



Gênese e Morfologia de Estruturas Sedimentares Induzidas por Atividade Microbiana (MISS) em Sedimentos da Lagoa Vermelha (Região dos Lagos – Rio de Janeiro)
Morphology and Genesis of Microbially Induced Sedimentary Structures (MISS) in Sediments of the Lagoa Vermelha (Região dos Lagos – Rio de Janeiro)

Lorena da Fonseca Sampaio;
 Patrick Francisco Führ Dal' Bó & Leonardo Borghi

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Laboratório de Geologia Sedimentar -LAGESD. Av. Athos da Silveira Ramos, 274 – Bloco J1. Cidade Universitária, Ilha do Fundão, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-mails: lorenafsampaio1@gmail.com; patrickdalbo@geologia.ufrj.br; lborghi@geologia.ufrj.br

Recebido em: 27/08/2014 Aprovado em: 10/03/2015

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2015_1_95_106

Resumo

As *MISS* são estruturas sedimentares primárias formadas pela interação de biofilmes e esteiras microbianas com sedimentos. O desconhecimento dos critérios que permitem a identificação dessas estruturas no registro geológico dificulta seu amplo reconhecimento, sendo por vezes confundidas com estruturas físicas de deposição e erosão. Historicamente, a Lagoa Vermelha é reconhecida por estudos biológicos, mineralógicos, geoquímicos e isotópicos, relacionados a estromatólitos e esteiras microbianas. Contudo, as estruturas sedimentares induzidas por atividade microbiana nunca foram objeto de estudo. Dessa forma, o presente estudo objetiva a análise e caracterização das *MISS* que ocorrem nos sedimentos da Lagoa Vermelha, reconhecendo os principais fatores biossedimentológicos envolvidos em sua gênese. Foi possível a distinção de onze estruturas resultantes dos processos de crescimento microbiano (estrutura de nivelamento laminada), bioestabilização (gretas de dessecação; *mat curls*; *mat chips*), metabolismo da esteira (biolaminito; estromatólito; estromatólito *biscuit*; nódulo trombolítico), *binding*, *baffling* e *trapping* e estruturas resultantes de mais de uma atividade microbiana interagindo com a dinâmica sedimentar (*wrinkles*; estrutura de descolamento; *petees*). Análises petrográficas permitiram o reconhecimento dessas estruturas em microescala e de outras feições organossedimentares associadas à atividade microbiana. Os resultados gerados permitem a melhor compreensão da interação entre processos microbianos e fatores ambientais atuantes na formação de estruturas sedimentares induzidas por micro-organismos, bem como, auxiliam seu reconhecimento no registro geológico em sucessões continentais e marinhas.

Palavras-chave: MISS; Lagoa Vermelha; Sedimentação Carbonática

Abstract

MISS are primary sedimentary structures formed by interactions between biofilms and microbial mats with physical and chemical dynamics of sediments. Recognizing these structures in the geologic record are difficult because there are no criteria of identification, and sometimes they can be confused with other depositional or erosional physical structures. During the last decades, lots of biological, mineralogical, geochemicals and isotopic studies related to stromatolites and microbial mats were performed in the Lagoa Vermelha. However, the sedimentary structures formed by microbial induction (MISS) have never been the subject of these studies. The aim of this study is the description and characterization of MISS that occur in sediments of the Lagoa Vermelha, and recognize the main biosedimentological factors involved on their genesis. MISS were recognized macroscopically in the field and cores. The main processes recognized are microbial growth (that form laminated leveling structures), bioestabilization (that form desiccation cracks, mat curls, mat chips), metabolism (that form biolaminite, stromatolite, biscuit stromatolite, thrombolytic nodule) and binding, baffling & trapping. The combination of processes can also produce structures (wrinkles, detachment structure, petees). Petrographic analysis supported the identification of binding, baffling & trapping processes and others microscopic microbial features. The results allow a better understanding of the relationship between microbial mats and physical and chemical processes in a lagoon sedimentary environment. The recognition of these structures formed by microbial induction in modern environments helps their recognition in the geologic record of continental and marine successions.

Keywords: MISS; Lagoa Vermelha; Carbonate Sedimentation

1 Introdução

As MISS (*Microbially Induced Sedimentary Structures*) são estruturas sedimentares primárias, formadas pela interação de biofilmes e esteiras microbianas com a dinâmica sedimentar física e química, e foram primeiramente reconhecidas por Kalkowsky (1908), que as denominou de “estromatólitos”, e posteriormente por Black (1933), que as classificou como sedimentos “algais” em trabalho realizado na Ilha de Andros, Bahamas. Estas estruturas abrangem uma nova categoria de estruturas sedimentares primárias (Nofke *et al.*, 2003), também conhecidas como *mat related structures* (MRS) (Chakraborty *et al.*, 2012). Segundo Nofke (2010), tais estruturas restringem-se a ambientes de sedimentação siliciclásticos, a partir da colonização do substrato por microbiotas bêmicas que, por meio da produção da substância polimérica extracelular (EPS) e formação de lâminas orgânicas, respondem de modo diferenciado aos processos físicos. Entretanto, no presente estudo, o conceito de MISS é utilizado em senso mais amplo (Hoffman, 1976; Riding, 2000), abarcando todas as estruturas sedimentares formadas por indução microbiana relacionadas a ambientes de sedimentação siliciclásticos, carbonáticos ou evaporíticos.

Embora pouco conhecidas e estudadas pela comunidade geocientífica internacional, as MISS são estruturas frequentes em sucessões sedimentares do Arqueano ao Cenozoico e, em ambientes de deposição atuais (*e.g.*, planícies de supramaré, lagunas, interdunas úmidas, etc.). O desconhecimento dos critérios que permitem a identificação dessas estruturas dificulta seu amplo reconhecimento no registro geológico e, por vezes, essas são confundidas com outras estruturas físicas de deposição e erosão, ou até mesmo com icnofósseis (Nofke *et al.*, 2003; Nofke, 2010; Chakraborty *et al.*, 2012).

A Lagoa Vermelha é uma área em sedimentação de grande importância no cenário nacional e internacional devido a vasta ocorrência de estruturas microbianas e estromatólitos que ocorrem em suas margens e interior. Historicamente, muitos estudos de caráter biológico (Silva e Silva *et al.*, 2007), geoquímico e isotópico (Santelli *et al.*, 2006) e mineralógico (Vasconcelos *et al.*, 1995; Van Lith *et al.*, 2003), foram desenvolvidos nas esteiras microbianas e estromatólitos; contudo, as estruturas

sedimentares formadas por indução microbiana nunca foram objeto de estudo.

O objetivo do presente estudo é a análise e caracterização das MISS que ocorrem nos sedimentos da Lagoa Vermelha, reconhecendo os principais fatores biossedimentológicos envolvidos em sua gênese.

2 Materiais e Métodos

A caracterização das MISS foi realizada em duas etapas. A primeira consistiu em atividades de campo, nas quais foram descritas estruturas localizadas na região nordeste da lagoa, tanto em suas margens quanto no interior.

Nesta etapa, foram realizadas medições e descrições macroscópicas das estruturas observadas em superfície, bem como, registro fotográfico e coleta de amostras representativas das principais feições e estruturas microbianas.

A segunda etapa consistiu na descrição de testemunhos rasos de sondagem. As sondagens foram realizadas por vibracorer em diferentes pontos do interior da lagoa, onde foram coletados dez testemunhos de cerca de 1 metro de altura, totalizando 12,7 metros. Desses, apenas 3 foram objeto de estudo deste trabalho (LV-01, LV-02 e LV-10).

Nos testemunhos, a descrição foi realizada em escala 1:1, e seguiu o método de análise de fácies (WALKER, 2006), considerando os principais atributos sedimentares, tais como: litologia, textura, estruturas sedimentares, cor e composição biótica. Lâminas delgadas foram confeccionadas nos principais intervalos de interesse.

A caracterização das MISS foi baseada na comparação das feições morfológicas descritas e estruturas observadas, com fotos e descrições de estruturas descritas na literatura. As comparações com as feições morfoestruturais foram realizadas com base nos trabalhos de Hoffmann (1976), Bottjer & Hagadorn (2007), Eriksson *et al.* (2007), Gerdes (2007), Porada *et al.* (2007), Nofke (2010) e Terra *et al.* (2010).

3 Área de Estudo

A Lagoa Vermelha está localizada no estado do Rio de Janeiro, na região dos Lagos, entre os

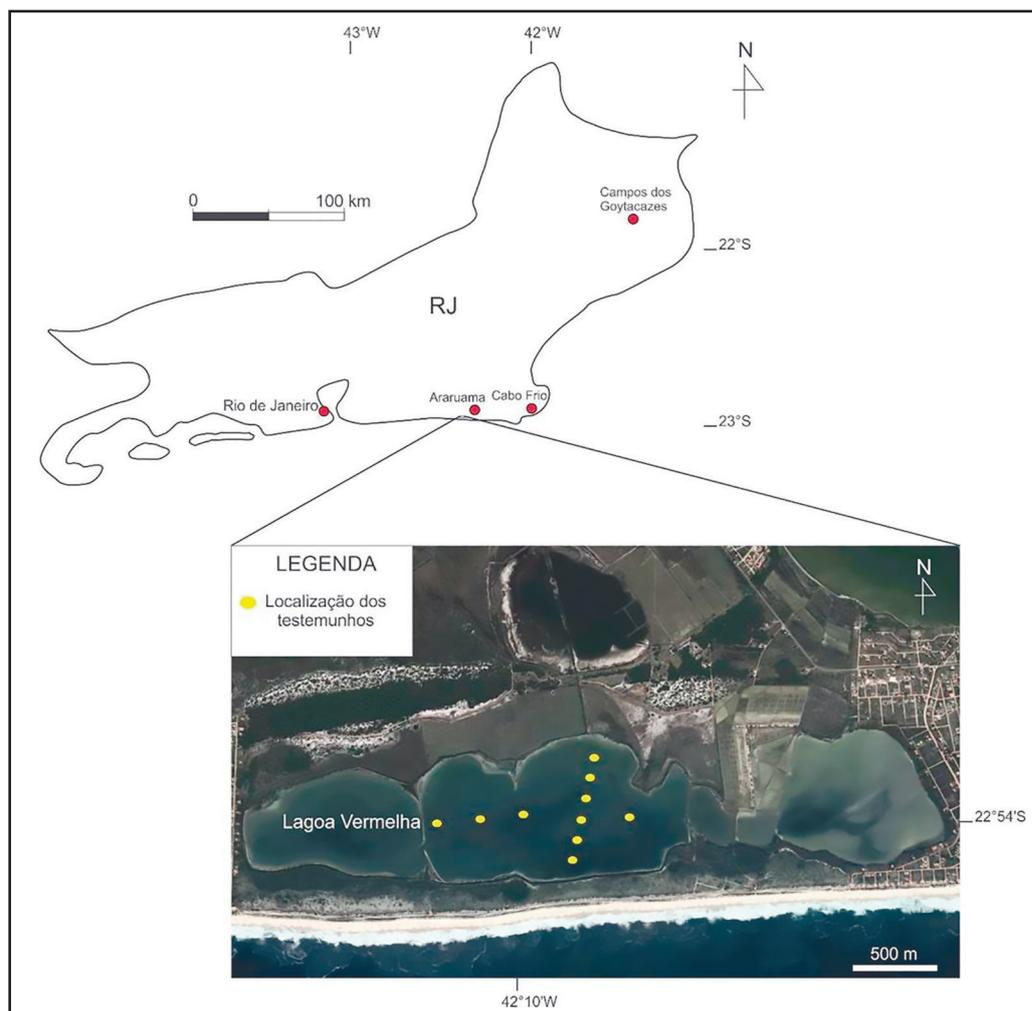


Figura 1 Mapa de localização da Lagoa Vermelha. Na imagem de satélite da lagoa estão representados os pontos de coleta dos testemunhos.

municípios de Araruama e Saquarema, compreendida entre as coordenadas geográficas $22^{\circ}55'44''$ S e $42^{\circ}23'29''$ W (Figura 1).

A Lagoa Vermelha possui 3 km^2 de área, cerca de 1 metro de profundidade e $3 \times 10^3 \text{ m}^3$ de volume de água (Kjerfve & Knoppers, 1999). O balanço hídrico é controlado pela precipitação, evaporação e entrada de águas subterrâneas de origem marinha e continental levando a expressivas variações de volume, profundidade e salinidade (Maddock, 1999).

A lagoa está inserida num contexto climático de transição entre o clima tropical com chuvas de verão e seca de inverno, e o semiárido quente, com o predomínio de ventos de direção nordeste ao longo do ano com variações na velocidade, que se intensifica no período inverno/primavera. Devido à pouca profundidade da lagoa e a forte ação dos ventos na região, a coluna d'água não se apresenta estratificada (Höhn *et al.*, 1986).

Na Lagoa Vermelha, as esteiras microbianas ocorrem distribuídas ao longo das margens, e podem alcançar até 30-40 m de extensão para o interior da lagoa (Höhn *et al.*, 1986), constituindo um assoalho coberto por tapetes algais laminados, gelatinoso e com 2-8 cm de espessura. Em épocas de seca, em consequência da acentuada evaporação, a lagoa tem seu volume de água reduzido, expondo o tapete algal (Santelli, 1988).

4 Resultados

Foram caracterizadas macroscopicamente onze estruturas sedimentares induzidas por atividade microbiana na Lagoa Vermelha, sendo oito reconhecidas em afloramentos, duas em testemunhos e uma tanto em afloramento quanto em testemunho.

Em campo, a observação das morfologias das estruturas foi possível devido ao frequente

reconhecimento de esteiras microbianas como parte integrante das estruturas, tornando clara a influência dos agentes microbiais. Onde as esteiras não estavam nitidamente preservadas, as descrições e fotos fornecidas pela literatura foram decisivas à diagnose.

As MISS foram observadas em sedimentos lamosos e arenosos, e quase sempre ocorrem associadas à carbonatos.

4.1 Estruturas Resultantes do Processo de Bioestabilização

As estruturas resultantes de bioestabilização observadas na Lagoa Vermelha foram gretas de dessecação, *mat curls* e *mat chips*. Tais estruturas ocorrem espacialmente associadas em regiões marginais da lagoa que foram submetidas à exposição subaérea, já que essas estruturas resultam, primeiramente, do dessecação e, conseqüente encolhimento da esteira.

O processo de bioestabilização é considerado a resposta da esteira microbiana ou biofilmes à erosão e também o comportamento flexível – biologicamente controlado – de uma camada de sedimentos que, caso não houvesse influência de fatores biológicos, seria rúptil (Nofke, 2010). A estabilização dos sedimentos é influenciada pela produção de EPS por micro-organismos viventes nos poros e superfícies sedimentares (Paterson & Black, 2000). A bioestabilização de uma camada sedimentar também pode

ocasionar a impermeabilização dessa superfície, impossibilitando a trocas de gases e fluidos entre sedimentos e a atmosfera (Nofke, 2010).

4.1.1 Gretas de Dessecação

As gretas observadas possuem de 15 a 25 cm de diâmetro e tem como característica as bordas contorcidas. Essas estruturas são formadas a partir de esteiras microbianas que se rompem e que podem ter suas bordas contorcidas tanto para cima quanto para baixo, enquanto sua porção interna/central permanece não-deformada, lisa e, por vezes, aderida ao substrato. Esse comportamento é mais comum em gretas de dimensões em torno de 25 cm, pois, quando são menores (ca. 15 cm), a deformação chega ao centro e a estrutura se torna totalmente contorcida e não mais aderida a superfície sotoposta. Conjuntamente a isso, as gretas de dessecação também são reconhecidas pelo substrato subjacente a elas sempre exposto, devido ao movimento de encolhimento da esteira (Figura 2).

De acordo com Gerdes (2007), as gretas de dessecação associadas as esteiras microbianas apresentam morfologias distintas daquelas observadas em superfícies não-bioestabilizadas, devido a imperfeições e variações locais na espessura da esteira microbiana.

4.1.2 Mat curls

Mat curls são estruturas associadas às gretas de dessecação, e se formam também em períodos

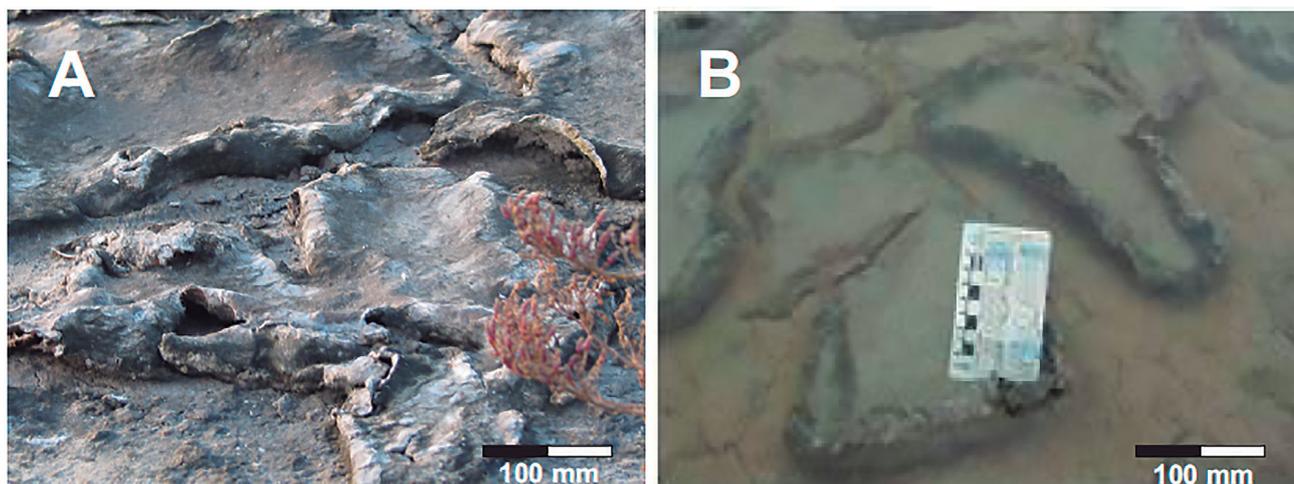


Figura 2 Gretas de dessecação. A. Gretas de dessecação com bordas deformadas para baixo da estrutura, em região marginal da lagoa; B. Gretas de dessecação submersas, com bordas deformadas para cima da própria estrutura.

de seca no ambiente. Nas gretas de dessecação de dimensões entre 10 e 15 cm, devido à intensa deformação de suas bordas, a estrutura formada passa a adquirir a feição de uma folha enrolada (Figura 3A).

As *mat curls* refletem o comportamento coesivo e flexível das esteiras microbianas, as quais podem ter seus fragmentos erodidos e retrabalhados, constituindo *mat chips*. As bordas evertidas das *mat curls* colaboram para a distinção entre os processos de coesão associada a cimentação sin-sedimentar, e a coesão gerada pelo processo de ligação em esteiras, referenciado como *binding* (Schieber, 1999).

4.1.3 Mat chips

Mat chips correspondem a fragmentos de esteiras de aproximadamente 5 cm, os quais são erodidos, retrabalhados e dispostos aleatoriamente no ambiente de sedimentação da lagoa (Figura 3B).

Na Lagoa Vermelha, os processos que levaram a separação desses fragmentos foram de pouca energia, pois as *mat chips* remobilizadas permaneceram sobre as esteiras originais. Posteriormente, os fragmentos das *mat chips* podem vir a ser transportados para outros locais dentro do ambiente de sedimentação.

4.2 Estruturas Resultantes do Processo de Crescimento Microbial

Segundo Nofke (2010), o processo de crescimento microbial está relacionado ao enriquecimento de biomassa por replicação

celular e é controlado não somente por parâmetros sedimentológicos, mas também por luminosidade, temperatura, umidade e disponibilidade de nutrientes. Eventos de sedimentação induzem o processo de crescimento por estimular a migração dos organismos formadores das esteiras em direção ascendente à nova superfície sedimentar, buscando luminosidade, e conseqüentemente, estabilizando novamente o substrato (Gerdes, 2010). A continuidade desse processo pode formar estruturas de nivelamento laminadas e grãos orientados.

4.2.1 Estrutura de Nivelamento Laminada

As estruturas de nivelamento laminadas representam esteiras microbianas que colonizam e modelam a superfície sedimentar. São caracterizadas por sucessões de lâminas de esteiras microbianas acrescidas sobre a superfície deposicional.

O conjunto de lâminas observado possui cerca de 2 cm de espessura, forma ondulada em seu limite inferior e limite superior plano (Figura 4).

A esteira microbiana é constituída por bactérias epibênticas, pois as laminações orgânicas que ocorrem sobre a superfície sedimentar são evidentes. A ondulação observada corresponde a morfologia do substrato. É possível que as laminações mascarem alguma outra estrutura ou forma de leito pré-existente, devido a sua forma ondulada nas laminações basais. Segundo Gerdes (2007), essa estrutura ocorre porque os biofilmes não foram coesos o suficiente para modificar as estruturas físicas primárias.

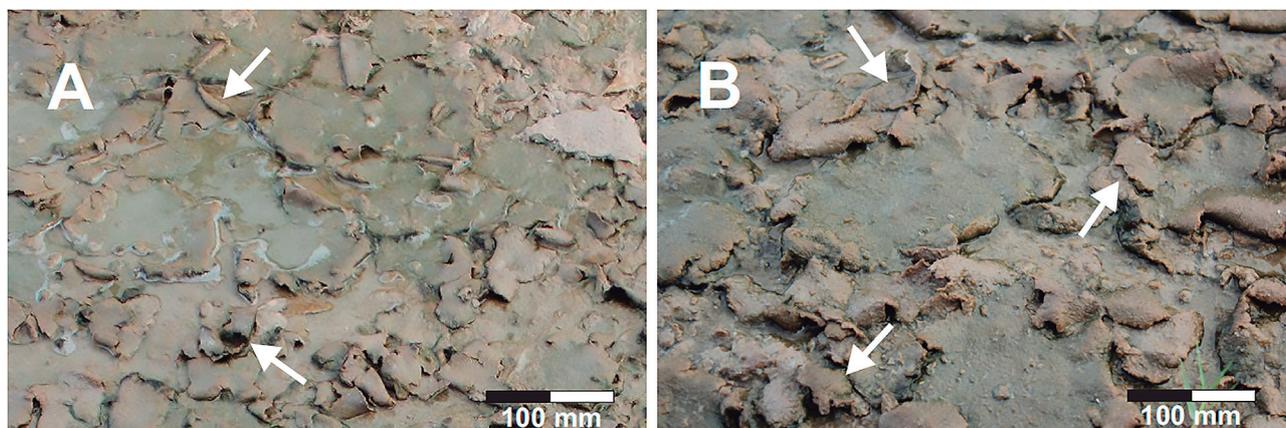


Figura 3 Esteiras microbianas conferem propriedades flexíveis e coesivas à superfícies sedimentares, que ao perderem água podem ter suas margens enroladas, gerando *mat curls* (A), e ao serem submetidas a processos de erosão podem ser fragmentadas, gerando *mat chips* (B).



Figura 4 Estrutura de nivelamento laminada.

4.3 Estruturas Resultantes do Metabolismo da Esteira Microbiana

Biolaminitos, estromatólitos, estromatólitos *biscuit* e trombólitos foram as estruturas observadas na Lagoa Vermelha resultantes da atividade metabólica dos micro-organismos presentes nas esteiras microbianas.

Esse grupo de estruturas abrange produtos primários de calcificação, aglutinação microbial e litificação precoce, associados a crescimento sazonal, sedimentação periódica ou ambos. A formação de estruturas calcificadas pode ocorrer por: i) degradação de matéria orgânica sob a esteira microbiana por bactérias heterotróficas, as quais criam microambientes propícios a precipitação de carbonato; ii) calcificação de cianobactérias como resultado da criação de gradientes de alcalinidade dentro da bainha de mucilagem (EPS) pela absorção de CO_2 fotossintético e/ou HCO_3^- ; iii) atração de íons de cálcio por regiões negativamente carregadas dentro da bainha de EPS. Tais processos são muito importantes na litificação de esteiras microbianas, pela precipitação de grãos muito finos (Riding, 2000).

4.3.1 Biolaminitos

Os biolaminitos foram observados em trincheiras rasas, de aproximadamente 30 cm de profundidade, escavadas nas margens da lagoa e nos testemunhos de sondagem. Os biolaminitos são caracterizados pela intercalação de lâminas claras de carbonato de cálcio com lâminas escuras constituídas

por esteiras microbianas. Macroscopicamente, formam laminações com configuração lisa ou crenulada (Figura 5).

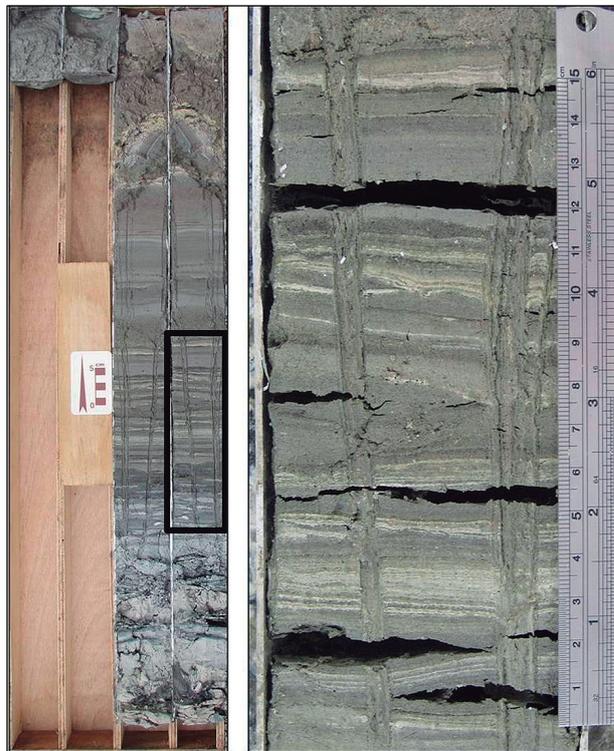


Figura 5 Biolaminito. Intercalações milimétricas de carbonato de cálcio e esteira microbiana. Testemunho LV-01.

Os biolaminitos são influenciados pela sazonalidade, a qual provoca períodos de maior e menor evaporação, alterações de salinidade, profundidade da lâmina d'água e, conseqüentemente, flutuações na intensidade de luz. As lâminas escuras são formadas por cianobactérias filamentosas, enquanto as claras são formadas por cianobactérias cocoides, grandes quantidades de EPS e intercalações de minerais autigênicos. No inverno, as espécies filamentosas se beneficiam com a diminuição da intensidade de luz e aumento da profundidade de lâmina d'água, ultrapassando as cocoides (Gerdes, 2007, 2010).

Microscopicamente, o padrão de laminação observado nos biolaminitos é formado pela intercalação de carbonato peloidal na forma de aglomerados grumosos cimentados por carbonato microcristalino e matéria orgânica de esteiras microbianas (Figura 6A e B). O aglomerado de carbonato de cálcio de textura grumosa (*clotted*)

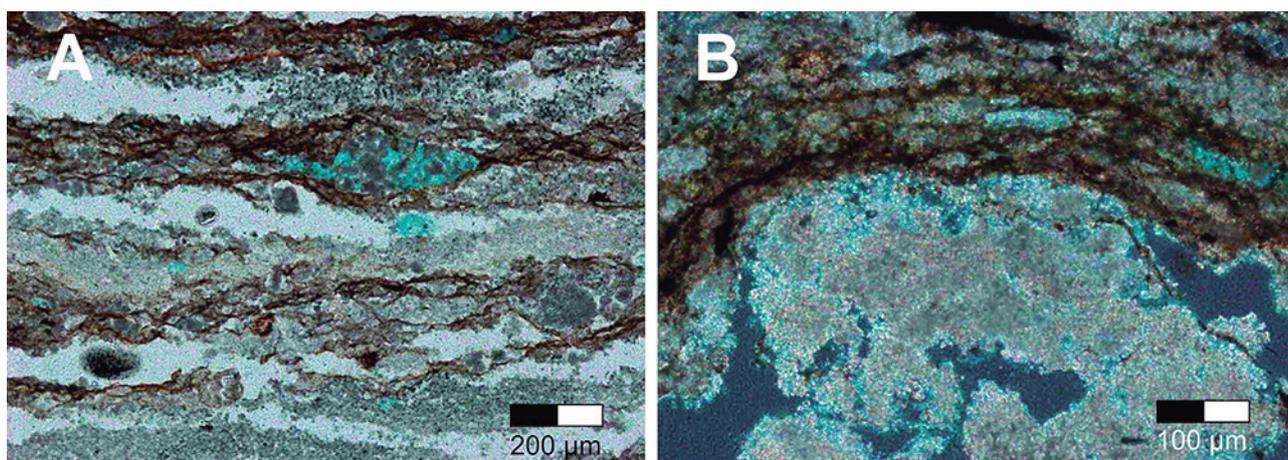


Figura 6 A. Biolaminito. Intercalação de lâminas de esteiras microbianas e carbonato peloidal. Fotomicrografia sob nicóis paralelos. Testemunho LV-01 (55 cm de profundidade); B. Esteiras microbianas sobre- e intercrescidas a um aglomerado de carbonato de cálcio peloidal de textura grumosa e cimentado por carbonato microcristalino. Fotomicrografia sob nicóis cruzados. Testemunho LV-10 (95 cm de profundidade).

é interpretado como produto de cianobactérias calcificadas dentro da bainha de mucilagem produzida pelo EPS e, posteriormente, cimentadas por carbonato microcristalino (Riding, 2000).

A partir da associação das esteiras com os aglomerados carbonáticos é possível atestar que a textura grumosa é produzida pelos micro-organismos formadores das esteiras. Ademais, a recorrência da textura grumosa em todos os intervalos nos quais foram realizadas análises petrográficas, vem corroborar a interpretação de que esses micro-organismos representam a principal fonte de sedimentação carbonática na Lagoa Vermelha.

Em alguns casos, as lâminas orgânicas podem apresentar substituição por lâminas crenuladas de fosfato (Figura 7A). Tal processo ocorre devido a momentos de eutrofização na lagoa, que disponibiliza fosfato para ser absorvido pelos micro-organismos dentro da bainha de mucilagem do EPS. As laminações apresentam tonalidades amarronzadas e são isotrópicas em nicóis cruzados devido à presença de matéria orgânica e óxidos de ferro (Flügel, 2010).

A micritização de carapaças de organismos, como bivalvíos, briozoários e foraminíferos, por bactérias é um processo comum verificado em diversas lâminas (Figura 7B) e, resulta na disponibilização de íons de cálcio para o ambiente, que pode se ligar a outros íons carregados negativamente e contribuir para a sedimentação carbonática na Lagoa Vermelha. As bactérias intermediam esse ciclo.

As relações existentes entre biofilmes e partículas sedimentares são reconhecidas em

lâminas petrográficas, por meio da formação de tramas de aprisionamento – *baffling* e *trapping* – de sedimentos e grãos esqueléticos. Essas tramas são formadas a partir do contínuo desenvolvimento das esteiras microbianas, as quais circundam e aglutinam partículas pelo processo de *binding* (Figura 7C e D) (Gerdes, 2010).

Como as laminações são associadas a variações ambientais sazonais, estas podem ser denominadas de bioarvitos (Gerdes *et al.*, 2000). As laminações descritas neste trabalho, são semelhantes àquelas descritas por Terra *et al.* (2010) em biolaminitos lisos e crenulados da Formação Barra Velha – seção pré-sal da Bacia de Santos e constituem feições associadas à ação microbiana (Riding, 2000).

4.3.2 Estromatólitos

Os estromatólitos observados apresentam dimensões que variam de 10 a 25 cm de comprimento e 5 a 10 cm de altura. Possuem laminações milimétricas, por vezes intercaladas com intervalos terrígenos, os quais são constituídos por grãos quartzosos e poucos bivalvíos, fragmentados ou não. O material terrígeno é cimentado por carbonato de cálcio e as laminações ocorrem frequentemente bioerodidas.

Os estromatólitos apresentam forma muito peculiar, cujas bordas são lâminas convolutas dobradas para baixo da estrutura, enquanto a porção central é plana (Figura 8A).

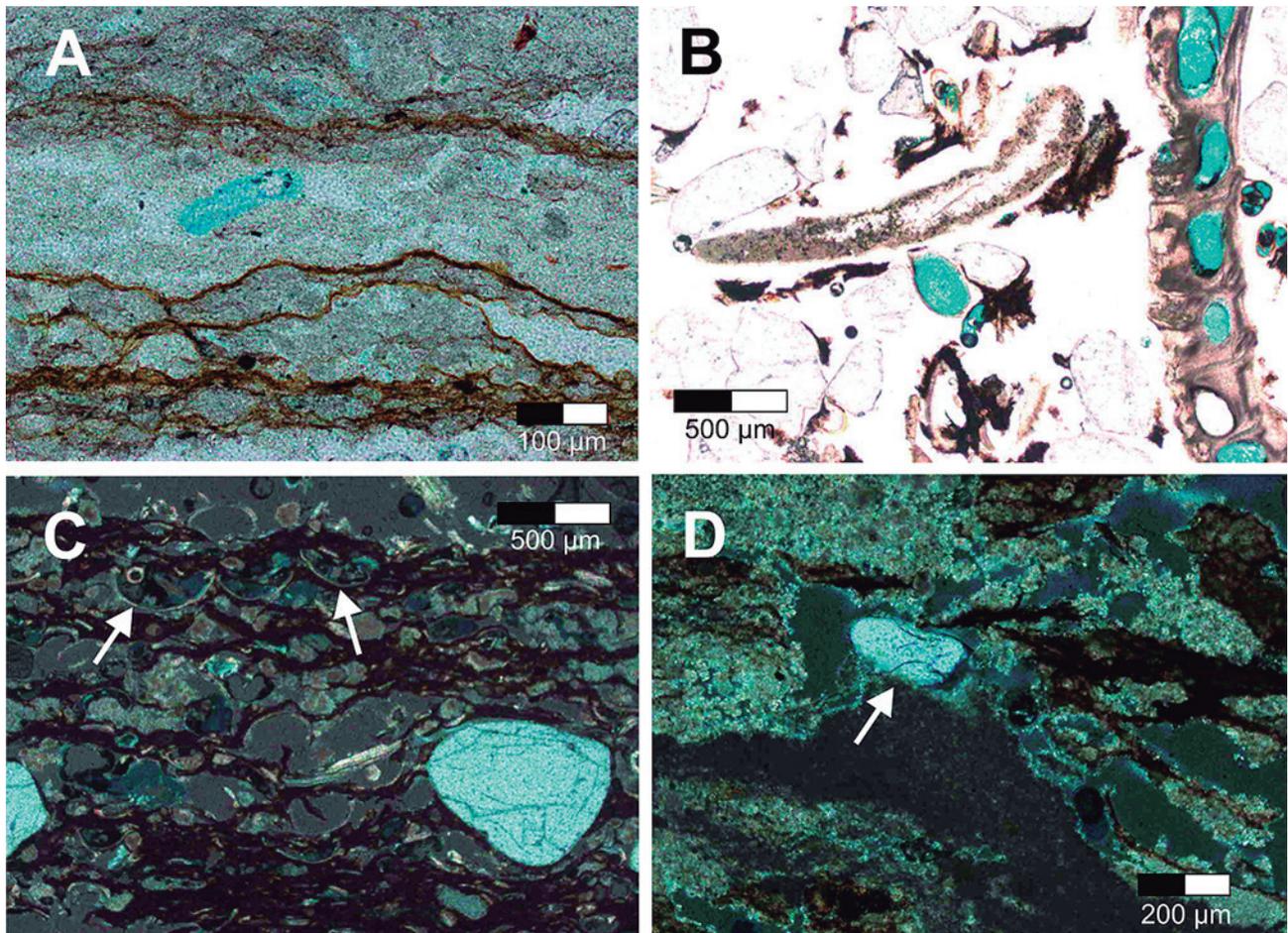


Figura 7 A. Laminações orgânicas fosfatadas. Fotomicrografia com nicóis paralelos. Testemunho LV-01 (55 cm de profundidade); B. Carapaças carbonáticas micritizadas. Fotomicrografia com nicóis paralelos. Testemunho LV-10 (95 cm de profundidade); C. Partículas sedimentares e carapaças carbonáticas aprisionadas e aglutinadas por esteiras microbianas. Fotomicrografia com nicóis cruzados. Testemunho LV-10 (95 cm de profundidade); D. Grão de quartzo aprisionado por esteira microbiana. Fotomicrografia com nicóis cruzados. Testemunho LV-01 (55 cm de profundidade).

A morfologia peculiar possivelmente reflete a forma original da esteira microbiana precursora, a qual adquiriu esse formato, primeiramente, em resposta a um período de baixa pluviosidade na lagoa, que ocasionou seu rompimento em gretas. Por conseguinte, um período de maior disponibilidade

hídrica ocasionou em rápido desenvolvimento das esteiras, que cresceram colonizando e envolvendo sua própria superfície precursora (Figura 8B). A sucessiva repetição desse processo, associada a processos de calcificação, resultou na forma convoluta das bordas do estromatólito.

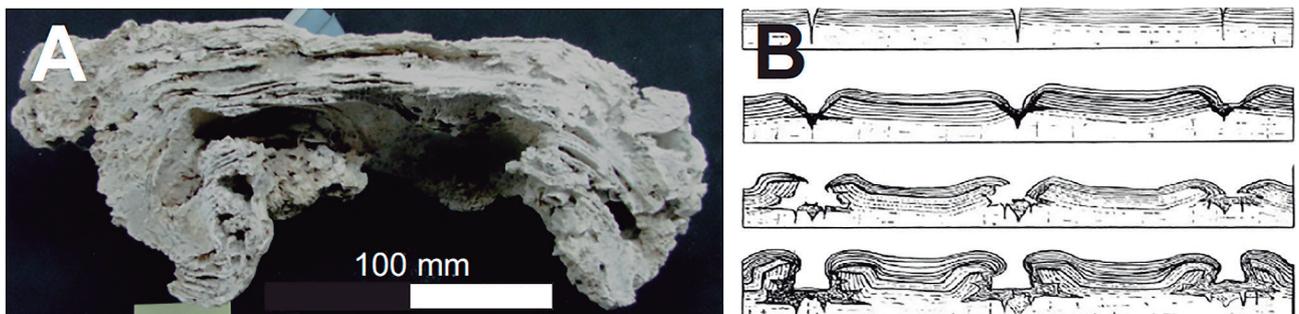


Figura 8 A. Morfologia de estromatólito estudado na Lagoa Vermelha, com bordas dobradas para baixo da estrutura; B – Processo de formação do estromatólito de Lagoa Vermelha, a partir do desenvolvimento de esteiras microbianas (Black, 1933).

4.3.3 Estromatólitos *biscuit*

Os estromatólitos *biscuit* são frequentes na Lagoa Vermelha e ocorrem tanto em superfície quanto em testemunhos. Esses estromatólitos são caracterizados por crostas carbonáticas litificadas, de 5 a 10 cm de diâmetro, constituídas por laminações milimétricas, irregulares e descontínuas de carbonato de cálcio formado por processos de litificação precoce de esteiras microbianas. Segundo Alves (2007), os estromatólitos *biscuit* observados na Lagoa Vermelha podem apresentar formas côncavas, convexas, mistas (formas côncavas e convexas na mesma amostra) ou irregulares (as quais não apresentam nenhuma destas feições citadas).



Figura 9 Nódulo trombolítico descrito em testemunho. Observar a interrupção das biolaminações pelo aglomerado de carbonato de cálcio. Testemunho LV-02.

4.3.4 Nódulos Trombolíticos

Os nódulos trombolíticos correspondem a aglomerados de carbonato de cálcio não litificado, de formato elíptico, sem organização em lâminas, textura coagulada, porosa e que trunca lateralmente biolaminitos (Figura 9).

Em lâmina petrográfica, apresentam um acúmulo grumoso de material peloidal cimentado por calcita microcristalina (Figura 10A e B).

Os nódulos trombolíticos e estromatólitos *biscuit* são interpretados como formados a partir da precipitação de carbonato dentro da bainha de mucilagem do EPS (Riding, 2000). A ausência de laminações observada macroscopicamente nos nódulos carbonáticos, se repete em lâmina petrográfica.

4.4 Estruturas Resultantes da Interação de Mais de Uma Atividade Microbial

4.4.1 *Wrinkles*

As *wrinkles*, juntamente com as estruturas de descolamento e *petees*, fazem parte das estruturas formadas por mais de uma atividade microbial interagindo com a dinâmica sedimentar física (Nofke, 2010).

As *wrinkles* observadas na área de estudo estão localizadas nas margens da lagoa. As estruturas possuem aspecto deformado em formato poligonal com diâmetros de 20 a 60 cm e são

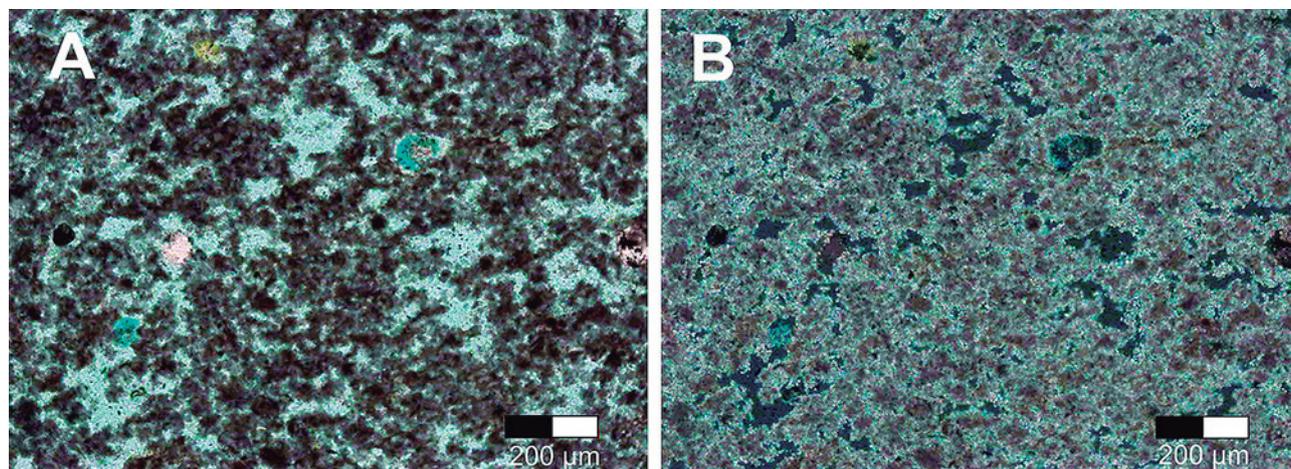


Figura 10 Fotomicrografia de nódulos trombolíticos exibindo material peloidal de textura grumosa cimentado por calcita microcristalina. A. Nicóis paralelos; B. Nicóis cruzados. Testemunho LV-02 (15 cm de profundidade).



Figura 11 *Wrinkles* observadas em sedimentos areno-lamosos das margens da lagoa. Notar a aparência enrugada adquirida pela esteira microbiana.

caracterizadas pelo aspecto enrugado e sinuoso da esteira microbiana, que ocorre em sedimentos areno-lamosos (Figura 11). A esteira microbiana nem sempre é reconhecida, apesar da deformação flexível da superfície sedimentar atestar sua presença.

As *wrinkles* podem ter origens diversas (Bottjer & Hagadorn, 2007). Apesar de Nofke (2010) assumir que *wrinkles* são estruturas formadas por processos pós-deposicionais, ligados a expulsão lateral de água por uma esteira microbiana soterrada; no caso da Lagoa Vermelha, essas estruturas foram interpretadas como formadas por atuação de forças tratativas sobre a esteira não completamente aderida ao substrato devido à elevação no nível do lençol freático (Bouougri *et al.*, 2007).

4.4.2 Estrutura de Descolamento

Em uma área marginal alagada da lagoa, foi possível observar esteiras microbianas finas e flexíveis descoladas e flutuando sobre o substrato. As esteiras apresentam rompimento em forma de polígonos de cerca de 20 cm de diâmetro e bordas por vezes dobradas e evertidas (Figura 12A).

As esteiras microbianas podem constituir zonas contínuas e coesas que impermeabilizam a interface sedimento-atmosfera impossibilitando a perda de água do substrato por evaporação. Esse mecanismo faz com que a camada de sedimentos saturada em água sob a esteira funcione como um aquífero confinado (Porada *et al.*, 2007). Quando a pressão subjacente ultrapassa a resistência da esteira microbiana, a mesma pode se romper e descolar do

substrato, formando as denominadas estruturas de descolamento observadas na Lagoa Vermelha.

Os processos que dão origem as estruturas de descolamento podem ser os mesmos que resultam na formação dos remanescentes erosivos de Nofke (2010). O local onde as esteiras descoladas do substrato foram observadas foi inundado além do ponto de saturação, culminando com o descolamento completo das esteiras microbianas, não restando nenhum remanescente. Provavelmente, as estruturas “remanescentes erosivos” são formadas em algum momento anterior ou posterior ao descolamento de todas as esteiras.

4.4.3 *Petees*

Na área de estudo, os *petees* constituem estruturas convolutas que ocorrem espacialmente associadas com estruturas de descolamento e foram associados a períodos de maior pluviosidade atmosférica.

Essas estruturas são caracterizadas por domos e dobras que ocorrem nas porções centrais de esteiras rompidas em forma de polígonos, alcançando até 2 cm de comprimento para o topo (Figura 12B).

Essas estruturas podem ter sido formadas tanto por deformação associada a processos físicos das esteiras que flutuam sobre fina lâmina d'água (como ação de ventos e correntes), quanto pelo contínuo desenvolvimento e crescimento das esteiras microbianas durante e após seu descolamento (Reineck *et al.*, 1990).

5 Considerações Finais

Neste trabalho foram caracterizadas onze estruturas sedimentares formadas por atividade microbiana na Lagoa Vermelha. O reconhecimento de tais estruturas é de grande importância para a caracterização geológica regional, pois nunca antes foram descritas na região.

O estudo das *MISS* na Lagoa Vermelha possibilitou a distinção de estruturas microbianas de acordo com os respectivos processos microbiais que as formam, conforme o diagrama abaixo (Figura 13).

Os parâmetros ambientais, tais como salinidade, temperatura da água, clima semiárido

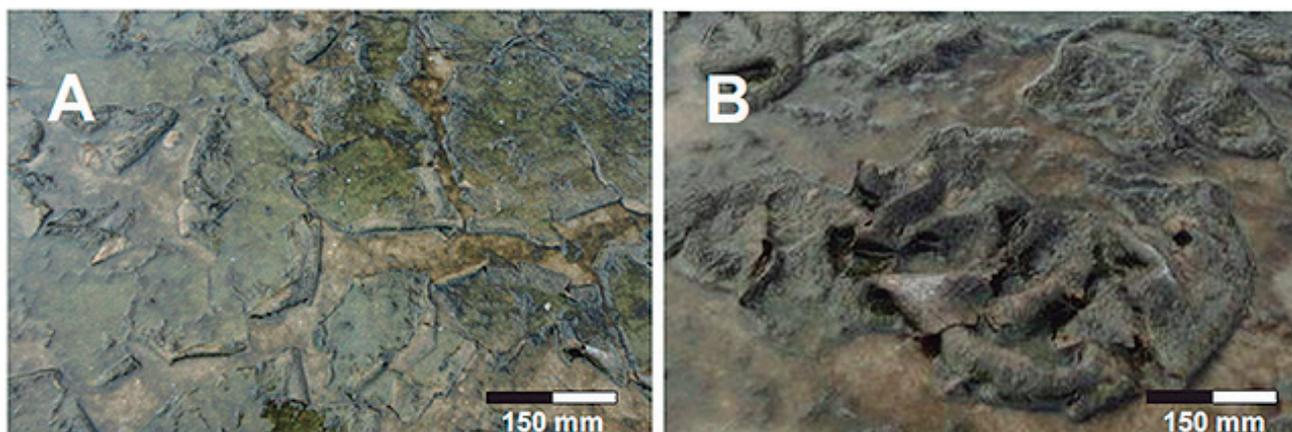


Figura 12 A. Esteiras microbianas descoladas do substrato devido ao aumento da pressão nos sedimentos confinados sob a esteira; B. Esteira microbiana deformada pela ação de processos físicos ou por seu contínuo desenvolvimento após o processo de descolamento; resultando em domos e dobras.

e aporte sedimentar, associados aos processos físicos, controlam a atividade das biotas, e consequentemente, o comportamento das esteiras na lagoa e a precipitação de carbonato. As estruturas que não apresentam precipitação de carbonato e, portanto, não são litificadas precocemente, possuem menor potencial de preservação.

A precipitação de carbonato bioinduzido, constatada pela relação entre as esteiras microbianas e aglomerados carbonáticos grumosos, representa a principal fonte de sedimentação carbonática na Lagoa Vermelha.

A integração de diversas ferramentas de estudo para o entendimento da maneira como as esteiras microbianas respondem às diferentes condições ambientais e do papel desempenhado por elas no aprisionamento de partículas sedimentares – em microescala - e por consequência na formação de estruturas sedimentares primárias – em mesoescala, foi de fundamental importância para o entendimento dos processos físicos, químicos e biológicos que resultaram na formação das MISS.

As pesquisas com MISS ainda carecem de sistema de nomenclatura consolidado de termos e conceitos biossedimentológicos, pois considerando o ineditismo do assunto na geologia nacional ainda não há consenso nomenclatural entre os autores, e a literatura internacional oferece vasta profusão nomenclatural, que oscila de acordo com os objetivos de cada estudo.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem a PETROBRAS, através do projeto “Caracterização estratigráfica, sedimentológica, geoquímica e de fácies orgânica das lagoas Salgada, Vermelha e Brejo do Espinho – Parte II”, pelo uso dos testemunhos e dados das figuras 5, 6, 7, 9 e 10.

7 Referências

- Alves, S.A.P.M. 2007. *Estudo geomicrobiológico dos estromatólitos biscoit da Lagoa Vermelha (estado do Rio de Janeiro – Brasil)*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 141 p.
- Black, M. 1933. The algal sediments of Andros Island, Bahamas.

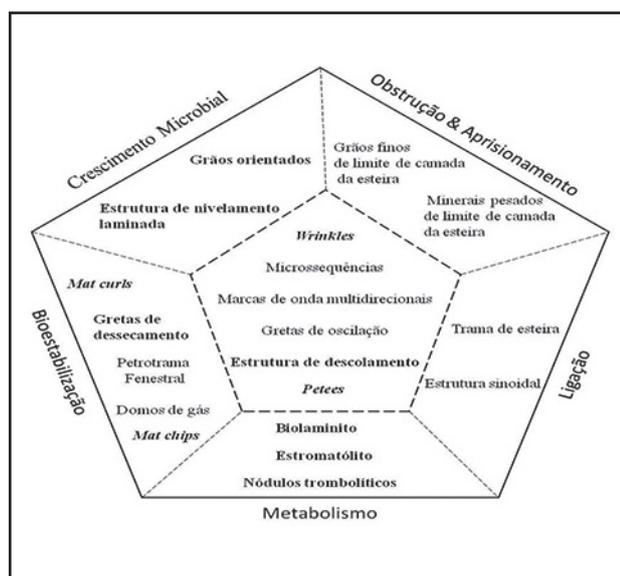


Figura 13 Diagrama de classificação de MISS, com as estruturas observadas na lagoa destacadas em negrito (Modificado de Nofke, 2010).

Gênese e Morfologia de Estruturas Sedimentares Induzidas por Atividade Microbiana (MISS) em Sedimentos da Lagoa Vermelha (Região dos Lagos – Rio de Janeiro)

Lorena da Fonseca Sampaio; Patrick Francisco Führ Dal' Bó & Leonardo Borghi

- Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B*, 222: 165-192.
- Bottjer, D. & Hagadorn, J.W. 2007. Mat features in sandstone. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W. & CATUNEANU, O. (eds.). *Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliciclastic Rock Record*. Amsterdam, Elsevier, p. 53-71.
- Bouougri, E.; Gerdes, G. & Porada, H. 2007. 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, O. (eds.). *Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliciclastic Rock Record*. Amsterdam, Elsevier, p. 145-152.
- Chakraborty, P.P.; Das, P.; Saha, S.; Das, K.; Mishra, S.R. & Paul, P. 2012. Microbial mat related structures (MRS) from Mesoproterozoic Chhattisgarh and Khariar basins, Central India and their bearing on shallow marine sedimentation. *Episodes*, 35: 513-523.
- Flügel, E. 2010. *Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application*. 2ª ed. Berlin, Springer. 984 p.
- Gerdes, G. 2007. Structures Left by Modern Microbial Mats in Their Host Sediments. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W. & CATUNEANU, O. (eds.). *Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliciclastic Rock Record*. Amsterdam, Elsevier, p. 5-38.
- Gerdes, G. 2010. What are microbial mats? In: SECKBACH, J. & AREN, A. (eds.). *Microbial Mats: Modern and Ancient Microorganisms in Stratified Systems*. Dordrecht, Springer, p. 5-25.
- Gerdes, G.; Klenke, T. & Noffke, N. 2000. Microbial signatures in peritidal siliciclastic sediments: a catalogue. *Sedimentology*, 47: 279-308.
- Hoffman, P. 1976. Stromatolite morphogenesis in Shark Bay, western Australia. In: WALTER, M.R. (ed.). *Stromatolites*. Amsterdam, Elsevier, p. 260-271.
- Hönn, A.; Tobschal, H. J. & Maddock, J.E.L. 1986. Biogeochemistry of a hypersaline lagoon east of Rio de Janeiro, Brasil. *The science of the total environment*, 58: 175-185.
- Kalkowsky, E. 1908. Oolith und stromatolith im norddeutschen Buntsandstein. *Zeitschrift Deutsche Geologisches*, 60: 68-125.
- Kjerfve, B. & Knoppers, B.A. 1999. Physical characteristics of the east fluminense coast, State of Rio de Janeiro, Brazil. In: Environmental geochemistry of coastal lagoon systems of Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro, FINEP, p. 57-67. (Série Geoquímica Ambiental 6).
- Maddock, J.E. 1999. Physical and chemical characteristics of algal mats from hypersaline lagoon: Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil. In: Environmental geochemistry of coastal lagoon systems of Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro, FINEP, p. 197-202. (Série Geoquímica Ambiental 6).
- Nofke, N. 2010. *Geobiology: Microbial mats in sandy deposits from the Archean era to today*. Berlin, Springer. 194 p.
- Nofke, N.; Gerdes, G. & Klenke, T. 2003. Benthic cyanobacteria and their influence on the sedimentary dynamics of peritidal depositional systems (siliciclastic, evaporitic salty, and evaporitic carbonatic). *Earth-Science Reviews*, 62: 163-176.
- Paterson, D.M. & Black, K. 2000. Siliciclastic intertidal microbial sediments, In: RIDING, R. & AWRAMI, S.M. (eds.). *Microbial Sediments*. Heidelberg, Springer, p. 76-83.
- Porada, H.; Bouougri, E. & Ghergut, J. 2007. Hydraulic Conditions and Mat-Related Structures in Tidal Flats and Coastal Sabkhas. In: SCHIEBER, J.; BOSE, P.K.; ERIKSSON, P.G.; BANERJEE, S.; SARKAR, S.; ALTERMANN, W. & CATUNEANU, O. (eds.). *Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliciclastic Rock Record*. Amsterdam, Elsevier, p. 258-265.
- Reineck, H.E.; Gerdes, G.; Claes, M.; Dunajtschik, K.; Riege, H. & Krumbein, W.E. 1990. Microbial modification of sedimentary surface structures. In: HELING, D.; ROTHE, P.; FÖRSTNER, U.; STOFFERS, P. (eds.). *Sediments and Environmental Geochemistry*. Berlin, Springer-Verlag, p. 254-276.
- Riding, R. 2000. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47: 179-284.
- Santelli, R.L. 1988. *Estudos de isótopos estáveis em sedimentos carbonáticos da Lagoa Vermelha – RJ*. Departamento de Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 95 p.
- Santelli, R.L.; Wagener, A.L.R.; Wagener, K. & Patchineelam, S. 2006. Assessing past environmental changes through sediment records in a hypersaline lagoon. *Croatica Chemica Acta*, 79: 129-141.
- Schieber, J. 1999. Microbial mats in terrigenous clastics: The challenge of identification in the rock record. *Palaios*, 14: 3-12.
- Silva e Silva, L.H.; Alves, S.A.P.M.N.; Iespa, A.A.C. & Iespa, C.M.D. 2007. Incidência de cianobactérias em estruturas estromatolíticas biscuit na Lagoa Vermelha, estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Revista de Geologia*, 20: 33-38.
- Terra, G.J.S.; Spadini, A.R.; França, A.B.; Sombra, C.L.; Zambonato, E.E.; Juschaks, L.C.S.; Arienti, L.M.; Erthal, M.M.; Blauth, M.; Franco, M.P.; Matsuda, N.S.; Silva, N.G.C.; Moretti Junior, P.A.; D'ávila, R.S.F.; Souza, R.S.; Tonietto, S.N.; Anjos, S.M.C.; Campinho, V.S. & Winter, W.R. 2009. Classificação de rochas carbonáticas aplicável às bacias sedimentares brasileiras. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 18: 9-29.
- Van Lith, I.; Warthmann, R.; Vasconcelos, C. & Mckenzie, J.A. 2003. Microbial fossilization in carbonate sediments: A result of the bacterial surface involvement in dolomite precipitation. *Sedimentology*, 50: 237-245.
- Vasconcelos, C.; Mckenzie, J.A.; Bernasconi, S.; Grujic, D. & Tien, A.J. 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. *Nature*, 377: 220-222.
- Walker, R.G. 2006. Facies models revisited Introduction. In: POSAMENTIER, H.W. & WALKER, R.G. (eds.). *Facies Models Revisited*. Tulsa, Society for Sedimentary Geology Special Publication, 84: p. 1-19.