

Trabalho de Formatura  
Curso de Graduação em Geologia

MICROBIALITOS DA FORMAÇÃO CODÓ (APTIANO SUPERIOR) ÀS MARGENS  
DO RIO TOCANTINS EM SÃO MIGUEL DO TOCANTINS (TO)

Marry Delatorre Costa

Orientadora: Profa. Dra. Rosemarie Rohn

Rio Claro (SP)

2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

MARRY DELATORRE COSTA

MICROBIALITOS DA FORMAÇÃO CODÓ (APTIANO  
SUPERIOR) ÀS MARGENS DO RIO TOCANTINS EM SÃO  
MIGUEL DO TOCANTINS (TO)

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", para obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro - SP

2015

552 Costa, Marry Delatorre  
C837m Microbialitos da formação Codó (Aptiano Superior) às  
margens do rio Tocantins em São Miguel do Tocantins (TO) /  
Marry Delatorre Costa. - Rio Claro, 2015  
75 f. : il., figs.

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade  
Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Rosemarie Rohn

1. Rochas. 2. Carbonatos. 3. Cretáceo. 4. Bacia de São  
Luís-Grajaú. I. Título.

MARRY DELATORRE COSTA

MICROBIALITOS DA FORMAÇÃO CODÓ (APTIANO  
SUPERIOR) ÀS MARGENS DO RIO TOCANTINS EM SÃO  
MIGUEL DO TOCANTINS (TO)

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto  
de Geociências e Ciências Exatas - Campus de  
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista  
“Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau  
de Geólogo.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Rosemarie Rohn (orientadora)

Prof. Dr. Thomas Rich Fairchild

Prof. Dr. Mario Luis Assine

Rio Claro, 02 de Abril de 2015.

Assinatura da aluna

Assinatura da orientadora

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à UNESP e ao UNESPetro que proporcionaram a estrutura necessária para a realização deste trabalho.

Agradeço especialmente à Prof. Dra. Rosemarie Rohn pela orientação, pela paciência e compreensão e por ter me apoiado quase incondicionalmente em todos momentos do trabalho, sempre me incentivando. Realmente, sem ela nada disso teria dado certo. Agradeço ao Prof. Dr. Thomas R. Fairchild pelos momentos de luz nas ideias do trabalho e também aos Profs. Dr. Paulo Tibana e Dr. Mario L. Assine.

Quero agradecer também à minha mãe (Neuza Delatorre) pelo amor e incentivo em todos momentos da faculdade e por aguentar e aceitar a distância que ficamos quando me mudei para Rio Claro. Agradeço meu pai (Wilson Ferreira da Costa) pela psicologia reversa, me fazendo nunca pensar em desistir da faculdade e também por ser minha solução financeira (muito importante!). Queria dizer obrigada também ao meu irmão geólogo e exemplo Nando que me mostrou a Geologia, esse “estilo de vida” que cada dia me apaixono mais. Um obrigada também aos outros irmãos, Ravy e Raissa, por fazerem a minha vida muito mais agitada desde sempre e também ao pequeno Kall que sempre me olhou com olhos de admiração. Um abraço de agradecimento à minha cunhada Patricia Martinelli e meus queridos sobrinhos que tanto amo Chico e Tom que são minha torcida organizada pessoal e meus orgulhos.

Agradecimentos especiais vão aos amigos que fazem a minha vida tão feliz, mesmo que alguns, estando longe, deixam saudades. Às minhas “BFFs” e “geodivas” Aline Carlin, Luana F. do Nascimento, Maria Fernanda Tomazella e Patricia Mescolotti (Sequela), exemplo de jovens mulheres e minha amada família rio-clarense. Às minhas outras amigas de república que fizeram esses anos de faculdade muito mais divertidos, Bárbara Robbi, Natália Almeida, Nayara Pazzini, Julia Favoreto, Érica Mariano (Xavas), Taís Salles e Laura Pozzo. Agradeço também aos amigos “rio-clarenses” Juliana Okubo (Sakura, verdadeira e batalhadora), Adriano Delgado (meu motivador pessoal e exemplo de vida), Filipe Varejão (que fez tanto por mim no campo) e todas as pessoas da minha querida turma Álcool n’Gel (2009) que é a “the best” e me proporcionou os momentos mais divertidos nas aulas e nos campos. E por último, mas não menos importantes, aos amigos de Caldas Novas, Franciolly, Maurício, Bárbara e Anderson que sempre estão perto, mesmo que longes, e me aceitaram em suas vidas desde o primeiro momento.

***“Se vi mais longe foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”***

Isaac Newton

## RESUMO

A região sudoeste da Bacia de São Luís-Grajaú possui um raro afloramento da Formação Codó (Aptiano superior) com sete espetaculares bioermas de microbialitos ao longo da margem esquerda do rio Tocantins, próximo a Imperatriz (MA). Sobrepondo arenitos da Formação Grajaú, a Formação Codó apresenta: 1) um calcilutito (20 cm de espessura) com pseudomorfos de gipsita e alguns caules fósseis; 2) folhelhos escuros métricos com nódulos calcários e intercalações de finas camadas de carbonato, incluindo alguns laminitos microbianos; 3) uma brecha superior (2 cm de espessura) composta por fragmentos de microbialitos e outros clastos carbonáticos, com *hoppers* de halita no topo; 4) os bioermas carbonáticos, os quais sobrepõem parcialmente os extensos folhelhos e os interrompem lateralmente, assim como a brecha. Os bioermas na parte norte do afloramento são mais espessos (<2 m) e têm intercalações de folhelhos escuros, enquanto que os meridionais são mais delgados e são verticalmente contínuos. Em geral, são compostos por laminitos microbianos com lâminas irregulares, pouco a muito ondulados, às vezes com laminação pseudocolunar a cônica. Todos os microbialitos com o mais alto relevo sinóptico (<20 cm) têm aspecto de estromatólitos colunares nas superfícies intemperizadas. Em planta, as seções horizontais dos microbialitos são circulares a levemente alongados, às vezes definindo estreitos canais (N60W) preenchidos por fina brecha. A camada mais alta do bioerma setentrional apresenta microbialitos mistos de laminitos microbianos e estromatólitos colunares, onde espaços intercolunares estão preenchidos por clastos de microbialitos, pequenos ossos de peixes, fragmentos de plantas e prováveis pequenos coprólitos de crustáceos. Muitas fraturas e deformação nesta camada superior indicam início de um processo de brechamento provavelmente causado por exposição subaérea. Na escala microscópica, a laminação é lisa, difusa, definida por diferenças sutis de granulação de cristais granulares bem pequenos de calcita dentro de micrita, mas óxidos, superfícies de dissolução ou finas lâminas de calcita precipitada comumente marcam alguns níveis da laminação num espaçamento relativamente regular (0,5-1 cm). As esteiras microbianas devem indicar condições de águas muito rasas e calmas (lacustres conforme a literatura), apenas com fracos fluxos que orientaram as esteiras e causaram as ondulações. Ocorriam recobrimentos por argila nas tempestades ou ressecamentos ocasionais. Contudo, a irregularidade das lâminas foge aos padrões usuais dos microbialitos. Pode refletir o desenvolvimento de comunidades microbianas em condições de alta salinidade (indicada, no mínimo, pelos *hoppers*) e/ou deformações por ressecamento. Adicionalmente, parte da irregularidade pode ser atribuída a alguma deformação, pois os bioermas tiveram significativas mudanças pós-deposicionais, como: 1) a total transformação dos microbialitos mais interiores numa massa de calcita com estrutura maciça, apresentando localmente calcita fibrosa irregular ou em *chevron*; 2) o desenvolvimento de veios horizontais centimétricos de cristais fibrosos, principalmente entre microbialitos, podendo ter precipitado primeiramente gipsita, depois substituída por calcita.

**Palavras-chave:** laminitos microbianos, bioermas, paleolago salino, NE do Brasil, estromatólitos.

## ABSTRACT

Title: Microbialites of the Codó Formation (upper Aptian) at the margin of the Tocantins river in São Miguel do Tocantins (TO)

The southwestern region of the São Luís-Grajaú Basin has a rare outcrop of the Codó Formation (upper Aptian) with seven outstanding microbialite bioherms along the left margin of the Tocantins river, near Imperatriz (MA). Resting on sandstones of the Grajaú Formation, the Codó Formation presents: 1) a 20 cm thick basal calcilutite with gypsite pseudomorphs and some fossil tree stems; 2) metric dark shales with carbonate nodules and thin intercalated carbonate layers, enclosing some microbial laminites; 3) a 2 cm thick upper breccia composed of microbialite fragments and other carbonate clasts, with halite hoppers on the top; 4) the carbonate bioherms, which partially overlie the extensive shales and interrupt them laterally, as well as the breccia. The bioherms in the northern part of the outcrop are thicker (<2 m) and have interbedded dark shales, whereas the southern are thinner and continuous in the vertical direction. In general, they are composed of irregular gently to strongly wavy microbial laminites, sometimes with pseudocolumnar to conical lamination. All microbialites with highest synoptic relief (<20 cm) look like columnar stromatolites on weathered lateral expositions. In plan view, the horizontal sections of these microbialites are circular to slightly elliptic, sometimes forming very small channels (N60W) filled with fine breccia. The highest bed of the northern bioherm has mixed microbial laminites and columnar stromatolites, where intercolumnar spaces were filled with microbialite clasts, fish bones, plant fragments and very small probable crustacean coprolites. Several fractures and deformation in this upper bed indicate an initial brecciation process probably caused by subaerial exposure. In microscopic scale, the lamination is smooth, diffuse, defined by subtle granulation differences of very fine granular calcite crystals within micrite, but oxide levels, dissolution surfaces or thin precipitated calcite veneers commonly mark some lamination levels in a relatively regular spacing (0,5-1 cm). The microbial laminites indicate very shallow and low energy marginal paleoenvironments (lacustrine according to the literature), with only weak currents which caused some orientation and the wavy lamination. During storms, they were overlaid by muds. Sometimes they were exposed. However, the irregular lamination differs from the usual microbialite pattern. It may be a result of particular microbial communities living in a very saline water (suggested, at least, by the halite hoppers). In addition, part of the irregularity may be addressed to deformation because the bioherms had significant post-depositional changes as: 1) the total transformation of the internal microbialites into a massive carbonate with locally irregular or in chevron fibrous calcite; 2) the development of centimetric horizontal veins of fibrous crystals, mainly between microbialites, probably precipitation first of gypsite, later replaced by calcite.

**Keywords:** Microbial laminites, bioherms, saline paleolake, NE Brazil, stromatolites.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b> Localização da Bacia do Parnaíba e da Bacia de São Luís-Grajaú (sobrepsta) nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, destacando-se a localização do município de Imperatriz (MA). .....	12
<b>Figura 2-</b> Localização do afloramento de estudo, denominado TOI. Fonte: Google.	12
<b>Figura 3-</b> Mapa geológico simplificado das regiões Norte e Nordeste brasileiras mostrando as principais unidades litoestratigráficas, bacias sedimentares e lineamentos estruturais (NASCIMENTO et al., 2007). O lineamento do Rio Parnaíba é aquele a leste da Bacia Barreirinhas. ....	18
<b>Figura 4-</b> Arcabouço estrutural e seqüências deposicionais da Bacia de São Luís-Grajaú, destacando o Arco Ferrer-Urbano Santos que manteve separadas as “sub-bacias” São Luís-Grajaú até parte do Neoalbiano (ROSSETTI, 2003). A região de Imperatriz não é contemplada neste perfil, mas está relativamente próxima à borda da (Sub-)bacia do Grajaú, à direita (SE). ....	19
<b>Figura 5-</b> Estratigrafia da Bacia de São Luís-Grajaú segundo Rossetti (2001). ....	20
<b>Figura 6-</b> Nomenclatura comumente usada na descrição de estromatólitos (SRIVASTAVA, 2010, com base em trabalhos de WALTER, 1972, PREISS, 1976). .....	26
<b>Figura 7-</b> Foto de parte do afloramento na margem esquerda do rio Tocantins, próximo à cidade de Imperatriz (MA). ....	27
<b>Figura 8-</b> Seção geológica esquemática do afloramento, com direção N-S e sobrelevação de 2x na escala vertical. ....	28
<b>Figura 9-</b> Caule carbonificado achatado no calcário basal da Formação Codó no afloramento na margem esquerda do rio Tocantins, próximo a Imperatriz. ....	29
<b>Figura 10-</b> Vista em planta da camada calcária basal com prováveis pseudomorfos de gipsita evaporítica (alongados e esbranquiçados), próximo ao bioerma 2. ....	30
<b>Figura 11-</b> Camada carbonática basal da Formação Codó. ....	31
<b>Figura 12-</b> Folhelho com camadas delgadas de calcário intercaladas. ....	32
<b>Figura 13-</b> Microbialito da amostra TOI-9 intercalado nos folhelhos. ....	33
<b>Figura 14-</b> Microbialito da amostra TOI-55 intercalado nos folhelhos. ....	34
<b>Figura 15-</b> Camada de brecha carbonática sobreposta por calcilutitos. ....	35
<b>Figura 16-</b> Vista em planta de microbialito pseudocolunar cuja porção superior aflora acima do nível da brecha carbonática, ao norte do bioerma 1. ....	35
<b>Figura 17-</b> Bioerma 1. ....	36

<b>Figura 18-</b> Corpo de microbialitos basal do bioerma 1. ....	38
<b>Figura 19-</b> Microbialitos do bioerma 1.....	39
<b>Figura 20-</b> Vista em planta dos microbialitos do corpo principal do bioerma 1. ....	40
<b>Figura 21-</b> Amostras do corpo de microbialitos principal do bioerma 1. ....	41
<b>Figura 22-</b> Corpo de microbialitos superior acima do corpo de microbialitos principal do bioerma 1. O tracejado amarelo delimita os dois conjuntos. ....	42
<b>Figura 23-</b> Amostra TOI-20 do corpo de microbialitos superior do bioerma 1. ....	43
<b>Figura 24-</b> Amostra TOI-53 na parte basal do corpo de microbialitos superior do bioerma 1. ....	44
<b>Figura 25-</b> Vista em planta de microbialito do corpo superior do bioerma 1, contendo <i>hoppers</i> de halita.....	45
<b>Figura 26-</b> Brecha calcária no topo do bioerma 1.....	45
<b>Figura 27-</b> Bioerma 2.....	46
<b>Figura 28-</b> Amostra TOI-58 do corpo de microbialitos inferior do bioerma 2. ....	47
<b>Figura 29-</b> Microbialito do corpo principal do bioerma 2 (amostra TOI-59.....	48
<b>Figura 30-</b> Calcita fibrosa no bioerma 2.....	49
<b>Figura 31-</b> Amostras dos níveis de calcita fibrosa intercalados no bioerma 2. ....	50
<b>Figura 32-</b> Corpo de microbialitos meridional do bioerma 2. ....	51
<b>Figura 33-</b> Bioerma 3.....	52
<b>Figura 34-</b> Feições do bioerma 4.....	53
<b>Figura 35-</b> Fotomosaico que mostra a borda leste do bioerma 5. ....	53
<b>Figura 36-</b> Bioerma 5.....	54
<b>Figura 37-</b> Porção lateral sul do bioerma 5.....	55
<b>Figura 38-</b> Bioerma 6.....	56
<b>Figura 39-</b> Bioerma 7.....	57
<b>Figura 40-</b> Ilustração de Bahniuk et al. (2015) mostrando, à direita, o perfil colunar do afloramento e os estromatólitos que eles registraram no afloramento de Imperatriz. ....	59

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1	Objetivos e Justificativas	11
1.2	Área de estudo	11
<b>2</b>	<b>MÉTODOS E ETAPAS</b>	<b>13</b>
2.1	Levantamento bibliográfico	13
2.2	Trabalho de campo	13
2.3	Preparação e documentação fotográfica das amostras	14
2.4	Estudos petrográficos das lâminas e confecção de fotomicrografias	15
2.5	Organização e interpretações dos dados	15
<b>3</b>	<b>GEOLOGIA REGIONAL</b>	<b>17</b>
3.1	Bacia de São Luís-Grajaú	17
3.1.1	<i>Arcabouço Estrutural</i>	17
3.1.2	<i>Estratigrafia</i>	19
3.2	Formação Codó	20
<b>4</b>	<b>MICROBIALITOS</b>	<b>23</b>
4.1	Conceitos gerais	23
4.2	Estromatólitos	24
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>27</b>
5.1	Descrição do afloramento, das amostras e das lâminas	27
5.1.1	<i>Litologias adjacentes e subjacentes aos bioermas</i>	29
5.1.2	<i>Bioermas</i>	36
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>58</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>64</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A notável expansão nos últimos anos das pesquisas na área de Geologia do Petróleo está diretamente relacionada à descoberta de hidrocarbonetos no intervalo chamado “pré-sal”, de idade cretácea, principalmente nas bacias de Santos e Campos. Este intervalo contém abundantes rochas carbonáticas, incluindo microbialitos, cuja diversidade reflete variados controles ambientais e biológicos.

Microbialitos são depósitos organossedimentares que foram acrescidos pelo resultado da interação de comunidades microbianas bentônicas e sedimentos detríticos ou químicos (BURNE & MOORE, 1987). Essas comunidades geralmente são formadas por cianobactérias, algas, fungos e outros microrganismos. As estruturas destas rochas são muito diversificadas quanto às formas, laminações e dimensões, podendo ser colunares, nodulares ou planares, e um mesmo corpo pode apresentar grandes variações laterais e verticais. Essas características dependem basicamente das espécies de microrganismos presentes nas comunidades microbianas e do seu ambiente de vida. As descobertas de reservatórios de hidrocarbonetos associados a microbialitos aptianos nas bacias marginais brasileiras vêm constituindo um grande incentivo para o avanço das pesquisas sobre os mais variados carbonatos microbianos e as respectivas condições de origem.

Microbialitos aproximadamente da mesma idade que os das bacias de Santos e Campos ocorrem na Formação Codó da Bacia de São Luís-Grajaú (Aptiano Superior, Cretáceo), no Nordeste do Brasil. Apesar da sua origem em condições ambientais e tectônicas distintas, estes microbialitos são extremamente importantes por constituírem, até o momento, os únicos registros coevos significativos que afloram e, portanto, disponíveis para estudos detalhados. Adicionalmente, a Formação Codó se destaca por seus depósitos de gipsita que provavelmente se formaram pelo mesmo controle climático que os extensos evaporitos (o “Sal”) das bacias marginais. Assim, foi realizado o presente estudo da Formação Codó na região de Imperatriz, com ênfase aos microbialitos, no âmbito do projeto “Carbonatos do Brasil” (Nº 0050.0051732.09-0), coordenado pelo Prof. Dr. Dimas Dias-Brito (UNESP - Rio Claro), financiado pela Rede de Sedimentologia e Estratigrafia da Petrobras. O projeto é desenvolvido no UNESPetro (Centro de Geociências Aplicadas ao Petróleo).

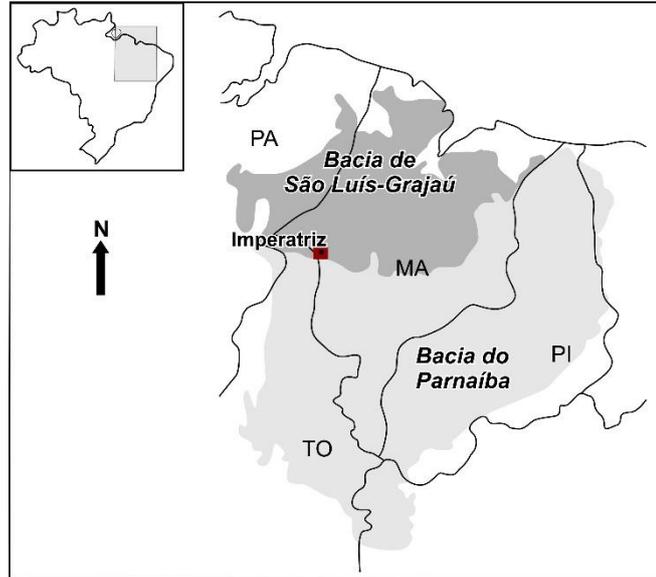
## 1.1 Objetivos e Justificativas

O principal objetivo desta pesquisa é apresentar uma caracterização detalhada das rochas carbonáticas da Formação Codó em um afloramento na margem esquerda do rio Tocantins, no município de São Miguel do Tocantins (TO), com ênfase aos microbialitos, incluindo informações sobre as relações laterais e verticais, petrologia e possíveis considerações sobre a gênese dessas rochas. Esse afloramento, apesar de localizado no Estado do Tocantins, é conhecido como o “afloramento de Imperatriz” (MA), dada a sua proximidade a esta maior cidade da região (Figura 1).

A realização do trabalho se justifica, em parte, por existirem relativamente poucos trabalhos anteriores sobre rochas carbonáticas da Formação Codó, sendo ainda mais escassas as considerações sobre os microbialitos desta unidade. O conhecimento detalhado desta formação, ou pelo menos dos microbialitos de um afloramento, é de grande interesse, pois se originaram aproximadamente no mesmo intervalo de tempo que os microbialitos do Pré-Sal das bacias de Santos e Campos, os quais constituem importantes reservatórios de hidrocarbonetos.

## 1.2 Área de estudo

A Bacia de São Luís-Grajaú está localizada, em grande parte, no Estado do Maranhão, estendendo-se à região oeste do estado do Pará e à região norte do Tocantins. (Figura 1). O afloramento de estudo, na borda SW da bacia, chamado localmente como Praia da Gaivota (coordenadas UTM-WGS84 23M-0224485mE/9382962mS), situa-se na margem esquerda do rio Tocantins, 2 km ao sul da ponte da Liberdade Dom Afonso Gregory que conecta a rodovia TO-126 em São Miguel do Tocantins - TO à avenida Pastor Luís Moreira, a qual dá acesso à BR-010 em Imperatriz - MA. Chega-se facilmente ao afloramento por barco, partindo do Porto do Curtume em Imperatriz e navegando ~4 km para sul (Figura 2).



**Figura 1-** Localização da Bacia do Parnaíba e da Bacia de São Luís-Grajaú (sobrepsta) nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, destacando-se a localização do município de Imperatriz (MA).



**Figura 2-** Localização do afloramento de estudo, denominado TOI. Fonte: Google.

## **2 MÉTODOS E ETAPAS**

As etapas do trabalho detalhadas neste capítulo, são:

- Levantamento bibliográfico.
- Trabalho de campo.
- Preparação e documentação fotográfica das amostras.
- Estudos petrográficos das lâminas e confecção de fotomicrografias.
- Organização dos dados e realização de interpretações.

### **2.1 Levantamento bibliográfico**

Foram realizados levantamentos bibliográficos ao longo de todo o trabalho, aproveitando particularmente o Portal da CAPES, via biblioteca da UNESP, Campus de Rio Claro.

### **2.2 Trabalho de campo**

Foram realizadas descrições convencionais das litofácies do afloramento da Praia de Gaivota, com ênfase aos microbialitos, o que incluiu observações sobre os modos de ocorrência dos corpos microbianos, tipos de contatos laterais e verticais dos corpos, dimensões e distâncias entre os corpos, formas dos bioermas e dos corpos microbianos menores, caracterização das laminações, determinação do relevo das laminações e observação dos espaços entre eventuais colunas estromatólíticas ou pseudocolunas.

As descrições preliminares dos microbialitos no campo basearam-se no esquema de Srivastava (2010), traduzido de Walter (1972, 1976) e Preiss (1976) (Figura 6).

Realizou-se a documentação fotográfica detalhada dos litotipos e dos corpos microbialíticos, e também a coleta de amostras representativas.

Foram confeccionados os primeiros desenhos esquemáticos dos bioermas ou dos microbialitos, posteriormente complementados conforme as imagens digitais.

### **2.3 Preparação e documentação fotográfica das amostras**

Um total de 65 amostras do afloramento mencionado anteriormente passaram por uma série de procedimentos de preparação com a finalidade de estudo e incorporação ao acervo do UNESPetro.

As amostras foram cadastradas com o código "TOI", que combina as letras iniciais do rio Tocantins e a cidade de Imperatriz (TOI-1 a TOI-65).

Após a lavagem das amostras com água e escova, foi realizada a primeira documentação fotográfica, registrando todas as suas faces, utilizando uma câmera fotográfica digital com resolução de 12 megapixels à luz natural.

Em seguida, para a melhor exposição das estruturas, foram confeccionados cortes verticais em quase todas as amostras e, no caso dos microbialitos, dois cortes verticais perpendiculares entre si (um paralelo ao maior alongamento e o outro transversal). Conforme a amostra, também foi confeccionado um corte horizontal.

Os cortes das amostras TOI-1 a TOI-36 foram realizados com serra diamantada, no Laboratório de Laminação do DPM (Departamento de Petrologia e Metalogenia) da Unesp, Campus de Rio Claro, pela própria autora deste trabalho. Já as outras amostras foram serradas no Laboratório de Laminação do UNESPetro pelo técnico responsável.

Novamente foi utilizada uma câmera fotográfica digital em ambiente com luz natural para registrar, desta vez, as seções das amostras. Para ressaltar as estruturas, quase todas as superfícies de seções foram fotografadas umedecidas ou realmente molhadas.

Com o final desta etapa, algumas amostras foram selecionadas para confecção de lâminas petrográficas e encaminhadas ao Laboratório de Laminação do UNESPetro.

## 2.4 Estudos petrográficos das lâminas e confecção de fotomicrografias

Nesta etapa foram analisadas 65 lâminas petrográficas com espessura convencional de 30  $\mu\text{m}$ , sem lamínula, utilizando-se os microscópios óticos e estereomicroscópio Zeiss dos laboratórios do UNESPetro, tanto com nicois paralelos, quanto cruzados, às vezes, colocando-se uma folha de papel branco sob a lâmina para diminuir o contraste dos contatos entre os cristais e dando destaque maior às feições estruturais da rocha, especialmente no caso dos microbialitos.

Também foram obtidas imagens por *scanner* de alta resolução das lâminas mais interessantes.

As rochas carbonáticas foram classificadas conforme a nomenclatura de Folk (1959; 1962) ou Dunham (1962, modificação de EMBRY & KLOVAN, 1971). No caso das lâminas que não puderam ser enquadradas nas classificações usuais, especialmente os microbialitos, foram apresentadas apenas descrições.

## 2.5 Organização e interpretações dos dados

Para a organização dos dados obtidos no trabalho de campo e nas documentações fotográfica e fotomicrográfica, foram confeccionadas fichas para cada amostra. Nestas fichas foram inseridas informações como nome da amostra, nível estratigráfico do afloramento, litotipos e imagens das amostras (superfícies naturais e seções), do afloramento onde foram coletadas e as fotomicrografias. Em alguns casos, foram confeccionados desenhos dos afloramentos, utilizando-se imagens digitais e recursos da informática. Nas fichas, deu-se continuidade às descrições iniciadas no trabalho de campo, complementando as informações em escala mesoscópica e microscópica.

Conforme já explicado, para sistematizar a descrição dos microbialitos foi consultado o esquema de Srivastava (2010), traduzido de Walter (1972, 1976) e Preiss (1976) (Figura 6). Porém a nomenclatura utilizada para denominar os

microbialitos estudados foi adaptada, uma vez que eles fogem do padrão normal, como é mostrado adiante.

Finalmente, foram realizadas interpretações de possíveis paleoambientes e processos que possibilitaram a formação das rochas estudadas neste trabalho.

### 3 GEOLOGIA REGIONAL

Na fragmentação do supercontinente Gondwana, a separação da América do Sul e África começou no EoJurássico (201-174 Ma) de modo que, no Eocretáceo (145-100 Ma), a região nordeste do Brasil constituía a última ligação entre os continentes América do Sul e África. A idade Aptiano (125-113 Ma) marcou a separação definitiva entre esses dois continentes e, conseqüentemente, a circulação mais livre de águas entre o Atlântico Norte e Sul. O processo de rifteamento que desencadeou essa separação causou inicialmente (fase pré-rifte) a formação de diversos sistemas deposicionais lacustres em bacias hoje localizadas na margem continental atlântica ou próximo à margem. A separação dos continentes ocorreu, em grande parte, do sul para o nordeste do país e, por essa razão, as bacias da região equatorial apresentam paleoambientes lacustres representativos apenas a partir do Aptiano (SZATMARI et al., 1987; ZANOTTO & SZATMARI, 1987; FEIJÓ, 1996).

#### 3.1 Bacia de São Luís-Grajaú

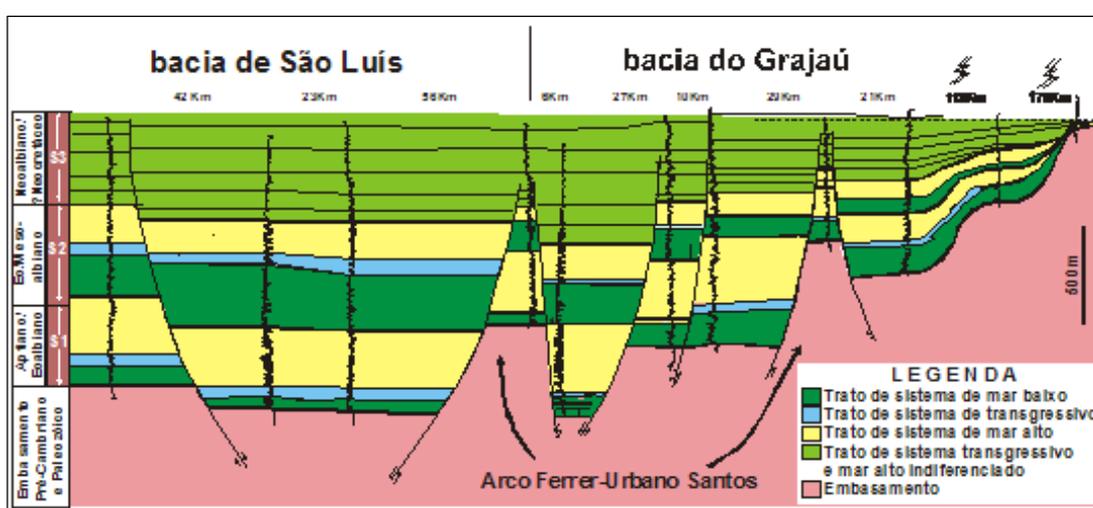
A Formação Codó é tratada como uma unidade pertencente à Bacia do Parnaíba (e.g., BAHNIUK et al., 2015) ou à Bacia de São Luís-Grajaú, sobreposta à Bacia do Parnaíba (GÓES & ROSSETTI, 2001), ou Bacia do Grajaú (e.g., SOARES JR. et al., 2008). Outras designações, já em desuso, foram Bacia Codó e Bacia Alto Parnaíba (vide ROSSETTI, 2003; SOARES et al., 2008). Foge ao escopo do presente trabalho a discussão sobre a validade de cada designação e respectivamente a sua abrangência estratigráfica. Adotou-se a nomenclatura “Bacia de São Luís-Grajaú” por esta ter sido mais frequentemente usada nas publicações recentes.

##### 3.1.1 *Arcabouço Estrutural*

Do Neocarbonífero ao Jurássico, antes da instalação da Bacia de São Luís-Grajaú, existia a Bacia do Parnaíba - uma típica sinéclise interior (VAZ et al., 2007). A partir do Cretáceo, com os processos relacionados à abertura do Oceano Atlântico, o



Góes & Rossetti (2001) interpretam que até o Albiano, o arco constituía uma barreira entre as (sub-)bacias de Grajaú e de São Luís. Depois, a sedimentação passou a ocorrer numa bacia única, de modo que o Arco Ferrer-Urbano Santos seria um alto estrutural intrabacinal (Figura 4). A (Sub-)bacia de São Luís é interpretada como um *graben* (Sistema de *Graben* Gurupi) equivalente a um rifte abandonado no processo de separação da América do Sul e África (RAJA GABAGLIA & FIGUEIREDO, 1990; AZEVEDO, 1991; GÓES & ROSSETTI, 2001). Quando as (sub)bacias se uniram, o padrão estrutural de falhas do *graben* se estendeu para o interior (GÓES & ROSSETTI, 2001).



**Figura 4-** Arcabouço estrutural e seqüências deposicionais da Bacia de São Luís-Grajaú, destacando o Arco Ferrer-Urbano Santos que manteve separadas as “sub-bacias” São Luís-Grajaú até parte do Neolábiano (ROSSETTI, 2003). A região de Imperatriz não é contemplada neste perfil, mas está relativamente próxima à borda da (Sub-)bacia do Grajaú, à direita (SE).

### 3.1.2 Estratigrafia

A deposição dos sedimentos da Bacia de São Luís-Grajaú se deu sobre rochas gnáissicas, graníticas e metassedimentares do Cinturão de Dobramento Gurupi e Tocantins-Araguaia e Cráton de São Luís, e também sobre rochas de formações sedimentares da Bacia do Parnaíba (ARANHA et al., 1990).

A coluna sedimentar da Bacia de São Luís-Grajaú alcança 4000 m nos depocentros e, segundo Rossetti (2001), consiste basicamente de depósitos cretáceos organizados em três seqüências sedimentares chamadas de S1, S2 e S3,

formadas respectivamente durante o Neoptiano/Eoalbiano, Eo/Mesoalbiano e Mesoalbiano/Neocretáceo (Figuras 4 e 5).

IDADE	Sequência Depositional	UNIDADE ESTRATIGRÁFICA		Evolução Tectônica
		Norte	Sul	
Quaternário		Depósitos Pós-Barreiras		Margem Passiva
Neomioceno?		Formação Barreiras (II)		
Eomioceno?		Formação Barreiras (I) Formação Pirabas		
Eoterciário?	Sequência 3	Formação Cujupe	Grupo Itapecuru	<i>Drift</i>
Cenomaniano		Formação Alcântara		
Meso/Neoalbiano	Sequência 2	Unidade Indiferenciada		<i>Rift</i>
Eoalbiano	Sequência 1	Formação Codó		<i>Pré-rift</i>
Neoptiano		Formação Grajaú		

**Figura 5-** Estratigrafia da Bacia de São Luís-Grajaú segundo Rossetti (2001).

A sequência S1 (Neoaptiano/Eoalbiano) contém as formações Codó e Grajaú com 450 m de arenitos, folhelhos e, subordinadamente, calcários e evaporitos, formados em ambientes marinho raso, lacustre e flúvio/deltaico.

A sequência deposicional S2, correspondente à Unidade Indiferenciada eo/mesoalbiana, possui espessura com cerca de 500 m de depósitos arenosos e argilosos também sendo de ambientes marinho raso e flúvio/deltaico.

Em cada sequência foram discriminados os tratos de sistemas de mar baixo (depósitos continentais e transicionais), transgressivo (predominantemente rochas argilosas de origem marinha) e de mar alto. Ainda de acordo com Rossetti (2001), a sequência S3 consiste em aproximadamente 600 a 800 m de argilitos e arenitos formados em vales estuarinos incisos.

### 3.2 Formação Codó

A Formação Codó é concordante com os depósitos fluviais e deltaicos da Formação Grajaú (ROSSETTI, 2001), embora Mesner & Wooldridge (1964) tenham

concluído o contrário. Repousa sobre o embasamento do Paleozoico e do Triássico. Seu contato superior é uma discordância com o Albiano marinho raso da Formação Itapecuru (ROSSETTI & TRUCKENBRODT, 1997; ROSSETTI et al., 2001).

Diversas fácies foram reconhecidas na Formação Codó (PAZ & ROSSETTI, 2001; PAZ et al., 2005; PAZ, 2005): folhelhos betuminosos, folhelhos cinza/verdes, *mudstone* calcífero, *wackestone-packstone* peloidal/ostracodal, *packstone* oolítico/pisolítico, calcário mesocristalino (*sparstone*), gipso laminado, gipsoarenito/gipsorrudito, *chert* e tufa. Nos *wackestones*, carapaças articuladas e desarticuladas de ostracodes intercalam-se com tapetes microbianas.

Alguns depósitos da Formação Codó são contínuos por várias centenas de metros e mostram intervalos de “arrasamento” ascendente (*shallowing-upward*), cujo empilhamento representaria a sucessão dos seguintes paleoambientes: lago central, lago transicional, lago marginal e *sabkha*/planície de lama (PAZ & ROSSETTI, 2005). A formação faz parte da sequência S1 das Figuras 4 e 5.

Há relativa abundância de ostracodes não marinhos na Formação Codó (ROSSETTI et al., 2001) e o conteúdo palinológico também é indicativo de idade neoaptiana (LIMA, 1982; BATISTA, 1992; PEDRÃO & MARTINS, 1999; ANTONIOLI, 2001). Na Formação Codó também há peixes fósseis, os quais permitem realizar correlações com as formações Santana (Membro Crato, Bacia do Araripe) e Riachuelo (Membro Taquari, Bacia Sergipe-Alagoas) (LINDOSO et al., 2011). Outros fósseis conhecidos na formação são vegetais, crustáceos (decápodos, isópodos), gastrópodos (LINDOSO et al., 2011), conchostráceos (que indicam condições límnicas) e insetos.

Paz & Rossetti (2001, 2005, 2006a, b) e Paz et al. (2005) detalharam a caracterização dos evaporitos da Formação Codó. O principal evaporito – gipsita, ocorre como: preenchimento de fraturas; pacotes maciços/macronodulares, localmente, como gipso laminado; nódulos de gipso. Localmente, os nódulos de gipso podem estar substituídos por anidrita. Estes evaporitos foram atribuídos ao paleoambiente de lago central. Os evaporitos que teriam sido originados em *sabkha*/planície de lama seriam principalmente gipso laminado e bandeado claro e escuro (até 10 cm), no qual as partes claras poderiam apresentar cristais de gipso do

tipo *chevron* intercrescidos com gipso fibroso ou acicular. Os evaporitos indicam hipersalinidade, mas sem influência marinha, conforme estudos de isótopos de Sr, C, O dos evaporitos e de outras rochas da Formação Codó (PAZ & ROSSETTI, 2001, 2005, 2006a, b; PAZ et al., 2005). Os folhelhos escuros da Formação Codó permitem interpretar que durante determinados intervalos de tempo, o ambiente apresentava fundo anóxico, com acumulação de matéria orgânica (ROSSETTI, 2001; PAZ & ROSSETTI, 2001, 2005; PAZ et al., 2005). As coquinas de ostracodes e grande abundância de restos de peixes indicam possíveis eventos de mortalidade, talvez por abaixamento do nível da água.

Bahniuk et al. (2015) definiu quatro fácies microbianas na Formação Codó: estromatolítica, laminada, maciça e esferulítica. Na fácies estromatolítica, reconheceram três tipos: *club-shaped* (em forma de taco) peloidal, colunar silicificado e dômico peloidal. Na fácies de microbialitos laminados, a autora reconheceu laminações planares, descontínuas e crenulação, todas com intercalações de camadas claras silicificadas e escuras micríticas. A fácies de microbialitos maciços é caracterizada pela coloração clara e ausência de estruturas laminares, com composição dolomítica. E a fácies esferulítica é composta por esferulitos com estruturas internas radiais e tamanho variados (2 a 6 mm), sobrepostos diretamente por evaporitos (BAHNIUK et al., 2015).

Bahniuk et al. (2015) interpretaram a evolução da Formação Codó como um paleoambiente de bacia lacustre fechada com episódios alternados de transgressão e regressão do nível d'água. Nesse contexto, propuseram quatro associações de fácies microbianas: Unidade I - estromatolítica e laminada (ambiente lacustre de água rasa); Unidade II - de fácies laminada (lago em expansão com um fluxo estável); Unidade III - de fácies de microbialitos maciços e com laminação crenulada (contração do lago a um nível mínimo de água na bacia fechada); e Unidade IV - esferulítica com evaporitos (condições extremas com alta evaporação, porém um nível d'água intermediário durante a deposição).

## 4 MICROBIALITOS

### 4.1 Conceitos gerais

Burne & Moore (1987) definiram microbialitos como sendo depósitos organossedimentares formados pela interação entre comunidades microbianas bentônicas e sedimentos detríticos ou químicos.

Neste contexto, carbonatos microbianos são produtos da interação do metabolismo de micróbios com a precipitação mineral e aglomeração de grãos detríticos, registrados desde o Arqueano. A litificação precoce é essencial para a acreção e preservação dos carbonatos microbianos bentônicos, e ambas são biologicamente controladas e ambientalmente dependentes. Assim, os microbialitos refletem não só seu próprio crescimento, mas também mudanças nas condições da água do mar e da atmosfera (RIDING, 1991).

A morfologia dos microbialitos também é resultante de controles ambientais, biológicos e ecológicos e também dos processos de litificação. Alguns dos termos usados para discriminar os microbialitos conforme as suas estruturas internas são: estromatólito, trombólito, oncoide (laminação concêntrica) e esferulito (RIDING, 1991).

São três os principais processos envolvidos na formação de microbialitos calcários: a captura e aglutinação de sedimentos detríticos, a precipitação inorgânica e a precipitação microbiana.

O primeiro processo, através da captura e aglutinação de sedimentos detríticos, é o principal na formação de esteiras microbianas. É controlado pela presença de comunidades microbianas bentônicas capazes de capturar e aglutinar sedimentos, pela disponibilidade de sedimentos detríticos adequados e pela taxa de suprimento dos sedimentos. Essas comunidades podem incluir filamentos de cianobactérias, que são capazes de incorporar detritos formando estruturas em forma de esteiras, devido à sua característica de apresentar uma superfície “pegajosa”. Da mesma forma, cianobactérias, cocóides, diatomáceas, e algumas microalgas eucarióticas também podem contribuir para a formação dessas esteiras (BURNE & MOORE, 1987).

O processo de precipitação inorgânica ocorre com a deposição de carbonato de cálcio a partir da perda de dióxido de carbono em águas supersaturadas ou também pela evaporação de soluções supersaturadas em carbonato (RIDING, 2011). A população microbiana é incrustada pelos minerais em precipitação, sendo que este

processo é aumentado pela tendência de ocorrer captura do carbonato recém precipitado pelos microrganismos com superfície pegajosa, assim como ocorre com os sedimentos detríticos (BURNE & MOORE, 1987).

A precipitação microbiana ocorre quando os microrganismos estão diretamente relacionados à cristalização mineral, ou seja, cianobactérias participam no processo de calcificação. Assim, a precipitação da fase mineral num ambiente e sua morfologia são determinadas por comunidades bentônicas, com nucleação de cristais em torno de e dentro de corpos biológicos, sendo um importante processo que pode formar calcários primários (BURNE & MOORE, 1987; PENTECOST, 1985). Segundo Pentecost & Riding (1986), a maioria das cianobactérias que realizam esse processo apresentam um invólucro gelatinoso (EPS= *extracellular polymeric substances*) que é impregnado de calcita micrítica.

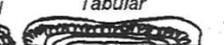
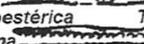
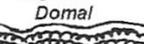
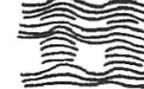
## 4.2 Estromatólitos

Os estromatólitos representam os microbialitos melhor conhecidos. Kalkowsky (1908) propôs o termo estromatólito (*Stromatolith*) para colunas e domos laminados em carbonatos lacustres do Eotriássico no norte da Alemanha. Hofmann (1973) definiu estromatólitos como sendo estruturas biossedimentares laminadas usualmente atribuídas à agregação e à ação química de algas não-esqueletais em ambientes de água rasa. Atualmente são melhor definidos com sendo estruturas microbianas laminadas relativamente organizadas, rapidamente litificados, comumente com morfologias dômicas ou colunares, que se desenvolvem, mais frequentemente, em águas marginais rasas de bacias marinhas e lagos salinos. O registro geológico mais antigo de estromatólitos data de mais de 3,5 bilhões de anos (e.g., VOLOGDIN, 1962; HOFMANN, 1969, 1973; WALTER, 1976; GROTZINGER & KNOLL, 1999; RIDING & AWRAMIK, 2000).

Existem dois modelos para explicar a formação das laminações. No primeiro, de captura e aglutinação, as cianobactérias secretam um filme pegajoso (substância polimérica extracelular) que captura grãos de sedimentos. O crescimento das cianobactérias (fotossintéticas e fototrópicas) permite a acumulação do sedimento; posteriormente, carbonato de cálcio precipita a partir da água intersticial, cimentando

os grãos da estrutura (REID et al., 2000). No segundo modelo, a formação do estromatólito ocorre pela precipitação de carbonato na matriz de substância polimérica extracelular (VASCONCELOS et al., 2013).

Segundo Srivastava (2010), os estromatólitos se dividem em colunares e não colunares (Figura 6). Os não colunares comumente são denominados como laminitos microbianos, esteiras microbianas, estromatólitos estratiformes ou ainda recebendo outras denominações. O termo “esteira microbiana”, embora bastante usado na literatura para microbialitos com lâminas onduladas lateralmente extensas, deveria ser empregado apenas para a comunidade viva de microrganismos, independentemente do tipo de microbialito (laminito, estromatólito colunar etc.). Riding (2011) apresentou uma minuciosa discussão sobre as denominações usadas para estromatólitos, microbialitos e outras feições relacionadas. Mencionou, por exemplo, que alguns antigos autores tenderiam a separar “corpos carbonáticos laminados planares” dos estromatólitos, sendo que estes últimos eram entendidos como “feições colunares, ramificadas e hemiesferoides”. Contudo, Riding (2011), assim como muitos outros autores, adota o termo estromatólito nas duas situações, desde que sejam macroscopicamente laminados e tenham origem autigênica microbiana, eventualmente com intercalações precipitadas abioticamente. No esquema de Srivastava (2010) usado para a descrição dos microbialitos do presente trabalho (Figura 6), deu-se preferência à designação “laminitos microbianos” ao invés de “estromatólitos não colunares” por expressar de modo mais preciso a sua natureza.

<b>FICHA DE DESCRIÇÃO DE ESTROMATÓLITOS</b>						
<b>Localidade</b>					Nº de amostra	
Amostra de mão	Parte polida	Fatias	Lâmina delgada	Coletor	Nº de arquivo	
Espessura da camada		Comprimento da camada		Unidade unitária	Unidade cíclica	
<b>Modo de ocorrência</b> Bioerma  Domal  Tabular  Interdigitada  Subestérica  Tabular  Domal  Biostroma 				<b>Forma de colunas em planta</b> Esférica, Circular Oblonga Eliptica, Oval Labada Poligonal		
Não colunares	     				Oncólito	
	Planares Ondulatórios Pseudocolunares Colunares-laminados Cumulativos					
Colunares	<b>Não Ramificadas</b>       					
	<b>Ramificadas</b> Natureza de ramificação      					
	Altura de colunas Diâmetro de colunas			Paredes		
	Paralela  Moderadamente divergente  Extremamente divergente 			Alfa  Bent  Gama 		
<b>Atitude</b>     		<b>Variabilidade</b>   		<b>Forma</b>   		
<b>Tipos de lâminas</b> Lisa  Ondulada  Crenulada 		<b>Ornamentação externa</b> Lisa  Bulbo  Tubérculo  Lobada  Nicho  Costelada  Projeções  Cornices  Pontes  Picos 				
<b>Forma laminar</b> Planar  Pouco convexo  Moderadamente convexo  Muito convexo  Parabólico  Retangular  Rômbo 		<b>Microestruturas</b> Microfósseis Orientação de colunas Relevo sinóptico Sedimento intercolunar Estruturas sedimentares Minerais Diagenéticos				

**Figura 6-** Nomenclatura comumente usada na descrição de estromatólitos (SRIVASTAVA, 2010, com base em trabalhos de WALTER, 1972, PREISS, 1976).

## 5 RESULTADOS

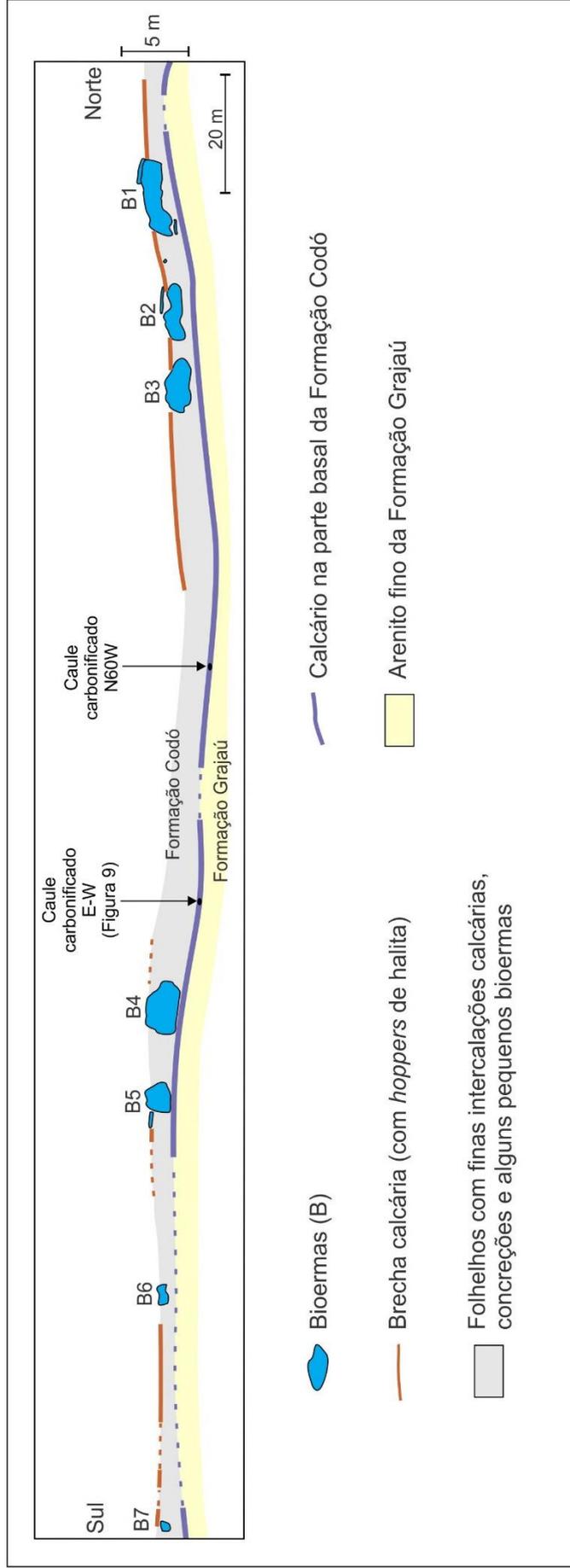
### 5.1 Descrição do afloramento, das amostras e das lâminas

O afloramento estudado, à margem esquerda do rio Tocantins (Figura 7), com cerca de 250 m de extensão e 2,5 m de altura, expõe arenitos da Formação Grajaú, sobre os quais jazem rochas carbonáticas e pelíticas da Formação Codó. Neste capítulo, estas rochas são descritas detalhadamente, com ênfase aos sete conjuntos de microbialitos aqui chamados de bioermas. A priori, um bioerma seria uma estrutura convexa carbonática, cujo arcabouço teria origem biológica, porém os corpos do afloramento possuem intercalações de outras litologias, conforme explicado adiante.



**Figura 7-** Foto de parte do afloramento na margem esquerda do rio Tocantins, próximo à cidade de Imperatriz (MA).

Ao longo do afloramento, três litotipos têm grande extensão lateral (Figura 8): uma rocha carbonática basal, folhelhos intermediários (com intercalações carbonáticas delgadas) e, na parte superior, uma brecha calcária. Estes conjuntos encontram-se interrompidos nas porções em que ocorrem os bioermas, compostos por microbialitos de diferentes características e com complexa relação lateral e vertical entre si e com as rochas adjacentes.



**Figura 8-** Seção geológica esquemática do afloramento, com direção N-S e sobrelevação de 2x na escala vertical.

### 5.1.1 Litologias adjacentes e subjacentes aos bioermas

#### A. Camada carbonática basal da Formação Codó

A camada basal da Formação Codó apresenta espessura média de 15 cm, podendo chegar a 25 cm em alguns locais. Ocorre por praticamente toda a extensão do afloramento e algumas porções está encoberta por material aluvionar do rio Tocantins. Apesar da continuidade, sua composição varia lateralmente. Em alguns locais, observam-se algumas concreções centimétricas, pequenas lentes de arenito fino, porções brechóides e foram encontrados dois troncos vegetais carbonificados como o da Figura 9, um orientado quase E-W e outra na posição N60W (Figura 8). Pequenos caules carbonificados, de até 5 cm, foram encontrados em diversos locais no afloramento.



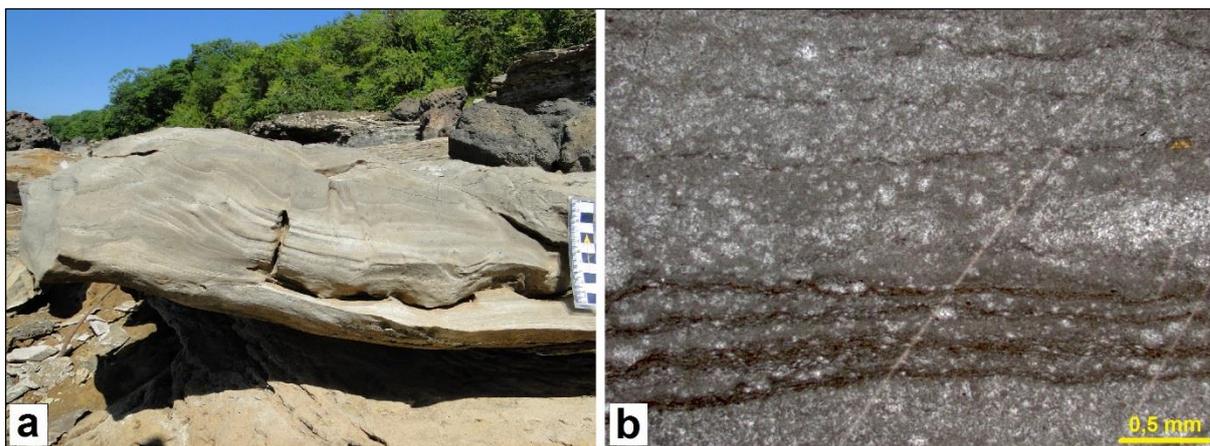
**Figura 9-** Caule carbonificado achatado no calcário basal da Formação Codó no afloramento na margem esquerda do rio Tocantins, próximo a Imperatriz.

Na parte superior desta camada calcária, próximo aos bioerma 2, 4 e 5, foram observados prováveis pseudomorfos de gipsita evaporítica (Figura 10).



**Figura 10-** Vista em planta da camada calcária basal com prováveis pseudomorfos de gipsita evaporítica (alongados e esbranquiçados), próximo ao bioerma 2.

No geral, esta camada apresenta-se com estrutura maciça, mas na porção norte do afloramento observa-se laminação ondulada irregular, quase rítmica, com fraca tendência de granodecrescência em cada lâmina (Figura 11a), localmente com aparência de estratificação cruzada por ondas, porém muito variável no sentido horizontal. Algumas porções laminadas lembram esteiras microbianas, mas não há claros limites verticais e laterais entre as partes laminadas e as não laminadas. Análises ao microscópio (Figura 11b) também mostram feições laminadas, porém aparentemente não são microbianas, pois a laminação, na realidade, corresponde a finos níveis de grãos insolúveis que foram concentrados devido à dissolução parcial por compactação da rocha carbonática impura, neste caso um micrito peloidal com proporção significativa de grãos muito finos de quartzo e de minerais opacos e/ou óxidos.



**Figura 11-** Camada carbonática basal da Formação Codó. (a) Laminação ondulada na rocha. (b) Fotomicrografia (nicóis paralelos) da amostra TOI-33, classificada como um micrito com abundantes peloides, grãos finos de quartzo e feições de dissolução (linhas sub-horizontais escuras com concentração de grãos insolúveis e óxidos).

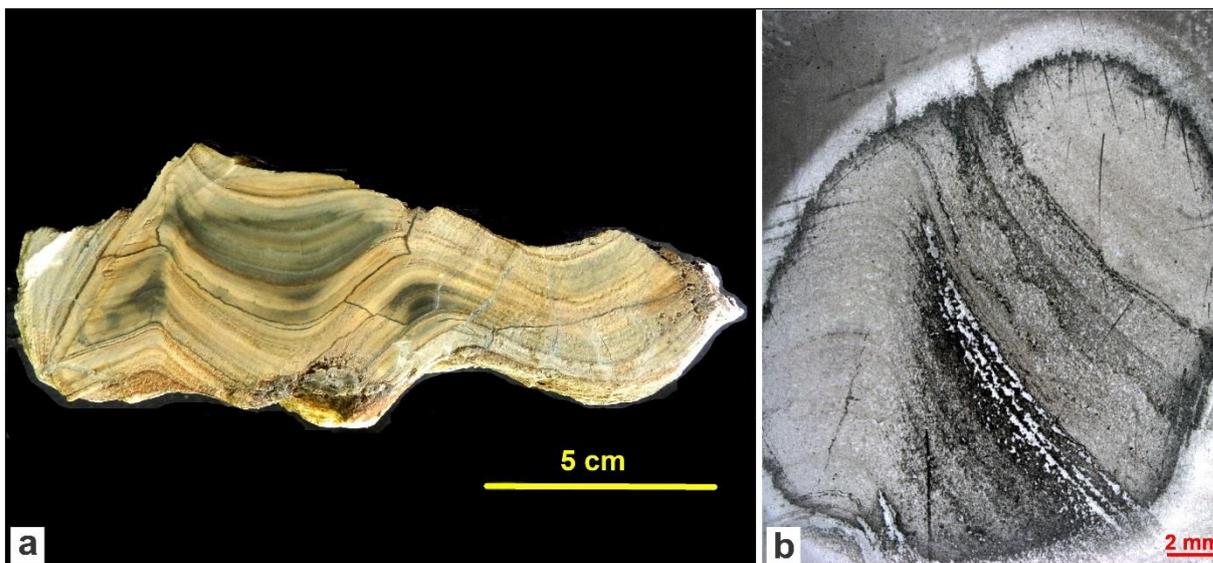
## B. Folhelhos escuros e carbonatos intercalados

Os folhelhos se estendem por todo afloramento e têm espessura variável em torno de 1 m, atingindo os valores máximos na porção norte. Apresentam coloração cinza amarronzada com a típica alteração intempérica por empastilhamento, sendo comuns nódulos centimétricos de carbonato de cálcio. Os folhelhos formam camadas de 2 a 50 cm de espessura separadas por diversas camadas de carbonato de cálcio, com 2 a 6 cm de espessura (Figura 12).



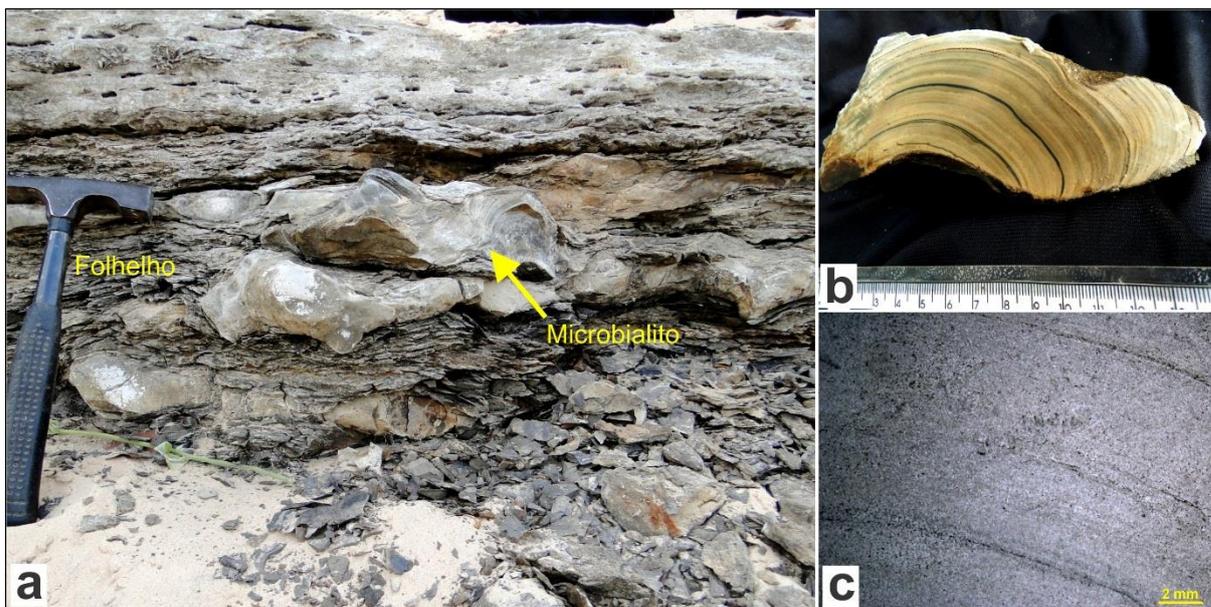
**Figura 12-** Folhelho com camadas delgadas de calcário intercaladas.

Quase todas as camadas carbonáticas intercaladas são estruturalmente maciças, mas algumas correspondem a microbialitos, com 5 a 15 cm de espessura, como no caso das amostras TOI-9 e TOI-55 coletadas entre os bioermas 1 e 2, cerca de 10 cm abaixo do topo dos folhelhos. Os microbialitos são laminitos microbianos ondulados irregularmente, às vezes com porções convexas suaves, outras vezes quase cônicas com grandes variações laterais (Figura 13a). Em lâmina petrográfica, nas porções não alteradas dos microbialitos, a composição é carbonato micrítico homogêneo, com laminação muito mal definida. Na amostra TOI-9, onde o carbonato de cálcio foi parcialmente substituído ou dissolvido, são reconhecíveis lâminas microbianas de 2 a 5 mm de espessura (Figura 13b). Petrograficamente, estes microbialitos e todos os outros do presente trabalho são micritos ou biolitos na classificação de Folk (1959) ou *boundstone* conforme classificação de Dunham (1962), variando apenas localmente onde a calcita foi recristalizada.



**Figura 13-** Microbialito da amostra TOI-9 intercalado nos folhelhos. (a) Foto da seção vertical da amostra, mostrando laminito microbiano ondulado irregularmente. (b) Fotomicrografia (ncois paralelos) de uma porção convexa com variações na preservação: nas partes melhor preservadas, as lâminas individuais são quase indistinguíveis, porém nas porções alteradas à direita, a laminação se destaca por feições de dissolução e aparentemente substituição.

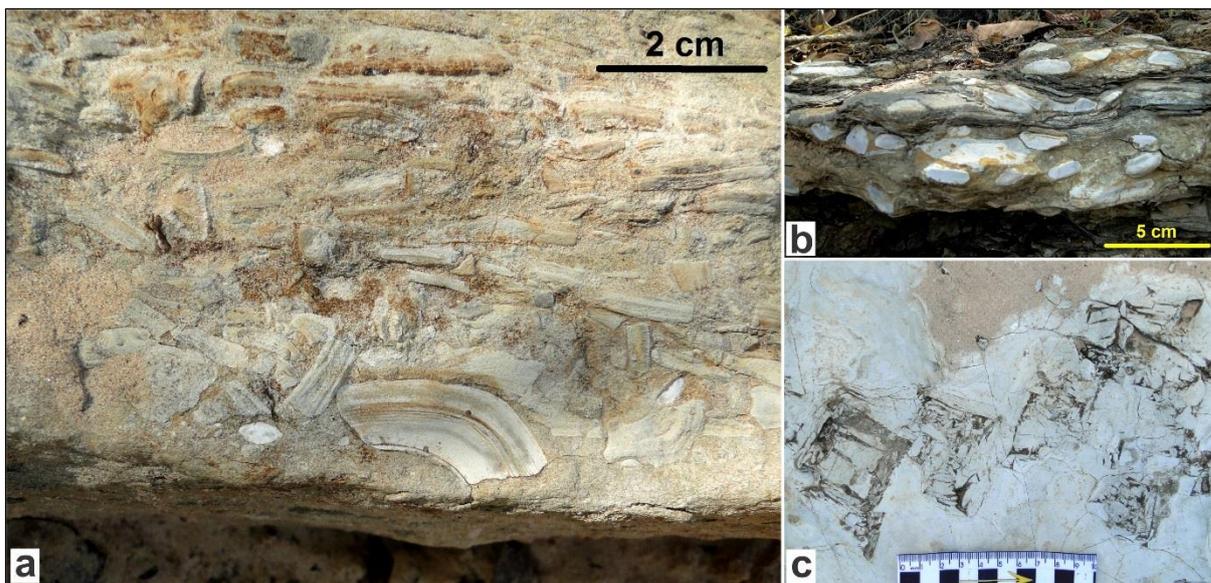
A amostra TOI-55, que também representa um laminito microbiano ondulado (Figura 14a), têm aparência dômica a pseudocolunar, lâminas convexas bem distinguíveis a olho nu, com espessuras de 4-5 mm, e limites entre lâminas mais marcados a cada 1,5 cm (Figura 14b), refletindo algum controle cíclico. Ao microscópio óptico, as lâminas de micrita, com espessura de aproximadamente 5 mm, são fracamente marcadas, separadas por finas linhas escuras que parecem ser níveis de dissolução do carbonato; são compostas por tênues lâminas submilimétricas bastantes regulares (Figura 14c).



**Figura 14-** Microbialito da amostra TOI-55 intercalado nos folhelhos. (a) Localização da amostra no afloramento. Abaixo, nos folhelhos, há grandes nódulos carbonáticos. (b) Seção vertical da amostra, mostrando uma laminação dômica e com espessura relativamente regular de 4-5 mm, e também alguns limites de 1,5 cm de espessura fortemente marcados entre as lâminas. (c) Fotomicrografia (nicóis paralelos) revelando lâminas de micrito (~5 mm) separadas por finas “linhas” escuras provavelmente equivalendo a níveis de dissolução dos carbonatos; as lâminas principais são tênues e submilimétricas.

### C. Brecha carbonática

Em diversos pontos do afloramento, acima dos folhelhos, foi observada uma camada brechóide com ~12 cm de espessura constituída por clastos angulosos de carbonatos. Os clastos geralmente são fragmentos de microbialitos (dimensões variáveis em torno de ~0,5 cm x ~1 cm x ~2 cm) (Figura 15a). Acima da brecha, em alguns locais do afloramento, há calcilitos esbranquiçados (~3 cm de espessura) com abundantes nódulos alongados de calcita (Figura 15b). No topo destes calcilitos ocorrem muitos *hoppers* de halita, com 0,5 a 3 cm de diâmetro (Figura 15c). Estes *hoppers* são moldes cúbicos (ou quadrangulares quando aparecem apenas num plano) de cristais de halita os quais se formaram na lama carbonática e foram substituídos por calcita durante a compactação (GORNITZ & SCHREIBER, 1987). Em outros locais, os *hoppers* de halita sobrepõem diretamente a brecha.



**Figura 15-** Camada de brecha carbonática sobreposta por calcilutitos. (a) Brecha carbonática numa seção vertical natural do afloramento, constituída por clastos angulosos de carbonato, inclusive clastos de microbialitos, em local próximo ao bioerma 7. (b) Calcilutito com abundantes nódulos de calcita. (c) *Hoppers* de halita no topo do calcilutito.

Ao norte do bioerma 1, um pequeno microbialito numa camada intercalada entre folhelhos possui uma porção dômica ou pseudocolunar mais proeminente, cuja porção superior aflora acima do nível da brecha carbonática (Figura 16).

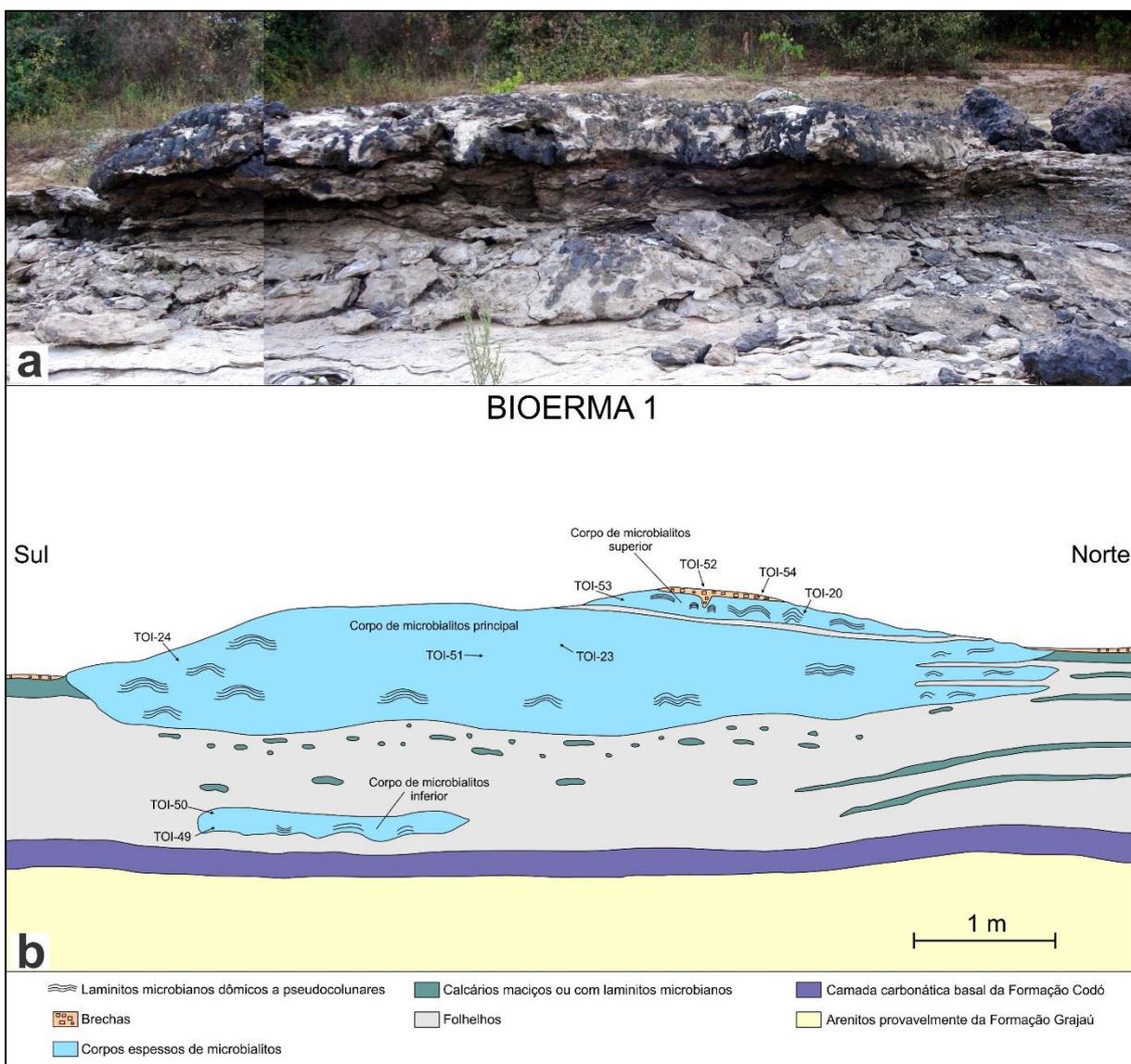


**Figura 16-** Vista em planta de microbialito pseudocolunar cuja porção superior aflora acima do nível da brecha carbonática, ao norte do bioerma 1.

### 5.1.2 Bioermas

#### A. Bioerma 1

Este bioerma, situado na porção norte do afloramento, tem 9,6 m de extensão na direção N-S e cerca de 1,8 m de altura (Figura 17). O bioerma, na realidade, é composto por três corpos de microbialitos (a priori, três bioermas) separados por folhelhos.

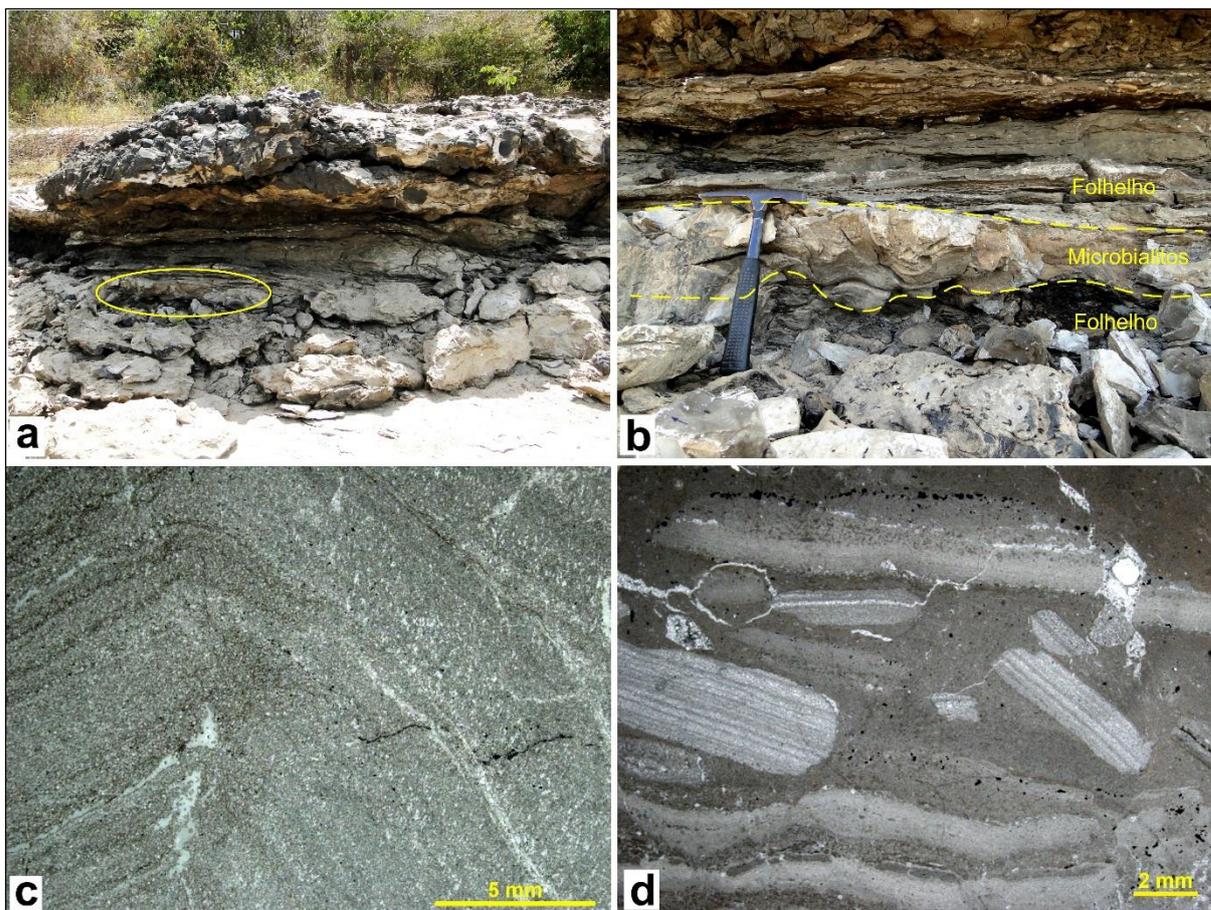


**Figura 17-** Bioerma 1. (a) Fotomosaico do bioerma 1, com 9,6 m de extensão. (b) Esquema geral do bioerma 1 sobrelevado 1,5x, com localização das amostras coletadas.

Os folhelhos abaixo do corpo de microbialitos principal são aqueles descritos para as regiões do afloramento sem bioermas. Alcançam 0,9 m de espessura e

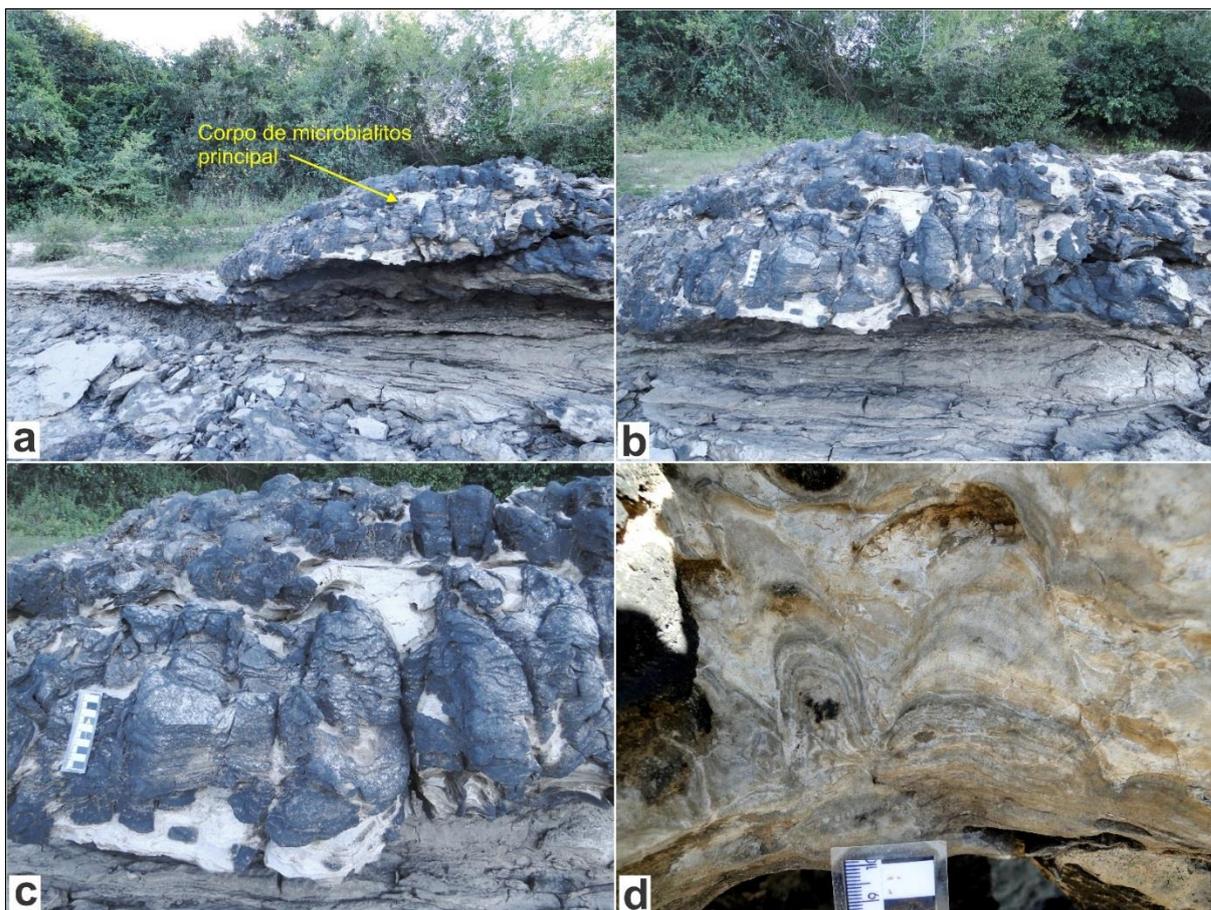
apresentam intercalações de finas camadas calcárias (cerca de 4 cm de espessura), assim como pequenos nódulos calcários (em média 5 cm de espessura).

Na porção sul do bioerma encontra-se o corpo de microbialitos inferior com 20 cm de espessura e 1,5 m de extensão (Figuras 18a, b). Os microbialitos são constituídos por lâminas onduladas irregulares lateralmente contínuas com relevo sinóptico expressivo, equivalente ao padrão pseudocolunar. O desnível entre os pontos mais baixos e os mais altos de uma lâmina chega a 10 cm. A amostra TOI-49 abrange uma porção convexa do microbialito na parte basal deste corpo em contato com o folhelho. A porção convexa possui ápice relativamente agudo, o qual lembra o padrão dos estromatólitos cônicos, porém é mais irregular e sem zona axial (Figura 18c). A laminação é quase indistinguível em algumas porções, estando mais marcada onde aparentemente houve precipitação de finos filmes de calcita entre as lâminas. Também há diversas pequenas fraturas preenchidas por calcita. Duas lâminas mais espessas (~3 mm e ~2 mm) apresentam pequenas estruturas quase ortogonais à laminação (até 2-3 mm de comprimento e espessuras da ordem de décimos de milímetros), que poderiam ser derivadas de filamentos da comunidade microbiana, porém, nesta hipótese, seu tamanho deveria ser menor. A amostra TOI-50 foi coletada na parte superior do mesmo corpo de microbialitos, correspondendo a uma brecha constituída por fragmentos angulosos de microbialitos e matriz micrítica, com marcas de dissolução (Figura 18d). A brecha sugere que o microbialito teve exposição subaérea e gretamento, com pequeno transporte dos clastos antes de nova submersão (por transgressão) e recobrimento por lama (que originou o folhelho).



**Figura 18-** Corpo de microbialitos basal do bioerma 1. (a) Localização do corpo no bioerma, destacado pelo círculo amarelo. (b) Detalhe do corpo, mostrando diminuição de espessura para o lado direito e lâminas muito onduladas do microbialito. (c) Fotomicrografia (nicóis paralelos) da amostra TOI-49, da parte basal do corpo, com laminação tênue, calcita em fraturas e nos limites entre algumas lâminas e, no lado direito, padrão de estruturas perpendiculares às lâminas. (d) Fotomicrografia (nicóis paralelos) da amostra TOI-50, da parte superior do corpo, composta por brecha de fragmentos de microbialitos e matriz micrítica.

O corpo de microbialitos principal do bioerma 1, com até 1 m de espessura, apresenta contato ondulado com o folhelho inferior (Figura 19a). O aspecto das seções verticais intemperizadas do bioerma é de colunas com até 20 cm de diâmetro e 35 cm de altura, recobertas por uma película preta provavelmente de óxido de manganês, atribuível a processos intempéricos, vadosos ou freáticos quaternários (Figura 19b, c). Na realidade, ao examinar porções sem a película preta (Figura 19d) ou cortes verticais de amostras (Figura 21a), verifica-se que os microbialitos são similares aos descritos para o corpo inferior e para as camadas delgadas intercaladas entre folhelhos, ou seja, são lâminas lateralmente contínuas com relevo sinóptico expressivo (variável, até > 10 cm), caracterizando um padrão dômico a pseudocolunar ou, localmente, padrão complexo colunar-laminado pela presença de colunas isoladas desenvolvidas sobre a porção convexa de laminações onduladas (Figura 19d).



**Figura 19-** Microbialitos do bioerma 1. (a) Localização do corpo de microbialitos principal, na porção sul do bioerma. (b) Corpo principal de microbialitos do bioerma, recobertos por película preta provavelmente de óxido de manganês atribuível a processos intempéricos. (c) Detalhe da foto anterior, com colunas de microbialitos de até 20 cm de diâmetro e 35 cm de altura. (d) Microbialitos apresentando lâminas lateralmente contínuas com relevo sinóptico expressivo na parte inferior, e padrão complexo colunar-laminado na parte superior.

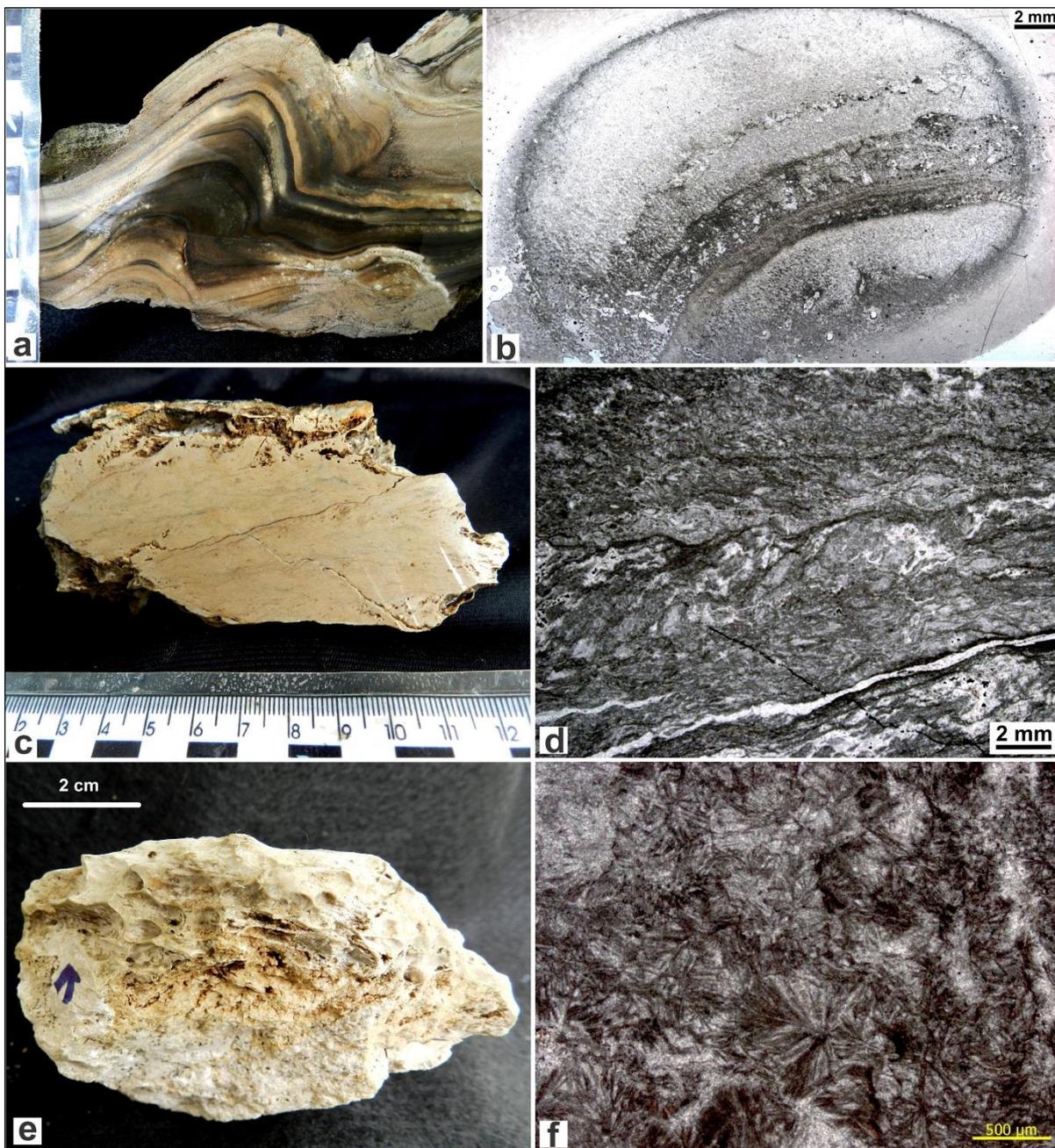
Os microbialitos no topo do corpo principal do bioerma 1 podem ser observados em planta, sendo que neste ângulo de visão apresentam, no geral, seção horizontal circular, porém alguns são elípticos ou configuram estreitos e rasos canais na direção N60W (Figura 20). Tais feições sugerem que os microbialitos se desenvolveram sob influência de fluxos, porém pouco intensos.



**Figura 20-** Vista em planta dos microbialitos do corpo principal do bioerma 1, mostrando pseudocolunas ou colunas de contorno circular ou elíptico e, no lado esquerdo inferior da imagem, as bordas estão alinhadas, indicando a provável presença de pequenos canais condicionados por fluxos. Escala na parte inferior da foto.

A amostra TOI-24 é um microbialito coletado na borda do corpo principal do bioerma 1. Em escala mesoscópica, apresenta laminações com aproximadamente 1 cm de espessura, muito irregulares, com rápidas passagens laterais de um padrão parabólico para um padrão quase horizontal, muitas vezes com as porções mais convexas bastante agudas (Figura 21a). Microscopicamente, como nas amostras de outros níveis já descritos, a laminação é fracamente marcada e parecem existir estruturas filamentosas perpendiculares à laminação, porém relativamente grandes (até 2 mm de comprimento e décimos de milímetros de espessura) em relação às dimensões normais de filamentos de cianobactérias (Figura 21b).

Na porção superior central do corpo, os microbialitos desaparecem, dando lugar para uma rocha carbonática com estrutura praticamente maciça e feições de dissolução (por exemplo, amostras TOI-23 e TOI-51, respectivamente, Figuras 21c, e). Mesmo ao microscópio óptico é difícil reconhecer laminações microbianas originais nas amostras (Figuras 21d, f). A lâmina petrográfica da amostra TOI-23 apresenta cristais radiais de calcita que podem ser interpretados como substituição de anidrita (Figura 21f).



**Figura 21-** Amostras do corpo de microbialitos principal do bioerma 1. (a) Amostra TOI-24, um microbialito da borda do bioerma com lâminas lateralmente contínuas muito irregulares num padrão pseudocolunar. (b) Fotomicrografia (nicóis paralelos) da amostra TOI-24, onde se destacam as lâminas recristalizadas entre porções sem laminação distinguível. (c) Amostra TOI-51, coletada na porção central do bioerma 1, sem feições microbianas preservadas, provavelmente modificadas na diagênese. (d) Fotomicrografia (nicóis paralelos) da amostra TOI-51, notando-se feições provavelmente de dissolução e deformação. (e) Amostra TOI-23, com estrutura maciça e feições de dissolução. (f) Fotomicrografia (nicóis paralelos) da amostra TOI-23, mostrando diversos cristais de calcita com hábito radial, provavelmente representando substituição de anidrita.

Acima do corpo principal do bioerma 1, existe um último corpo de microbialitos com características um pouco distintas do anterior. Uma camada muito fina de folhelho (até 3 cm de espessura) separa este corpo superior do principal. Em afloramento, este carbonato ocorre como uma camada arqueada com cerca de 0,5 m de espessura, é

mais esbranquiçado, mais compacto, com laminações microbianas destacadas (Figura 22). A laminação é contínua lateralmente com relevo sinóptico significativo, caracterizando o padrão pseudocolunar ou, às vezes, a combinação entre pseudocolunas e colunas. Porém, a camada como um todo está parcialmente deformada e com microfalhas, provavelmente resultantes de ressecamento, sendo comum a ocorrência de colunas ou pseudocolunas ao lado de lâminas sub-horizontais (Figura 22).



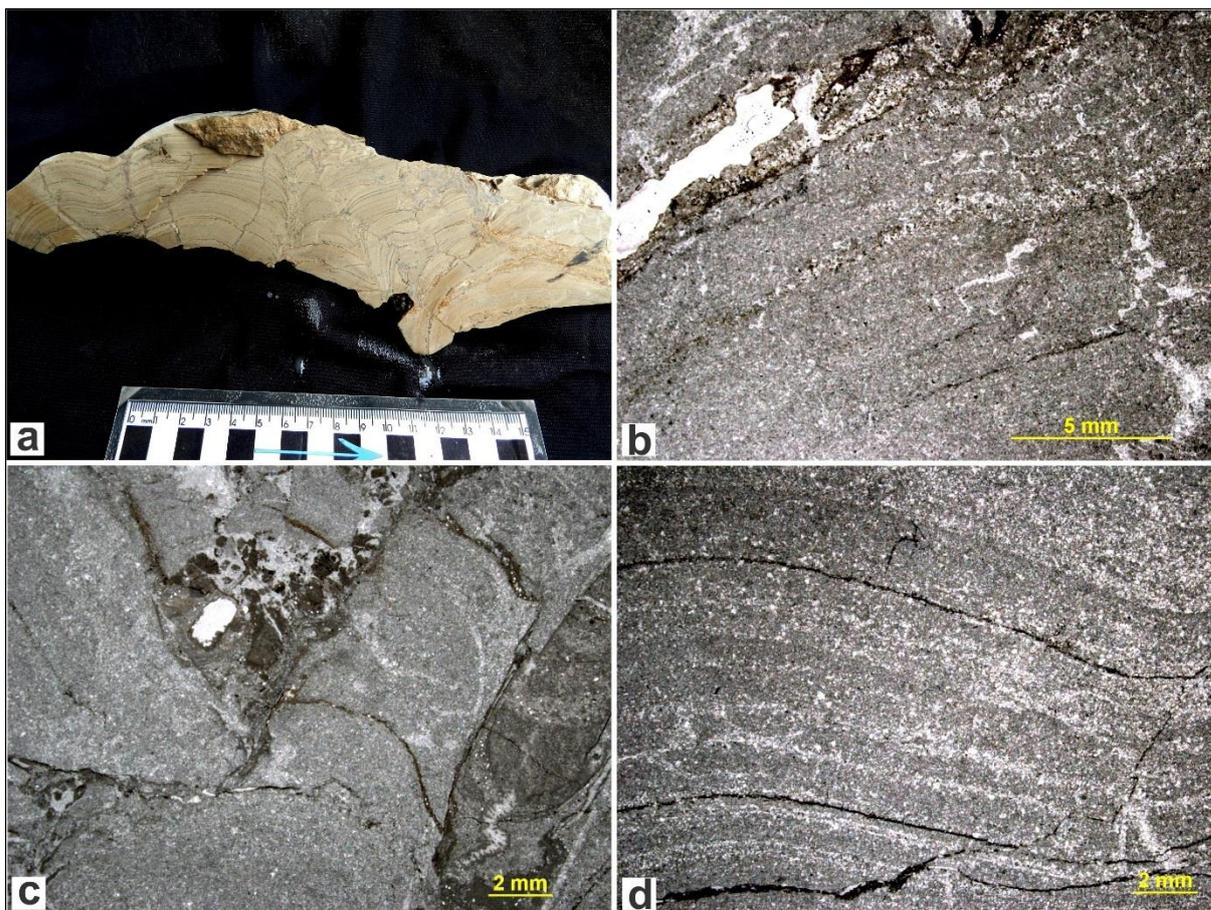
**Figura 22-** Corpo de microbialitos superior acima do corpo de microbialitos principal do bioerma 1. O tracejado amarelo delimita os dois conjuntos.

A amostra TOI-20 exibe padrões relativamente distintos de lâminas em duas seções verticais ortogonais, uma com o padrão de lâminas onduladas lateralmente contínuas, e a outra com aparência colunar a pseudocolunar (Figuras 23a, b). As lâminas têm espessuras entre 0,5 e 1 cm, sendo relativamente evidentes a olho nu, porém muito apagadas nas lâminas petrográficas (Figuras 23c, d). Em geral, há numerosas fraturas, microfalhas e evidências de deformação (Figura 23b). As linhas escuras que delimita as lâminas provavelmente se formaram por dissolução parcial durante a compactação (Figuras 23c, d).



**Figura 23-** Amostra TOI-20 do corpo de microbialitos superior do bioerma 1. (a) A amostra abrange uma porção com lâminas convexas do bioerma. (b) Foto de seção vertical da amostra em posição perpendicular à superfície exposta em “a”, mostrando tendência de ramificação na parte superior e diversas fraturas preenchidas por calcita. Algumas lâminas mais destacadas parecem apresentar espaçamento regular, talvez evidenciando ciclicidade. (c) Fotomicrografia (nicóis paralelos) da amostra, onde as lâminas são reconhecíveis principalmente onde estão limitadas por óxidos (“linhas escuras”). (d) Fotomicrografia (nicóis paralelos) obtida com maior aumento para mostrar os níveis de concentração de óxidos, provavelmente por dissolução durante a compactação, e o caráter maciço das lâminas ou com fraca tendência de desenvolvimento de cristais perpendiculares à laminação.

A amostra TOI-53, coletada próxima à base do corpo de microbialitos superior do bioerma 1, evidencia marcante brechamento. A espessura média das lâminas chega a 1 cm, porém estão muito deformadas na maior parte da amostra (Figura 24a). Foram confeccionadas três lâminas delgadas na mesma seção. Na Figura 24b (lâmina TOI-53a), há fraturas, diversas porções com evidências de dissolução e quase não é possível reconhecer as lâminas microbianas. Na Figura 24c (lâmina TOI-53b), há um fragmento de microbialito, com lâminas não muito marcadas, numa porção bastante brechada. E na Figura 24d (lâmina TOI-53c) as lâminas estão suavemente onduladas, pouco marcadas, exceto onde limitadas por uma película escura provavelmente de óxidos.



**Figura 24-** Amostra TOI-53 na parte basal do corpo de microbialitos superior do bioerma 1. (a) Foto da seção vertical da amostra, mostrando acentuado brechamento. (b) Fotomicrografia (nicóis paralelos, TOI-53a), com lâminas microbianas pouco destacadas e feições de dissolução. (c) Fotomicrografia (nicóis paralelos, TOI-53b) de porção mais brechada da amostra. (d) Fotomicrografia (nicóis paralelos, TOI-53c) com laminação microbiana um pouco melhor destacada, suavemente ondulada, algumas lâminas limitadas por finos níveis de óxidos.

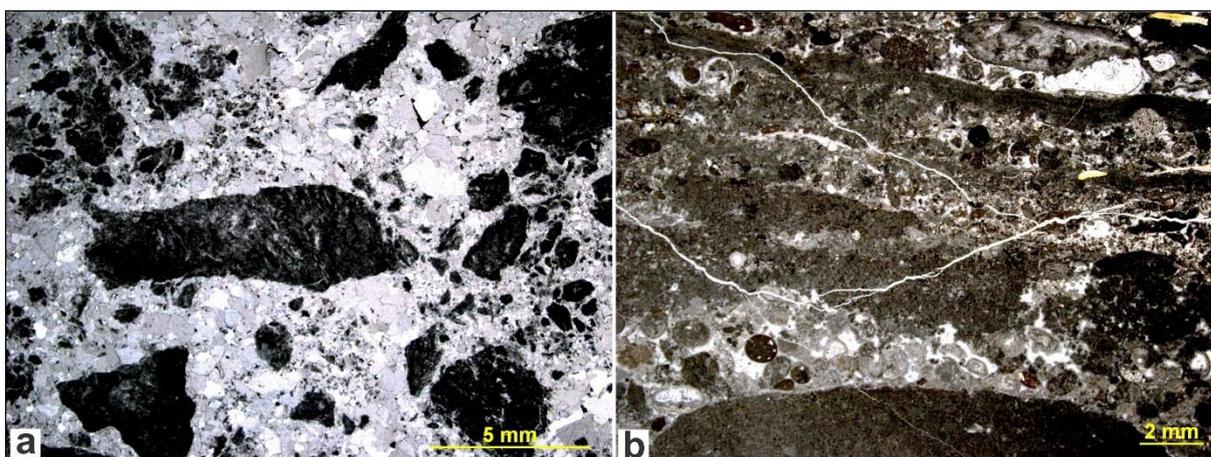
Os microbialitos deste corpo superior, quando vistos em planta, apresentam forma circular a triangular e pequenos *hoppers* de halita (Figura 25).

Recobrendo este último corpo de microbialitos, tem-se uma fina camada de brecha calcária com cerca de 2 cm de espessura (amostra TOI-52, Figura 26a), com restos de peixes (dentes e ossos parcialmente articulados). Esta brecha também ocupa os espaços intercolunares dos microbialitos, como é o caso da amostra TOI-54 (Figura 26b). Esta última apresenta peloides, alguns fragmentos vegetais, ossos de peixes e esferas escuras que podem corresponder a coprólitos de crustáceos.

Uma fina camada carbonática branca com estrutura maciça recobre a brecha e/ou parte dos microbialitos. Esta camada apresenta muitas microfaturas irregulares e encontra-se localmente brechada, evidenciando exposição subaérea (Figura 25).



**Figura 25-** Vista em planta de microbialito do corpo superior do bioerma 1, contendo *hoppers* de halita. O carbonato que recobriu os microbialitos e preencheu os espaços entre as pseudocolunas apresenta microfaturas e localmente ficou brechado (como no canto superior esquerdo), provavelmente por exposição subaérea). Na parte superior esquerda da imagem, existe uma fina camada de brecha calcária.

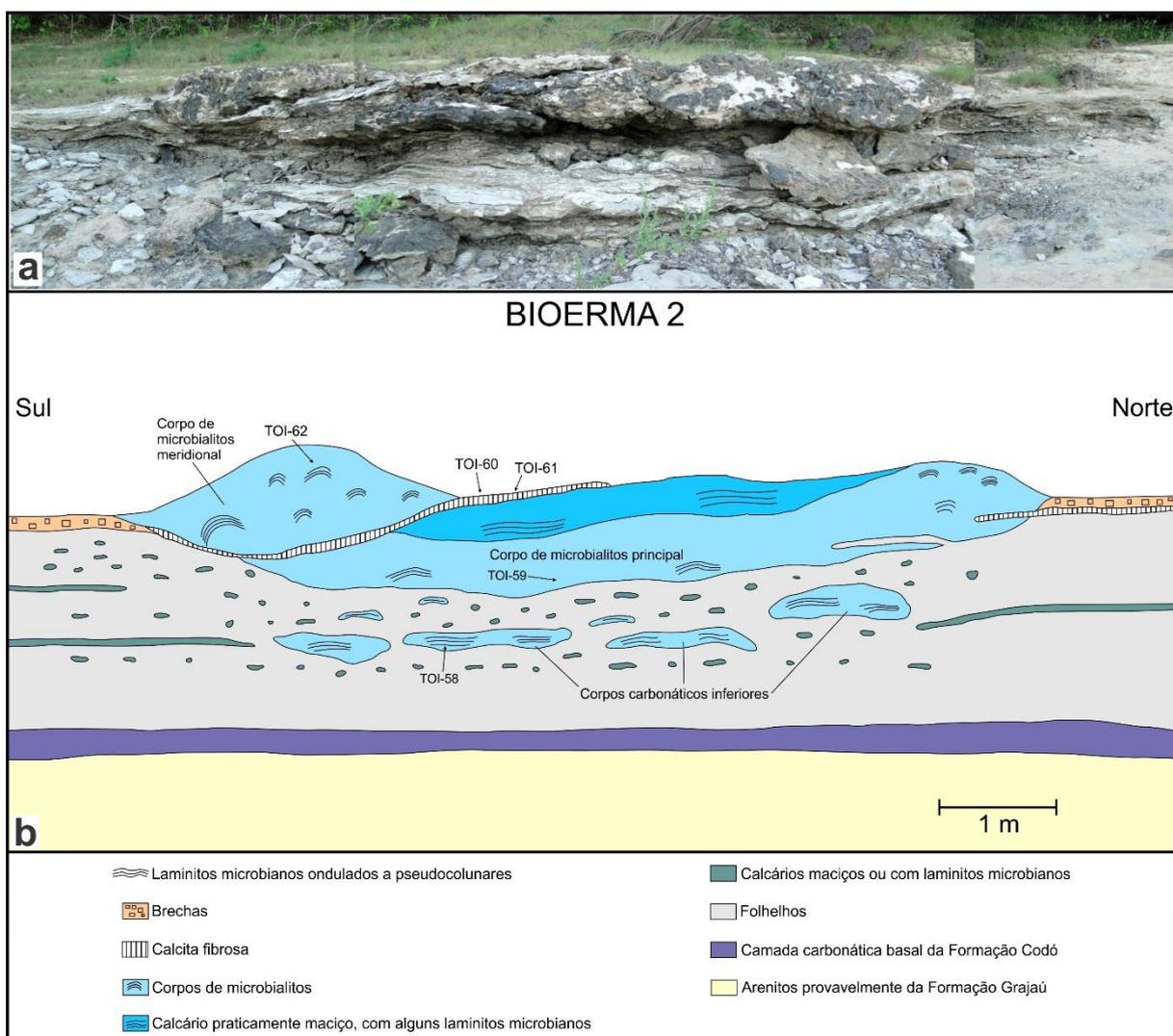


**Figura 26-** Brecha calcária sobre o bioerma 1. (a) Fotomicrografia (nicóis paralelos, amostra TOI-52) da brecha calcária que recobre o corpo de microbialitos superior do bioerma 1, apresentando grãos de quartzo, fragmentos de rocha (escuros) numa matriz micrítica. (b) Fotomicrografia (nicóis paralelos, amostra TOI-54) de fina brecha intercolunar do corpo de microbialitos superior do bioerma 1, destacando-se as abundantes estruturas circulares que podem ser coprólitos de crustáceos.

## B. Bioerma 2

O bioerma 2 tem 8 m de extensão e a distância que o separa do bioerma 1 é cerca de 16 m. Os aspectos gerais do bioerma 2 se assemelham aos do bioerma 1. A principal diferença é que, no bioerma 2, existem camadas de cristais de calcita com hábito fibroso vertical, as quais são detalhadas posteriormente. Outra distinção neste bioerma é a presença de possíveis laminitos microbianos menos ondulados (Figura 27).

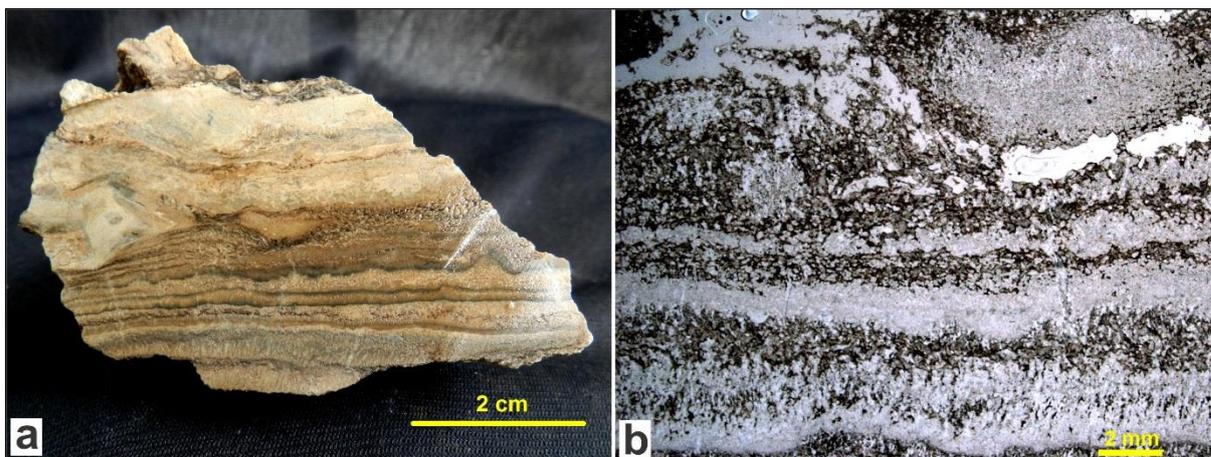
As porções com microbialitos foram aqui denominadas “corpos carbonáticos inferiores”, “corpo de microbialitos principal” e “corpo de microbialitos meridional” (Figura 27).



**Figura 27-** Bioerma 2. (a) Mosaico de fotos do bioerma 2, com 8 m de extensão. (b) Esquema geral do bioerma 2, com sobrelevação de 1,5x.

O corpo de microbialitos principal do bioerma 2, assim como no bioerma 1, está sobre folhelhos com algumas intercalações de delgadas camadas calcárias e abundantes nódulos ou concreções (com 2 a 6 cm de espessura). Blocos rolados do bioerma recobrem quase totalmente a parte inferior dos folhelhos, impedindo sua observação detalhada.

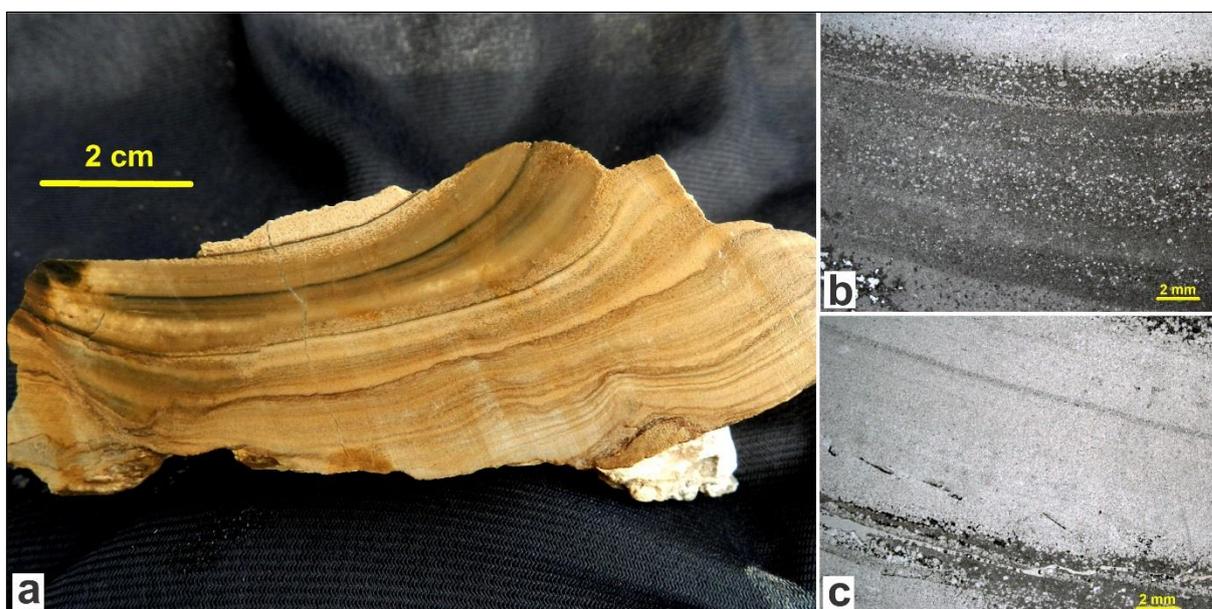
Alguns corpos carbonáticos intercalados nos folhelhos ultrapassam 20 cm de espessura e são aqui denominados como “corpos carbonáticos inferiores” (Figura 27). Estes corpos incluem microbialitos e porções com brechas. Adicionalmente, abaixo dos laminitos microbianos, ocorre um ritmito irregular, que inclui lâminas com cristais de calcita perpendiculares à laminação e limites entre lâminas irregulares provavelmente por causa de dissolução (amostra TOI-58, Figuras 28a, b). Este ritmito lembra depósitos evaporíticos de gipsita (crostas de gipso), posteriormente substituída por calcita (como exemplificadas em KENDALL & HARWOOD, 1996).



**Figura 28-** Amostra TOI-58 do corpo de microbialitos inferior do bioerma 2. (a) Foto da amostra TOI-58 (vide Figura 28 para localização), com duas partes distintas, a inferior com aparência rítmica irregular e feições de dissolução, incluindo lâminas com cristais fibrosos de calcita; a parte superior, conforme observação de campo, deve corresponder a lâminas microbianas onduladas, porém alteradas por dissolução e recristalização. (d) Fotomicrografia (nicóis paralelos) da parte inferior da mesma amostra, destacando-se lâminas com calcita fibrosa deformada perpendicular à laminação.

No corpo principal do bioerma 2, os microbialitos apresentam lâminas muito onduladas, formando pseudocolunas, como no bioerma 1. Em corte vertical na amostra TOI-59 (Figura 29a), são visíveis lâminas submilimétricas difusas organizadas em conjuntos maiores com espessuras em torno de 1 cm. A separação dos conjuntos maiores dá-se por níveis submilimétricos escuros que, em algumas porções, são irregulares provavelmente por dissolução do carbonato e concentração

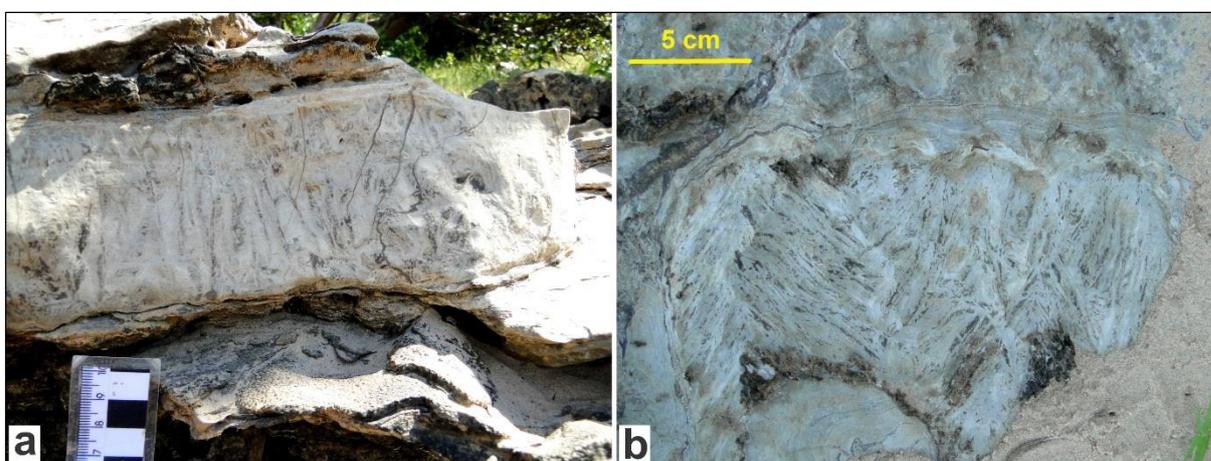
de materiais insolúveis escuros, mas em outras porções há subdivisão em lâminas mais finas, quase não perceptíveis, definidas por diferenças na granulação. A regularidade na ocorrência destes níveis (inclusive onde aparentemente houve dissolução) poderia indicar algum controle cíclico. Análises petrográficas das mesmas amostras (Figuras 29b, c) mostram a composição micrítica, porém com grande quantidade de finos grãos de calcita submilimétricos. Assim como já observado a olho nu na seção vertical da amostra, a variação na granulação destes grãos define as finas lâminas submilimétricas difusas dentro dos conjuntos maiores. Os limites entre os conjuntos de lâminas não parecem indicar mudança marcante no desenvolvimento dos microbialitos, às vezes apenas representando níveis preferenciais de precipitação de calcita, sílica ou óxidos durante a diagênese (Figura 29c).



**Figura 29-** Microbialito do corpo principal do bioerma 2 (amostra TOI-59), caracterizado por lâminas microbianas muito onduladas a pseudocolunares, abrangendo uma porção côncava da laminação. (a) Seção vertical da amostra, com lâminas milimétricas, localmente deformadas, compreendidas entre finos níveis escuros, os quais provavelmente representam superfícies de dissolução e/ou precipitação de óxidos. (b) Fotomicrografia (nicois paralelos, TOI-59A), onde uma lâmina relativamente espessa (~1 cm) apresenta matriz micrítica escura com finos grãos de calcita mais clara, cujas variações de tamanho definem sua subdivisão em lâminas subordinadas, porém difusas. (c) Fotomicrografia (nicois paralelos, TOI-59B), onde grãos de calcita são reconhecíveis apenas nas porções mais escuras.

Sobrepondo o corpo de microbialitos principal, tem-se uma porção mais esbranquiçada e maciça, com poucas laminações microbianas preservadas e partes com brechas constituídas por fragmentos de microbialitos. As lâminas são muito irregulares e não chegam a formar pseudocolunas como no corpo principal.

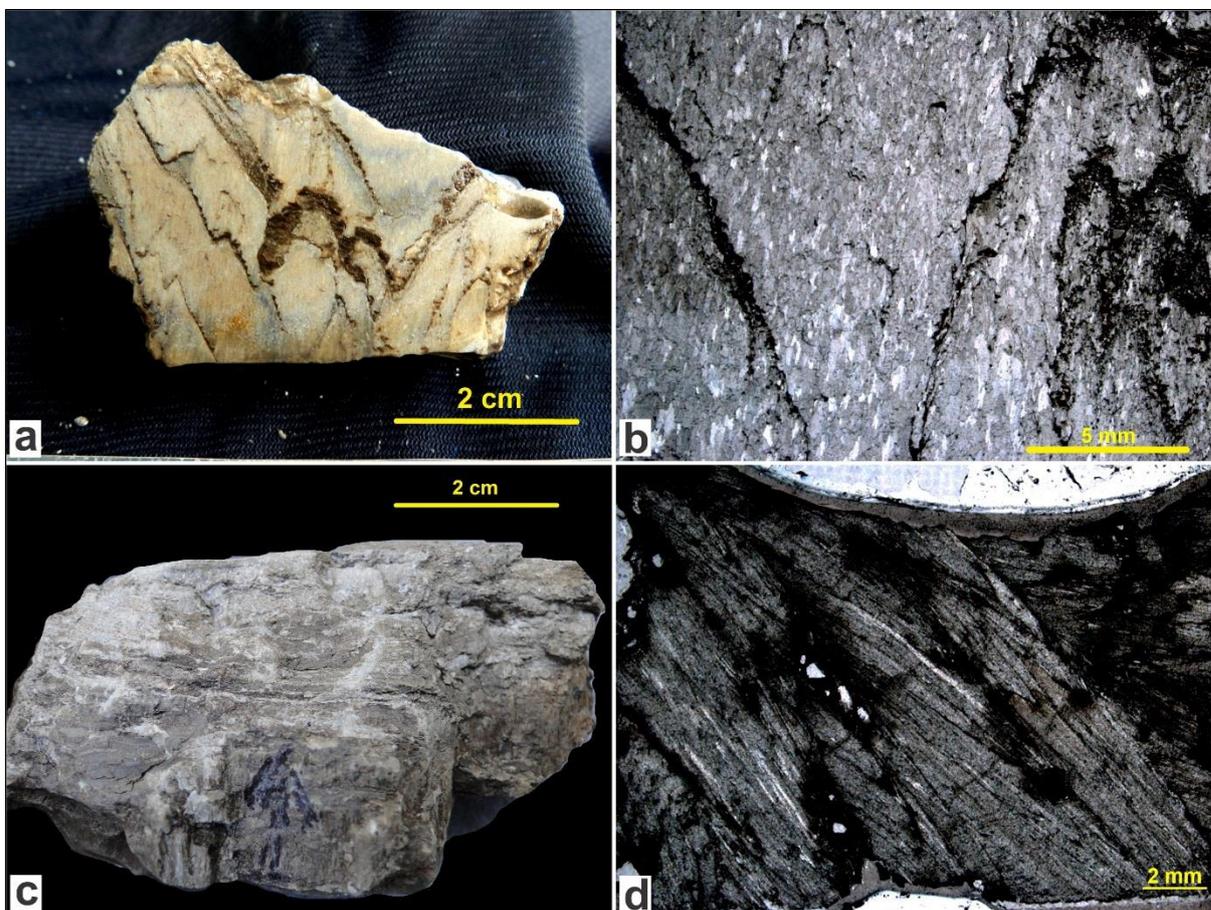
No bioerma 2 ocorrem duas delgadas camadas de calcita esbranquiçada, com cristais fibrosos orientados mais ou menos perpendicularmente à camada (Figura 27). Uma aflora na porção norte do bioerma, entre microbialitos no interior do corpo principal (Figura 30a), próximo à extremidade do corpo, estendendo-se para fora do bioerma por mais ~2 m, onde está posicionada imediatamente abaixo da camada brechóide (aquela que frequentemente tem os *hoppers* de halita no topo). Alcança cerca de 6 cm de espessura, mas se adelgaça para ambos os lados, até desaparecer. Os cristais de calcita são longos, estendidos da base até o topo da camada, não perfeitamente perpendiculares ao acamamento, mas configurando um padrão em *chevron* (zigue-zague). Outra camada de calcita fibrosa, com espessura similar, ocorre principalmente na porção sul do bioerma, entre o corpo de microbialitos principal e o corpo meridional, iniciando-se junto à brecha com os *hoppers* e estendendo-se para o meio do bioerma, acima do carbonato mais maciço (Figura 27). Em planta, os cristais têm organização radial e, localmente, também apresentam padrão em *chevron* (Figura 30b).



**Figura 30-** Calcita fibrosa no bioerma 2. (a) Camada de calcita com estrutura fibrosa que recobre os laminitos microbianos na porção superior do bioerma 2. (b) Vista em planta da mesma camada de calcita; nota-se estrutura semelhante ao tipo *chevron*.

As amostras TOI-60 e TOI-61 (Figura 31), coletadas no local, permitem observar mais detalhadamente o padrão em *chevron*, o que pode ser reconhecido macroscopicamente na superfície intemperizada, em corte vertical e em lâminas petrográficas. A amostra TOI-60, além da calcita, apresenta possíveis cristais de anidrita e linhas em zigue-zague escuras (Figura 31b) atribuíveis a níveis de dissolução de carbonatos e concentração de materiais insolúveis. Estas feições devem merecer novos estudos. A amostra TOI-61 (Figuras 31c, d) possui cristais de

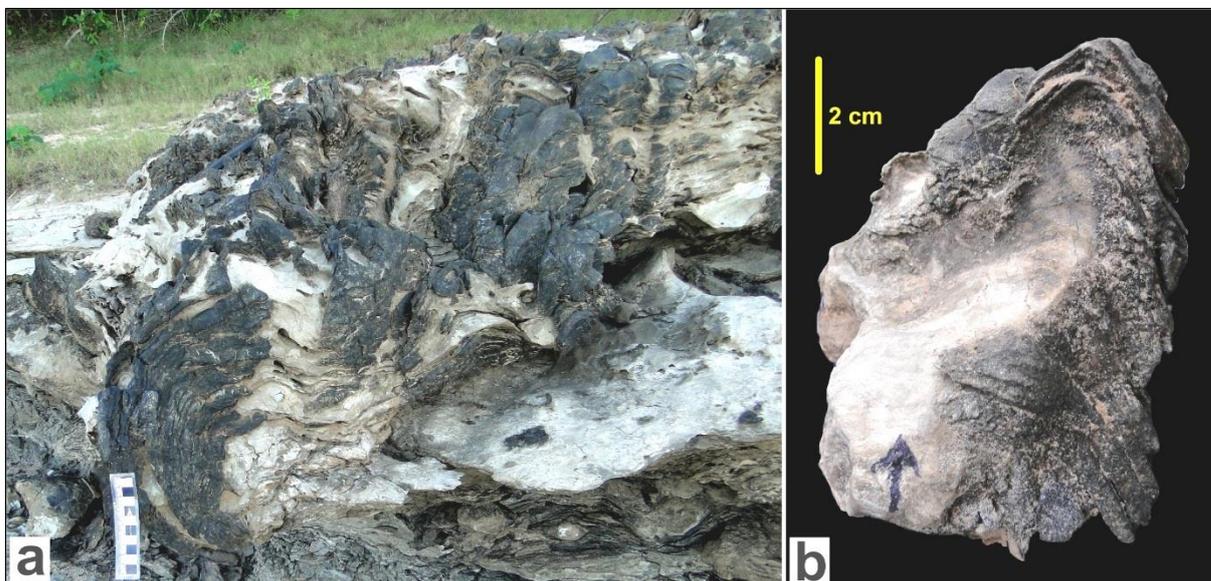
calcita maiores. Os cristais de calcita, em lâmina petrográfica, mostram uma tênue deformação, especialmente próximo ao topo da camada.



**Figura 31-** Amostras dos níveis de calcita fibrosa intercalados no bioerma 2. (a) Amostra TOI-60 em corte vertical que mostra calcita fibrosa que configura padrão em *chevron* e prováveis superfícies de dissolução do carbonato (partes escuras). (b) Detalhe da amostra anterior em fotomicrografia (nicos paralelos, TOI-60), mostrando cristais relativamente pequenos um pouco deformados. (c) Foto de calcita fibrosa na amostra TOI-61. (d) Fotomicrografia da mesma amostra (nicos paralelos, TOI-61) mostrando calcita fibrosa bem desenvolvida, porém um pouco deformada no topo.

O corpo de microbialitos meridional do bioerma 2 tem os laminitos microbianos pseudocolunares melhor desenvolvidos (Figura 32a). Na extremidade do bioerma, as lâminas encurvam-se fortemente para baixo, indicando o relevo sinóptico original de pelo menos 25 cm do bioerma (ou seja, desnível entre o bioerma e os sedimentos adjacentes ao bioerma). As pseudocolunas têm forma circular quando vistos em planta e porções mais altas quase cônicas, como na amostra TOI-62, mostrada na Figura 32b.

Os microbialitos no topo do bioerma 2 observados em planta apresentam, no geral, seção horizontal circular, porém alguns são elípticos ou configuram estreitos e rasos canais na direção N60°W, assim como no bioerma 1.



**Figura 32-** Corpo de microbialitos meridional do bioerma 2. (a) Microbialitos com laminações onduladas pseudocolunares. Notar o alto relevo das lâminas na porção onde se encontra a escala, devendo representar uma borda original do bioerma. (b) Foto da amostra TOI-62 coletada no corpo meridional, um típico microbialito com lâminas quase cônicas na porção superior.

### C. Bioerma 3

O bioerma 3 tem aproximadamente 9 m de extensão na direção N-S e uma distância de apenas ~1 m separa a extremidade deste bioerma daquela do anterior (Figura 8). No geral, os aspectos do terceiro bioerma se assemelham aos mencionados dos bioermas 1 e 2. Porém, pode-se destacar três principais diferenças: a) na porção mais central do bioerma, os microbialitos do corpo principal parecem estar em contato com a camada carbonática basal da Formação Codó (Figura 33a); b) na porção mais setentrional do bioerma, a porção inferior apresenta espetaculares lâminas microbianas quase cônicas, seguindo-se várias camadas delgadas (5-8 cm de espessura) de brechas carbonáticas, folhelhos e calcários maciços (calcilutitos), cuja relação lateral com o corpo de microbialitos principal não pôde ser claramente observada, mas parece ser interdigitada (Figura 33b). A camada de brecha carbonática superior, que é a continuação da mesma camada que aparece na parte sul do bioerma 2, recobre grande parte do bioerma 3 e também apresenta *hoppers* de

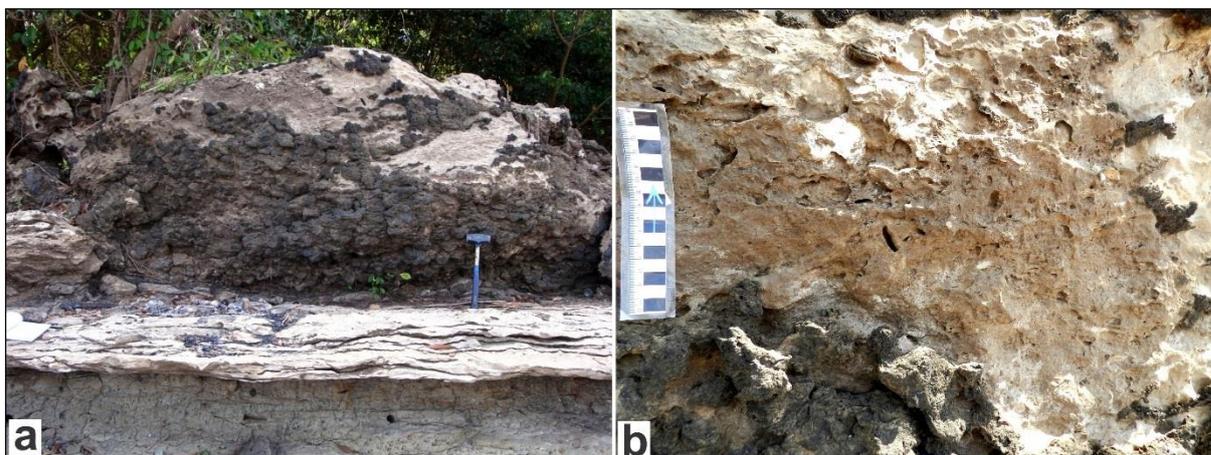
halita. Na parte sul do bioerma 3, abaixo dos microbialitos “cônicos”, quase em contato com a camada carbonática basal, há uma camada delgada de calcita fibrosa similar àquela do bioerma 2; c) O corpo de microbialitos principal, na realidade, está muito mal preservado e suas bordas estão recobertas por película de provável óxido de manganês recente ou pelo menos quaternário (Figura 33a).



**Figura 33-** Bioerma 3. (a) Foto mostrando a camada carbonática basal da Formação Codó sobreposta pelo corpo de microbialitos principal, o qual exibe laminações microbianas onduladas irregulares, sendo que em alguns locais equivalem ao padrão pseudocolunar. (b) Vista lateral de norte para sul do bioerma, mostrando microbialitos com morfologia quase cônica (~13 cm de altura) na parte basal e no meio da foto, recobertos por calcilutitos esbranquiçados, seguindo-se camadas de brechas calcárias, folhelhos e calcilutitos na parte superior.

#### D. Bioerma 4

Este bioerma tem cerca de 4 m de extensão e se assemelha, no geral, ao bioerma 3. Neste caso, pode-se reconhecer apenas um corpo inteiro de carbonato, o qual é separado da camada carbonática basal da Formação Codó por uma camada delgada de folhelhos pretos (~10 cm de espessura) (Figura 34a). Os laminitos microbianos, reconhecíveis apenas nas bordas laterais e na porção basal, são ondulados a pseudocolunares como nos corpos principais dos bioermas anteriores. Na parte superior do bioerma 4 têm-se carbonato praticamente maciço, com feições de dissolução, sem lâminas reconhecíveis, localmente com cristais de calcita fibrosa não orientados, repetindo-se feições da parte central superior do bioerma 1 (Figura 34b).



**Figura 34-** Feições do bioerma 4. (a) Em ordem ascendente: os arenitos provavelmente da Formação Grajaú; a camada carbonática basal da Formação Codó; e os laminitos microbianos do bioerma 4 na borda leste, muito mal preservados, recobertos por provável óxido de manganês, e topo praticamente maciço. (b) Detalhe da parte superior do bioerma, em vista lateral, com aspecto mais maciço e localmente calcita com hábito fibroso não orientado, com feições de dissolução.

#### E. Bioerma 5

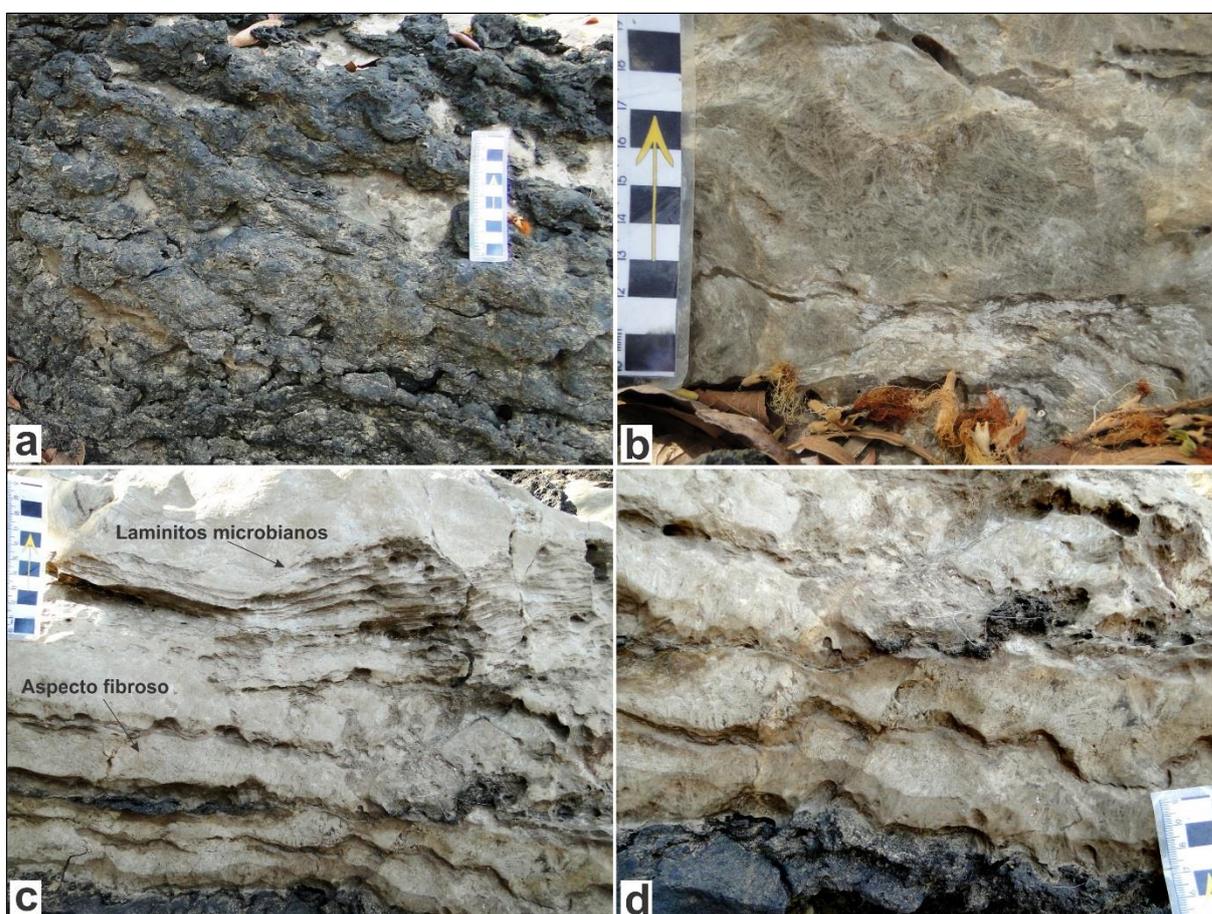
Este bioerma (Figura 35) está sobre uma camada delgada de folhelhos (~2 cm de espessura) acima da camada de calcário basal (da Formação Codó) a qual, neste local, é constituída por lâminas sub-horizontais irregulares (0,5-1 cm de espessura).



**Figura 35-** Fotomosaico que mostra a borda leste do bioerma 5.

O bioerma está bastante deformado, sendo difícil reconhecer lâminas microbianas definidas, assim como acontece com o bioerma 4. Isto é, as lâminas são

reconhecíveis, no geral, nas bordas laterais, onde existe uma película preta de provável óxido de manganês (Figura 36a). Já na parte superior do bioerma (parte mais clara, sem película preta), não estão preservadas laminações microbianas, observando-se calcita com um aspecto fibroso (Figura 36b). Em vista lateral da parte sul do bioerma pode-se observar uma sucessão de quase 20 cm de espessura de camadas de calcita fibrosa com cristais sub-verticais, cada camada com ~4-5 cm de espessura (Figura 36d). Estas camadas assemelham-se àquela do bioerma 2 (Figura 30), porém há um número maior de camadas. Sobrepõem-se laminitos microbianos melhor definidos, com lâminas sub-horizontais ou levemente onduladas, as quais têm ~0,5 cm de espessura (Figura 36c).



**Figura 36-** Bioerma 5. (a) Porção de carbonato recoberta por película de provável óxido de manganês, com laminações microbianas fracamente definidas. (b) Porção do topo do bioerma com calcita fibrosa. (c) Vista lateral do bioerma com laminitos microbianos sub-horizontais (~0,5 cm de espessura) recobrendo diversas camadas de carbonato de cálcio fibroso. (d) Detalhe das camadas de carbonato de cálcio fibroso da foto “c”.

Lateralmente ao sul do bioerma 5, sobrepondo a camada carbonática basal da Formação Codó, observa-se uma alternância de várias camadas de rochas

carbonáticas maciças e folhelhos com cerca de 8-10 cm de espessura, somando um total de ~1,2 m de altura. As últimas camadas são folhelhos sobrepostos por laminitos microbianos ondulados intercalados e recobertos por camada delgada de calcita esbranquiçada com cristais fibrosos orientados mais ou menos verticalmente (Figuras 37a, b). Estas camadas encontram-se quase no mesmo nível que a sucessão de camadas fibrosas da Figura 36d e a menos do que 2 m de distância lateral.



**Figura 37-** Porção lateral sul do bioerma 5. (a) Folhelhos sobrepostos por laminitos microbianos ondulares com camada de calcita fibrosa acima (~7 cm de espessura). (b) Microbialitos pseudocolunares acima de camada de calcita fibrosa (~4 cm de espessura).

## F. Bioerma 6

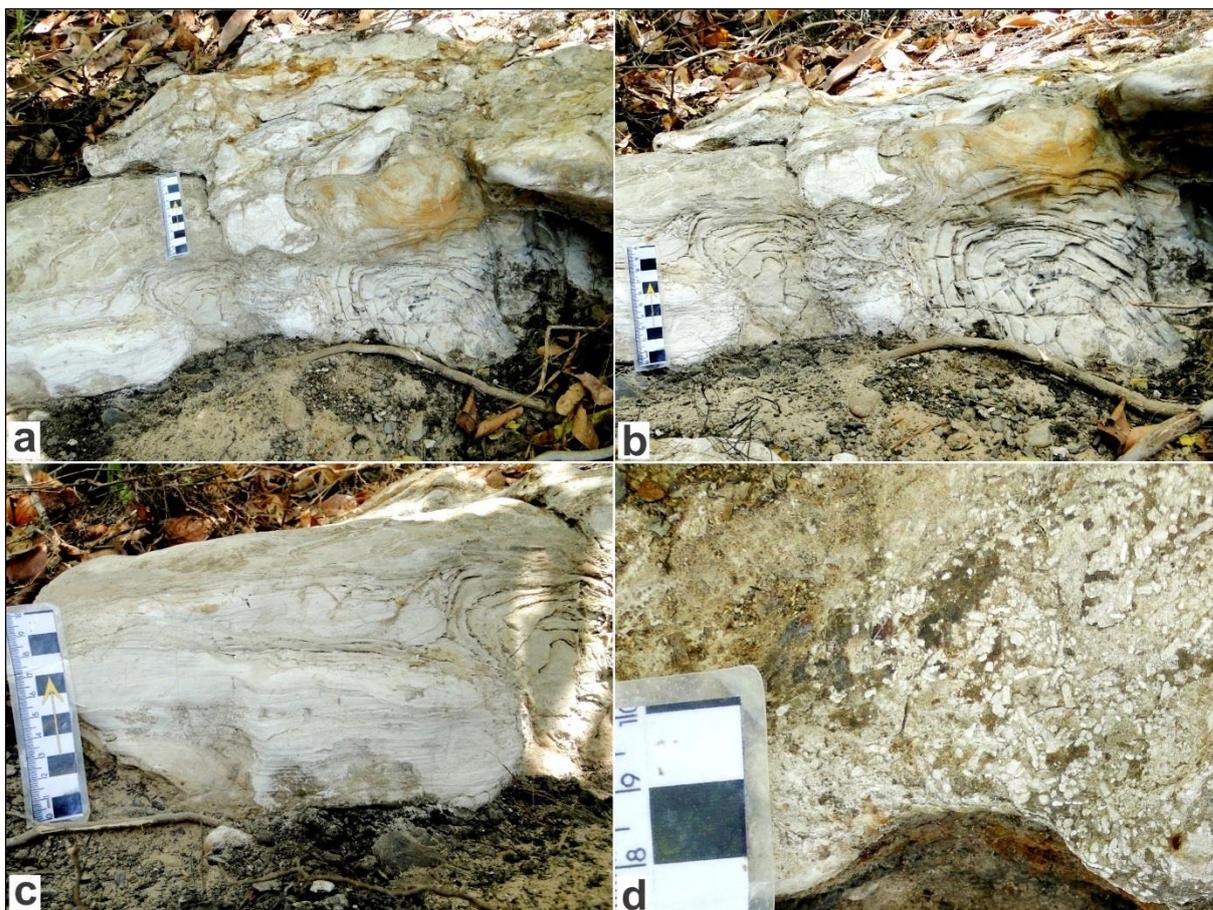
O bioerma 6 é um corpo de microbialitos com dimensões pequenas, em relação aos bioermas anteriores, com ~1 m de extensão e 50 cm de altura, e sobrepõe folhelhos pretos. Há diversos blocos rolados de microbialitos ao lado deste corpo, sugerindo que o bioerma 6 era um pouco maior. Os microbialitos são constituídos por lâminas bem marcadas e lateralmente contínuas. O que mais chama atenção neste bioerma é a diferença entre a morfologia das laminações nas porções norte e sul do corpo, numa distância lateral menor que 1 m. Na parte sul, as lâminas são mais ou menos planas e sub-horizontais, com ~1 cm de espessura. Já na parte norte do bioerma, as laminações passam para onduladas, ~0,5 cm de espessura, com relevo sinóptico expressivo equivalente ao padrão pseudocolunar (Figura 38a), o qual poderia ser facilmente confundido com um estromatólito colunar (Figura 38b).



**Figura 38-** Bioerma 6. (a) Vista da borda leste do bioerma. Nota-se que os microbialitos têm laminações sub-horizontais na parte esquerda da foto que passam para laminações onduladas do tipo pseudocolunar na parte direita da foto. (b) Vista da borda norte do bioerma, que mostra o padrão pseudocolunar bem destacado nos microbialitos.

#### G. Bioerma 7

Este bioerma tem cerca de 1 m de extensão e 50 cm largura, está localizado na extremidade sul do afloramento e expõe microbialitos sobrepostos por calcário esbranquiçado (Figura 39a). Os microbialitos apresentam lâminas com espessuras variáveis (0,5 a 1 cm) e onduladas com relevo sinóptico expressivo, caracterizando o padrão pseudocolunar (Figura 39b). Porém, estes microbialitos, que parecem ser duas colunas, encontram-se fraturados. O espaço intercolunar é preenchido por brecha de fragmentos dos microbialitos. Um carbonato com lâminas mais finas sub-horizontais (~2 mm) na parte esquerda do bioerma (Figura 39c) indica deposição posterior à dos laminitos microbianos. No topo do calcário aparecem prováveis coprólitos (Figura 39d).



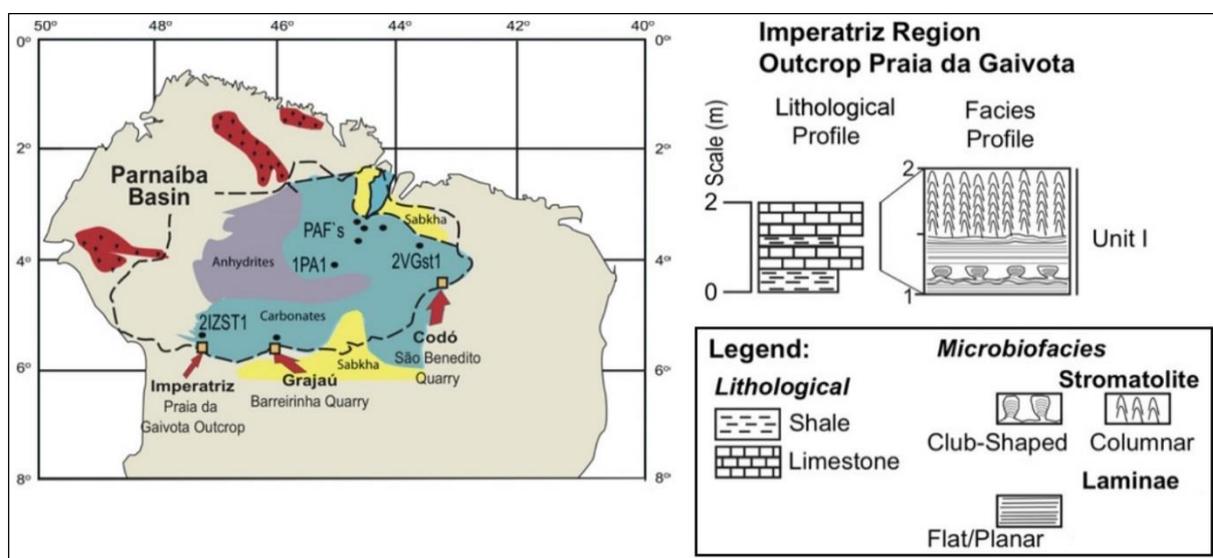
**Figura 39-** Bioerma 7. (a) Exposição de microbialitos com padrão pseudocolunar, fraturados, sobrepostos por calcários esbranquiçados, os quais preenchem também espaço intercolunar. (b) Detalhe da foto anterior, destacando o faturamento e a presença de brecha entre as pseudocolunas. (c) Carbonato com lâminas sub-horizontais e delgadas (~2 mm de espessura) em contato lateral abrupto com os laminitos microbianos pseudocolunares. (d) Nível de prováveis coprólitos no topo do calcário que recobre os microbialitos.

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os corpos carbonáticos que se destacam no afloramento são identificados como bioermas pela composição, ao menos parcial, por microbialitos. E os microbialitos são assim definidos pelas estruturas laminadas onduladas, similares a outras da literatura (e.g., PERRI et al., 2013; AREF & TAJ, 2013), cuja origem não pode ser explicada em termos de estruturas sedimentares geradas por fluxos unidirecionais ou por ondas. A composição micrítica dos microbialitos, junto com as ondulações, é uma característica adicional que permite inferir a origem das estruturas como sendo biogênica. O fato de que os folhelhos associados aos microbialitos não estão deformados, além da própria irregularidade das ondulações dos carbonatos, descarta dobramentos de origem tectônica ou deformações pós-deposicionais (por exemplo, como aquelas causadas por empurrão de geleiras em depósitos inconsolidados). Não foi possível identificar seguramente microrganismos como cocos ou filamentos, o que seria uma prova conclusiva da origem microbiana dos carbonatos laminados dos bioermas. Mas, conforme a literatura, quando microrganismos são encontrados em microbialitos, estes quase sempre são sub-recentes ou foram substituídos por sílica numa fase bem precoce da diagênese. No caso do afloramento estudado, não foi observada substituição dos carbonatos por sílica.

Bahniuk et al. (2015), em sua análise dos microbialitos do mesmo afloramento de São Miguel do Tocantins, próximo a Imperatriz (MA), reconheceram estromatólitos *club-shaped* na parte inferior e colunares na parte superior (BAHNIUK et al., 2015; Figura 40). Os primeiros, conforme a nomenclatura aqui usada, começariam como formas laminadas pseudocolunares, porém passariam para estromatólitos colunares turbinados (com o máximo diâmetro na parte superior). Os autores não mostraram fotografia deste padrão para o afloramento de Imperatriz. Este padrão não foi observado no presente trabalho. O segundo tipo de Bahniuk et al. (2015), considerado como estromatólito colunar pelos autores, aqui é classificado como laminito microbiano muito ondulado, chegando a ser pseudocolunar ou em cone. Excepcionalmente, alguns exemplares podem ser complexos laminares-colunares, mas não essencialmente colunares. Cabe ser destacado que, devido ao recobrimento de grande parte dos bioermas por uma película escura (provável óxido de manganês),

a forma e a laminação dos microbialitos são reveladas, em geral, nos cortes verticais de amostras grandes.



**Figura 40-** Ilustração de Bahniuk et al. (2015) mostrando, à direita, o perfil colunar do afloramento e os estromatólitos que eles registraram no afloramento de Imperatriz.

Bahniuk et al. (2015) interpretaram que entre os bioermas 2 e 3 ocorreria um paleocanal e isso seria evidenciado pela presença de brecha. Contudo, a brecha não ocorre apenas entre os dois bioermas, como também em quase todo o afloramento. A brecha é constituída por fragmentos de microbialitos angulosos, os quais parecem ter sido muito pouco transportados e não seriam clastos de um canal, onde teriam sido arredondados. Neste contexto, a camada brechoide superior sugere exposição subaérea de esteiras de microbialitos e pouquíssimo transporte dos clastos.

No topo dos bioermas 1 e 2 foi possível constatar uma fraca orientação dos microbialitos e alguns “microcanais” entre as porções mais elevadas dos microbialitos, indicando sentido fluxo na direção N60W. Contudo, este fluxo não deve ter sido intenso, uma vez que os microbialitos, em geral, têm seções horizontais circulares e não apresentam relevo significativo entre as partes mais baixas e as mais altas das lâminas. O desnível geralmente é inferior a 10 cm.

Em alguns locais do afloramento (bioermas 1 e 2) foram descritas camadas delgadas de carbonato de cálcio (calcita) constituída por cristais fibrosos orientados mais menos perpendicularmente à camada. É importante chamar a atenção que essas camadas de calcita fibrosa são descontínuas e aparecem em níveis distintos tanto no

bioerma 2 como no bioerma 5, de modo que, se sua origem foi por precipitação química no ambiente deposicional, não se formaram no mesmo intervalo de tempo. Além disso, não foram observadas camadas similares no bioerma 1. Assim, embora as camadas sejam concordantes ao acamamento, parece ser mais provável que elas se formaram após a construção dos bioermas.

Rodrigues et al. (2009) descreveram veios de calcita fibrosa do Jurássico da Argentina, denominadas como *beef*, formadas por entrada de fluidos nos planos de fraqueza entre camadas numa fase de geração de hidrocarbonetos, quando ocorreu sobrepressão de fluidos. Contudo, neste exemplo, a calcita fibrosa apresenta cristais perfeitamente perpendiculares ao acamamento e não em *chevron*, como no afloramento de Imperatriz.

As características da calcita fibrosa do afloramento são compatíveis com gipsita, a qual teria sido substituída. Segundo Jaworska (2012), a substituição de gipsita por calcita é um processo comum e bastante precoce na diagênese. Portanto, uma hipótese seria que as camadas de calcita fibrosa se originaram, inicialmente, por penetração de soluções ricas em sulfatos em planos de fraqueza do bioerma, enquanto este ainda não estava litificado. A fonte de sulfatos pode ter sido por dissolução de gipsita nodular, formada durante a sedimentação. Quando as soluções invadiram os espaços entre os planos de acamamento, a força de cristalização dos sulfatos teria sido capaz de forçar as camadas para cima (P. Tibana, comunicação verbal, março de 2015).

A deposição de gipsita no ambiente deposicional na região de Imperatriz é uma hipótese compatível com a ocorrência de gipsita e anidrita na Formação Codó, principalmente na região de Codó (MA), podendo estas ocorrências serem correlatas estratigraficamente. Além disso, condições salinas e/ou evaporíticas são comprovadas pelo menos através dos *hoppers* de halita no afloramento estudado. Cabe ser comentado que Bahniuk et al. (2015) não mencionaram a presença de *hoppers*, nem de calcita fibrosa no afloramento e, assim, não inferiram a deposição de sulfatos.

Quanto à possível deposição de gipsita, ainda é importante lembrar que existem exemplos de gipsita fibrosa precipitada no ambiente deposicional, também

originando cristais verticalmente alongados ou em zigue-zague conhecidos como selenita. Babel (2007) propôs que a selenita se forma no fundo da bacia em períodos de agitação da água saturada, pois em períodos de estratificação da água, o fundo fica redutor e a comunidade bentônica consome o sulfato, não formando selenita. No caso do afloramento estudado da Formação Codó, a descontinuidade das camadas da calcita fibrosa é um argumento contra a hipótese de precipitação diretamente no ambiente de sedimentação.

De qualquer modo, considerando a presença de *hoppers* de halita e que a calcita fibrosa provavelmente se originou de gipsita, pode-se interpretar que as comunidades microbianas se desenvolveram em condições evaporíticas ou com alta salinidade, quase sempre desfavoráveis para outros organismos. Os folhelhos, que localmente se intercalam entre os microbialitos representam lama que chegava ao ambiente deposicional durante tempestades ou fases chuvosas. E, conforme já comentado, as brechas carbonáticas indicam fases de ressecamento.

Os prováveis coprólitos encontrados em lâmina petrográfica na Figura 26b lembram coprólitos de crustáceos cretáceos da Bacia de Neuquén (Argentina), típicos de condições evaporíticas, porém marinhos (KIETZMANN & PALMA, 2014). Os restos de peixes encontrados no topo do bioerma 1 estão muito incompletos para permitir identificação, mas lembram, conforme as dimensões, os pequenos peixes do gênero *Dastilbe* da Chapada do Araripe. Futuramente, especialistas em ictiologia talvez possam realizar identificações mais seguras.

Um aspecto que chama muita atenção nos microbialitos estudados é sua ondulação muito irregular, às vezes com contatos laterais abruptos (como na parte superior do bioerma 1). Em geral, nos exemplos da literatura, a laminação dos estromatólitos e dos laminitos microbianos ondulados é muito mais uniforme. É possível que as ondulações originais não tenham sido tão irregulares, sugerindo-se que tenha ocorrido alguma deformação local (não uma deformação intensa, lembrando que as camadas de folhelhos não estão deformadas). Admitindo-se que as camadas de calcita fibrosa se originaram possivelmente de gipsita e que tais camadas localmente alcançam espessuras significativas (como no bioerma 5), é possível que a gipsita tenha causado deformações, tanto durante a cristalização, como posteriormente devido à sua plasticidade. É importante destacar que quase todos os

bioermas estudados não têm mais microbialitos preservados nas porções centrais, porém uma “massa” de calcita maciça ou com cristais fibrosos. Esta grande massa de calcita demonstra que muitas transformações ocorreram nos depósitos durante a diagênese, talvez inclusive as deformações das lâminas dos microbialitos.

Outra alternativa é que o estranho padrão ondulado irregular a pseudocolunar dos microbialitos teve origem primária. Por exemplo, Perri et al. (2013) mostraram laminitos microbianas com ondulações bem irregulares em depósitos permianos da Inglaterra originados em condições evaporíticas. Tais ondulações diferem daquelas da Formação Codó, mas podem ser um indício de que a hipersalinidade pode condicionar lâminas onduladas irregularmente. Aref & Taj (2013) compararam microbialitos modernos da Arábia Saudita com miocenos do Egito. Os microbialitos da Formação Codó assemelham-se relativamente bem com os ilustrados do Mioceno pelo padrão das ondulações e espessura relativamente grande das lâminas, porém aparentemente não têm porções com lâminas crenuladas ou rompidas pelo crescimento sinsedimentar de cristais de gipsita. Ali-Bik et al. (2013) verificaram ambientes modernos de gipsita não-marinha depositada junto com o desenvolvimento microbial. Contudo, neste caso, as lâminas microbianas também são crenuladas conforme os cristais de selenita intercalados, diferentemente das lâminas lisas dos microbialitos estudados da Formação Codó.

Qualquer que seja a origem das ondulações das lâminas microbianas do afloramento de Imperatriz (primária ou por deformação), é importante frisar que não se formaram colunas. A falta de colunas indica que não havia muita sedimentação concomitante com o desenvolvimento das comunidades microbianas. O padrão microbialítico de laminitos é comum em condições de supramaré no caso de ambientes costeiros (transicionais para o mar) e indicam águas muito calmas. No afloramento estudado, conforme as análises geoquímicas (BAHNIUK et al., 2015), as condições deposicionais foram límnicas, descartando condições de supramaré, mas não um ambiente marginal com águas muito rasas, calmas, com eventual influência de tempestades e eventuais ressecamentos. Havia algum pequeno fluxo de água, que condicionou o caráter pseudocolunar levemente alongado no topo dos bioermas, porém devem ter predominado condições calmas, com pouco afluxo de siliciclastos (exceto durante tempestades). O pequeno fluxo de água pode ter sido causado por

ventos ou circulação controlada por diferenças de temperatura ou de salinidade entre as porções marginais e mais centrais do corpo d'água.

A presença dos caules no afloramento não é evidência segura de proximidade da costa, pois eles podem ter flutuado por longas distâncias antes da deposição. Por outro lado, é significativo que os caules da camada basal apresentem mais ou menos a mesma orientação dos microbialitos, indicando que: a) a sua deposição provavelmente ocorreu em águas rasas sob a influência das correntes; b) embora fracas, as correntes parecem ter mantido a mesma direção ao longo do tempo. Contudo, seria importante encontrar um número muito maior de caules para analisar a sua direção e dar suporte a esta conclusão.

De acordo com as características dos microbialitos, especialmente as suas espessuras e proporção de folhelhos intercalados, parece que o bioerma 1 (parte norte) representa um sítio deposicional mais distante da margem do corpo d'água, mais frequentemente sujeito a inundações, com maior espaço para crescimento vertical. Os últimos bioermas seriam, portanto, mais proximais, com menos espaço para desenvolvimento vertical.

## 7 CONCLUSÕES

- No afloramento da Formação Codó (Aptiano Superior), na margem esquerda do rio Tocantins, próximo a Imperatriz (MA) foram reconhecidos pelo menos sete bioermas (*sensu lato*) de microbialitos e intercalações centimétricas de carbonatos microbialíticos entre folhelhos.
- O espaçamento entre os bioermas é irregular, ocorrendo algumas diferenças entre eles. Os bioermas setentrionais são maiores em extensão e espessura, porém possuem intercalações de folhelhos, indicando que ocorreram interrupções em seu desenvolvimento (fases possivelmente de águas mais profundas). Os bioermas localizados na parte sul são menores e possuem menos intercalações de folhelhos, indicando desenvolvimento mais contínuo (ou com discordâncias locais que não puderam ser reconhecidas). Provavelmente se formaram em condições um pouco mais rasas, mais próximas à margem do corpo aquoso, com menos espaço para desenvolvimento.
- Pseudomorfos de gipsita e *hoppers* de halita atestam condições ambientais bastante salinas da água (pelo menos durante alguns intervalos de tempo). Na realidade, tratava-se de um ambiente lacustre conforme dados geoquímicos da literatura. Outras feições possivelmente relacionadas à alta salinidade da água, porém provavelmente pós-deposicionais, são a calcita fibrosa, a qual pode ter substituído sulfato de cálcio precipitado em espaços entre camadas. A fonte das soluções sulfatadas pode ter derivado da dissolução de nódulos de gipsita, hoje também substituídos por calcita. O assunto relacionado aos evaporitos precisa ser estudado em maior profundidade.
- De uma forma geral, os microbialitos são do padrão “laminitos microbianos” e não estromatólitos colunares. Esse resultado difere daqueles anteriores da literatura. Os laminitos microbianos são sugestivos de águas muito rasas e calmas, talvez com influência de fluxos fracos, já que algumas porções, em planta, mostram orientação das estruturas (N60W). Contudo, não se formaram grandes canais entre os bioermas. A direção das paleocorrentes é compatível com aquela dos troncos.
- Os microbialitos mais superiores do bioerma setentrional podem ser classificados como “complexos colunares-laminados”, sendo que estes têm evidência de um fraco processo de brechamento, talvez, por exposição subaérea.

- Pela primeira vez foram reconhecidos restos de peixes, de vegetais e possíveis coprólitos de crustáceos associados aos microbialitos da Formação Codó (encontrados, por exemplo, nos espaços intercolunares dos microbialitos mais superiores do primeiro bioerma). Os coprólitos assemelham-se a exemplos da literatura de águas hipersalinas.
- As laminações dos laminitos microbianos mostram ondulações muito irregulares, diferentes das lâminas microbianas mais comuns da literatura. Esta característica pode ser intrínseca às comunidades microbianas que se desenvolveram em águas hipersalinas. Outra alternativa é interpretar a irregularidade das laminações como resultado de deformação. O próprio ressecamento dos bioermas, em algumas fases, pode ter contribuído para a deformação e o seu brechamento parcial, mas a possível precipitação de gipsita entre camadas de microbialitos também pode ter sido a causa, dada a sua plasticidade. As porções centrais maciças dos bioermas podem refletir deformações e outros complexos processos pós-deposicionais.
- Ao microscópio, os microbialitos, por um lado, são muito simples, micríticos, sem lâminas destacadas. Por outro, algumas amostras exibem cristais de calcita de distintos hábitos (granulares ou fibrosos), às vezes preenchendo finos espaços entre lâminas e alguns possivelmente relacionados à substituição de gipsita. Existe a possibilidade de que as lâminas microbianas se desenvolveram junto com a precipitação de gipsita, a exemplo de ocorrências modernas, porém são necessários novos estudos.

## REFERÊNCIAS

ALI-BIK, M. W.; METWALLY, H. I. M.; WALI, A. M. A.; KAMEL, M. G. Facies and geochemistry of non-marine gypsum, EMISAL, Egypt. **Geologica Acta**, Barcelona, v. 11, n. 4, p. 409-420, 2013.

ANTONIOLI, L. **Estudo palino-cronoestratigráfico da Formação Codó** – Cretáceo Inferior do nordeste brasileiro. 2001. 265 f. Tese (Doutorado em Geologia), Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

ARANHA, L. G. F.; LIMA, H. L.; SOUZA, J. M. P.; MAKINO, R. K. Origem e evolução das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. (Ed.) **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1990. p. 221-233.

AREF, M. A. M.; TAJ, R. J. A. Recent analog of gypsified microbial laminites and stromatolites in solar salt works and the Miocene gypsum deposits of Saudi Arabia and Egypt. **Arabian Journal of Geosciences**, Heidelberg, v. 6, p. 4257-4296, 2013.

AZEVEDO, R. P. **Tectonic evolution of Brazilian equatorial continental margin basins**. 1991. 580 f. Tese (PhD) - Royal School of Mines, Imperial College, London, 1991.

BABEL, M. Depositional environments of a saline-type basin recorded in the Badenian gypsum facies in the northern Carpathian Foredeep. **Geological Society Special Publication**, London, v. 285, p. 107-142, 2007.

BAHNIUK, A. M.; ANJOS, S.; FRANÇA, A. B.; MATSUDA, N.; ELLER, J.; MCKENZIE, J. A.; VASCONCELOS, C. 2015. Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codó Formation (north-east Brazil): Implication for interpretation of microbialite facies associations and palaeoenvironmental conditions. **Sedimentology**, Oxford, v. 62, p. 155-181, 2015.

BATISTA, A. M. N. 1992. **Caracterização paleoambiental dos sedimentos Codó-Grajaú, Bacia de São Luís (MA)**. 1992. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 1992.

BURNE, R. V.; MOORE, L. S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic communities. **Palaios**, Tulsa, v. 2, p. 241-254, 1987.

DUNHAM, R. J. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: HAM, W. E. (Ed.) **Classification of Carbonate Rocks**. A Symposium: American Association of Petroleum Geologists Memoir, Tulsa, v. 1, p. 108-121, 1962.

EMBRY, A. F.; KLOVAN, J. E. A Late Devonian reef tract on north-eastern Banks Island, N. W. T. **Bulletin of Canadian Petroleum Geology**, Calgary, v. 19, p. 730-781, 1971.

FEIJÓ, F. J. O início da livre circulação de águas do Oceano Atlântico. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 10, p. 157-164, 1996.

FOLK, R. L. Practical petrographic classification of limestones. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v. 43, p. 1-38, 1959.

FOLK, R. L. Spectral subdivision of limestone types. In: HAM, W. E. (ed.) **Classification of Carbonate Rocks**. A Symposium: American Association of Petroleum Geologists Memoir, Tulsa, v. 1, p. 62-84, 1962.

GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.). **O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 15-31 (Coleção Friedrich Katzer).

GORNITZ, V. M.; SCHREIBER, B. C. Displacive halite hoppers from the Dead Sea; some implications for ancient evaporite deposits. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 51, p. 787-794, 1981.

GROTZINGER, J. P.; KNOLL, A. H. Stromatolites in Precambrian carbonates: Evolutionary mileposts or environmental dipsticks. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, Palo Alto, v. 27, p. 313-358, 1999.

HOFMANN, H. J. Attributes of stromatolites. **Geological Survey of Canada Paper**, Ottawa, v. 69, p. 39-58, 1969.

HOFMANN, H. J. Stromatolites: Characteristics and Utility. **Earth Science Reviews**, Amsterdam, v. 9, p. 339-373, 1973.

JAWORSKA, J. Crystallization, Alternation and Recrystallization of Sulphates. In: MASTAI, Y. (Ed.) **Advances in Crystallization Processes**. InTech, Zoetermeer, p. 465-482, 2012.

KALKOWSKY, E. Oolith and stromatolith in norddeutschen Bunt-sandstein. **Deutsche Geologisches Gesellschaft Zeitschrift**, Stuttgart, v. 60, p. 1040-1058, 1908.

KENDALL, A. C.; HARWOOD, G. M. Marine evaporites: arid shorelines and basins. In: READING, H. G. (ed.) **Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy**. London: Blackwell Science, 1996, p. 281-324 (v. 1).

KIETZMANN, D. A.; PALMA, R. M. Early Cretaceous crustacean microcoprolites from Sierra de la Cara Cura, Neuquén Basin, Argentina: Taphonomy, environmental distribution, and stratigraphic correlation. **Cretaceous Research**, London, v. 49, p. 214-228, 2014.

LIMA, M. R. Palinologia da Formação Codó, Maranhão. **Boletim do Instituto de Geociências**, USP, São Paulo, v. 13, p. 116-128, 1982.

LINDOSO, R. M.; CARVALHO, I. S.; MEDEIROS, M. A.; PEREIRA, A. A.; SANTOS, R. A. B.; MENDES, I. D.; BRITO, J. M.; VILAS BÔAS, I.; ARAÚJO, M. N.; FERREIRA, N. N. Novos sítios fossilíferos em carbonatos da Formação Codó (Aptiano/Albiano) da Bacia do Parnaíba, Maranhão, Brasil. In: CARVALHO, I. S.; SRIVASTAVA, N. K.; STROCHSCHOEN JR., O.; LANA, C. (Ed.) **Paleontologia: Cenários de Vida**. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. p. 819-827 (v. 4).

MESNER, J. C.; WOOLDRIDGE, L. C. P. Maranhão Paleozoic Basin and Cretaceous coastal basins, north Brazil. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, Tulsa, v. 48, p. 1475-1512, 1964.

NASCIMENTO, M. S.; GÓES, A. M.; MACAMBIRA, M. J. B.; BROD, J. A. Provenance of Albian sandstones in the São Luís-Grajaú Basin (northern Brazil) from evidence of Pb-Pb zircon ages, mineral chemistry of tourmaline and palaeocurrent data. **Sedimentary Geology**, Amsterdam, v. 201, p. 21-42, 2007.

PAZ, J. D. S. **Fácies, Petrografia e Geoquímica da Formação Codó, Neo-aptiano, Bacia de São Luís-Grajaú**. 148 f. 2005. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Reconstrução paleoambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do Grajaú, MA. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.), **O Cretáceo na Bacia de São Luís Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emilio Goeldi, 2001. p. 77-100 (Coleção Friedrich Katzer).

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Linking lacustrine cycles with synsedimentary tectonic episodes: an example from the Codó Formation (Late Aptian), northeastern Brazil. **Geological Magazine**, v. 142, p. 269-285, 2005.

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Paleohydrology of an Upper Aptian lacustrine system from northeastern Brazil: Integration of facies and isotopic geochemistry. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, Amsterdam, v. 241, p. 247-266, 2006a.

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F. Petrography of gypsum-bearing facies of the Codó Formation (Late Aptian), Northern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 78, p. 1-16, 2006b.

PAZ, J. D. S.; ROSSETTI, D. F.; MACAMBIRA, M. J. B. An Upper Aptian saline pan/lake system from the Brazilian Equatorial Margin: integration of facies and isotopes. **Sedimentology**, Oxford, v. 52, p. 1303-1321, 2005.

PEDRÃO, E.; MARTINS, F. J. C. Palinoestratigrafia de um afloramento da Formação Itapecuru (Bacia do Parnaíba) em Rosário, Estado do Maranhão: Correlações Cronoestratigráficas. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 71(4-I), p. 767-776, 1999.

PENTECOST, A. Association of cyanobacteria with tufa deposits: Identity, enumeration, and nature of the sheath material revealed by histochemistry. **Geomicrobiology Journal**, New York, v. 4, p. 285-298, 1985.

PENTECOST, A.; RIDING, R. Calcification in cyanobacteria. In: RIDING, R.; LEADBEATER, B. S. C. (Ed.) **Biomíneralisation in Lower Plants and Animals**. Systematic Association, v. esp., p. 73-90, 1986.

PERRI, E.; TUCKER, M.; MAWSON, M. Biotic and abiotic processes in the formation and diagenesis of Permian dolomitic stromatolites (Zechstein Group, NE England). **Journal of Sedimentary Research**, Tulsa, v. 83, p. 896-914, 2013.

PREISS, W. V. 1976. Intercontinental correlation. In: WALTER, M. R. (Ed.) **Stromatolites**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co., 1976. p. 359-357 (Developments in Sedimentology).

RAJA GABAGLIA, G. P.; FIGUEIREDO, A. M. F. Evolução dos conceitos acerca das classificações de bacias sedimentares. In: RAJA GABAGLIA, G. P.; MILANI, E. J. (Ed.) **Origem e evolução de bacias sedimentares**. Rio de Janeiro: Petrobras, 1990. p. 31-45.

REID, R. P.; VISSCHER, P. T.; DECHO, A. W.; STOLZ, J. F.; BEBOUTK, B. M.; DUPRAZ, C.; MACINTYRE, I. G.; PAERL, H. W.; PINCKNEY, J. L.; PRUFERT-BEBOUTK, L.; STEPPE, T. F.; DESMARAIS, D. J. The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites. **Nature**, London, v. 406, p. 989-992, 2000.

RIDING, R. Classification of microbial carbonates. In: RIDING, R. (Ed.) **Calcareous algae and stromatolites**. Berlin: Springer-Verlag, 1991. p. 21-51.

RIDING, R. Microbialites, stromatolites and thrombolites. In: REITNER, J.; THIEL, V. (Ed.) **Encyclopedia of Geobiology**. Encyclopedia of Earth Science Series, Springer, Heidelberg, p. 635-654, 2011.

RIDING, R.; AWRAMIK, S. M. (Ed.) **Microbial sediments**. Berlin: Springer-Verlag, 2000.

RODRIGUES, N.; COBBOLD, P. R.; LOSETH, H.; RUFFET, G. Widespread bedding-parallel veins of fibrous calcite ("beef") in a mature source rock (Vaca Muerta Fm, Neuquén Basin, Argentina): evidence for overpressure and horizontal compression. **Journal of the Geological Society**, London, v. 166, p. 695-709, 2009.

ROSSETTI, D. F. Arquitetura deposicional da Bacia de São Luís-Grajaú, meio norte do Brasil. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.), **O Cretáceo na Bacia de São Luís Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 31-46 (Coleção Friedrich Katzer).

ROSSETTI, D. F. Bacia de São Luís-Grajaú. **Phoenix**, v. 5, n. 58, 2003. Disponível em: <[http://www.phoenix.org.br/phoenix58\\_out03.htm](http://www.phoenix.org.br/phoenix58_out03.htm)>. Acesso em: 15 jan. 2015.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W. Classificação estratigráfica para o Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, MA. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi** (Série Ciências da Terra), Belém, v. 9, p. 31-43, 1997.

ROSSETTI, D. F.; TRUCKENBRODT, W.; SANTOS-JÚNIOR, A. E. Clima do Cretáceo no Meio-Norte brasileiro. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; TRUCKENBRODT, W. (Ed.), **O Cretáceo na Bacia de São Luís Grajaú**. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2001. p. 67-76 (Coleção Friedrich Katzer).

SOARES JR, A. V.; COSTA, J. B. S.; HASUI, Y. Evolução da Margem Atlântica Equatorial do Brasil: Três Fases Distensivas. **Geociências**, São Paulo, v. 27, n.4, p. 427-437, 2008.

SRIVASTAVA, N. K. 2010. Estromatólitos. In: CARVALHO, I. S. (Ed.) **Paleontologia: Conceitos e Métodos**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. p. 229-259 (v. 1).

SZATMARI, P.; FRANÇOLIN, J. B. L.; ZANNOTTO, O.; WOLFF, S. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, p. 180-188, 1987.

VASCONCELOS, C.; DITTRICH, M.; MCKENZIE, J. A. Evidence of microbiocenosis in the laminae formation process of modern stromatolites. **Facies**, in press. 2013.

VAZ, P. T.; REZENDE, N. G. A. M.; WANDERLEY Fo., J. R.; TRAVASSOS, W. A. S. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, p. 253-363, 2007.

VOLOGDIN, A. G. **Drevneishie Fodorosli SSSR** (The Oldest Algae of the U.S.S.R.). Akad. Nauk S.S.S.R., 656 p. (in Russian). 1962.

WALTER, M. R. Stromatolites and the biostratigraphy of the Australian Precambrian. **Paleontological Association Special Publication**, Lancaster, v. 11, 190p, 1972.

WALTER, M. R. (Ed.) **Stromatolites**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co., 1976 (Developments in Sedimentology).

ZANOTTO, O.; SZATMARI, P. Mecanismo de rifteamento da porção ocidental da margem norte brasileira, Bacia do Pará-Maranhão. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 17, p. 189-197, 1987.