mineralogia composta predominantemente por quartzo e raras muscovitas além da cimentação por óxido/hidróxido de ferro, silício e alumínio.

Interpretação. – É evidente um filme argiloso central, o qual apresenta grãos maiores aglutinados em seu interior. Esta feição pode ser atribuída ao mecanismo de agarramento e aglutinamento (*trapping and binding*) por esteiras (Figura 36). Além dos grãos de tamanhos variados nas regiões argilosas, é visível uma intensa oxidação nas mesmas, também interpretadas como produto da atividade bacteriana. Na análise de matéria orgânica por fluorescência, nada foi detectado, indicando que a matéria orgânica microbiana não foi preservada.

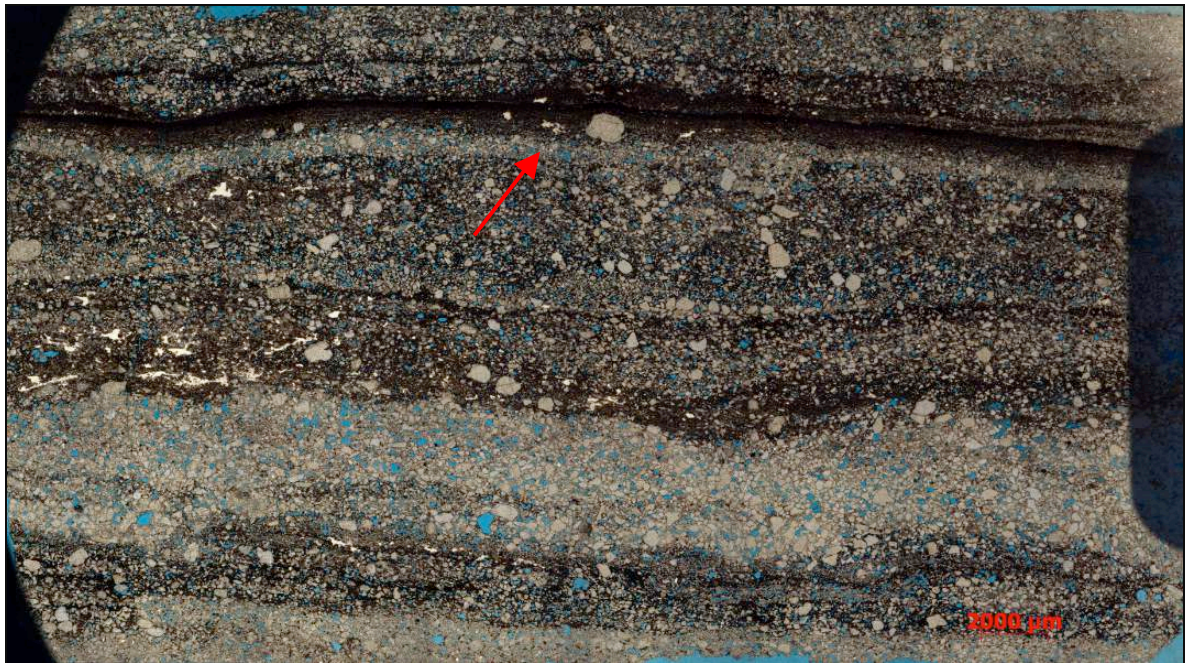


Figura 36: Lâmina SER-06 - Filme argiloso com agarramento de grãos (seta vermelha, MISS?). Nicóis Paralelos.

6.2.2 Microscópio Eletrônico de Varredura

A análise em MEV foi realizada para as amostras que apresentaram estruturas atribuídas pela literatura como de origem microbiana (*pele de elefante, domos e pináculos*), para identificação de qualquer bioassinatura bacteriana em grãos internos. Contudo, somente a estrutura pináculos encontrada no afloramento 3, apresentou vestígios bacterianos (Figura 37). Aglomerados domais não apresentou

qualquer vestígio, assim como pele de elefante que somente apresentou-se contaminada por fungos recentes.

Pináculos

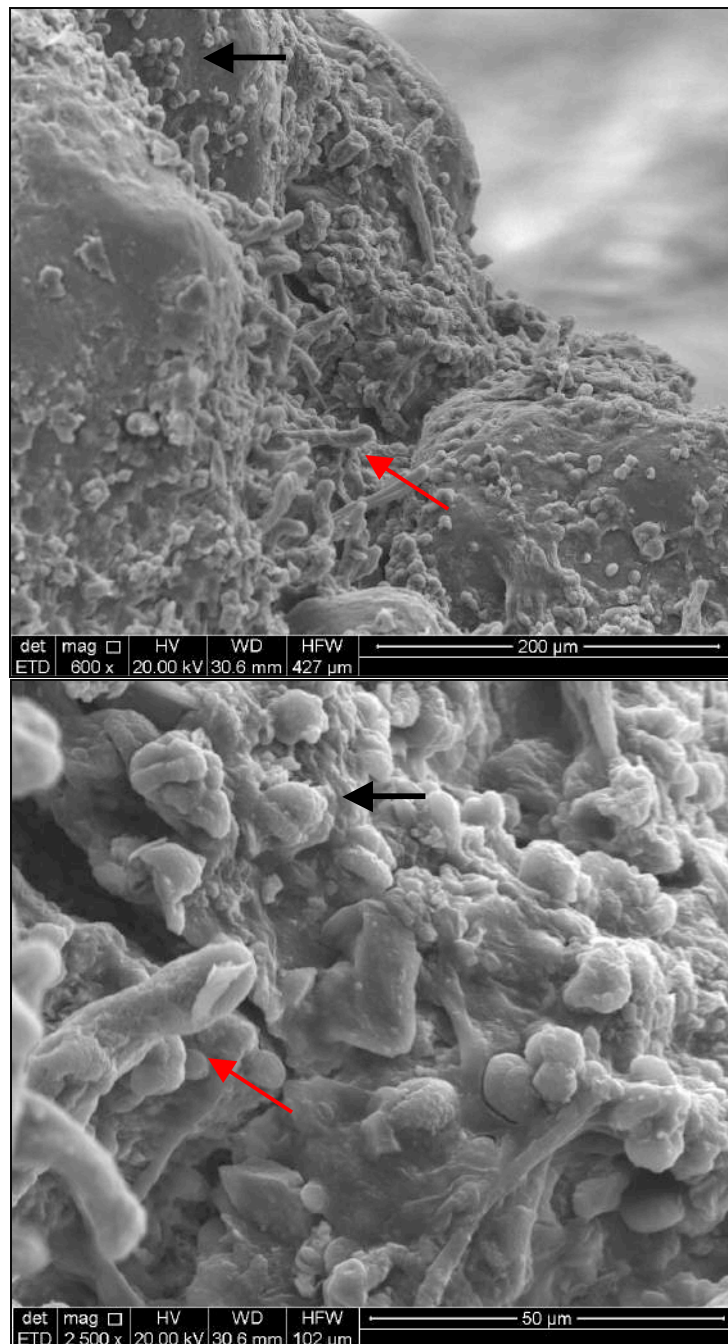


Figura 37: Possível fossilização de bactérias esféricas (seta preta) e filamentosas (seta vermelha) em estruturas pináculos. Imagem em MEV.

6.3 CONSIDERAÇÕES PALEOAMBIENTAIS

Para Schieber (1998), as estruturas que não apresentam vestígios de microfósseis não podem ser consideradas como produto organossedimentar. Apesar disso, há uma gama de características que podem ser atribuídos a ação de biofilmes e esteiras microbianas quando comparadas a análogos recentes. Ainda para o autor, as diferentes estruturas que podem ser encontradas em diversos estratos ou afloramentos advém de cenários deposicionais diferentes, como profundidade da coluna de água e velocidade de sedimentação.

A importância em descrever e entender as estruturas sedimentares microbianas advém da sua aplicação nos estudos faciológicos e sedimentológicos. Segundo Noffke *et al.* (2001b) estruturas sedimentares microbianas podem ser usadas para reconstrução de fácies em pequena escala, inferindo condições paleoclimáticas, hidrológicas e sedimentológicas.

Trabalhos com estudos de MISS em sistemas eólicos foram procurados e somente o trabalho de Eriksson *et al.* (2000) foi encontrado. Nele é feita a descrição de estruturas sedimentares induzidas por microbiais em interdunas úmidas fossilizadas que datam 1.8 Ga. Porém, as estruturas por ele encontradas diferem das observadas na Formação Sergi, sendo descrita somente a *muddy roll-up*.

Os afloramentos discutidos foram os que apresentaram estruturas microbianas devido à uma série de fatores deposicionais favoráveis ao seu desenvolvimento. Entre elas, ambientes eólicos desérticos, onde são formados lagos efêmeros em interdunas e lençóis de areia, são propícios ao desenvolvimento de filmes bacterianos, devido a umidade, ambiente calmo e luz solar abundante.

MISS é mais bem identificada em estruturas preservadas em planta. A interpretação microscópica ainda é muito relativa, visto que filamentos bacterianos e matéria orgânica são raramente preservados.

As pegadas de dinossauros associadas as estruturas microbianas podem abrir uma outra questão para este estudo, estando sua preservação ligada ou não as esteiras microbianas. Trabalhos como Carmona *et al.* (2012) relatam pegadas de pássaros preservadas em função de esteiras microbianas associadas em planícies de maré do Neógeno, na Argentina.

6.4 MISS NO BRASIL

Estruturas microbianas em rochas siliciclásticas tem tido um foco crescente nas últimas décadas em várias regiões do Mundo, sendo evidente pelos inúmeros trabalhos internacionais já publicados, apesar deste tipo de estudo ainda carecer de mais pesquisas para melhor entendimento em registro geológico,

No Brasil poucos foram os trabalhos constatados sobre o assunto, além disso são apenas resumos apresentados em congressos com reconhecimento de estruturas microbianas em unidades litoestratigráficas diversas, sem detalhamento aprofundado. Entre eles destacam-se o trabalho de Borghi e Paula-Freitas (2010), Netto *et al.* (2010), Avalone *et al.* (2012) e Carvalho *et al.* (2010). O primeiro aborda cinco unidades estratigráficas em que foram reconhecidas estruturas microbianas induzidas (MISS); O trabalho de Netto *et al.* (2010) apresenta feições como marcas de rugas em depósitos do Grupo Itararé, bacia do Paraná, sobre o qual também não foram encontrados trabalhos mais descritivos. Avalone *et al.*, apresenta em resumo um detalhamento das estruturas ocorrentes na Formação Pimenteiras. Por fim,

Carvalho *et al.*(2010) associa estruturas microbianas a pegadas de dinossauros na Formação Sousa, bacia de Sousa.

6.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho procura demonstrar a importância do estudo e identificação de estruturas sedimentares induzidas por microbiais em âmbito estratigráfico, paleoambiental e sedimentológico.

Considerações fora do objetivo do trabalho, tomadas durante a realização do mesmo, podem também ser aqui pontuadas:

- Considerando que os trabalhos consultados sobre a Formação Sergi são predominantemente voltados a geologia do petróleo, esteiras microbianas em rochas muito porosas como as do sistema eólico da Formação Sergi, podem constituir uma barreira de óleo e água.
- Tais estruturas não apresentam um sistema nomenclatural – parataxonômico, tal como os estromatólitos e icnofósseis – muitas vezes recorrendo-se a aspectos descritivos de estruturas sedimentares primárias físicas associadas ou mesmo a critérios genéticos para sua designação.
- Para uma melhor identificação e interpretação de MISS, há a necessidade de levar em consideração o contexto ambiental onde suas estruturas são localizadas, além é claro, da análise das amostras em petrografia e MEV.
- MISS por ser uma interface muito nova da geologia e biologia, ainda carece de muitas pesquisas voltadas para o registro geológico. Uma estrutura específica, numa rocha de milhões ou bilhões de anos, pode dizer

muito sobre o paleoambiente daquele local, porém, muitas das estruturas descritas não possuem vestígio orgânico, ou mesmo um análogo recente, o que dificulta sentenciá-las como de origem microbial ou apenas uma estrutura primária gerada por processos físicos.

7 CONCLUSÃO

A maior parte dos trabalhos que tratam de descrição de MISS são de ambientes deposicionais marinhos. Logo, este trabalho é importante como o primeiro a descrever as feições pele de elefantes, lama encrespada, pináculos, marcas de rugas, aglomerados domais, com suas gêneses num cenário paleoambiental completamente diferente daquelas descritos na literatura: ambiente eólico de interdunas ou lençol de areia. Além disso, cada estrutura microbiana, por suas diferentes morfologias, leva a interpretação de que foram formadas sob regimes hidrodinâmicos e taxas de sedimentação diferenciados associados a diferentes grupos microbianos.

Um tópico relevante que este trabalho abordou e aqui deve ser salientado são a lamas encrespadas, os quais ainda são descritas como estruturas primárias de origem puramente por fatores físicos do meio ambiente. O presente trabalho mostra que, na Formação Sergi, estas estruturas estão associadas a biofilmes/esteiras, o que a partir daqui deve-se levar em consideração se há ou não presença microbiana em estudos sedimentológicos onde estas estruturas forem identificadas.

Outro assunto abordado e ainda a ser melhor discutido é a questão da associação de icnofósseis e estruturas microbianas na unidade. Há um crescente número de trabalhos que relatam achados semelhantes em várias regiões do Planeta, sendo discutido a influência dos biofilmes na preservação dos icnitos.

Por fim, para a Formação Sergi, a identificação de MISS implica na interpretação de que sistemas deposicionais eólicos de lençóis de areia ou interdunas foram colonizadas por cianobactérias sob ambiente úmido.

Referências bibliográficas

- ADEGAS, F.; SCHERER, C.M.S.; BORN, C. Arcabouço estratigráfico da Formação Sergi (Jurássico Superior) na Bacia de Almada, Bahia. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, pp. 2-19, 2012.
- AHLBRANDT, T.S.; FRYBERGER, G.D. Sedimentary features and significance of interdunes deposits. In: ETHRIDGE, F.G. e FLORES, R.M. *Recent and Ancient Nonmarine Depositional Environments*. 31. ed. Califórnia: Soc. Econ. Paleont. Miner., 1981, v.31, pp.293-314.
- AHLBRANDT, T.S.; FRYBERGER, G.D. Introduction to Eolian Deposits. In: SCHOLLE, P.A.; SPEARING, D. *Sandstone Depositional Environments*. 0.ed. Oklahoma: AAPG, 1982, v.31, n.1, pp.11-48.
- ALTERMANN, W.; CATUNEAU, O. *Atlas of microbial mat features preserved within the clastic rock record*. 0.ed. Amsterdam: Elsevier, 2007, v. 2, pp. 5-38, 2007.
- ANDERSON, R.S. The pattern of grainfall deposits in the lee of eolian dunes. *Sedimentology*, v.35, pp. 175-188, 1988.
- ANP – Agência Nacional do Petróleo. Disponível em: http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round4/atividades_exploratorias/cartas_secoes/index.htm, acesso em 22/01/2013
- AVALONE, M.C.K.; SANTOS, B.R.; BORGHI, L. Estruturas Sedimentares Induzidas por Organismos Microbianos (MISS) na Formação Pimenteira (Devoniano, bacia do Parnaíba). In: Reunião Anual Regional da Sociedade Brasileira de Paleontologia Núcleo RJ/ES. 2012. Rio de Janeiro. *Resumos...* Rio de Janeiro: UFRJ, 2012.
- BLACK, M. The algal sediments of Andros Island, Bahamas. *Philos Trans R Soc Lond*, v. 222, pp. 165-192, 1933.
- BONGIOLO, D.E.; SCHERER, C.M.S. Fácies architecture and heterogeneity of the fluvial–aeolian reservoirs of the Sergi formation (Upper Jurassic), Recôncavo Basin, NE Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, v.27, n.9, pp. 1885-1897, 2010.
- BORGHI, L.; PAULA-FREITAS, A.B.L. Microbial sedimentary structures in some distinct siliciclastic depositional systems of different ages from Brazil. In: SEPM Field Conference Microbial Mats in Sandy Deposits (Archean to Today), 2010, Denver. *Resumos...* Denver, SEPM Microbial Mat Conference. p.53.
- BORGHI, L.; AVALONE, M.C.K. Estruturas Sedimentares Microbianas Induzidas (MISS): Significado e Importância. In: ISMAR DE SOUZA CARVALHO; NARENDRA KUMAR SRIVASTAVA; OSCAR STROHSCHOEN JR.; CECÍLIA CUNHA LANA. *Paleontologia: Cenários de Vida*. Rio de Janeiro: Interciência, 2011, v. 3, pp. 19-26
- BOSE, S.; CHAFETZ, H.S. Morphology and distribution of MISS: a comparison between modern siliciclastic and carbonate settings. In: NOFFKE, N. CHAFETZ, H. *Microbial mats in siliciclastic depositional systems through time*. SEMP, 2012, v.101, pp.3-14.

- BOTTJER, D.; HAGADORN, J.W. 2007. Mat Features in Sandstone: Mat Growth Features. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, 2007, v.2, pp.53-71, 2007.
- BOUOUGRI, E.; GERDES, G.; PORADA, H. Discussion of Some Problems: Unusual Features and the Importance of Terminology. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, 2007, v.2, pp. 145-151.
- BRAGA, J.A.E. Estratigrafia, estrutura e acumulações de petróleo na Bacia do Recôncavo. In: Seminário sobre "Rifts" Intracontinentais, 1987, Rio de Janeiro. *Resumos...* Rio de Janeiro: Petrobrás, p.304, 1987.
- BROCK, T. Halophilic-blue-green algae. *Microbiology*, v. 107, pp. 109-111, 1976.
- BRUHN, C.H.L.; DE ROS, L.F. Formação Sergi: evolução de conceitos e tendências na geologia de reservatórios. Rio de Janeiro, *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.1, n.1, pp. 25-40, 1987.
- CAIXETA, J.M., BUENO, G.V., MAGNAVITA, L.P., FEIJÓ, F.J. Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Rio de Janeiro, *Boletim de Geociências da Petrobras*, v.,8, n.1, pp.163-172, 1994.
- CALLOW, R.H.T.; BRASIER, M. Remarkable preservation of microbial mats in Neoproterozoic siliciclastic settings: Implications for Ediacaran taphonomic models. *Earth Science Reviews*, v. 96, n.3, pp. 207-219, 2009.
- CANFIELD, D.E.; SØRENSEN, K.B.; OREN, A. Biogeochemistry of a Gypsum-Encrusted Microbial Ecosystem. *Geobiology*, v.2, pp.133-150, 2004.
- CARMONA, N.B.; PONCE, J.J.; WETZEL, A.; BOURNOD, C.N.; CUADRADO, D.G. Microbially induced sedimentary structures in Neogene tidal flats from Argentina: Paleoenvironmental, stratigraphic and taphonomic implications. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaecology*, v. 353, pp. 1-9, 2012.
- CARVALHO, I.S.; BORGHI, L.; LEONARDI, G. Microbial mat preservation of dinosaur tracks from the Sousa Basin (Lower Cretaceous, Brazil) In: International Sedimentological Congress, 2010, São Leopoldo. *Resumos...* São Leopoldo, v.18, p.28.
- COSTERTON, J.; STOODLEY, P. Microbial biofilms: protective niches in ancient and modern geomicrobiology. In: W.E KRUMBEIN, D.M. PATERSON AND G.A. ZAVARZIN. *Fossil and Recent Biofilms*. Dordrecht: Springer, 2003, pp. xv-xxi.
- CATUNEANU, O. 2007. Sequence Stratigraphic context of microbial mat features. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, 2007, v.2, pp. 276-283.
- CORRÊA, I.C.S. 2010. *Os desertos*. Departamento de Geodésia, UFRGS. Disponível em:

http://www.ufrgs.br/museudetopografia/Artigos/Os_Desertos.pdf. Acesso em: 13/12/2012.

- CPRM – Serviço Geológico Brasileiro. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/gis/carta_reconcavo.htm. Acesso em: 22/01/2013.
- DA ROSA, A.A.S.; GARCIA, A.J.V. Paleobiogeographic aspects of northeast Brazilian basins during Berriasian before the break up of Gondwana. *Cretaceous Research*, n.21, pp.221-239, 2000.
- DECHO, A.W. Microbial exopolymer secretions in ocean environments: their role(s) in food webs and marine processes. *Oceanography Marine Biology Annual Review*, v.28, pp.73–154, 1990.
- DECHO, A.W. Exopolymer microdomains as a structuring agent for heterogeneity within microbial biofilms. In: RIDING, R.E., AWRAMIK, S.M. *Microbial Sediments*. Berlin: Springer-Verlag, 2000, pp. 1–9.
- DE VRIND-DE JONG, E.W. e DE VRIND, J.P.M. Algal deposits of carbonates and silicates. In: BANFIELD, J.F. e NEALSON, K.H. *Geomicrobiology: Interactions Between Microbes and Minerals*. USA: Mineralogical Society of America, 1998, p.267-307.
- DIAS, F.R.B. *Análise Estratigráfica do Intervalo Formacional Sergi Superior-Itaparica-Água Grande no Poço 1-CAL-1-BA (Caldeirão 1), Bacia do Recôncavo*. 2003. 87f. Dissertação de Mestrado em Geologia - Programa de Pós Graduação em Geologia, UFRJ, Rio de Janeiro.
- DUPRAZ, C., R.P. REID, O. BRAISSANT, A.W. DECHO, R.S. NORMAN, AND P.T. VISSCHER. Processes of Carbonate Precipitation in Modern Microbial Mats. *Earth Sciences Reviews*, v.96, pp.141-162, 2009.
- EMERSON D., WEISS J. V. Bacterial iron oxidation in circumneutral freshwater habitats: findings from the field and the laboratory. *Geomicrobiology Journal*. v.21, pp.405–414, 2004.
- ERIKSSON, P.G.; SIMPSON, E.L.; ERIKSSON, K.A.; BUMBY, A.J.; STEYN, G.L.; SARKAR, S. Muddy Roll-up Structures in Siliciclastic Interdune Beds of the c.1.8 Ga Waterberg Group, South Africa. *Palaio*, v.15, pp. 177-183, 2000.
- ERIKSSON, P.G.; SCHIEBER, J. BOUOUGRI, E.; GERDES, G.; PORADA, H.; BANERJEE, S.; BOSE, P.K.; SAKAR, S. 2007. Classification of Structures left by Microbial Mats in Their Host Sediments. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, v.2, 2007, pp. 39-52.
- ERIKSSON, P.G.; SARKAR, S.; SAMANTA, P.; BANERJEE, S.; PORADA, H.; CATUNEANU, O. Paleoenvironmental context of microbial mat-related structures in siliciclastic rocks. In: SECKBACH, J.; OREN, A. *Microbial Mats - Modern and Ancient Microorganisms in Stratified Systems*. Londres: Springer, v.14, 2010, pp 73-108.
- FERNANDES, M. A. ; GHILARDI, A. M. ; Carvalho, I.S. ; LEONARDI, G. Pegadas de dinossauros Theropoda do paleodeserto Botucatu (Jurássico Superior-Cretáceo Inferior) da Bacia do Paraná. ISMAR DE SOUZA CARVALHO;

- NARENDRA KUMAR SRIVASTAVA; OSCAR STROHSCHOEN JR.; CECÍLIA CUNHA LANA. *Paleontologia: Cenários da Vida*. Rio de Janeiro: Interciência, 2011, v. 3, pp. 609-621.
- FERRÃO-FILHO, A.S; MOLICA, R; AZEVEDO, S.M.F.O. Ecologia, ecofisiologia e toxicologia de cianobactérias. *Oecologia Brasiliensis*, v.13, n.2, p.225-228, 2009.
- FOLK, R.L. The distinction between grain size and mineral composition in sedimentary-rock nomenclature. *Journal of Geology*, v. 62, n.4, pp.344-359, 1954.
- FIGUEIREDO, A.M.F.; BRAGA, J.A.E.; ZABALAGA, J.C.; OLIVEIRA, J.J.; AGUIAR, G.A.; SILVA, O.B.; MATO, L.F.; DANIEL, L.M.F.; MAGNAVITA, L.P.; BRUHN, C.H.L. *Recôncavo Basin, Brazil: a prolific Intracontinental Rift Basin*. In: LANDON, S.M. Interior Rift Basins. Califórnia: AAPG, 1994, v.59, p.157-203.
- FRIEDMANN, I.; LIPKIN, Y.; OCAMPO-PAUS, R. Desert Algae of the Negev (Israel). *Phycologia*, v. 6, n.4, pp. 185-200, 1967.
- FRYBERGER, S.G., AL-SARI, A.M.; CLISHAM, T.J. Eolian Dune, interdune, sand sheet and siliciclastic sabkha sediments of an offshore prograding sand sea, Dharan area, Saudi Arabia. *Amer Assoc Petrol Geol*, v. 67, pp. 280-312, 1983.
- GERDES, G.; KLENKE, T.; NOFFKE, N. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue. *Sedimentology*, v.47, pp. 279-308, 2000.
- GERDES, G. Structures left by modern microbial mats in their host sediments. 2007. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, v.2, 2007, pp. 5-38.
- GHIGNONE, J.I. Geologia dos sedimentos fanerozóicos do Estado da Bahia. In: INDA, H.A.V. *Geologia e recursos minerais do Estado da Bahia: textos básicos*. Salvador: Secretaria de Minas e Energia da Bahia, n.2, 1979, pp.24-227.
- HAGADORN, J.W.; BOTTJER, D.J. Restriction of a Late Neoproterozoic biotope: suspect-microbial structures and trace fossils at the Vendian-Cambrian transition. *Palaos*, v.14, pp. 73-85, 1999.
- HÄNTZSCHEL, W.; REINECK, H. E. Fazies-Untersuchungen im Hettangium von Helmstedt (Niedersachsen). *Mitt Geol Staatsinst Hamburg*, v.37, pp. 5-39, 1968.
- HORODYSKI, R.J. Impressions of algal mats from the Middle Proterozoic Belt Supergroup, northwestern Montana, U.S.A. *Sedimentology*, v.29, pp. 285-289, 1982.
- IESPA, A. Estudo Geomicrobiológico da lagoa Pernambuco, Região dos Lagos (Estado do Rio de Janeiro). 2006. 116f. Dissertação de Mestrado em Geologia - Programa de Pós Graduação em Geologia, UFRJ, Rio de Janeiro.
- KALKOWSKY, E. Oolite und Stromatolith im norddeutschen Buntsandstein. *Z Dtsch Geol Ges*, v.60, pp. 68-125, 1908.

- KOCUREK, G. Erg Reconstruction: The Entrada Sandstone (Jurassic) of Northern Utah and Colorado. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecol*, v.36, pp.125-153, 1981a.
- KOCUREK, G. Significance of interdune deposits and bounding surfaces in aeolian dune sands. *Sedimentology*, v. 28, pp.753-80, 1981b.
- KOCUREK, G.; FIELDER, G. Adhesion structures. *J Sediment Petrol*, v.51, pp.1229-1241, 1982.
- KOCUREK, G.; NIELSON, J. Conditions favourable to the formation of warm-climate Aeolian sand sheets. *Sedimentology*, v.33, pp. 795-816, 1986.
- LANCASTER, N. The development of large eolian bedforms. *Sediment Geol*, v. 56, pp. 69-89, 1988.
- LANZARINI, W.L. e TERRA, G.J.S. Fácies sedimentares, evolução da porosidade e qualidade de reservatório da Formação Sergi, Campo da Fazenda Boa Esperança, bacia do Recôncavo. *Bol Geoc PETROBRAS*, Rio, v. 3, pp.365-375, 1989.
- LAWRENCE, J.R.; WOLFAARDT, G.M.; KORBER, D.R. Determination of diffusion coefficients in biofilms by confocal laser microscopy. *Appl Environ Microbiol*, v.60, pp.1166- 1173, 1994.
- LOGAN, B.W., HOFFMAN, P.; GEBELEIN, C.D. Algal mats, cryptalgal fabrics, and structures, Hamelin Pool, Western Australia. *AAPG*, v.22, pp. 140-194, 1974.
- MAGNAVITA, L.P.; SILVA, R.R.; SANCHES, C.P. Guia de Campo da Bacia do Recôncavo. *Boletim de Geociencias da Petrobras*, v.13, n.2, pp.301-334, 2005.
- MANN, S. Biomineralization—Principles and Concepts in Bioinorganic Materials Chemistry: Oxford, *Oxford University Press*, p.210, 2001.
- McBride, E.F. 1963. A classification of common sandstones. *Journal of Sedimentary Petrology*, v.34, p.667, 1963.
- MCKEE, E.D. Sedimentary structures in dunes. In: MCKEE, E. D. *Global Sand Sea*. US Geol Surv Prof Pap, v.1052, 1979, p.429.
- MEDEIROS, R.A.; PONTE, F.C. Roteiro Geológico da Bacia do Recôncavo. Salvador, *Petrobrás/SEPES/DIVEN/SEM-BA*, p.63, 1981.
- MOUNTNEY, N.P.; HOWELL, J. Aeolian architecture, bedform climbing and preservation space in the Cretaceous Etjo Formation, NW Namibia. *Sedimentology*, v.47, pp. 825-849, 2000.
- MOUNTNEY, N.P. Eolian Facies Models. In: WALKER, R.G.; POSAMENTIER, H.W. *Facies models revisited*. *Society of Sedimentary Geology*. U.S.A: SEPM Special Publication, n.84, 2006, p. 19-83.
- MUSSA, D. Paleobotânica: Conceituação Geral e Grupos Fósseis. In: Carvalho, I.S. *Paleontologia*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2004, pp.413-508.
- NETTO, R.G.; SILVEIRA, D.M.; LAVINA, E.L.C. Evidence of Microbial Mats in Ancient Gondwana Glacigenic Freshwater Lakes In: SEPM Field Conference Microbial Mats in Sandy Deposits (Archean to Today), 2010, Denver. *Resumos...* Denver, SEPM Microbial Mat Conference, p.53.

- NICHOLSON, J.A.M., STOLZ, J.F., PIERSON, B.K. Structure of a microbial mat at Great Sippewissett Marsh, Cape Cod, Massachusetts. *FEMS Microbiology Letters*, v.45, pp. 343–364, 1987.
- NICHOLS, G. *Sedimentology and Stratigraphy*. 2.ed. England: Wiley-Blackwell, 2009, p.419.
- NOFFKE, N.; GERDES, G.; KLENKE, T.H.; KRUMBEIN, W.E. Microbially induced sedimentary structures - examples from modern siliciclastic tidal at sediments. *Zentralbl. Geol Pala Èont*, pp. 307-316, 1996.
- NOFFKE, N.; GERDES, G.; KLENKE, T.H.; KRUMBEIN, W.E. A microscopic sedimentary succession indicating the presence of microbial mats in siliciclastic tidal flats. *Sedim.Geol.*, v.110, pp.1-6, 1997a.
- NOFFKE, N., GERDES, G., KLENKE, T.H.; KRUMBEIN, W.E. Biofilm impact on sedimentary structures in siliciclastic tidal flats. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, v.201, pp.297-305, 1997b.
- NOFFKE, N.; GERDES, G.; KLENKE, T.; KRUMBEIN, W. E. "Microbially Induced Sedimentary Structures: A New Category within the Classification of Primary Sedimentary Structures". *Journal of Sedimentary Research*, v.7, p. 649-656, 2001a.
- NOFFKE, N.; GERDES, G.; KLENKE, T.; KRUMBEIN, W. E. Microbially induced sedimentary structures indicating climatological, hydrological and depositional conditions within Recent and Pleistocene coastal facies zones (Southern Tunisia). *Facies*, v.44, pp.23-30, 2001b.
- NOFFKE, N., HAZEN, R.M., ERIKSSON, K., AND SIMPSON, E. A new window into early life: Microbial mats in a siliciclastic early Archean tidal flat (3.2 Ga Moodies Group, South Africa). *Geology*, v. 34, pp. 253–256, 2006.
- NOFFKE, N. The criteria for biogenicity of microbially induced sedimentary structures (MISS) in Archean and younger, sandy deposits. *Earth Sci Rev*, v.96, pp. 173-180, 2009.
- NOFFKE, N. *Microbial Mats in Sandy Deposits from the Archaean Era to Today*. Springer, 2010, p.194.
- OLIVEIRA, F.M. *Análise estratigráfica da Formação Sergi, Campos de Fazenda Balsamo, Baciado Recôncavo, Bahia*. 2005. 192f. Dissertação (Mestrado em geologia) - Programa de Pós-graduação em Geologia, UFRGS, Rio Grande do Sul.
- PARIZOT, M.; ERIKSSON, P. G.; AIFA, T.; SARKAR, S.; BANERJEE, S.; CATUNEANU, O.; ALTERMANN, W.; BUMBY, A. J.; BORDY, E. M.; ROOY, J.L.V.; BOSHOFF, A.J. Microbial mat-related crack-like sedimentary structures in the c. 2.1 Ga Magaliesberg Formation sandstones, South Africa. *Precam Res*, v.138, pp.274–296, 2005.
- PENTECOST, A.; RIDING, R. 1986. Calcification in cyanobacteria. In: LEADBEATER, B.S.C.; RIDING, R. *Biom mineralization in lower plants and animals*. Oxford: Clarendon Press, 1986, pp. 73-90.
- PFLÜGER, F. Matground structures and redox facies. *Palaios*, v.14, pp. 25-39, 1999.

- PORADA, H.; BOUOUGRE, E.. Wrinkle Structures – a critical review. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record*. Amsterdam: Elsevier, v.2, 2007, pp. 39-52,
- REID, R.P.; MACINTYRE, I.G.; STENECK, R.S.; BROWNE, K.M.; MILLER, T.E. Stromatolites in the Exuma Cays, Bahamas: Uncommonly Common. *Facies*, v.33, pp. 1-18, 1995.
- RICHTER, D.; HERFORTH, A.; OTT, E. Blackish blue-green algal bioherms composed by *Rivularia haematites* in Pleistocene deposits of the Perechora Peninsula near Korinthos (Greece). *Neues Jahrb Geol Paleontol*, v. 159, n.1, pp. 14-40, 1979.
- RIDING, R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, v.47, pp. 179-214, 2000.
- RUNNEGAR, B.; FEDONKIN, M. Proterozoic metazoan body fossils. In: SCHOPF, J.W.; KLEIN, C. *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study*. Nova York: Cambridge University Press, 1992, pp. 369-387.
- SARKAR, S.; BANERJEE, S.; SAMANTA, P., JEEVANKUMAR, S. Microbial mat-induced sedimentary structures in siliciclastic sediments: Examples from the 1.6 Ga Chohat Sandstone, Vindhyan Supergroup, M.P.India. *J Earth System Sci*, v.115, n.1, pp. 49–60, 2006.
- SCHERER, C.M.S. Sedimentologia e Estratigrafia de Sistemas Fluviais e Eólicos. Apostila complementar da pós-graduação da UFRGS, 2004, p.130.
- SCHERER, C.M.S.; LAVINA, E.L.C.; DIAS FILHO, D.C.; OLIVEIRA, F.M.; BONGIOLO, D.E.; AGUIAR, E.S. *Evolução estratigráfica da sucessão flúvio-eólica-lacustre da formação Sergi, Bacia do Recôncavo, Brasil*. In: 3º Congresso brasileiro de p&d em petróleo e gás, 2005, Salvador. *Anais...* Salvador, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005.
- SCHERER, C. M. S.; LAVINA, E. L. C.; DIAS, D. C.; OLIVEIRA, F. M.; BONGIOLO, D. E.; AGUIAR, E. S. Stratigraphy and facies architecture of the fluvial-aeolian-lacustrine Sergi Formation, Recôncavo Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, v. 194, pp. 169-193, 2006.
- SCHERER, C. M.S.; GOLDBERG, K. Cyclic cross bedding in the eolian dunes of the Sergi Formation (Upper Jurassic), Recôncavo Basin: Inferences about the wind regime. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology*, v.296, pp 103-110, 2010.
- SCHIEBER, J. Possible indicators of microbial mat deposits in shales and sandstones: Examples from the Mid_Proterozoic Belt Supergroup, Montana, USA. *Sedimentary Geology*, v.120, pp. 105-124, 1998.
- SCHIEBER, J. Microbial Mats in TerrigenousClastics: The Challenge of Identification in the Rock Record. *Palaaios*, v. 14, pp. 3-12, 1999.
- SCHIEBER, J. Microbial mats in the siliciclastic rock record: a summary of diagnostic features, In: ERIKSSON, P.G.; ALTERMANN, W.; NELSON, D.R.; MUELLER, W.U.; CATUNEANU, O. *The Precambrian Earth: Tempos and*

Events, Developments in Precambrian Geology. Amsterdam: Elsevier, v.12, 2004, pp. 663–673.

- SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU, O. Prologue: An introduction to microbial mats. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record. Atlases in Geoscience 2*. Amsterdam: Elsevier, 2007a, pp. 1-3.
- SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; SARKAR, S. Paleoenvironmental and Chronological Relationships of Mat-Related Features, and Sequence Stratigraphic Implications of Microbial Mats. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W.; CATUNEANU. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic Rock Record. Atlases in Geoscience 2*. Amsterdam: Elsevier, 2007b, pp. 267-275.
- SCHOPF, J.W. Fossil evidence of Archean life *Philos. Trans R Soc Lond B Biol Sci*, v.361, pp.869-885, 2006.
- SILVA E SILVA, L.H.; SENRA, M.C.E.; FARUOLO, T.C.L.M.; CARVALHAL, S.B.V.; ALVES, S.A.P.M.N.; DAMAZIO, C.M.; SHIMIZU, V.T.A.; IESPA, A.A.C. Distinção entre as esteiras microbianas da lagoa Pitanguinha, Quaternário do Rio de Janeiro, Brasil. In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 2003, Brasília. *Anais...* Brasília, SBP, 2003, v.18, p. 271
- SUR, S.; SCHIEBER, J.; BANERJEE, S. Petrographic observations suggestive of microbial mats from Rampur Shale and Bijaigarh Shale, Vindhyan basin, India. *J. Earth Syst Sci*, v.115, pp. 61-66, 2006.
- STOLZ, J.F. Structure of microbial mats and biofilms. In: RIDING, R. E.; AWRAMIK, S. M. *Microbial Sediments*. New York: Springer- Verlag Heidelberg, 2000, p.1-8.
- SUTHERLAND, I.W. *Biotechnology of microbial exopolysaccharides*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1990, p.163.
- SUTHERLAND, I.A. Biofilm exopolysaccharides: a strong and sticky framework. *Microbiology*, v.147, pp. 3–9, 2001.
- TANG, D.J.; SHI, X.Y.; JIANG, G.; WANG, X.Q. 2012. Morphological Association of MISS as a Indicator: Exemple From The Proterozoic Succession of the Southern North China Platform. In: NOFFKE, N. CHAFETZ, H. *Microbial mats in siliciclastic deposicional systems through time*. SEMP, v.101, 2012, pp.163-176.
- THIEL T, WOLK C.P. Conjugal transfer of plasmids to cyanobacteria. *Methods Enzymol*, v.153, pp. 232–243, 1987.
- TICE, M.M.; LOWE, D.R. The origin of carbonaceous matter in pre -3.0 Ga greenstone terrains: a review and new evidence from the 3.42 Ga Buck Reef Chert. *Earth-Sci Rev*, v.76, pp. 259-300, 2006.
- TORRES RIBEIRO, M. *Fácies sedimentares e arquitetura deposicional da Formação Sergi (Jurássico Superior), bacia do Recôncavo*. 2002. 98f. Trabalho de

Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia). Curso de Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro.

- TORRES RIBEIRO, M.; BORGHI, L. Estudo da Arquitetura Depositional da Formação Sergi (Bacia do Recôncavo) como subsídio para a análise de Heterogeneidades de Reservatório. *In: 3º Congresso brasileiro de p&d em petróleo e gás*, 2005, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2005.
- VAN GEMERDEN, H. Microbial mats: a joint venture. *Marine Geology*, v.113, pp.3-25, 1993.
- VISSCHER, P.T., REID, R.P., BEBOUT, B.M. Microscale observations of sulfate reduction: correlation of microbial activity with lithified micritic laminae in modern marine stromatolites. *Geology*, v.28, pp. 919–922, 2000.
- VINCENT, W.F. Cyanobacteria. *In: LIKENS, G.E. Encyclopedia of Inland Waters*. Oxford: Elsevier, v. 3, 2009, pp.226-232.
- WALCOTT, C.D. *Cambrian Geology and Paleontology III, No.2 – Precambrian, Algonkian algal flora*. Smithsonian Misc. Collection, v.64, 1916, pp. 77-156.
- WALSH, M.M. *Microbial mats on the early earth: the archean rock record*. *In: SECKBACH, J.; OREN, A. Microbial Mats*. New York: Springer, 2010, pp. 43-54.
- WILSON, I.G. Desert sandflow basins and a model for the development of ergs. *Geogr J*, v.137, pp.180-189, 1971.
- WILSON, I.G. 1972. Aeolian Bedforms - Their Development and Origins. *Sedimentology*, v.19, pp. 173-210, 1972.
- WINGENDER, J.; FLEMMING, H.C.; NEU, T.R. What are Bacterial Extracellular Polymeric Substances. *In: WINGENDER, J.; NEU, T.R.; FLEMMING, H.C. Microbial Extracellular Polymeric Substances*. Berlin: Springer, 1999, pp.1-19.
- WOLFAARDT, G.M.; LAWRENCE, J.R.; KORBER, D. Function of EPS. *In: WINGENDER, J.; NEU, T.R.; FLEMMING, H.C. Microbial extracellular polymeric substances*. Springer, Berlin, 1999, pp.171-200.

**Apêndice A – Estruturas microbianas da Formação Sergi e suas equivalentes
descritas na literatura**

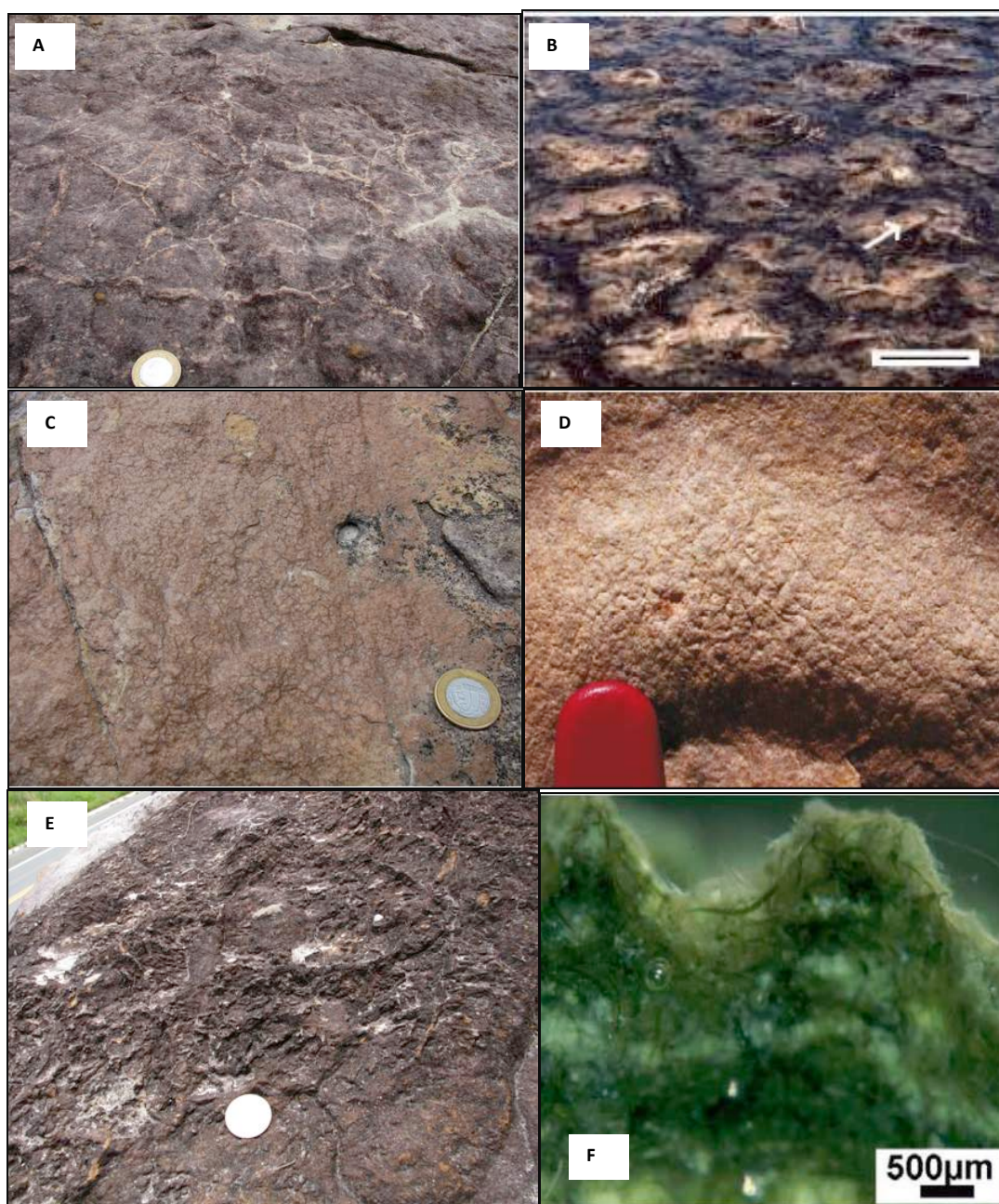


Figura A1: As Figuras da esq. representam estruturas microbianas da Formação Sergi; as da direita foram retiradas da literatura de Eriksson *et al.* (2007), Bottjer e Hagadorn (2007) e Gerdes (2007). As Figuras **A e B** representam domos e gretas de ressecamento do atual e do registro geológico, respectivamente. As Figuras **C e D** comparam pele de elefante (*Elephant Skin*) em registro geológico; **E e F** mostra pináculos em registro geológico e a formação recente de pináculos (*pinnacles* ou *tuffos*) por filamentos bacterianos, respectivamente.

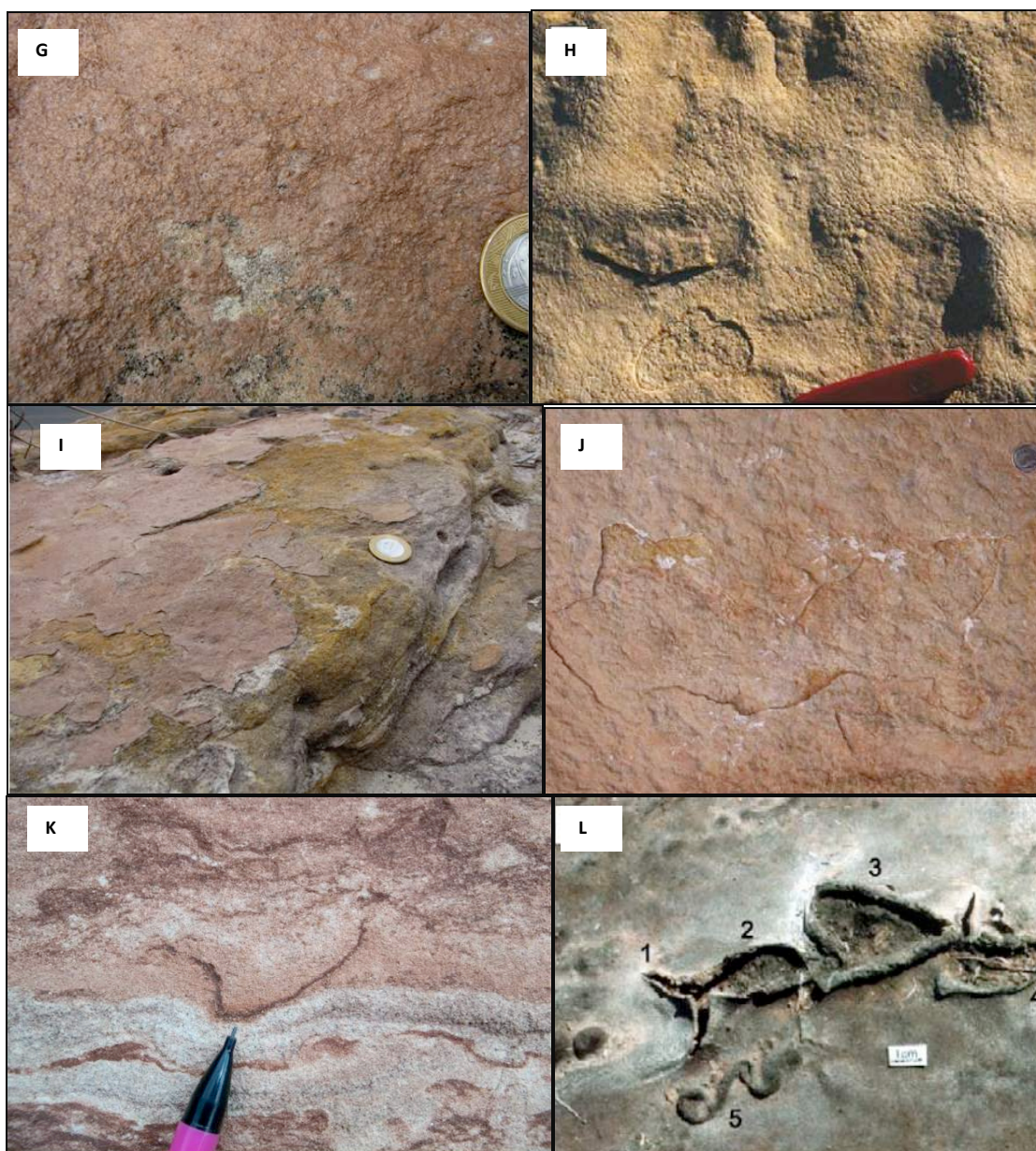


Figura A2: As Figuras da esq. representam estruturas microbianas da Formação Sergi; as da direita foram retiradas da literatura de Eriksson *et al.* (2007), Bottjer e Hagadorn (2007) e Gerdes (2007). **G e H** são comparações entremarcas de rugas (*wrinkle marks*); **I e J** demonstram lamina de areia esfoliada (*exfoliating sand laminae*); E por fim, **K e L** representam lama encrespada (*mud curled*), registro geológico e recente, na ordem.

**APENDICE B – Figuras complementares de estruturas microbianas da
Formação Sergi**



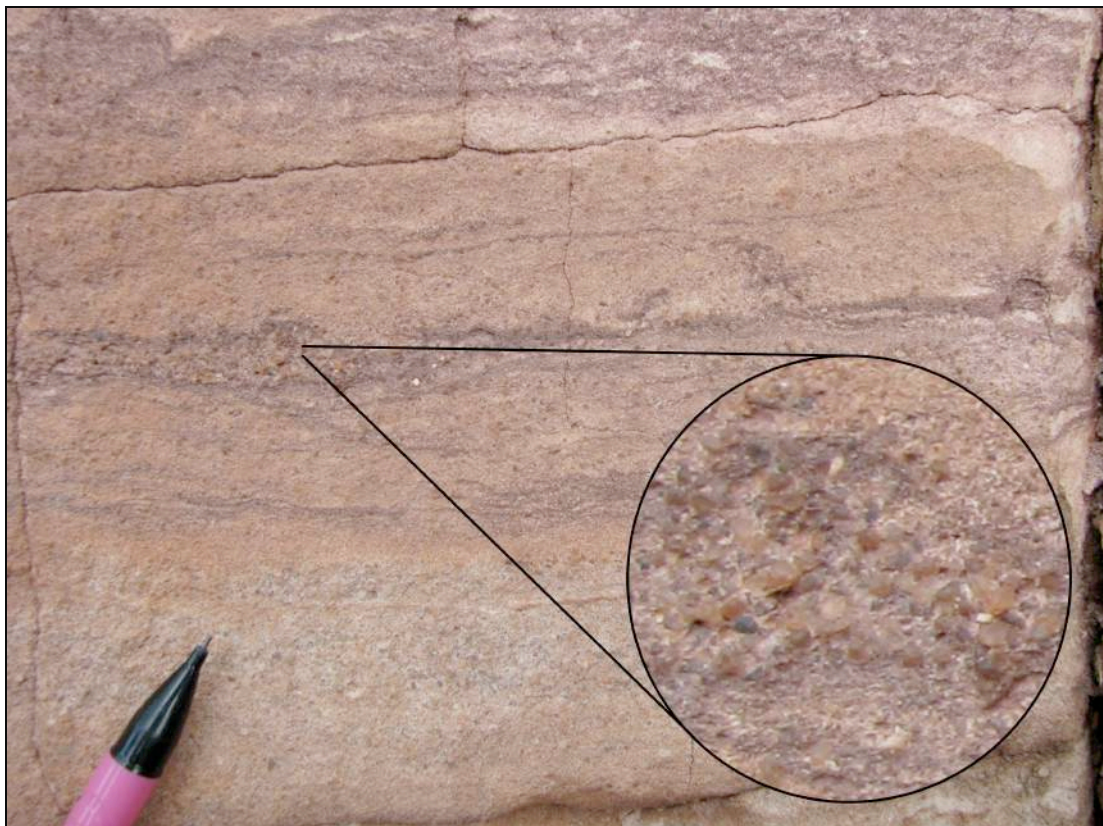
B1: Afloramento 3: Lama com margens onduladas (Lama encrespada, recente).



B2: Afloramento 4. Gretas de ressecamento associadas a esteiras (?)



B3: Afloramento 4. Marcas de deformação por pisoteamento (dinossauro ?) associadas a filmes argilosos (esteiras ?)



B4: Afloramento 4. Marcas de rugas mostrada em corte transversal (ver em planta nas Figuras 27 e 28); notar o trapeamento de grão mais grossos (zoom).

**Apêndice C – Resumo enviado/apresentado à Reunião Anual Regional da
Sociedade Brasileira de Paleontologia, Paleo RJ/ES, 2012**

ESTRUTURAS SEDIMENTARES INDUZIDAS POR ORGANISMOS MICROBIAIS (MISS) NA FORMAÇÃO PIMENTEIRA (DEVONIANO, BACIA DO PARNAÍBA)

MICROBially INDUCED SEDIMENTARY STRUCTURES (MISS) IN PIMENTEIRA FORMATION (DEVONIAN, PARNAÍBA BASIN)

MAIANA CLÁUDIA KREFF AVALONE^{1,2}, BRUNO RAFAEL SANTOS^{1,2}, LEONARDO BORGHI¹

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, CCMN, Instituto de Geociências, ¹Laboratório de Geologia Sedimentar (Lagesed), ²Programa de Pós-graduação em Geologia. Cidade Universitária da UFRJ (Ilha do Fundão), Av. Athos da Silveira Ramos, 274, s/J1-011, CEP 21910-200, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: mayavalom@gmail.com, santosbr@geologia.ufrj.br, lborghi@geologia.ufrj.br

A Formação Pimenteira constitui-se, de modo geral, de arenitos e folhelhos depositados em mares rasos epicontinentais do Gondwana no Devoniano. A presente ocorrência, inédita em toda a bacia do Parnaíba, encontra-se em um afloramento na borda oeste da bacia, no Estado do Tocantins (margem da rodovia TO-020, km 97,6), no topo de um conjunto de camadas delgadas de arenitos finos a muito finos com laminação cruzada por onda. Sotopostos a esse conjunto, ocorrem folhelhos datados como Fransniano (Neodevoniano). *Microbially Induced Sedimentary Structures* (MISS) são estruturas primárias produzidas por ação de organismos microbianos em sedimentos, particularmente siliciclásticos, por ação de organismos microbiais, as quais requerem condições paleoecológicas – sobretudo tafonômicas – especiais para sua preservação. As estruturas reconhecidas foram: (1) impressão de fragmentos de esteiras, com marcas onduladas milimétricas; (2) estromatólitos de areia ou domos, estruturas ligadas a crescimento de esteira; (3) *Kinneya*, uma variedade de *wrinkle mark*, com sinuosidades e topos achatados ou arredondados; (4) *spheroidal pliable sand clasts* - fragmentos de esteira, coesivos, capazes de se tornarem arredondados durante transporte e deposição; e (5) *individual knots* (nós), estruturas ligadas ao crescimento e movimento de filamentos em resposta de fatores ambientais. O contexto tafonômico de preservação discutido envolve baixa taxa de sedimentação (superfícies de omissão) em um paleoambiente de mar raso sob ação de ondas, com aporte de águas continentais, cujos depósitos arenosos representam tempestitos distais em uma frente deltaica (?) que compõem o início de um ciclo de regressão forçada. Entretanto, tais estruturas, em comparação com exemplos atuais, são normalmente interpretadas e reconhecidas caracteristicamente em planícies de maré rasa. [Pesquisa financiada pelo CNPq]

**Apêndice D – Artigo completo publicado em livro [Paleontologia: Caminhando
pelo tempo, 2011, pp. 170-171]**

ESTRUTURAS SEDIMENTARES MICROBIANAS INDUZIDAS (MISS): SIGNIFICADO E IMPORTÂNCIA GEOLÓGICA

MICROBIALLY INDUCED SEDIMENTARY STRUCTURES (MISS): GEOLOGICAL SIGNIFICANCE AND IMPORTANCE

Leonardo Borghi & Maiana Kreff Avalone

Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. Laboratório de Geologia Sedimentar (Lagesed). Av. Athos da Silveira Ramos, 274, sala J1-011. 21.941-916, Rio de Janeiro, RJ
E-mails: lborghi@geologia.ufrj.br, mayavalom@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho trata da divulgação de uma nova classe de estruturas sedimentares primárias, de origem microbiana (*Microbially Induced Sedimentary Structures – MISS*), concebida pela pesquisadora Nora Noffke (Old Dominion University, VA, USA) no início dos anos 2000, com impacto direto na ampliação da capacidade descritiva de sucessões sedimentares, sobretudo terrígenas. Tais estruturas não apresentam um sistema nomenclatural – parataxonômico, tal como os estromatólitos e icnofósseis – muitas vezes recorrendo-se a aspectos descritivos de estruturas sedimentares primárias físicas associadas ou mesmo a critérios genéticos para sua designação. Aborda-se uma classificação de 5 grupos sugeridos por aquela pesquisadora, aqui considerados tafonômicos, que se aplicam ao registro macroclástico de areias e arenitos. Não obstante sua recente concepção, seu potencial de abordagens paleoambientais e tafonômicas já se revela significativo para a Geologia e a Paleontologia; mas ainda se assoma como um desafio de estudo devido à pouca familiaridade dos geocientistas com o próprio mundo microbiano.

Palavras-chave: Microbialito, Biossedimentologia, Geobiologia, Geomicrobiologia

ABSTRACT

This paper deals with the dissemination of a new class of primary sedimentary structures of microbial origin, namely Microbially Induced Sedimentary Structures (MISS), conceived by Nora Noffke (Old Dominion University, VA, USA) in early 2000, with a strong impact on the enhancement of the terrigenous sedimentary successions descriptive and interpretative capacity. Such structures do not have a well established nomenclature system yet – like the parataxonomy applied for trace-fossils and stromatolites – as primary physical sedimentary structure names still coexist with purely interpretative ones. The classification approach of 5 genetic groups suggested by Noffke – here considered on taphonomic basis – are applied to the macroclastic register of sands and sandstones. Despite its recent conception, its potential for palaeoenvironmental and taphonomic approaches reveals significant for Geology and Paleontology, but it is still challenging due to the lack of familiarity with the microbial world by geoscientists.

Keywords: Microbialite, Biosedimentology, Geobiology, Geomicrobiology.

1. INTRODUÇÃO

A atual importância da compreensão do mundo microbiano envolve, além do entendimento da Origem da Vida e a possibilidade de reconhecimento de vida extraterrestre, a discussão de processos geológicos da Terra.

Processos geológicos, vida microbiana e registro de rochas sedimentares puderam ser intimamente relacionados desde o reconhecimento de estromatólitos carbonáticos como produto da ação microbiana, no início do século 20 por E. Kalkowski. Desde então – e sobretudo em terrenos calcários pré-cambrianos presentes em todos os continentes – o registro de estromatólitos vem sendo abordado em estudos paleontológicos, sedimentológicos e estratigráficos, inclusive por sua associação com bens minerais, tais como fosfato, chumbo e zinco (*q.v.* Srivastava, 2010).

Além dos estromatólitos, os trombólitos, oncólitos, leiólitos e dendrolitos (*cf.* Riding, 2000; Riding & Awramik, 2000) podem ser considerados **microbialitos** (*q.v.* Burne & Moore, 1987), designação genérica que envolve o registro geológico microbiano que também pode abarcar *s.l.* rochas contendo as estruturas aqui tratadas.

Biofilmes (*biofilms*) e **esteiras microbianas** (*algal mats*) são as estruturas ecológicas que envolvem comunidades microbianas (mormente cianobacterianas), as quais aumentam de complexidade daquelas para estas, que apresentam, distintamente, variados horizontes tróficos (*q.v.* Riding, 2000; Riding & Awramik, 2000). São tais estruturas ecológicas microbianas que interagem com o meio ambiente, interferindo na mobilidade de elementos químicos e na organização partículas sedimentares, produzindo então registros minerais e sedimentares peculiares, incluindo as estruturas sedimentares em questão. O próprio registro fóssil de biofilmes e esteiras microbianas pode ser tratado como um microbialito, constituindo até mesmo uma rocha sedimentar (*i.e.*, “folhelho orgânico”).

A Biossedimentologia, a Geobiologia e a Geomicrobiologia são novas áreas interdisciplinares que vêm tratar do estudo dos microbialitos, das quais a Paleontologia e a Geologia se beneficiam. A **Geomicrobiologia** aborda o comportamento geoquímico dos elementos sob a perspectiva bioquímica microbiana; ou seja, fenômenos na “escala” celular e da partícula sedimentar (mineral). Já a **Geobiologia**, que abarca conhecimentos da Geomicrobiologia, enfoca diferenciadamente aspectos ecológicos (ou paleoecológicos) e evolutivos dos microbialitos, como também dos organismos biomineralizados (uni- e multicelulares), numa abordagem já esqueletal. A **Biossedimentologia**, por sua vez, orienta-se pela abordagem “processo–produto” da Sedimentologia e Petrologia Sedimentar no estudo dos microbialitos, em estudos de fácies sedimentares e sistemas deposicionais.

Assim, estruturas sedimentares microbianas induzidas são aqui entendidas como foco primário da Biossedimentologia, não obstante concorram as abordagens geobiológicas e geomicrobiológicas para o entendimento da sua gênese.

Pela percepção de que se trata, não da última, mas da mais recente fronteira de estudos da Paleontologia e da Geologia – impactando sobretudo no modo com que descrevemos e compreendemos a gênese de sedimentos e rochas sedimentares – faz-se mister o trabalho de divulgação e estímulo ao estudo dessas estruturas no meio geocientífico do país.

2. MISS

Noffke *et al.* (2001) nomearam como “**estruturas sedimentares microbianas induzidas**” (*Microbially Induced Sedimentary Structures* – MISS) uma série de estruturas sedimentares ocorrentes em areias e arenitos (*cf.* Noffke, 2010), as quais vinham sendo abordadas isoladamente pela literatura pregressa como de origem microbiana (*q.v.* Gerdes *et al.*, 2000), porém sem uma sistematização de seu estudo; e introduziram o simpático acrônimo MISS. O principal grupo microbiano que atua no processo de formação de MISS são as cianobactérias, procariontes fotossintéticos que crescem especialmente em planícies de maré, lagunas, em ambientes de água rasa, em profundidades onde a luz solar consiga atingir o substrato, formando biofilmes e esteiras microbianas nas superfícies de substratos. (*cf.* Noffke *et al.*, 2001)

Por outro lado, estruturas sedimentares microbianas induzidas em diversos meios terrígenos foram abordadas extensivamente por Schieber *et al.* (2007), além das areias e arenitos, o que constitui em uma fonte diferenciada para abordagens em sedimentos e rochas sedimentares microclásticas (lamas, lamitos, “folhelhos”). Um aspecto particularmente inovador dessa obra é a tentativa de Catuneanu (*in* Schieber *et al.*, 2007) de inserir tais estruturas num contexto da Estratigrafia Sequencial.

Apesar da associação inicial dessas estruturas a sedimentos e rochas sedimentares terrígenas (ou siliciclásticas), nada opõe seu uso para casos de estudo em sedimentos e rochas aloquímicas (carbonáticas) ou ortoquímicas (evaporitos).

3. CLASSIFICAÇÃO

A mais completa obra que atualmente reúne exemplos de estruturas sedimentares microbianas em sedimentos e rochas siliciclásticas é o atlas editado por Schieber *et al.* (2007). Nesse atlas, observa-se que a classificação das estruturas por diversos autores segue nomes distintos para estruturas aparentemente semelhantes e estruturas distintas com mesmo nome; e nele ainda coexistem nomes de uma taxonomia lineana (*e.g.*, *Kinneyia* Walcott, 1914) com os de estruturas sedimentares primárias físicas (*e.g.*, gretas, marcas de ondulação e corrugação) e ainda termos genéticos, que se tornam imprecisos *per se* (*e.g.*, laminação de esteira microbiana, estrutura de expansão de esteiras). Para uma avaliação nomenclatural futura, portanto necessária, será importante a revisão de táxons ora considerados pseudofósseis e fósseis *problematicae*, dentre os quais alguns poderão ser entendidos como microbialitos – tal como vários ‘fucoides’ o foram como icnitos.

A partir deste ponto, em se que observa destas estruturas uma instabilidade nomenclatural, vale então abordar a classificação de Noffke *et al.* (2001, 2010) – a qual podemos considerar de natureza tafonômica (ou preservacional) – em que se reúnem as estruturas sedimentares microbianas induzidas em cinco ‘categorias’, aqui consideradas “classes”: (1) nivelamento, (2) bioestabilização, (3) impressão, (4) separação de grão e (5) aprisionamento. Pode-se esperar

O **nivelamento** (*leveling*) é o processo pelo qual a superfície do substrato é ‘nivelado’ por esteiras microbianas; como, por exemplo, em marcas de ondulação, onde se pode observar preenchimento preferencial de suas calhas (*troughs*) por esteiras algais, o que diminui a topografia da superfície ondulada (Figura 1 A). Neste caso, mecanismos próprios da colonização do substrato pela esteira microbiana

podem ficar registrados nas calhas como estruturas, enquanto que as cristas, menos protegidas, podem submeter-se a reelaborações sindeposicionais.

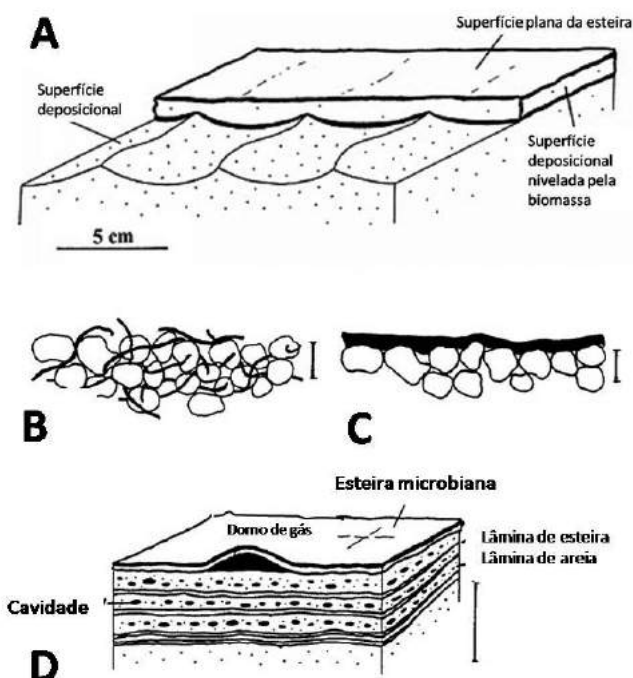


Figura 1. A. Marcas de ondas sendo niveladas por esteiras microbianas. B. Bioestabilização por filamentos de cianobactérias envolvendo grãos sedimentares. C. Bioestabilização por diminuição da rugosidade superficial. D. Bioestabilização preservando cavidades produzidas por gases. B, C, escala 5 mm; D, escala 10 cm. (Modificado de Noffke *et al.*, 2001).

A **bioestabilização** (*biostabilization*) pode ocorrer de três diferentes maneiras: fixação de grãos de sedimentos soltos (Figura 1 B), suavização de superfícies ásperas, evitando erosão (Figura 1 C) e vedação do sedimento como uma capa protetora (Figura 1 D). Neste caso, os biofilmes e esteiras microbianas ampliam o potencial de preservação de outras estruturas sedimentares primárias, como, por exemplo, a estrutura esponjosa (Figura 1 D) – tal como olhos-de-pássaro (*birdseye*) em rochas carbonáticas – em que bolhas de gás ficam preservadas. Este mecanismo talvez seja o mais impactante no registro sedimentar, porém talvez o de mais difícil reconhecimento, quando afeta apenas petrotrama, em escala microscópica (Figura 1 B,C).

A **impressão** (*imprinting*) são marcas deixadas quando o biofilme ou a esteira microbiana, que recobre o substrato, é soterrado, podendo ser observado como lâminas sinusoidais ou crenuladas (Figura 2 A). Este mecanismo talvez seja o de mais fácil reconhecimento mesoscópico (amostra de mão). Já em escala microscópica, vêm sendo reconhecidos ostensivamente em rochas microclásticas (“folhelho”), em lâminas delgadas (*q.v.* Schieber & Banerjee *in* Schieber *et al.*, 2007).

A **separação de grãos** (*microbial grain separation*) acontece quando os grãos sedimentares vão sendo recobertos individualmente por biofilme até formar uma esteira única sobre o substrato (Figura 2 B). Este mecanismo afeta tipicamente a petrotrama sedimentar, em escala microscópica. Pode ser de difícil identificação, se não houver indícios residuais de recobrimento (coating) dos grãos, pelo menos, por um mineral de origem associada.

O **aprisionamento** (*baffling, trapping and binding*) ocorre em três etapas: na primeira (Figura 2 C), filamentos algais orientam-se perpendicularmente em relação ao substrato, formando redes de captura (*baffling*); na segunda etapa (Figura 2 E), grãos são capturados por essas “redes” pelo decréscimo do fluxo da corrente que passa pelos filamentos (*trapping*); e, por último (Figura 2 D), os grãos vão sendo encobertos por substância polimérica extracelular ou EPS que os aglutina (*binding*). A partir da conjugação desses mecanismos, desenvolve-se então um conjunto de lâminas conforme cresce a comunidade microbiana. Neste caso, temos o registro de um microbialito que, no caso de as partículas serem carbonáticas, um verdadeiro estromatólito como os que ocorrem em Bahamas.

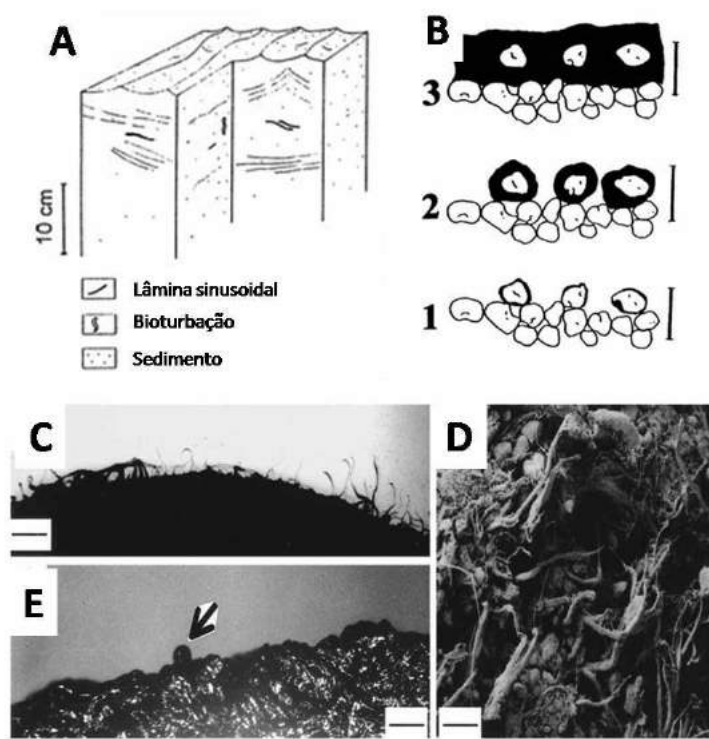


Figura 2. A. Estruturas sinusoidais preservadas por impressão. B. Desenvolvimento da esteira microbiana sobre o sedimento, com o progressivo desenvolvimento da separação de grãos no biofilme (escala: 2 mm). C. *Baffling*, mostrando a orientação perpendicular dos filamentos em relação ao substrato (escala: 1 mm). D. *Binding*, indicando grão mineral sendo encoberto por esteira microbiana em crescimento (escala: 1 mm). E. *Trapping*, ilustrando grãos minerais sendo capturados pela diminuição do fluxo da corrente (escala: 1 mm). (Modificado de Noffke *et al.*, 2001).

Dentro dos processos biológicos descritos acima para formação de MISS, há as diferentes feições deixadas pelos biofilmes e esteira microbianas, que dependem de fatores ambientais em que ocorrem. As feições diagnósticas mais facilmente reconhecidas são interrupções irregulares de uma laminação, margens dobradas de gretas de dessecação (lama encrespada, *mud curl*), lâminas dobradas, lâminas rugosas, bolsos de erosão (diminutas contramarcas de calha, *gutter casts*), “elephant skin” e intraclastos de arenito (*chips marks*) (q.v. Gerdes *et al.*, 2000), que não são, porém, detalhadamente discutidas nesse trabalho.

4. REGISTROS NO BRASIL

No Brasil, as únicas menções a tais estruturas que se têm notícia até o momento registraram-se no evento “Microbial Mats in Sandy Deposits (Archean to Today)” promovido pela SEPM – Society for Sedimentary Geology, em Denver (CO, USA), em maio de 2010 (*q.v.* Borghi & Paula Freitas, 2010; Netto *et al.*, 2010), e no Simpósio Latinoamericano de Icnología, provovido pela Sociedade Brasileira de Paleontologia, em São Leopoldo (RS), em outubro/novembro de 2010 (Carvalho *et al.*, 2010). Em tais ocasiões, foram apontadas estruturas sedimentares microbianas induzidas em rochas das formações Lenheiro (Neoproterozoico, Bacia de Carandaí), Pimenteira (Devoniano, Bacia do Parnaíba), Mafra (Permiano, Bacia do Paraná), Sergi (Jurássico, Bacia do Recôncavo, Figura 3), Maracangalha (Cretáceo, Bacia do Recôncavo), Sousa (Cretáceo, Bacia de Sousa) e Tremembé (Paleógeno, Bacia de Taubaté, Figura 4).

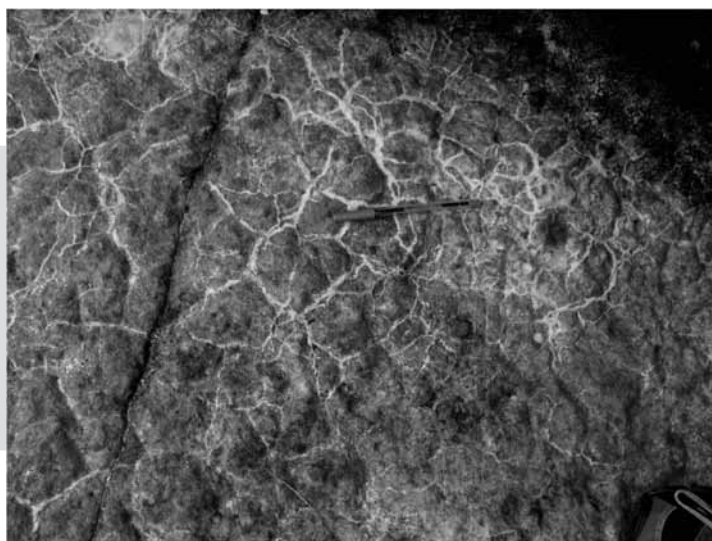


Figura 3. *Sand cracks*, estrutura pustular ou *elephant skin structure* em arenitos da Formação Sergi (Jurássico, Bacia do Recôncavo).

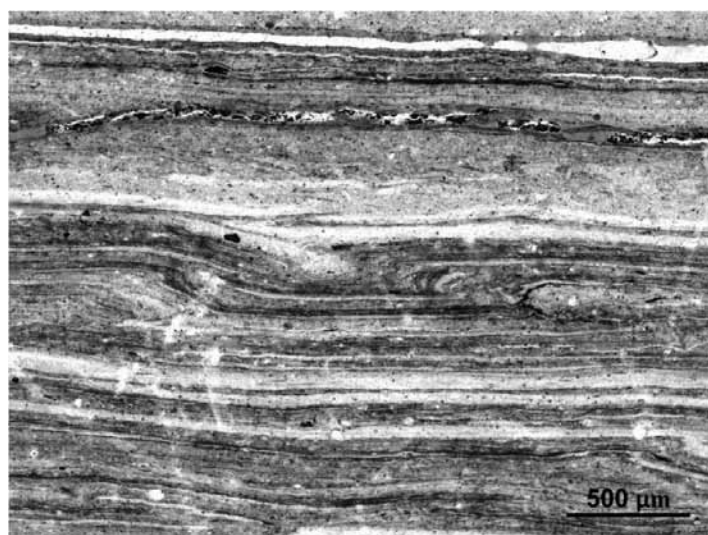


Figura 4. Laminação de esteira microbiana recumbente em lâmina delgada de “folhelhos” da Formação Tremembé (Paleógeno, Bacia de Taubaté).

5. CONCLUSÃO

As estruturas sedimentares microbianas induzidas (MISS) são uma nova fronteira de estudos para a Paleontologia e para a Geologia, capitaneada por novas áreas de conhecimento específicas como a Biossedimentologia, a Geobiologia e a Geomicrobiologia. Reconhecer tais estruturas amplia a capacidade descritiva e interpretativa de sucessões sedimentares terrígenas (ou siliciclásticas), posto que apenas as rochas carbonáticas vinham recebendo, com sucesso, tal atenção. Embora não se tenha alcançado uma nomenclatura estável para essas estruturas, a definição de cinco grandes classes genéticas (tafonômicas) é de grande ajuda na orientação das investigações que se sucederão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

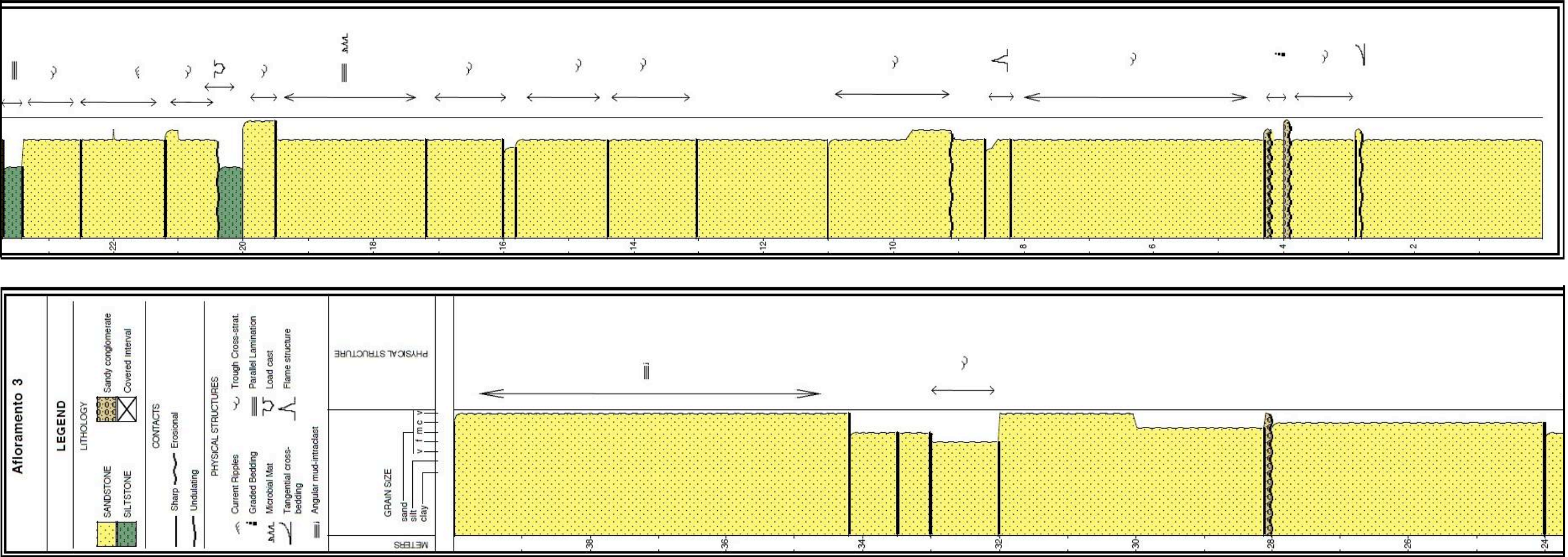
- BORGHI, L. & PAULA FREITAS, A.B.L. 2010. Microbial sedimentary structures in some distinct siliciclastic depositional systems of different ages from Brazil. *In: SEPM FIELD CONFERENCE MICROBIAL MATS IN SANDY DEPOSITS (ARCHEAN TO TODAY)*, 2010, Denver, CO, USA. *Abstracts*. Denver: SEPM, p.5
- BURNE, R.V. & MOORE, L.S. 1987. Microbialites: organo sedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaos*, 2(2):241–254.
- CARVALHO, I.S.; BORGHI, L. & LEONARDI, G. 2010. The role of microbial mats in the preservation of dinosaur tracks from the Sousa Basin (Lower Cretaceous, Brazil). *In: SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE ICNOLOGÍA*, 2010, São Leopoldo. *Resúmenes*. São Leopoldo: Sociedade Brasileira de Paleontologia, v.1, p.28–26.
- GERDES, G.; KLENKE, T. & NOFFKE, N. 2000. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue. *Sedimentology*, 47(2):279–308.
- NETTO, R.G.; SILVEIRA, D.M. & LAVINA, E.L.C. 2010. Evidence of microbial mats in ancient Gondwana glaciogenic freshwater lakes. *In: SEPM FIELD CONFERENCE MICROBIAL MATS IN SANDY DEPOSITS (ARCHEAN TO TODAY)*, 2010, Denver, CO, USA. *Abstracts*. Denver: SEPM, p.37.
- NOFFKE, N.; GERDES, G.; KLENKE, T. & KRUMBEIN, W.E. 2001. Microbially Induced Sedimentary Structures: a new category within the classification of primary sedimentary structures. *Journal of Sedimentary Research*, 71(5):649–656.
- RIDING, R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial–algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47(Supp.1):179–214.
- RIDING, R. & AWRAMIK, S.M. (eds.). 2000. *Microbial Sediments*. Heidelberg: Springer-Verlag. 331p.

- SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W. & CATUNEANU (eds.). 2007. *Atlas of microbial mats features preserved within the siliciclastic rock record*. Amsterdam: Elsevier. 311p. (Atlases in Geoscience, n.2)
- SRIVASTAVA, N.K. 2010. Estromatólito. In: CARVALHO, I.S. (Org.) *Paleontologia*. 3^{ed}. Rio de Janeiro: Interciência. v.1, p.229-259.

PROVA

**Apêndice E – Perfis estratigráficos completos dos afloramentos 3 e 4 da
Formação Sergi (modificado de Torres Ribeiro, 2002)**

Apêndice E.1- Perfil estratigráfico completo do afloramento 3 (modificado de Torres Ribeiro, 2002)



Apêndice E.2- Perfil estratigráfico completo do afloramento 4 (modificado de Torres Ribeiro, 2002)

