

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTROMATÓLITOS DESÉRTICOS SILICICLÁSTICOS DA  
FORMAÇÃO GUARÁ, JURÁSSICO SUPERIOR DA BACIA  
DO PARANÁ: TRAPEAMENTO E AGLUTINAÇÃO EM UM  
CONTEXTO NÃO-MARINHO**

**BRUNO SILVERSTON ANGONESE**

**ORIENTADOR – Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer**

**Porto Alegre, 2024**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTROMATÓLITOS DESÉRTICOS SILICICLÁSTICOS DA  
FORMAÇÃO GUARÁ, JURÁSSICO SUPERIOR DA BACIA  
DO PARANÁ: TRAPEAMENTO E AGLUTINAÇÃO EM UM  
CONTEXTO NÃO-MARINHO**

**BRUNO SILVERSTON ANGONESE**

ORIENTADOR – Prof. Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer

**BANCA EXAMINADORA**

Profa. Dr. Amanda Goulart Rodrigues –Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS);

Prof. Dr. Ernesto Luiz Correa Lavina – Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos);

Prof. Dr. Adriano Domingos dos Reis – Universidade de Brasília (UnB).

Dissertação de Mestrado apresentada  
como requisito parcial para a obtenção do  
Título de Mestre em Ciências.

Porto Alegre, 2024

### CIP - Catalogação na Publicação

Angonese, Bruno Silverston  
ESTROMATÓLITOS DESÉRTICOS SILICICLÁSTICOS DA  
FORMAÇÃO GUARÁ, JURÁSSICO SUPERIOR DA BACIA DO PARANÁ:  
TRAPEAMENTO E AGLUTINAÇÃO EM UM CONTEXTO NÃO-MARINHO /  
Bruno Silverston Angonese. -- 2024.  
55 f.  
Orientador: Claiton Marlon dos Santos Scherer.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa  
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,  
2024.

1. microbialito. 2. estromatólito. 3. MISS. 4.  
silcrete. I. Scherer, Claiton Marlon dos Santos,  
orient. II. Título.

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, mãe, pai, Brunna, Julia, obrigado por terem me aguentado durante esse processo. Aos outros familiares e a todos meus amigos, obrigado pela confiança.

Ao meu orientador, obrigado pela confiança durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao planeta, mais uma vez obrigado, meu lar.

## RESUMO

Estromatólitos aglutinantes são raros entre o longo registro geológico dos microbialitos, sendo mais comuns do Neógeno até o presente. Eles se originam em ambientes marinhos específicos, nos quais o processo de trapeamento e aglutinação é a principal fonte de acreção nas esteiras microbiais. A Formação Guará, Jurássico Médio da Bacia do Paraná, contém estromatólitos siliciclásticos únicos, formados em um ambiente continental desértico. Esses microbialitos foram depositados em lençóis de areia úmidos em um erg ativo, que recebia incursões fluviais periódicas. A estrutura laminada dos domos resulta de trapeamento e aglutinação de grãos siliciclásticos por esteiras microbiais e precipitação in-situ de sílica microcristalina, facilitada pela decomposição de matéria orgânica nas esteiras microbiais. A esteira microbiana é parcialmente preservada em inclusões esféricas incorporadas no chert precipitado in-situ, com fósseis de cianobactérias cocóides reveladas por luz UV. Uma comparação com a salina Sua Pan, no Botswana, na qual ocorrem atualmente processos de silicificação em esteiras microbiais, mostra que o amplo suprimento sedimentar e ausência de cimentação precoce é chave para a origem dos estromatólitos siliciclásticos da Formação Guará. Esses estromatólitos foram formados através de um equilíbrio delicado de fatores ambientais que intensificaram o trapeamento e aglutinação, registrando um tipo único de ecossistema na história da Terra que abre novas possibilidades para a identificação da vida primitiva em ambientes continentais, na Terra ou em Marte.

palavras-chave: microbialito, estromatólito, MISS, silcrete.

## ABSTRACT

Agglutinated stromatolites are rare in the long microbialite geological record, being most common in the Neogene to today. They originate in specific marine environments in which the process of trapping and binding is the main source of accretion of the microbial mats. The Guará Formation, Middle Jurassic of Paraná Basin, hosts unique siliciclastic stromatolites formed in a desertic continental environment. These microbialites were deposited in wet sand sheet deposits in an active erg, that received periodical fluvial incursion. The structural layering of the domes results from trapping and binding of siliciclastic grains by microbial mats and in-situ precipitation of microcrystalline silica facilitated by the decomposition of organic matter in the microbial mats. The microbial mat is partially preserved in spherical inclusions embedded in the in-situ precipitated chert, with coccoid cyanobacteria fossils revealed by UV light. A comparison with the modern Sua Salt Pan in Botswana, in which microbial mat silicification occurs presently, shows the Guará Formation ample sediment supply and lack of early cementation is key to the origin of the Guará Formation siliciclastic stromatolites. These siliciclastic stromatolites were formed due to a delicate balance of environmental factors that enhanced trapping and binding, recording a unique type of ecosystem in Earth's history that opens new possibilities for identification of ancient life in continental environments, be it in Earth or Mars.

key words: microbialite, stromatolite, MISS, silcrete.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Mapa de localização da área de estudo; a) Extensão da Bacia do Paraná no Brasil, b) Mapa geológico com a localização dos 2 afloramentos. Datum WGS 84, Zona UTM 21S. .... 15
- Figura 2 Morfologia de cianobactérias (a) filamentososa e (b) cocoide. Traduzido de (Riding, 1991). .... 17
- Figura 3. Classificação dos microbialitos pela macrofábrica. Traduzido de (Riding, 2011a)..... 18
- Figura 4. No diagrama ternário são dispostos diversos tipos de estromatólitos, classificados de acordo com os processos de precipitação microbial, precipitação abiótica e trapeamento de grãos que os formam, traduzido de (Riding, 2011a). (A) Estromatólito híbrido: *Conophyton cylindricum* do grupo Vazante, Cabeludo, Minas Gerais. Escala 3 cm. Retirado de (Sallun Filho & Fairchild, 2005). (B) Estromatólito de grão fino: *Cryptozoon* do Calcário Hoyt, Nova Iorque, EUA. Escala 10 cm. Retirado de (Riding, 2011a). (C) Crosta cristalina: Laminito isópaco da Formação *Society Cliffs*, próximo à ilha de Bylot, Canadá. Escala 2 cm. Retirado de (Riding, 2008). (D) Estromatólito aglutinante: Estromatólito marinho moderno, ilha de Lee Stocking, Bahamas. Escala 3 cm. Retirado de (Feldmann & McKenzie, 1998). .... 20
- Figura 5. No diagrama ternário estão dispostas as principais macrofábricas estromatolíticas, classificadas de acordo com os processos de precipitação microbial, precipitação abiótica e trapeamento de grãos que as formam. (A) Microfábrica peloidal/coagulada. No lado direito os pelóides são mais estreitamente espaçados, enquanto no lado esquerdo a fábrica é coagulada com pelóides dispersos. Retirado de (Riding & Tomas, 2006). (B) Microfábrica híbrida composta de filmes escuros de dolomicrospar separados por lentes mais espessas de dolospar. Escala 300 µm. Retirado de (Knoll & Semikhatov, 1998). (C) Microfábrica aglutinada composta por grãos de areia divididos por crosta fina de aragonita. Retirado de (Schwarz; Einsele; Herm, 1975). (D) Microfábrica esquelética, formada por leques de microfósseis filamentosos. Retirado de (Suarez-Gonzalez *et al.*, 2019). (E) Microfábrica cristalina, formada por leques cristalinos radiais. Escala 500 µm. Retirado de (Corsetti & Storrie-Lombardi, 2003). (F) Microfábrica aglutinada. A camada do topo mostra a zona habitada pelos micróbios, com grãos sendo aglutinantes e precipitação de micrita. Retirado de (Feldmann & McKenzie, 1998). .... 21
- Figura 6. Representação do trapeamento de partículas por uma esteira microbial. As partículas menores são mais facilmente trapeadas. Traduzido de (Riding, 1991). .... 23
- Figura 7. Comparação entre os processos de mineralização e seus produtos. Retirado de (Dupraz *et al.*, 2009). .... 26
- Figura 8. Fluxograma da progressão lógica da interpretação de um depósito sedimentar. Modificado de James & Dalrymple (2010). .... 28
- Figura 9. Mapa de localização da área de estudo; a) Extensão da bacia do Paraná no Brasil, b) Mapa geológico mostrando a localização dos afloramentos estudados. Datum WGS 84, UTM Zone 21S. .... 30
- Figura 10. Fácies encontradas nos afloramentos estudados. a) Perfil estratigráfico composto dos afloramentos estudados; b) Depósitos de areia microbial finamente laminada; c) Arenito maciço fluvial. As setas apontam para grânulos

de chert; d) Arenito com estratificação cruzada tangencial fluvial; e) Arenito com estratificação cruzada de baixo ângulo.....32

Figura 11. Estromatólitos dômicos siliciclásticos. A) Domo cônico com abundante sílica nodular em sua estrutura; b) Domos formados gradualmente a partir de arenito laminado horizontalmente; c) A cúpula começa com lados íngremes que gradualmente ficam mais horizontais; d) Domos assimétricos ligados lateralmente; e) Grandes domos silicificados ligados lateralmente. ....34

Figura 12. Características microscópicas dos estromatólitos. A) Cúpula silicificada com centímetros de largura, composta por lâminas de sílica detrítica e precipitada; b) Lâminas escuras onduladas na interface detrítico-precipitado; c) Matéria orgânica preservada em camadas de sílex, PP; d) Matéria orgânica preservada em camadas de sílex, XP; e) A matéria orgânica fluoresce quando exposta à luz UV, revelando fantasmas de antigas células cocóides.....35

## LISTA DE ABREVIações

Fm. – Formação;

MISS – *Microbially induced sedimentary structures* (Estruturas sedimentares induzidas por micróbios);

EPS – *Extracellular polymeric substances* (Substâncias poliméricas extracelulares).

## SUMÁRIO

<b>Resumo .....</b>	<b>V</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE ABREVIações.....</b>	<b>IX</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>X</b>
<b>ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 Objetivos .....	14
1.2 Área de Estudo .....	14
<b>2. CONTEXTO GEOLÓGICO.....</b>	<b>15</b>
<b>3. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>16</b>
3.1 Estromatólitos .....	16
<b>3.2 Classificação.....</b>	<b>18</b>
3.3 Trapeamento e aglutinação .....	22
3.4 Precipitação mineral em esteiras microbiais .....	25
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
<b>5. RESUMO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>30</b>
5.1 Análise de fácies .....	30
5.2 Evidências microbiais.....	36
5.3 Ambiente deposicional .....	37
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>38</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>38</b>
<b>8. ARTIGO CIENTÍFICO .....</b>	<b>44</b>
8.1 Comprovante de Submissão .....	45
8.2 Artigo Submetido em inteiro teor .....	46

## ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação de mestrado está estruturada em torno do artigo científico intitulado “Desertic siliciclastic stromatolites of Guará Formation, Paraná Basin, Southern Brazil: trapping and binding in a non-marine setting”, submetido ao periódico *Geology* da Sociedade Geológica da América (Geological Society of America - GSA), em dezembro de 2023.

A estruturação da dissertação se dá da seguinte forma:

- a) Texto Integrador: Introdução sobre o tema e descrição do objeto da pesquisa de mestrado, onde estão descritos os objetivos, localização e geologia da área de pesquisa, o estado da arte sobre o tema de pesquisa e a metodologia aplicada no estudo;
- b) Síntese dos principais resultados obtidos, interpretações desenvolvidas nos artigos e discussão integradora dos resultados;
- c) Conclusões;
- d) Referência bibliográfica utilizadas para embasar os capítulos anteriores;
- e) Comprovante de submissão do artigo ao periódico;
- f) Artigo científico submetido ao periódico.

## 1. INTRODUÇÃO

Estromatólitos siliciclásticos são um tópico ainda pouco explorado no estudo e discussão de microbialitos. Ao contrário dos famosos estromatólitos marinhos modernos que ocorrem nas Bahamas e Shark Bay (Black, 1932; Logan, 1961, respectivamente), que são compostos principalmente de partículas de carbonato, os estromatólitos siliciclásticos são o resultado da captura e ligação de sedimentos terrígenos. Seus processos genéticos de formação são semelhantes aos de suas contrapartes carbonáticas, mas ainda há dificuldade em sua classificação como estromatólitos devido aos seus processos de gênese e preservação, que se sobrepõem aos das MISS (Noffke; Awramik, 2013).

Estromatólitos siliciclásticos são definidos por Martin *et al.* (1993): estromatólitos carbonáticos siliciclásticos contêm entre 10 e 50% do volume total de grãos siliciclásticos; e os estromatólitos “areníticos” (*sandstone stromatolite*) contêm mais de 50% do volume total de grãos siliciclásticos. Todos os exemplares encontrados na Formação Guará possuem > 50% de grãos em volume. No texto, porém, o termo “arenítico” não é utilizado pois “siliciclástico” implica a relação com o processo de trapeamento e aglutinação de grãos detríticos, que é intrínseco à formação dos estromatólitos siliciclásticos e, portanto, é preferido.

O mecanismo de captura e ligação foi recentemente o foco de uma extensa revisão (Suarez-Gonzalez *et al.*, 2019) que compilou os dados de todos os exemplos publicados de estromatólitos aglutinantes carbonáticos. Nesse trabalho, não foram inseridos os estromatólitos siliciclásticos, apesar destes serem, na sua essência, estromatólitos aglutinantes. Estromatólito aglutinante refere-se a estromatólitos cujo mecanismo de acreção é dado em maior parte pelo trapeamento e aglutinação de sedimentos (Burne; Moore, 1987; Hofmann, 1973; Riding, 1991; Riding, 2011). Esse tipo de estromatólito é considerado bastante raro no registro geológico, o Neógeno e o Quaternário contendo a maioria dos espécimes publicados, como constatado por Riding (2011).

Nessa revisão, todas as ocorrências de estromatólitos aglutinantes carbonáticos publicadas foram formadas em ambientes marinhos ou de influência marinha, sendo este fato atribuído à confluência de quatro fatores ambientais mais facilmente encontrados em ambientes marinhos: disponibilidade de grãos; agitação comum por ondas (carregando grãos até o tapete microbiano); eletrólitos na água que melhoram

a adesão do EPS (evitando que os grãos sejam removidos do tapete microbiano); e a baixa concentração de carbonatos na água dificultando a precipitação precoce em EPS (e preservando assim o EPS pegajoso que retém os grãos) (Suarez-Gonzalez *et al.*, 2019).

Esta restrição ambiental também foi encontrada em todos os trabalhos publicados que descrevem estromatólitos siliciclásticos, que foram compilados e classificados por Angonese (2021), reforçando que o processo de trapeamento e aglutinação não depende da composição dos grãos, mas de fatores ambientais que pode ocorrer em sistemas deposicionais carbonáticos, siliciclásticos ou mistos. (Bertrand-Sarfati, 1994; Braga; Martín, 2000; Davis, 1968; Draganits; Noffke, 2004; Druschke *et al.*, 2009; Ferronato *et al.*, 2021; Harwood, 1990; Marcinowski; Szulczewski, 1972; Schieber, 1998; Schwarz; Einsele; Herm, 1975; Soudry; Weissbrod, 1995)

Isso nos leva ao tema deste estudo: os estromatólitos siliciclásticos da Formação Guará. Em estudos prévios (Scherer; Lavina, 2005, 2006), estruturas sedimentares presentes na Fm. Guará, como laminações onduladas e corrugadas, eram interpretadas como produto de adesão física em substrato umedecido (estruturas de adesão *sensu* Kocurek e Fielder (1982)). Os estromatólitos dômicos encontrados nos afloramentos descritos, porém, são incompatíveis em tamanho com as estruturas geradas puramente por adesão física, e possuem evidências estruturais, texturais e fósseis de sua origem microbial.

Os estromatólitos siliciclásticos da Fm. Guará diferem de todos os espécimes publicados de estromatólitos aglutinantes carbonáticos e siliciclásticos por não ter sido depositado em ambiente com influência marinha. Esses estromatólitos foram depositados nos lençóis de areia eólicos úmidos com periódicas incursões fluviais. A identificação da biogenicidade desses depósitos é importante para o estudo da evolução da vida na Terra e até mesmo em Marte.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo desse estudo é a reinterpretação das fácies estromatolíticas da Fm. Guará, fornecer evidências da origem microbiana desses depósitos e discutir as condições ambientais que permitiram a existência de estromatólitos aglutinantes em um ambiente continental.

## **1.2 Área de Estudo**

O estudo foi localizado na região oeste do estado do Rio Grande do Sul, entre as cidades de Rosário do Sul e Santana do Livramento e nos seus arredores, onde foi realizado mapeamento da Fm. Guará, prospectando afloramentos. Aproximadamente 30 km sudoeste da cidade de Rosário do Sul, ocorrem dois afloramentos distantes 2 km em linha reta. Esses afloramentos são correlacionáveis estratigraficamente, devido à camada silicificada que os capeia, que é traçável lateralmente.

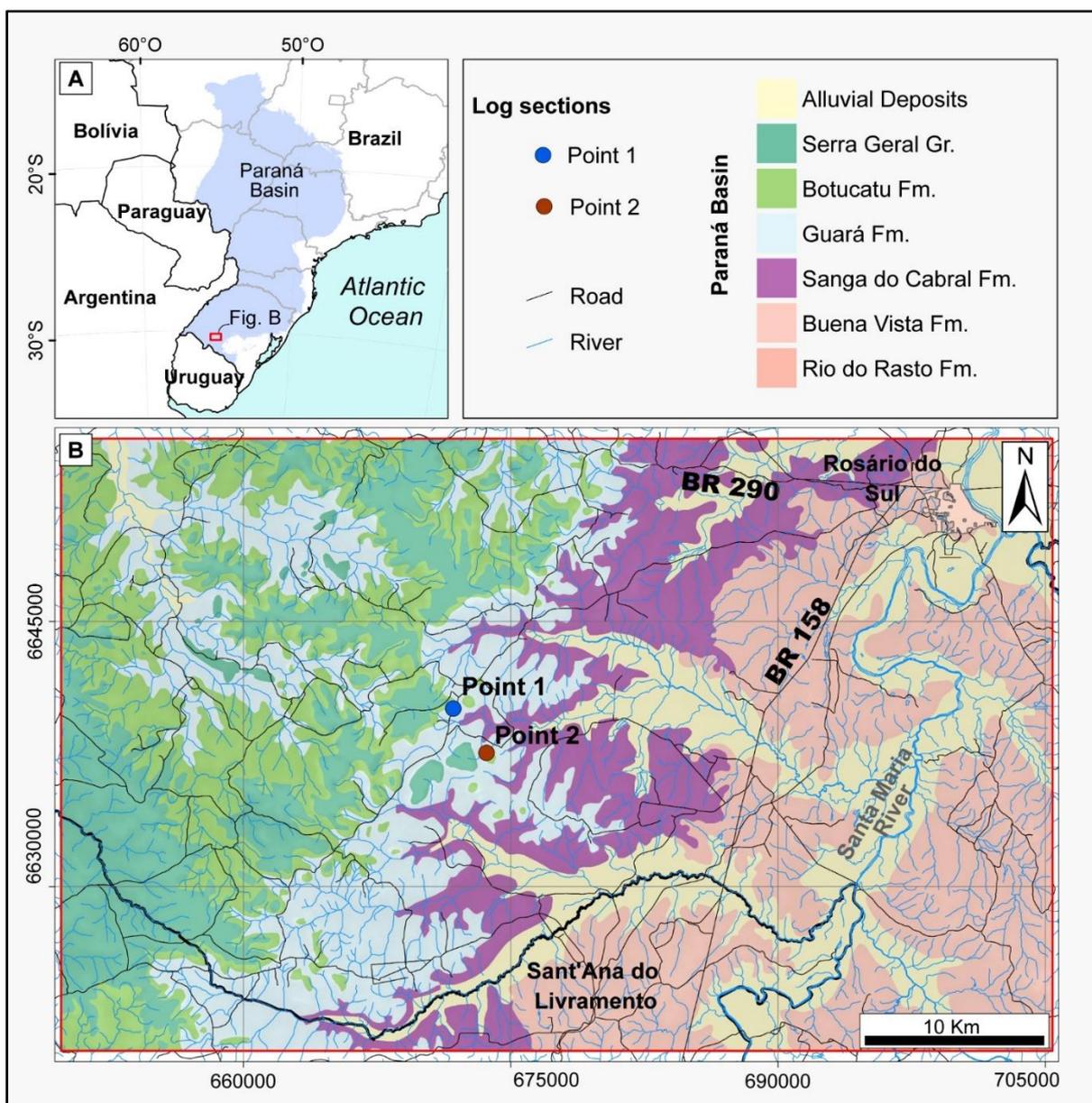


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo; a) Extensão da Bacia do Paraná no Brasil, b) Mapa geológico com a localização dos 2 afloramentos. Datum WGS 84, Zona UTM 21S.

## 2. CONTEXTO GEOLÓGICO

Cobrando uma área de 1.400.000 km<sup>2</sup>, a Bacia do Paraná (Fig. 1a) é uma bacia intracratônica localizada parcialmente na Argentina, Brasil, Paraguai, Uruguai e, em menor extensão, na correlata Bacia de Huab, na Namíbia (Milani *et al.*, 1998). A bacia contém o registro de subsidência e sedimentação do Ordoviciano ao Cretáceo. A Formação Guarú é uma sequência deposicional distinta na Bacia do Paraná, datada do Jurássico Superior (Schereret *et al.*, 2023). No Brasil, a Formação Guarú varia de 12 a 110 m de espessura, com afloramentos nos estados do Rio Grande do Sul e Paraná. Sobrepõe-se à Formação Sanga do Cabral no estado do Rio Grande do Sul e à Formação Pirambóia no estado do Paraná, e é sobreposta pela Formação Botucatu

em ambos os estados. No Uruguai, o Membro Batovi da Formação Tacuarembó, que tem até 200 m de espessura, é estratigraficamente equivalente à Formação Guará (Scherer *et al.*, 2021).

No estado do Rio Grande do Sul, a Formação Guará apresenta uma variação lateral de associações de fácies. Na porção norte, próximo às cidades de Jaguari e São Francisco de Assis, ocorrem arenitos médios a grossos, que foram depositados por sistemas fluviais entrelaçados. Na porção sul, no entorno das cidades de Rosário do Sul e Santana do Livramento (área de estudo, Fig. 1B), ocorrem arenitos finos a médios, depositados por canais fluviais intercalados, dunas eólicas e lençóis de areia, definindo ciclos ascendentes de aumento de umidade (Scherer & Lavina, 2006).

### 3. ESTADO DA ARTE

#### 3.1 Estromatólitos

O termo estromatólito tem origem dos termos gregos *stromata*, plural de *stroma*, “camada” e *lithos*, “rocha”. Os estromatólitos são microbialitos originados pelos processos litificantes bióticos e físicos que ocorrem nas esteiras microbiais. Os estromatólitos aparecem no planeta pela primeira vez 3,7 Ga atrás (Nutman *et al.*, 2016), no Arqueano, e continuam existindo até os dias de hoje. São os mais abundantes registros da vida na Terra durante o Pré-Cambriano (Riding, 2011b).

Microbialitos são rochas geradas por comunidades microbiais bentônicas (Riding, 2011a). Micróbio, aqui, se refere a qualquer organismo microscópico, sendo os principais micróbios envolvidos nesses depósitos as bactérias heterotróficas, e as autotróficas cianobactérias (especialmente importantes, também chamadas de cianófitas) e algas como diatomáceas, clorófitas e rodófitas (Riding, 1991). As cianobactérias apresentam duas morfologias principais: cocoides e filamentosas (Fig. 2).

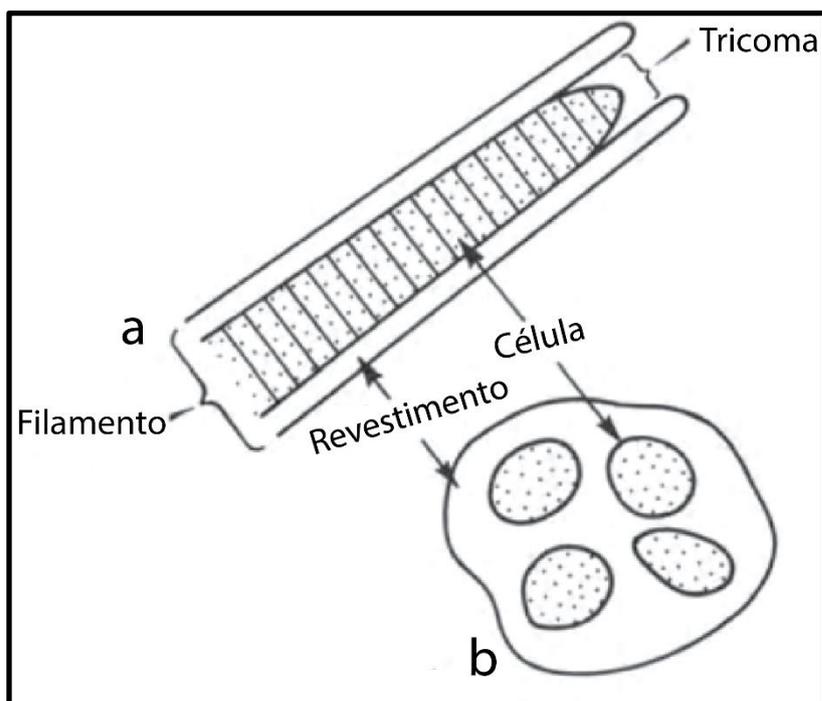


Figura 2 Morfologia de cianobactérias (a) filamentosa e (b) cocoide. Traduzido de **(Riding, 1991)**.

Esteiras microbiais são camadas planares, não-litificadas que cobrem a superfície deposicional como um tapete, em ambientes deposicionais siliciclásticos, carbonáticos e evaporíticos. São compostas por células microbiais e sua mucosa, chamada de EPS (substâncias poliméricas extracelulares) (Noffke et al., 2003; Riding, 2011a). Por processos de trapeamento e aglutinação, precipitação mineral microbiana e abiótica, as esteiras microbiais podem se tornar microbialitos (Fig. 3).

Os microbialitos são divididos em dendrolitos, trombolitos, estromatólitos e leirolitos, de acordo com a sua macrofábrica (Fig. 3). Estromatólitos, segundo esse critério, são definidos como depósitos microbiais bentônicos laminados (Riding, 1991; Riding, 2011a).

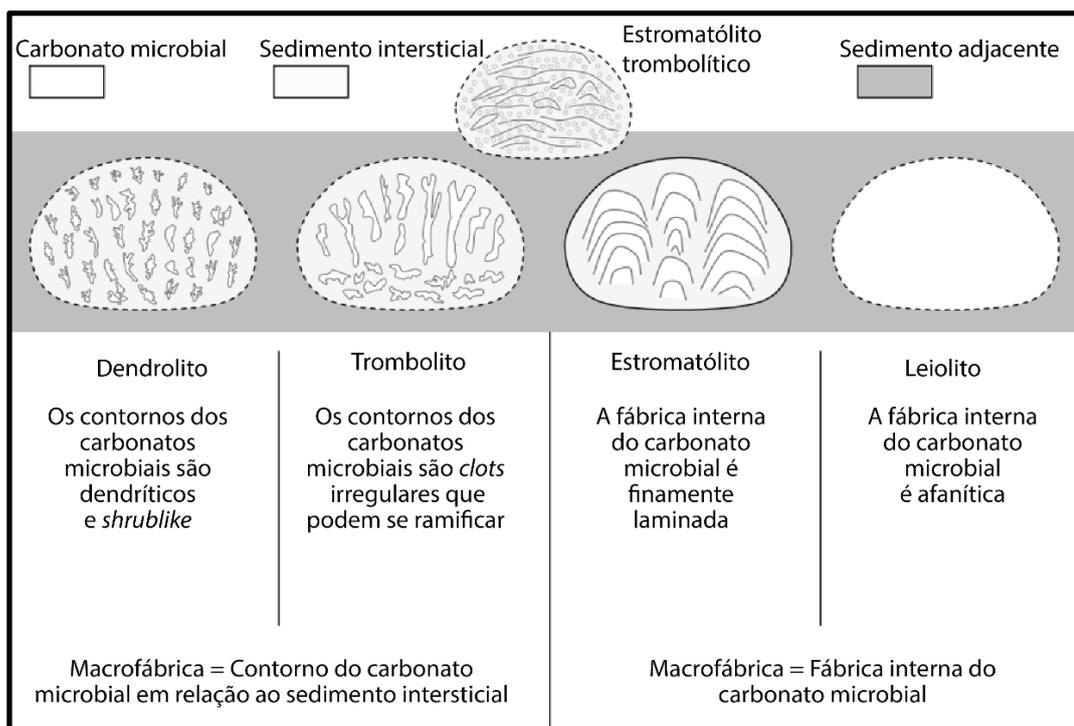


Figura 3. Classificação dos microbialitos pela macrofábrica. Traduzido de (Riding, 2011a).

### 3.2 Classificação

Os estromatólitos podem ser divididos de acordo com seus processos de formação e a fábrica resultante (Riding, 2011a). A figura 4 relaciona os processos de formação com as macrofábricas, e a figura 5 ilustra as principais microfábricas. Os cinco tipos principais de estromatólitos são: (1) Esteiras microbiais litificadas; (2) Crosta cristalina; (3) Crosta híbrida; (4) Estruturas enrugadas e; (5) Estromatólitos siliciclásticos.

#### 3.2.1 Esteiras microbiais litificadas

Formam depósitos estratiformes, dômicos e colunares, e sua microfábrica tende a ser irregular e descontínua, podendo apresentar abundante porosidade fenestral. São divididas em dois subtipos principais: estromatólitos de grãos finos e estromatólitos grossos aglutinantes.

Os estromatólitos de grãos finos apresentam duas microfábricas distintas: coagulada/peloidal, composta por micrita e microespatita; e filamentosa (também denominada esquelética, que consiste de microfósseis tubiformes envoltos por matriz de grãos finos. São interpretados como produtos de precipitação microbial sinsedimentar. Microfábricas micríticas também podem ser formadas por trapeamento e aglutinação de lama carbonática (Tosti; Riding, 2017).

Estromatólitos aglutinantes são formados pelo trapeamento e aglutinação de sedimentos arenosos e cascalhosos por EPS não-calcificado e filamentos de cianobactérias e microalgas. Sua acreção envolve precipitação microbiana de carbonato e trapeamento e aglutinação de partículas.

### **3.2.2 Crosta cristalina (*sparry crust*)**

São precipitados abiogênicos *stromatolite-like* (não são estromatólitos pois na definição de estromatólito é implícita sua origem microbiana), formados exclusivamente por precipitação inorgânica. Têm microfábrica cristalina, composta por cristais radiais/fibrosos. A laminação é isópaca, homogênea e com boa continuidade lateral e vertical.

### **3.2.3 Crosta híbrida**

São formados por precipitação microbiana e inorgânica, e consistem de laminação milimétrica de crostas cristalinas inorgânicas de coloração clara e de crostas de grãos finos escuras de origem microbiana. A laminação é bem desenvolvida e homogênea, porém não é isópaca.

### **3.2.4 Estruturas enrugadas (*wrinkle structures*) - MISS**

As estruturas enrugadas, ou MISS são formadas por esteiras microbianas coesas, mas com litificação precoce insuficiente (microbiana ou abiótica). Por isso, não apresentam acreção significativa, mas mesmo assim estabilizam camadas de sedimento. Esses depósitos inconsolidados podem ser perturbados pelo movimento da água ou ressecamento (fraturados, enrolados e dobrados), e essas estruturas sindeposicionais podem ser posteriormente preservadas.

### **3.2.5 Estromatólitos siliciclásticos**

Os estromatólitos siliciclásticos, em contraste com as estruturas enrugadas, podem apresentar taxas de acreção consideráveis, devido à processos de precipitação microbiana e abiótica. Os estromatólitos siliciclásticos são formados por trapeamento e aglutinação de partículas terrígenas (Fig. 7), e são estromatólitos aglutinantes. Martín et al. (1993) define que um estromatólito siliciclástico é composto por mais de 10% de grãos siliciclásticos.

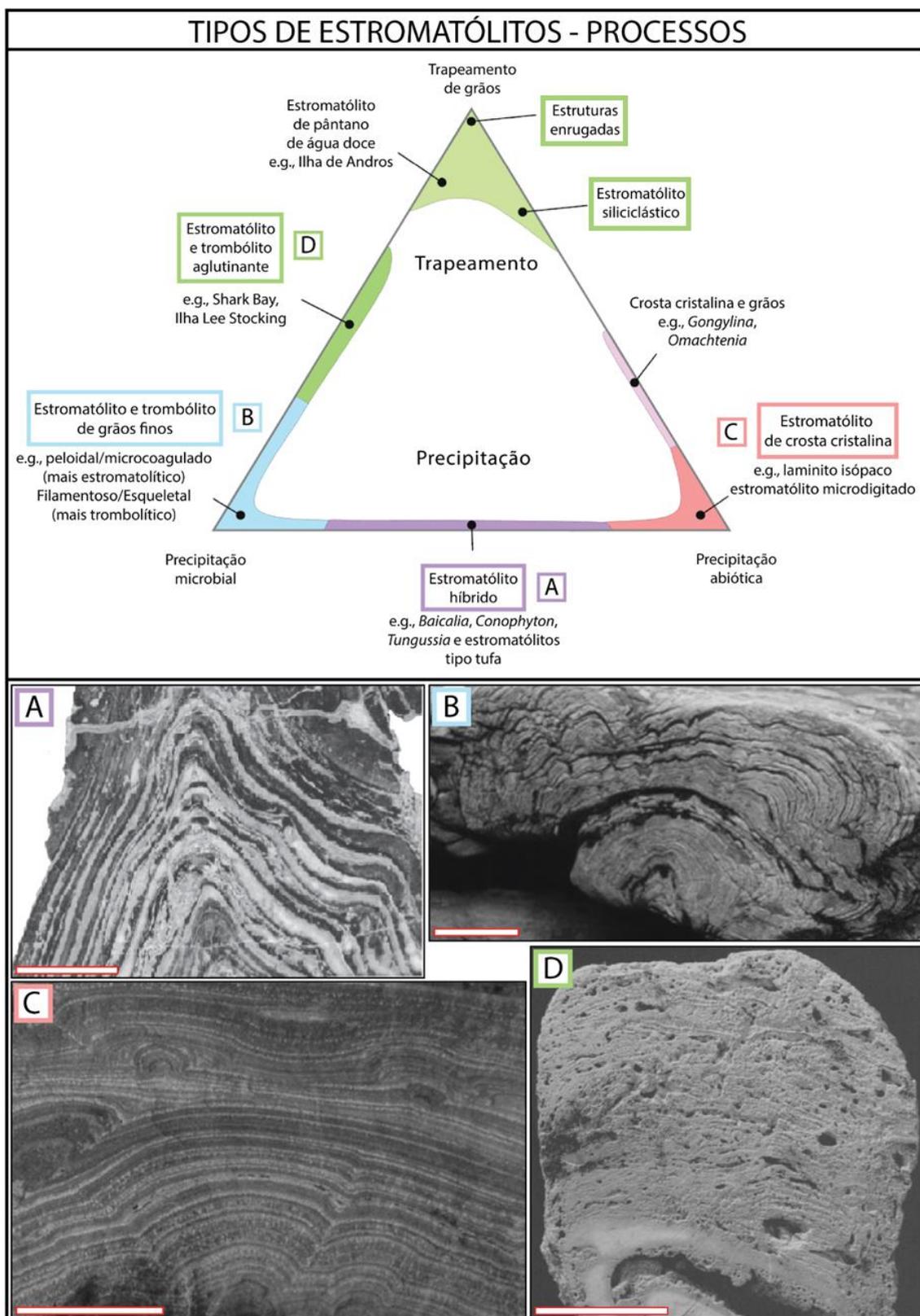


Figura 4. No diagrama ternário são dispostos diversos tipos de estromatólitos, classificados de acordo com os processos de precipitação microbiana, precipitação abiótica e trapeamento de grãos que os formam, traduzido de (Riding, 2011a). (A) Estromatólito híbrido: *Conophyton cylindricum* do grupo Vazante, Cabeludo, Minas Gerais. Escala 3 cm. Retirado de (Sallun Filho & Fairchild, 2005). (B) Estromatólito de grão fino: *Cryptozoon* do Calcário Hoyt, Nova Iorque, EUA. Escala 10 cm. Retirado de (Riding, 2011a). (C) Crosta cristalina: Laminito isópaco da Formação *Society Cliffs*, próximo à ilha de Bylot, Canadá. Escala 2 cm. Retirado de (Riding, 2008). (D) Estromatólito aglutinante: Estromatólito marinho moderno, ilha de Lee Stocking, Bahamas. Escala 3 cm. Retirado de (Feldmann & McKenzie, 1998).

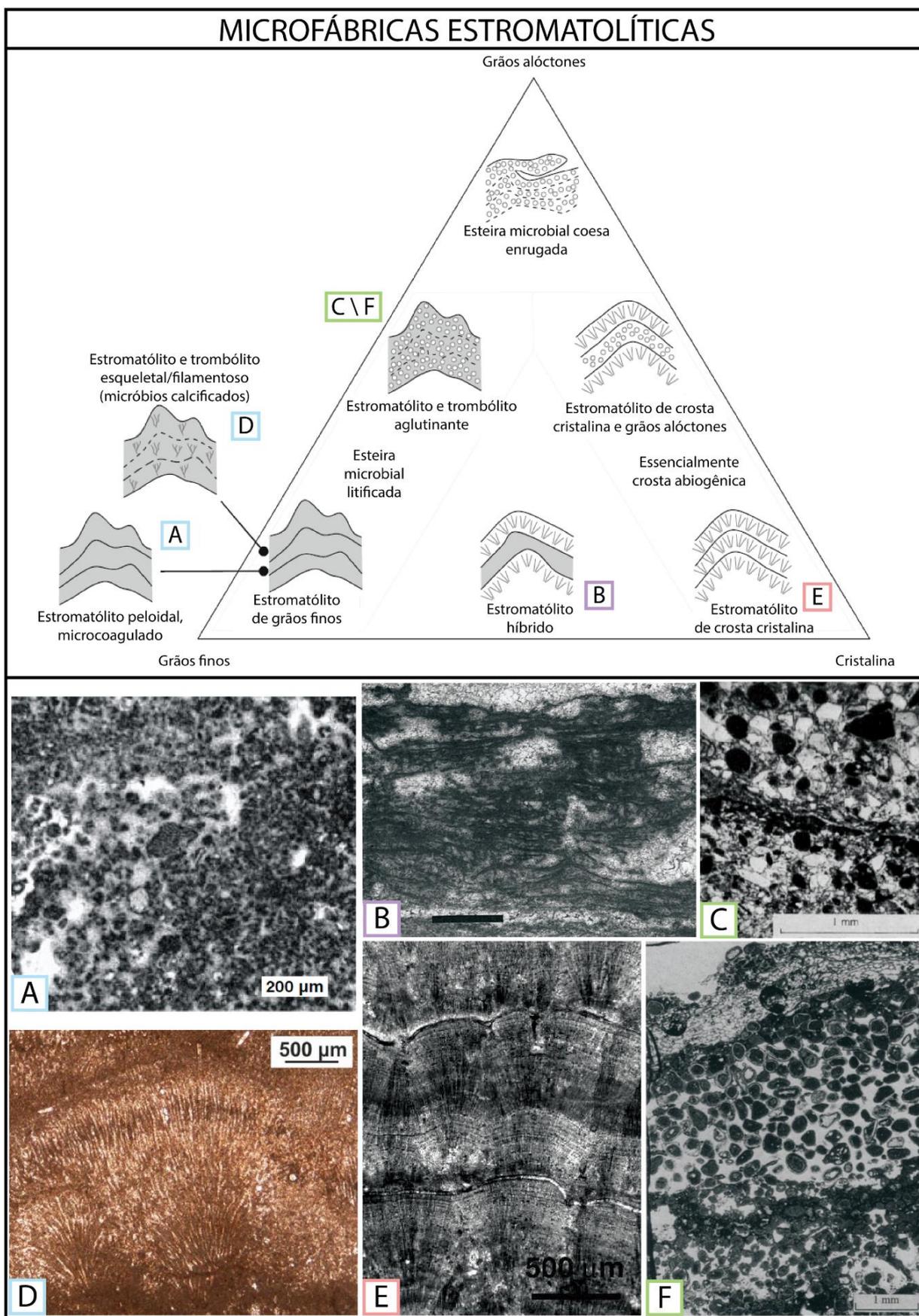


Figura 5. No diagrama ternário estão dispostas as principais macrofábricas estromatolíticas, classificadas de acordo com os processos de precipitação microbial, precipitação abiótica e trapeamento de grãos que as formam. (A) Microfábrica peloidal/coagulada. No lado direito os peloides são mais estreitamente espaçados, enquanto no lado esquerdo a fábrica é coagulada com pelóides dispersos. Retirado de (Riding & Tomas, 2006). (B) Microfábrica híbrida composta de filmes escuros

de dolomicrospas separados por lentes mais espessas de dolospar. Escala 300  $\mu\text{m}$ . Retirado de (Knoll & Semikhatov, 1998). (C) Microfábrica aglutinada composta por grãos de areia divididos por crosta fina de aragonita. Retirado de (Schwarz; Einsele; Herm, 1975). (D) Microfábrica esquelética, formada por leques de microfósseis filamentosos. Retirado de (Suarez-Gonzalez *et al.*, 2019). (E) Microfábrica cristalina, formada por leques cristalinos radiais. Escala 500  $\mu\text{m}$ . Retirado de (Corsetti & Storrie-Lombardi, 2003). (F) Microfábrica aglutinada. A camada do topo mostra a zona habitada pelos micróbios, com grãos sendo aglutinantes e precipitação de micrita. Retirado de (Feldmann & McKenzie, 1998).

### 3.3 Trapeamento e aglutinação

O processo de trapeamento e aglutinação de grãos foi primeiro descrito por Black (1932), quando estudou os estromatólitos da Ilha de Andros, Bahamas, constatando que “os filamentos são envoltos em um revestimento mucilaginoso, no qual partículas minerais facilmente aderem” e “a colonização de sedimentos recém depositados por algas filamentosas aglutina o sedimento, prevenindo que seja novamente removido”.

As partículas sedimentares são transportadas por correntes até a superfície da esteira microbiana, onde são trapeadas. O trapeamento consiste de dois subprocessos: adesão pela natureza pegajosa do EPS produzido pelos micróbios e obstrução física (*baffling*) gerada pelos filamentos microbianos (Riding, 1991). Esteiras microbianas mais desenvolvidas e compostas predominantemente por cianobactérias e algas eucariontes, tem maior capacidade de trapear grãos de areia média e grossa. Esteiras microbianas subdesenvolvidas trapeiam majoritariamente grãos finos (Frantz; Petryshyn; Corsetti, 2015). Isso faz com que exista uma seleção granulométrica intrínseca ao processo, imposta por fatores biológicos (Fig. 6). Os micróbios migram verticalmente para o topo de maneira contínua, através de respostas fototáticas positivas e mecanismos de motilidade, **aglutinando** as partículas trapeadas à esteira microbiana e impedindo que a corrente as remova.

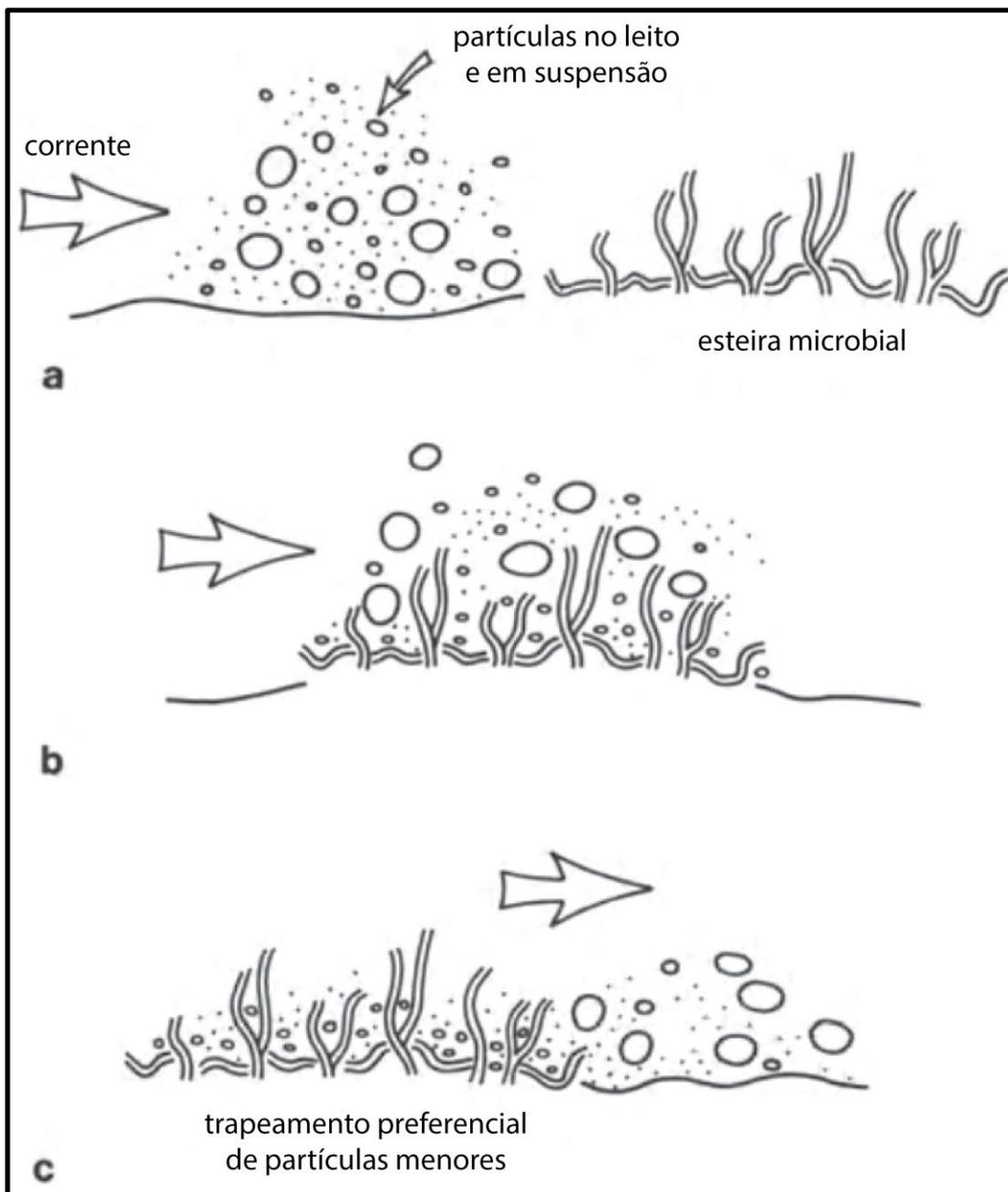


Figura 6. Representação do trapeamento de partículas por uma esteira microbial. As partículas menores são mais facilmente trapeadas. Traduzido de (Riding, 1991).

Os dois controles fundamentais no trapeamento e aglutinação são (Burne & Moore, 1987; Riding, 2011a):

1. capacidade de fornecimento de grãos à esteira microbial.
2. capacidade da esteira microbial de impedir a remoção dos grãos fornecidos.

A capacidade de fornecimento de grãos à esteira microbial depende de (Suarez-Gonzalez et al., 2019):

- a. presença de grãos no ambiente.

**b. agitação por correntes.**

A presença de grãos no ambiente e agitação por correntes não é o suficiente para que se estabeleça o trapeamento e aglutinação. Diversos exemplos de microbialitos formados em ambientes com presença de grãos e frequentemente agitados não mostram quantidade significativa de grãos trapeados em suas fábricas (Suarez-Gonzalez *et al.*, 2019).

A capacidade da esteira microbial de impedir a remoção dos grãos fornecidos depende de (Suarez-Gonzalez *et al.*, 2019):

**c. concentração significativa e diversidade de eletrólitos na água.**

**d. baixa saturação em  $\text{CaCO}_3$  da água.**

A alta concentração de eletrólitos na água aumenta a adesividade do EPS. Segundo Spears *et al.* (2008), “a bioestabilização de sedimentos requer um complexo de interações (íon-íon, íon-dipolo e ligações de hidrogênio) entre as partículas de argila, cátions e grupos funcionais reativos do EPS. Portanto, apenas quando há EPS e cátions em quantidades suficientes os efeitos comuns da bioestabilização são observados”.

Além de ser a superfície na qual os grãos aderem, o EPS também é o lócus de precipitação mineral (Dupraz *et al.*, 2009). A alta saturação em  $\text{CaCO}_3$  na água facilita a precipitação de carbonato no EPS, diminuindo a quantidade de EPS pegajoso, e consequentemente diminuindo sua capacidade de aderência.

Suarez-Gonzalez *et al.* (2019), estudando a Formação Leza, na Espanha, demonstram que só os microbialitos que foram formados em ambientes que atendiam a todos os quatro fatores (acima listados) desenvolveram fábricas aglutinadas. A Fm. Leza apresenta diversos tipos de microbialitos, entre eles oncóides, trombolitos, estromatólitos micríticos-evaporíticos, esqueletais e aglutinantes. Os oncóides, por exemplo, que foram formados em canais fluviais e lagos rasos sem influência marinha (i.e., água doce, com presença de grãos e agitação por correntes) não mostram microfábricas aglutinadas. Essa ausência é explicada pelo autor pela baixa diversidade e concentração de eletrólitos (i.e., salinidade) e alta concentração de  $\text{CaCO}_3$  na água, vinda de fontes com dureza elevada (*hardwater sources*), que inibiram o trapeamento e aglutinação de grãos e favoreceram a precipitação mineral.

Os estromatólitos aglutinantes da Formação Leza foram formados em ambientes marinhos com influência de maré, que também continham grãos e eram continuamente agitados. A água marinha/salobra possui alta abundância e diversidade de eletrólitos (aumentando a adesão do EPS) e relativamente baixa (no Fanerozoico) saturação de  $\text{CaCO}_3$  (inibindo precipitação mineral). Apenas nesse ambiente os quatro fatores foram atingidos plenamente, e apenas nele se desenvolveram estromatólitos aglutinantes. A dificuldade da obtenção e manutenção de um estado favorável em todos os quatro fatores simultaneamente pode explicar a raridade dos estromatólitos aglutinantes no registro geológico.

O levantamento bibliográfico conduzido por Suarez-Gonzalez et al. (2019) observou que todos os estromatólitos aglutinantes (fósseis e modernos) já publicados foram formados em ambientes marinhos rasos, a maioria com influência de maré. Essas observações evidenciam como os parâmetros ambientais exercem grande influência sobre os processos de acreção microbiana.

### 3.4 Precipitação mineral em esteiras microbianas

Além do trapeamento e aglutinação de partículas, outro processo de acreção em esteiras microbianas é a precipitação mineral. Essa precipitação pode ocorrer por diferentes processos, como mostrado na figura 7 (Dupraz *et al.*, 2009). Esses processos podem ocorrer simultaneamente em um microbialito, dando origem à tramas distintas.

A precipitação **induzida** biologicamente consiste de precipitação mineral induzida por atividades metabólicas microbianas, sendo necessária a presença de organismos vivos. De acordo com Dupraz (2009): “A fotossíntese e a redução de sulfato aumentam a alcalinidade (promovendo a precipitação de carbonato), enquanto a respiração aeróbica, a oxidação de sulfeto e a fermentação induzem a dissolução. A precipitação total de carbonato depende do equilíbrio entre as diferentes atividades metabólicas, bem como de suas variações temporais e espaciais.”. Esse processo de precipitação dá origem às tramas microbianas: estromatólitos, trombolitos e leiólitos.

A precipitação **influenciada** biologicamente consiste de mineralização passiva da matéria orgânica, onde esta serve como núcleos de cristalização, com influência de fatores extrínsecos como evaporação e desgaseificação. Os produtos dessa precipitação são esferulitos, esferóides nanométricos, agulhas.

A precipitação **inorgânica** consiste de precipitação direta de solução aquosa, controlada por fatores extrínsecos como evaporação e desgaseificação. Esse tipo de precipitação gera as crostas cristalinas mencionadas na classificação dos estromatólitos.

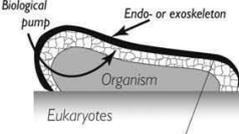
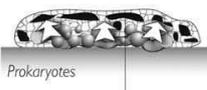
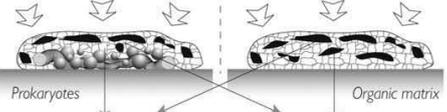
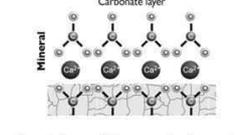
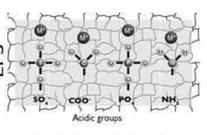
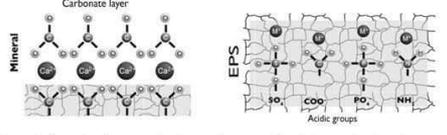
	<b>Biominerzation</b>	<b>Organomineralization s.l.<sup>1</sup> - This study</b>		<b>Mineralization</b>
<b>Process and players</b>	<p><b>Biologically-controlled mineralization</b></p> <p><b>Intrinsic</b> Enzymatic controlled - Active pump</p>  <p>Biological pump Endo- or exoskeleton Organism Eukaryotes</p>	<p><b>Biologically-induced mineralization</b></p> <p><b>Intrinsic</b> Microbial metabolisms - Diffusion</p>  <p>Prokaryotes</p>	<p><b>Biologically-influenced mineralization (This study)</b></p> <p><b>Extrinsic</b> Environmentally-driven (e.g. degassing, evaporation) - Diffusion</p>  <p>Prokaryotes Organic matrix</p>	<p><b>Inorganic mineralization</b></p> <p><b>Extrinsic</b> Environmentally-driven (e.g. degassing, evaporation) Lacking organic matter</p>  <p>Abiotic substrate</p>
<b>Nucleation site</b>	<p>Mineral</p>  <p>Carbonate layer Mineral Genetically controlled macromolecular matrix</p>	<p>EPS</p>  <p>EPS Randomly organized matrix Acidic groups</p>	<p>Mineral</p>  <p>Carbonate layer Mineral Diagenetically-produced macromolecular matrix 'Organomineralization' Randomly organized matrix Acidic groups</p>	<p>Variety of nuclei</p>  <p>Variety of nuclei</p>
<b>Nomenclature (not exhaustive)</b>	<p>Biominerzation - Biomineral (e.g., Mann 2002, Perry et al. 2007)</p> <p>Biominerzation - Biomineral, e.g., Dove and Weiner 2003</p> <p><b>BIOMINERAL - This study</b> Clear morphology (specific organism)</p>	<p>Organomineral (Perry et al. 2007)</p> <p>Organomineralization s.s.<sup>2</sup> (Trichet and Défarge 1995)</p> <p><b>ORGANOMINERAL - This study</b> Difficult to determine the exact origin of the alkalinity engine responsible in the fossil record</p>		<p>Mineral</p>
<b>Living organisms required</b>	YES	YES	NOT NEEDED FOR MINERALIZATION	NO
<b>Level of control on precipitation</b>	<p><b>Strict</b></p> <p>Cellular activities <b>control</b> nucleation, growth, morphology, final location</p>	<p><b>Induced</b></p> <p>Metabolic activities <b>induce</b> conditions for precipitation The organic matrix influences crystal morphology and composition</p>	<p><b>Passive</b></p> <p>Passive mineralization of organic matter The organic matrix <b>influences</b> crystal morphology and composition</p>	<b>None</b>
<b>Products</b>	<p><b>External &amp; internal skeleton</b></p> <p>Consists of 'Biomineral' Direct evidence of life</p> 	<p><b>Microbialite</b></p> <p>Consists of 'Organomineral' Indirect evidence of life</p>  <p>Stromatolite Thrombolite Leiolite Smooth rhomb Needle Dumbell Spherulite Nanometer spheroid</p> <p>Macrometer scale Micro to nanometer scale</p>		<p>e.g., Speleotem - Stalagmite - Stalagite</p> 

Figura 7. Comparação entre os processos de mineralização e seus produtos. Retirado de (Dupraz et al., 2009).

#### 4. MATERIAL E MÉTODOS

Para a execução do trabalho, foi aplicada uma metodologia de análise de fácies, com levantamento de perfis colulares em campo, e coleta de amostras para petrografia.

O perfil colunar é uma representação gráfica das fácies sedimentares em uma seção rochosa. Possui dois eixos: o vertical representa a espessura da camada, e o horizontal o tamanho de grão. Também são registradas informações do afloramento (nome do ponto, coordenadas), a denominação de cada fácies, paleocorrentes, estruturas, fotos e amostras.

Segundo James & Dalrymple (2010), uma fácies é “um corpo de rocha caracterizada por uma combinação de litologia, e estruturas físicas e biológicas que a concedem um aspecto que o diferencia de outra fácies acima, abaixo ou lateralmente adjacente”. A análise de fácies baseia-se na ideia de que cada processo atuante (seja ele físico, químico ou biológico) produz um registro específico (estrutura sedimentar, textura ou conteúdo fossilífero). Portanto, para cada característica de uma rocha sedimentar, conhecendo as relações processo-produto em questão, é possível inferir algo sobre os processos que a formaram.

Uma associação de fácies é um conjunto de fácies geneticamente relacionadas, e que possuem algum significado ambiental. Um modelo de fácies, por sua vez, é uma síntese de um sistema deposicional específico, construído pela integração de diversos exemplos de sistemas modernos e antigos. Combinando o conjunto de processos que são deduzidos na análise de fácies com modelos de fácies, é possível inferir o ambiente deposicional no qual o depósito foi formado (James & Dalrymple, 2010), (Fig. 8).

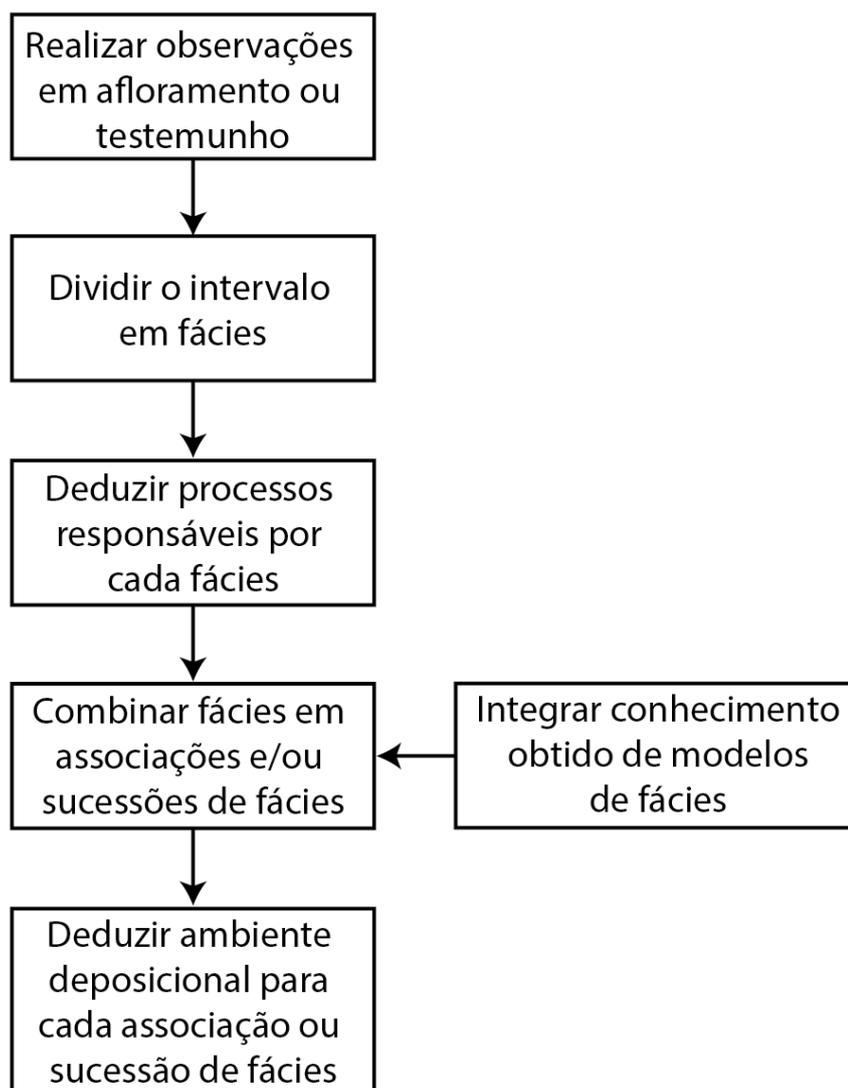


Figura 8. Fluxograma da progressão lógica da interpretação de um depósito sedimentar. Modificado de James & Dalrymple (2010).

Nesse trabalho, a petrografia de luz polarizada teve como principal objetivo a definição e interpretação das microfábricas microbiais e a identificação de material orgânico fóssil da esteira microbiana.

A análise das lâminas petrográficas sob luz polarizada consistiu em identificação dos componentes primários e diagenéticos, através de comparação com atlas de descrição petrográficas (Ulmer-Scholle *et al.*, 2015), observações qualitativas das porcentagens composicionais, que foram estimadas visualmente através de ábacos e de texturas sedimentares microbiais, que foram comparadas com exemplos da literatura (Schieber *et al.*, 2007; Ulmer-Scholle *et al.*, 2015).

Para a identificação do material orgânico fóssil, foi utilizada a técnica de epifluorescência de ultravioleta, onde uma luz ultravioleta é aplicada à fonte luminosa

do microscópio para revelar material orgânico fóssil. O princípio da microscopia de epifluorescência de ultravioleta é que a matéria orgânica absorve os comprimentos de onda emitidos e reemite comprimentos de onda mais longos, dentro do espectro de luz visível. Esta forma de fluorescência é conhecida como fluorescência primária ou autofluorescência (Hutton, 1991).

## 5. RESUMO DOS RESULTADOS

### 5.1 Análise de fácies

Neste estudo foram interpretados 2 afloramentos da Formação Guará (Fig. 9B) cerca de 30 km a sudoeste da cidade de Rosário do Sul. Esses dois afloramentos, distantes 2 km um do outro, são estratigraficamente correlacionáveis, ocorrendo na mesma cota, rastreáveis através da camada silicificada que capeia os trechos. Os afloramentos têm em média 10 m de espessura, aflorando nas porções mais íngremes de morros arredondados e isolados.

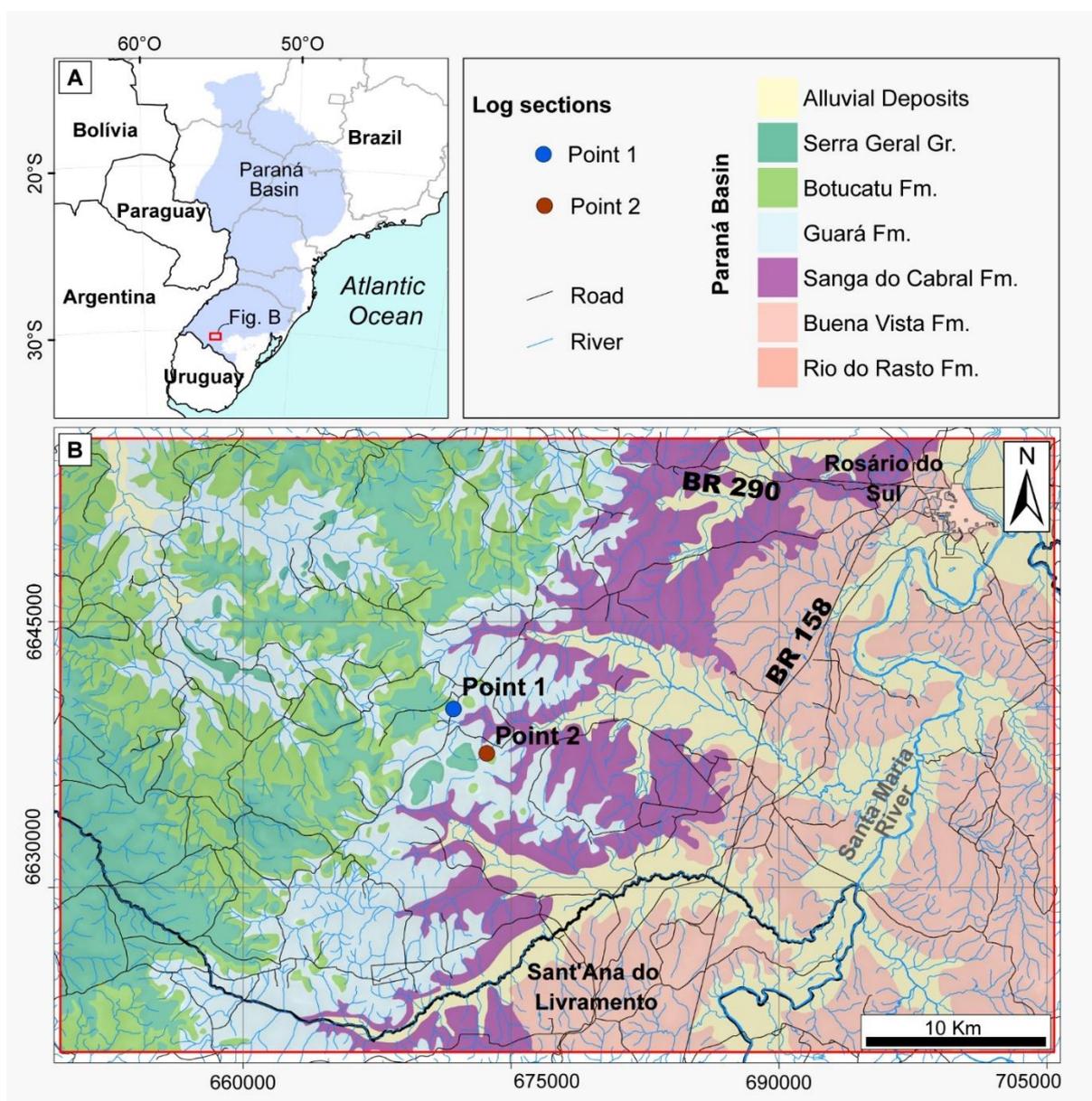


Figura 9. Mapa de localização da área de estudo; a) Extensão da bacia do Paraná no Brasil, b) Mapa geológico mostrando a localização dos afloramentos estudados. Datum WGS 84, UTM Zone 21S.

Os afloramentos continham fácies eólicas e fluviais (Fig. 10A), que foram diferenciadas pela gradação inversa e normal das lâminas, respectivamente, e também pela presença de areia grossa e grânulos nos depósitos fluviais. A fácies eólica consiste em arenitos finos a médios compostos principalmente por quartzo e raros K-feldspato e esmectita, com estratificação cruzada tangencial ou com estratificação cruzada de baixo ângulo (Fig. 10E). As laminações são inversamente gradadas, formando estratos transladantes cavalgantes. A fácies fluvial consiste em *sets* amalgamados de arenitos estratificados cruzados tangenciais (Fig. 10D) e arenitos maciços (Fig. 10C) de granulação fina a média, compostos principalmente por quartzo e raros grãos de chert, feldspato K e esmectita.

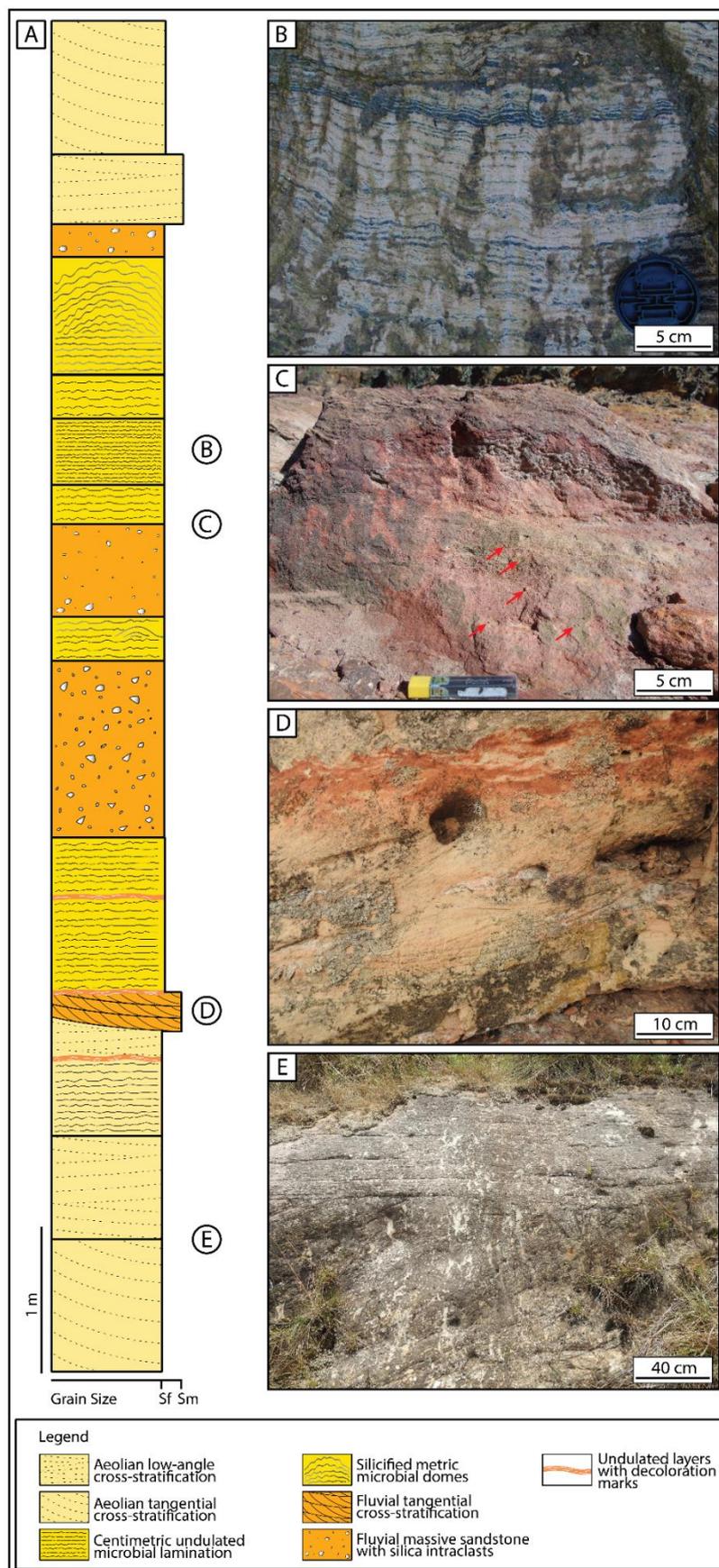


Figura 10. Fácies encontradas nos afloramentos estudados. a) Perfil estratigráfico composto dos afloramentos estudados; b) Depósitos de areia microbiana finamente laminada; c) Arenito maciço fluvial. As setas apontam para grânulos de chert; d) Arenito com estratificação cruzada tangencial fluvial; e) Arenito com estratificação cruzada de baixo ângulo.

Além desses depósitos, existem fácies microbiais, que consistem em domos isolados ou ligados lateralmente (Fig. 11A, D, E) compostos por lâminas alternadas detríticas e precipitadas in situ (Fig. 12A). Essas cúpulas gradualmente se acumulam para cima a partir da laminação ondulada com centímetros de largura (Fig. 11B) dos depósitos do lençol de areia eólico (Fig. 10B), construindo camadas onduladas de decímetros de largura que atingem até 0,7 m de espessura e 1,5 m de largura no topo das seções estudadas.

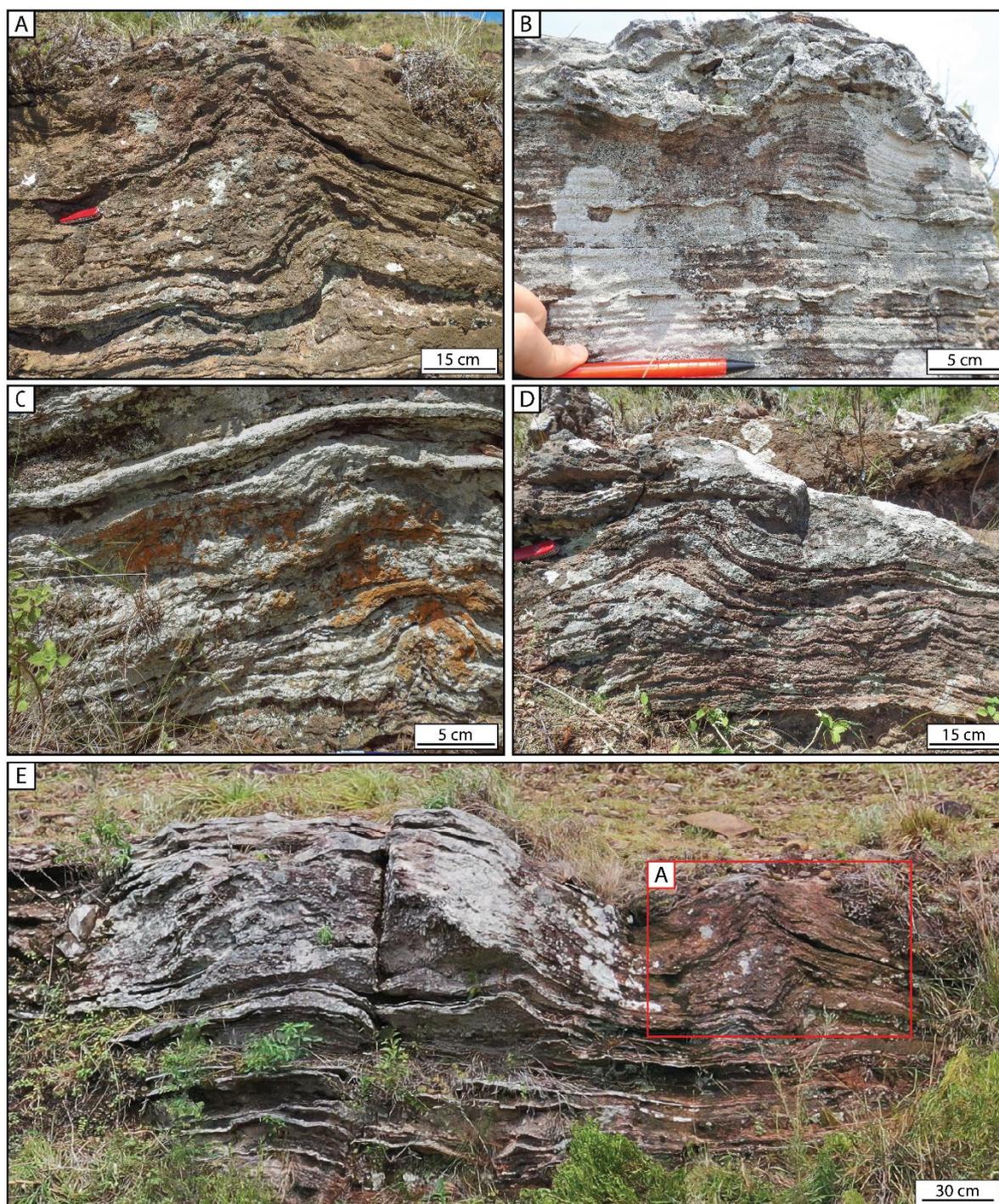


Figura 11. Estromatólitos dômicos siliciclásticos. A) Domo cônico com abundante sílica nodular em sua estrutura; b) Domos formados gradualmente a partir de arenito laminado horizontalmente; c) A cúpula começa com lados íngremes que gradualmente ficam mais horizontais; d) Domos assimétricos ligados lateralmente; e) Grandes domos silicificados ligados lateralmente.

As lâminas detríticas são compostas principalmente por quartzo de granulação fina a média (até 97% do volume total) e, em menor proporção, por feldspato K (até 3%) e esmectita (até 0,2%). Essas camadas possuem ampla porosidade preservada (Fig. 12A), reforçada pela dissolução geral de feldspato K e minerais argilosos. Por vezes, ocorrem lâminas onduladas escuras com milímetros de largura.

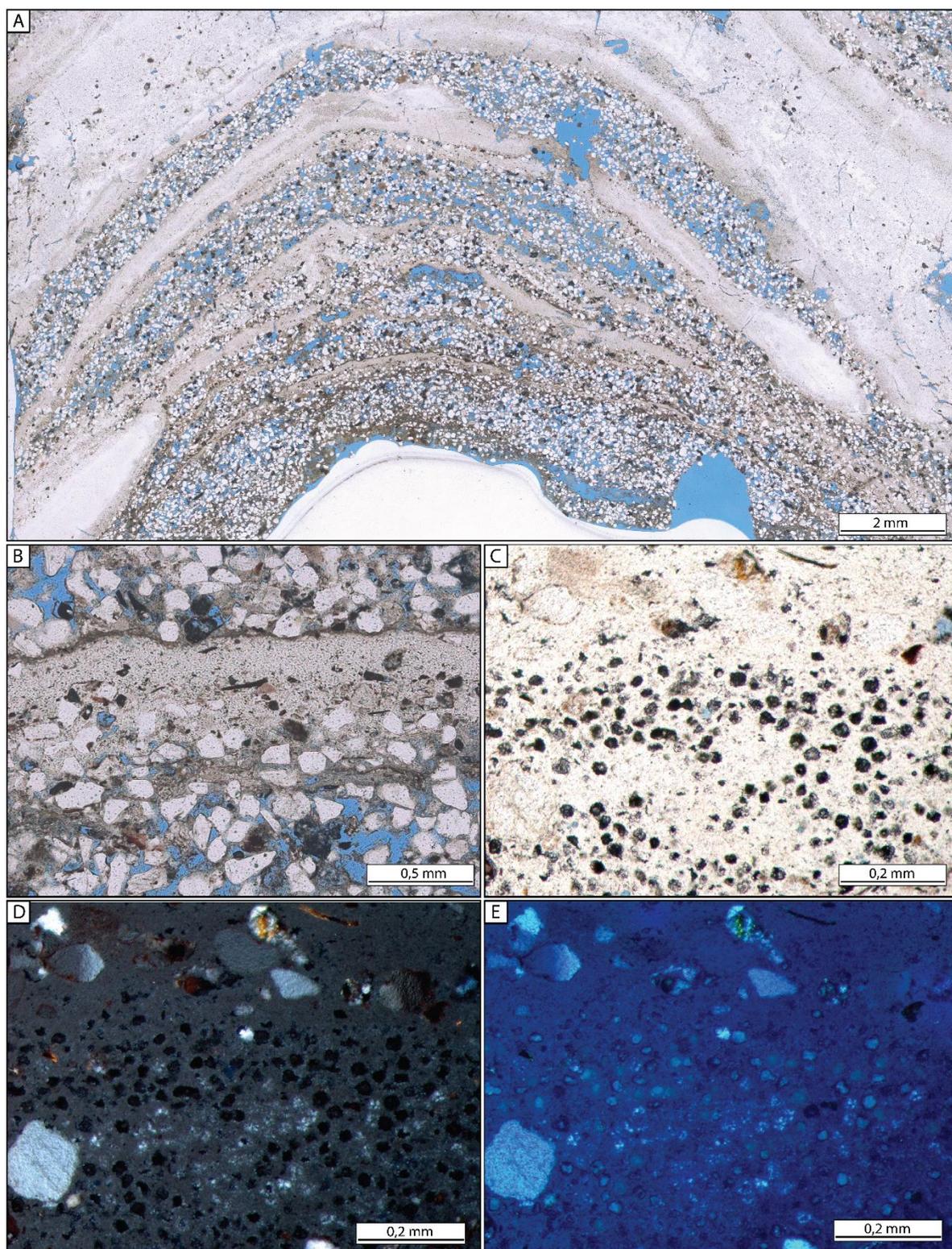


Figura 12. Características microscópicas dos estromatólitos. A) Cúpula silicificada com centímetros de largura, composta por lâminas de sílica detrítica e precipitada; b) Lâminas escuras onduladas na interface detrítico-precipitado; c) Matéria orgânica preservada em camadas de sílex, PP; d) Matéria orgânica preservada em camadas de sílex, XP; e) A matéria orgânica fluoresce quando exposta à luz UV, revelando fantasmas de antigas células cocóides.

As camadas precipitadas, por outro lado, são compostas quase inteiramente por chert, ou sílica microcristalina, que possui principalmente uma textura laminada evidenciada pela mudança na quantidade e tamanho das inclusões nas camadas individuais. Também pode aparecer em uma textura nodular e protuberante que pode alterar e interromper a laminação nas camadas detríticas (Fig. 12A). Por vezes encontra-se fraturado perpendicularmente à laminação

## 5.2 Evidências microbiais

Em trabalhos anteriores (Scherer; Lavina, 2005, 2006), estruturas da Formação Guará como laminação enrugada e ondulada foram interpretadas como produto de adesão física em substrato úmido (Kocurek; Fielder, 1982), mas os domos estromatólitos encontrados nos afloramentos descritos são incompatíveis em tamanho com as estruturas geradas por adesão puramente física, e possuem evidências estruturais, texturais e fósseis de origem microbiana que são detalhadas a seguir.

A evidência estrutural de origem microbiana consiste na intercalação de sedimentos detríticos com precipitação *in situ*, gerada pelo processo de trapeamento e aglutinação (Reid *et al.*, 2000); e as formas dômicas resultantes com flancos íngremes, evidência da estabilização microbiana do substrato. O processo de trapeamento e aglutinação consiste inerentemente em duas etapas sucessivas (Burne; Moore, 1987): captura, quando o sedimento trazido para o tapete microbiano é capturado pelo EPS e pelos filamentos microbianos, enterrando o tapete microbiano; e ligação, quando a colônia, por meio de resposta fototática positiva (ou seja, movendo-se em direção à luz), sobe até o topo do sedimento e o liga ao edifício microbiano. Neste período de não deposição, a esteira microbiana desenvolve-se plenamente e, através da degradação da matéria orgânica (e processos metabólicos, no caso da precipitação de carbonatos), cria condições favoráveis para a precipitação *in situ* de sílica (Butts, 2014).

As lâminas onduladas escuras milimétricas (Fig. 12B) presentes na base das lâminas detríticas são evidências texturais da matéria orgânica uma vez presente (Noffke *et al.*, 2013), que se acumulou diretamente abaixo da superfície da esteira microbiana à medida que micróbios vivos subiam para o topo. Quando a esteira microbiana é soterrada em um evento deposicional, há um acúmulo de matéria orgânica que gera as camadas onduladas e acastanhadas. O material orgânico original não

está bem preservado, devido à precipitação de sílica que ocorre nas camadas ricas em orgânicos. Uma pequena quantidade de material orgânico é incorporada nas camadas de sílex como inclusões.

A evidência microbial fóssil ocorre nas inclusões incrustadas no chert (Fig. 12C, D, E). Através da microscopia de luz transmitida, é possível observar material escuro preso em inclusões esferoidais, que apresenta fluorescência verde quando exposto à luz ultravioleta. Elas são interpretadas como células cocoides da esteira microbial original.

### **5.3 Ambiente deposicional**

Conforme mencionado acima, existem três fácies principais nas seções estudadas: fluvial, eólica e microbial. Na base dos afloramentos ocorrem estratos cruzados de grande porte de dunas eólicas que são sobrepostas por estratos horizontais de lençóis de areia eólicos com pequenos domos não silicificados, de até 20 cm de largura. Intercalado com os lençóis de areia eólicos ocorrem esporádicos depósitos fluviais formados por sets de estratificações cruzadas de pequeno porte. Numa camada específica, perto do topo dos afloramentos, os grandes domos silicificados acumulam-se gradualmente, atingindo o seu máximo desenvolvimento e dimensões, sendo eventualmente sobrepostos mais uma vez por depósitos fluviais e depois por depósitos eólicos de dunas.

Esses dados estratigráficos mostram que o ambiente de deposição é inteiramente continental, consistindo de um erg ativo, com condições parcialmente úmidas que recebeu incursão fluvial periódica. Mas os processos de silicificação encontrados nestes afloramentos acrescentam mais à nossa compreensão deste ambiente. Um exemplo moderno, a Salina Sua Pan, no Botswana, possui depósitos microbiais de silcrete que compartilham características com os domos silicificadas encontradas na Formação Guará (Shaw; Cooke; Perry, 1990).

No Sua Pan são encontrados dois tipos diferentes de silcrete microbiano: o chert, que é precipitado quimicamente da água, com a matéria orgânica servindo como sítios de nucleação para cristais de sílica (Butts, 2014) (mineralização influenciada biologicamente, sensu Dupraz et al. (2009)); e grão-suportados, que são formados pelo trapeamento e aglutinação de grãos de quartzo e carbonato nas esteiras microbiais, que posteriormente são cimentadas por sílica. Esses dois silcretos, em

composição e textura, são semelhantes aos dois tipos de camadas (detrítica e precipitada) dos estromatólitos da Formação Guará.

A diferença entre os silcretes da Sua Pan e os estromatólitos da Formação Guará é a acreção microbial. Em Sua Pan, o silcrete ocorre como camadas finas na porção superior do substrato (Shaw; Cooke; Perry, 1990). Isso contrasta com os grandes domos descritos neste estudo. Voltando aos controles ambientais relacionados ao processo de captura e encadernação (Suarez-Gonzalez *et al.*, 2019), fica claro que Sua Pan possui baixo suprimento sedimentar, com dominância de deflação eólica na área circundante e relativa baixa energia no lago para fornecer sedimentos aos tapetes microbianos. Além disso, a precipitação precoce de carbonato de sódio nas esteiras microbiais pode diminuir a capacidade de trapeamento do EPS.

A análise de fácies da Formação Guará aponta para uma interpretação diferente de seu ambiente deposicional. As fácies encontradas mostram um erg ativo com amplo suprimento de sedimentos, provenientes tanto de processos eólicos quanto fluviais. A água, necessária à vida da colônia microbiana, teve, por um período, alto teor de sílica dissolvida, evidenciado pela ampla precipitação *in situ*. Também não há evidências de precipitação precoce de carbonato que possa diminuir a adesão da esteira microbial. Isto pode sugerir uma água mais ácida, em comparação com as águas alcalinas de Sua Pan que favorecem a precipitação de carbonatos.

## 6. CONCLUSÕES

As estruturas encontradas nos afloramentos aqui descritos representam estromatólitos aglutinantes siliciclásticos, que se formaram em um erg ativo com periódicas incursões fluviais, onde, por um período, houve ampla precipitação de chert.

Os estromatólitos siliciclásticos desérticos da Formação Guará são produto de um delicado equilíbrio de fatores ambientais que facilitaram o raro processo de captura e ligação, resultando em exemplares únicos de estromatólitos aglutinados não marinhos. Isto abre novas possibilidades para a identificação de vida em ambientes deposicionais anteriormente inéditos, seja na Terra ou em Marte.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGONESE, B. S. **Estromatólitos siliciclásticos da Formação Caboclo,**

**Mesoproterozóico da Chapada Diamantina, BA.** 2021. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/221881>. Acesso em: 1 fev. 2024.

BERTRAND-SARFATI, J. Siliciclastic-Carbonate Stromatolite Domes, in the Early Carboniferous of The Ajjers Basin (Eastern Sahara, Algeria). **Phanerozoic Stromatolites II**, [s. l.], p. 395–419, 1994.

BLACK, M. The algal sediments of Andros Island, Bahamas. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character**, [s. l.], v. 222, n. 483–493, p. 165–192, 1932. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstb.1932.0015>.

BRAGA, J. C.; MARTÍN, J. M. Subaqueous Siliciclastic Stromatolites: A Case History from Late Miocene Beach Deposits in the Sorbas Basin of SE Spain. *In*: MICROBIAL SEDIMENTS. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2000. p. 226–232. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04036-2\\_25](http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04036-2_25). Acesso em: 8 out. 2019.

BURNE, R. V.; MOORE, L. S. Microbialites: Organosedimentary Deposits of Benthic Microbial Communities. **PALAIOS**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 241, 1987. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/palaios/article/2/3/241-254/100005>.

BUTTS, S. H. Silicification. **The Paleontological Society Papers**, [s. l.], v. 20, p. 15–34, 2014. Disponível em: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S1089332600002783/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S1089332600002783/type/journal_article). Acesso em: 16 fev. 2022.

CORSETTI, F. A.; STORRIE-LOMBARDI, M. C. Lossless Compression of Stromatolite Images: A Biogenicity Index?. **Astrobiology**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 649–655, 2003. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6517454/>.

DAVIS, R. A. Algal stromatolites composed of quartz sandstone. **Journal of Sedimentary Research**, [s. l.], v. 38, n. 3, p. 953–955, 1968.

DRAGANITS, E.; NOFFKE, N. Siliciclastic Stromatolites and Other Microbially Induced Sedimentary Structures in an Early Devonian Barrier-Island Environment (Muth Formation, NW Himalayas). **Journal of Sedimentary Research**, [s. l.], v. 74, n. 2, p. 191–202, 2004.

DRUSCHKE, P. A. *et al.* Stromatolites in the Late Ordovician Eureka Quartzite: implications for microbial growth and preservation in siliciclastic settings.

**Sedimentology**, [s. l.], v. 56, n. 5, p. 1275–1291, 2009. Disponível em:

<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-3091.2008.01033.x>.

DUPRAZ, C. *et al.* Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats.

**Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 96, n. 3, p. 141–162, 2009. Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825208001190>.

FELDMANN, M.; MCKENZIE, J. A. Stromatolite-Thrombolite Associations in a Modern Environment, Lee Stocking Island, Bahamas. **PALAIOS**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 201, 1998. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/palaios/article/13/2/201-212/244449>.

FERRONATTO, J. P. F. *et al.* Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in a mesoproterozoic storm-dominated ramp: Depositional processes and stromatolite development. **Precambrian Research**, [s. l.], v. 361, n. September 2020, p. 106240, 2021. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301926821001686>.

FRANTZ, C. M.; PETRYSHYN, V. A.; CORSETTI, F. A. Grain trapping by filamentous cyanobacterial and algal mats: Implications for stromatolite microfabrics through time. **Geobiology**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 409–423, 2015.

HARWOOD, G. Sandstone stromatolites-An example of algal-trapping of sand grains from the Permian Yates Formation, New Mexico, USA. *In*: NOTTINGHAM, ENGLAND: 13TH INTERNATIONAL SEDIMENTOLOGICAL CONGRESS. [S. l.]: England Abstracts of Posters, 1990.

HOFMANN, H. J. Stromatolites: Characteristics and utility. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 339–373, 1973. Disponível em:

[http://www.crossref.org/deleted\\_DOI.html](http://www.crossref.org/deleted_DOI.html).

HUTTON, A. FLUORESCENCE MICROSCOPY IN OIL SHALE AND COAL STUDIES Department of Geology Wollongong NSW 2500 Australia Fluorescence of Vitrinite Macerals. **Microscopy**, [s. l.], p. 107–116, 1991.

JAMES, N. P.; DALRYMPLE, R. W. **Facies models 4**. St. John's, Nfld.: Geological Association of Canada, 2010.

KNOLL, A. H.; SEMIKHATOV, M. A. The Genesis and Time Distribution of Two Distinctive Proterozoic Stromatolite Microstructures. **PALAIOS**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 408, 1998. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/palaios/article/13/5/408->

422/321261.

KOCUREK, G.; FIELDER, G. Adhesion Structures. **SEPM Journal of Sedimentary Research**, [s. l.], v. Vol. 52, n. 4, 1982. Disponível em:

<https://pubs.geoscienceworld.org/jsedres/article/52/4/1229-1241/113603>.

LOGAN, B. W. Cryptozoon and Associate Stromatolites from the Recent, Shark Bay, Western Australia. **The Journal of Geology**, [s. l.], v. 69, n. 5, p. 517–533, 1961.

Disponível em: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/10.1086/626769>.

MARCINOWSKI, R.; SZULCZEWSKI, M. Condensed Cretaceous sequence with stromatolites in the Polish Jura Chain. **Acta Geologica Polonica**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 515–540, 1972. Disponível em:

<https://geojournals.pgi.gov.pl/agp/article/view/9898/8431>.

MARTIN, J. M.; BRAGA, J. C.; RIDING, R. Siliciclastic stromatolites and thrombolites, late Miocene, S.E. Spain. **Journal of Sedimentary Research**, [s. l.], v. 63, n. 1, p. 131–139, 1993. Disponível em: <https://doi.org/10.1306/D4267AAA-2B26-11D7-8648000102C1865D>.

MILANI, E. J. *et al.* Sequences and stratigraphic hierarchy of the Parana Basin (Ordovician Cretaceous), Southern Brazil. **Boletim IG-USP Serie Cientifica**, [s. l.], v. 29, 1998. Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20183601>. Acesso em: 12 fev. 2022.

NOFFKE, N. *et al.* Microbially Induced Sedimentary Structures Recording an Ancient Ecosystem in the ca. 3.48 Billion-Year-Old Dresser Formation, Pilbara, Western Australia. **Astrobiology**, [s. l.], v. 13, n. 12, p. 1103–1124, 2013. Disponível em: <http://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ast.2013.1030>.

NOFFKE, N.; AWRAMIK, S. M. Stromatolites and MISS-Differences between relatives. **GSA Today**, [s. l.], v. 23, n. 9, p. 4–9, 2013.

NOFFKE, N.; HAZEN, R.; NHIEKO, N. Earth's earliest microbial mats in a siliciclastic marine environment (2.9 Ga Mozaan Group, South Africa). **Geology**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 673–676, 2003.

NUTMAN, A. P. *et al.* Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures. **Nature**, [s. l.], v. 537, n. 7621, p. 535–538, 2016.

Disponível em: <http://www.nature.com/articles/nature19355>.

REID, R. P. *et al.* The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites. **Nature**, [s. l.], v. 406, n. 6799, p. 989–992, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/35023158>.

RIDING, R. Abiogenic, microbial and hybrid authigenic carbonate crusts: components of Precambrian stromatolites. **Geologia Croatica**, [s. l.], v. 61, n. 2–3, p. 73–103, 2008.

RIDING, R. Calcified Cyanobacteria. *In*: RIDING, R. (org.). **Calcareous Algae and Stromatolites**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. p. 55–87. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-52335-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-52335-9_3).

RIDING, R. Classification of Microbial Carbonates. *In*: CALCAREOUS ALGAE AND STROMATOLITES. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991. p. 21–51. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-52335-9\\_2](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-52335-9_2). Acesso em: 13 out. 2019.

RIDING, R. Microbialites, stromatolites, and thrombolites. **Encyclopedia of Earth Sciences Series**, [s. l.], n. 9781402092114, p. 635–654, 2011.

RIDING, R. The Nature of Stromatolites: 3,500 Million Years of History and a Century of Research. *In*: LECTURE NOTES IN EARTH SCIENCES. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. v. 131, p. 29–74. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-10415-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10415-2_3).

RIDING, R.; TOMAS, S. Stromatolite reef crusts, Early Cretaceous, Spain: bacterial origin of in situ-precipitated peloid microspar?. **Sedimentology**, [s. l.], v. 53, n. 1, p. 23–34, 2006. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-3091.2005.00751.x>.

SALLUN FILHO, W.; FAIRCHILD, T. R. Estudo comparativo entre estromatólitos do tipo Conophyton das faixas Ribeira e Brasília. **Revista do Instituto Geológico**, [s. l.], v. 26, n. 1–2, p. 1–18, 2005. Disponível em: <http://www.gnresearch.org/doi/10.5935/0100-929X.20050001>.

SCHERER, C. M. dos S. *et al.* Estratigrafia da sucessão sedimentar mesozoica da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul. *In*: CONTRIBUIÇÕES À GEOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA. [S. l.]: Compasso Lugar-Cultura, 2021. p. 289–304. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/221976>.

SCHERER, C. M. S.; LAVINA, E. L. C. Sedimentary cycles and facies architecture of aeolian-fluvial strata of the Upper Jurassic Guar Formation, southern Brazil.

**Sedimentology**, [s. l.], v. 52, n. 6, p. 1323–1341, 2005.

SCHERER, C. M. S.; LAVINA, E. L. C. Stratigraphic evolution of a fluvial-eolian succession: The example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guar and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil. **Gondwana Research**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 475–484, 2006.

SCHIEBER, J. *et al.* **Atlas of Microbial Mat Features Preserved within the Siliciclastic Rock Record**. [S. l.]: Elsevier Science, 2007. (ISSN). Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=o6PUup2117cC>.

SCHIEBER, J. Possible indicators of microbial mat deposits in shales and sandstones: examples from the Mid-Proterozoic Belt Supergroup, Montana, U.S.A. **Sedimentary Geology**, [s. l.], v. 120, n. 1–4, p. 105–124, 1998. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0037073898000293>.

SCHWARZ, H.-U.; EINSELE, G.; HERM, D. Quartz-sandy, grazing-contoured stromatolites from coastal embayments of Mauritania, West Africa. **Sedimentology**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 539–561, 1975. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-3091.1975.tb00245.x>.

SHAW, P. A.; COOKE, H. J.; PERRY, C. C. Microbialitic silcretes in highly alkaline environments: some observations from Sua Pan, Botswana. **South African Journal of Geology**, [s. l.], v. 93, n. 5–6, p. 803–808, 1990.

SOUDRY, D.; WEISSBROD, T. Morphogenesis and facies relationships of thrombolites and siliciclastic stromatolites in a Cambrian tidal sequence (Elat area, southern Israel). **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, [s. l.], v. 114, n. 2–4, p. 339–355, 1995. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0031018294000870>.

SPEARS, B. M. *et al.* Microalgal sediment biostabilisation along a salinity gradient in the Eden Estuary, Scotland: unravelling a paradox. **Marine and Freshwater Research**, [s. l.], v. 59, n. 4, p. 313, 2008. Disponível em: <http://www.publish.csiro.au/?paper=MF07164>.

SUAREZ-GONZALEZ, P. *et al.* ‘Trapping and binding’: A review of the factors controlling the development of fossil agglutinated microbialites and their distribution in space and time. **Earth-Science Reviews**, [s. l.], v. 194, n. May, p. 182–215, 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012825218307293>.

TOSTI, F.; RIDING, R. Fine-grained agglutinated elongate columnar stromatolites: Tieling Formation, ca 1420 Ma, North China. **Sedimentology**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 871–902, 2017.

ULMER-SCHOLLE, D. S. *et al.* **A Color Guide to the Petrography of Sandstones, Siltstones, Shales and Associated Rocks**. [S. l.]: American Association of Petroleum Geologists, 2015. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/books/book/1526/>.

## 8. ARTIGO CIENTÍFICO

## 8.1 Comprovante de Submissão

G51999

<https://geology.msubmit.net/cgi-bin/main.plex?el=A2Nb3MMx4A7...>




[Manuscript Home](#)   [Author Instructions](#)   [Reviewer Instructions](#)   [Contact](#)   [Journal home](#)   [Logout](#)

<b>Manuscript #</b>	G51999
<b>Current Revision #</b>	0
<b>Submission Started Date</b>	12-20-2023 01:14
<b>Author Approved Date</b>	12-20-2023 16:19
<u>Current Stage</u>	In Review (can take 1-4 months)
<b>Title</b>	Desertic siliciclastic stromatolites of Guará Formation, Paraná Basin, Southern Brazil: trapping and binding in a non-marine setting
<b>Running Title</b>	Desertic siliciclastic stromatolites of Guará Formation: trapping and binding in a non-marine setting
<b>Manuscript Type</b>	Article
<b>Themed Issue</b>	N/A
<b>Corresponding Author</b>	Mr. Bruno Silverston Angonese (UFRGS)
<b>Contributing Authors</b>	Dr. Claiton Marlon dos Santos Scherer , Luiz F. De Ros , Mr. Rossano Dalla Lana Michel , João Pedro Formolo Ferronato , Gabriel Schaffer Sipp
<b>Abstract</b>	The Guará Formation, Middle Jurassic of Paraná Basin, hosts unique siliciclastic stromatolites formed in a desertic continental environment. These microbialites were deposited in wet sand sheet deposits in an active erg, that received periodical fluvial incursion. The structural layering of the domes results from trapping and binding by microbial mats and in-situ precipitation of silica, facilitated by the decomposition of organic matter in the mat. The microbial mat is partially preserved in spherical inclusions embedded in chert, with coccoid fossils revealed by UV light. These siliciclastic stromatolites were formed due to environmental factors that enhanced trapping and binding, recording a unique type of ecosystem.
<b>Keywords</b>	microbialite, MISS, trapping and binding, silcrete, siliciclastic stromatolite
<b>Classifications</b>	Geomicrobiology, Stratigraphy, Sedimentary Geology - Siliciclastics
<b>Conflict of Interest</b>	<b>No</b> , there is not a duality of interest
<b>Ethical Guidelines</b>	Agree
<b>Previously Submitted</b>	Has this manuscript been submitted previously to this journal? No, the manuscript does not include previously submitted material(s).
<b>Author Participation and Approval</b>	Have all authors of this paper directly participated in the planning, execution, or analysis of the study? Have all authors of this paper read and approved the final, submitted version? Yes
<b>GSA Reference Style</b>	Yes
<b>Location Information</b>	Has the location information (in decimal degrees, with sufficient precision that readers could reasonably be expected to find the localities where appropriate) been provided for all locations from which data are reported? : Yes
<b>Supplemental Information</b>	Does your submission contain Supplemental Information file(s)? If your paper is accepted for publication, your supplemental material will be published on <a href="#">Figshare</a> under a Creative Commons License.: No
<b>Contributing Author Agreement</b>	Do all Contributing Authors know of and concur with the submission of this manuscript?: Yes
<b>Region of Origin</b>	Brazil

**Manuscript Items**

1. Cover Letter (last updated: 12/20/2023 16:07:45) [PDF \(175KB\)](#)   [Source File \(DOCX\) 18KB](#)
2. Merged File containing manuscript text and 4 Figure files. (last updated: 12/21/2023 17:11:26) [PDF \(126.19KB\)](#)   [Small PDF \(30182KB\)](#)
  - a. Article File (last updated: 12/20/2023 16:07:49) [PDF \(158KB\)](#)   [Source File \(DOCX\) 26KB](#)
  - b. [Original](#) Figure 1 (last updated: 12/20/2023 16:07:45) [PDF \(761KB\)](#)   [Source File \(JPG\) 759KB](#)
  - c. Figure 2 (last updated: 12/20/2023 16:07:45) [PDF \(74442KB\)](#)   [Source File \(PNG\) 58334KB](#)
  - d. Figure 3 (last updated: 12/20/2023 16:07:45) [PDF \(97886KB\)](#)   [Source File \(PNG\) 77134KB](#)
  - e. Figure 4 (last updated: 12/20/2023 16:07:46) [PDF \(68950KB\)](#)   [Source File \(PNG\) 57657KB](#)

## 8.2 Artigo Submetido em inteiro teor

Desertic siliciclastic stromatolites of Guar Formation, Paraná Basin, Southern Brazil: trapping and binding in a non-marine setting

Bruno S. Angonese<sup>1</sup>, Claiton M. S. Scherer<sup>1</sup>, Luiz F. De Ros<sup>1</sup>, Rossano D. L. Michel<sup>1</sup>, João P. F. Ferronato<sup>2</sup> and Gabriel S. Sipp<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), Geosciences Institute, Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil. brunoangonese@hotmail.com

<sup>2</sup>Environment Institute, (IMA-SC), Florianopolis, Santa Catarina, Brazil.

### ABSTRACT

The Guar Formation, Middle Jurassic of Paraná Basin, hosts unique siliciclastic stromatolites formed in a desertic continental environment. These microbialites were deposited in wet sand sheet deposits in an active erg, that received periodical fluvial incursion. The structural layering of the domes results from trapping and binding by microbial mats and in-situ precipitation of silica, facilitated by the decomposition of organic matter in the mat. The microbial mat is partially preserved in spherical inclusions embedded in chert, with coccoid fossils revealed by UV light. These siliciclastic stromatolites were formed due to environmental factors that enhanced trapping and binding, recording a unique type of ecosystem.

### INTRODUCTION

Siliciclastic stromatolites are an elusive topic in microbialite study and discussion. Unlike the famous modern marine stromatolites that occur in Bahamas and Shark Bay, (Black, 1932; Logan, 1961, respectively) which are composed mostly of carbonate particles, siliciclastic stromatolites are the result of trapping and binding of terrigenous sediments. Their genetic processes of formation are similar to their carbonate counterparts, but still there are difficulty in their classification as stromatolites due to their processes of genesis and preservation, which overlap with microbially induced sedimentary structures (MISS) (Noffke and Awramik, 2013).

Siliciclastic stromatolites are defined by Martin et al. (1993): siliciclastic-carbonate stromatolites contain between 10 and 50% total volume of siliciclastic grains; and sandstone stromatolites contain more than 50% total volume of siliciclastic grains. All specimens found in Guar Formation have > 50% grains by volume. In the text, though, the term sandstone stromatolite is not used because "siliciclastic" entails the relation to the process of trapping and binding of detrital grains, which is intrinsic to the formation of siliciclastic stromatolites and is therefore preferred.

The mechanism of trapping and binding has recently been the focus of an extensive review (Suarez-Gonzalez et al., 2019) which compiled the data of all published specimens of carbonate agglutinated stromatolites. Agglutinated stromatolite refers to stromatolites which accrete mainly by trapping and binding of sediment (Hofmann, 1973; Burne and Moore, 1987; Riding, 1991, 2011). These specimens were found to be quite rare in the geological record, the Neogene and Quaternary containing the majority of published specimens, also noted by Riding (2011).

Furthermore, all published occurrences mentioned in the review were formed in marine or marine influenced settings, this fact being attributed to the confluence of four environmental factors that are more easily found in marine settings: availability of grains; common agitation by waves (carrying grains to the microbial mat); electrolytes in water enhancing EPS adhesion (preventing grains from being removed from the microbial mat); and low carbonate concentration in water hindering early precipitation in EPS (and thus preserving sticky EPS that traps grains) (Suarez-Gonzalez et al., 2019).

This environmental constraint was also found in all the published works describing siliciclastic stromatolites (Davis, 1968; Marcinowski and Szulczewski, 1972; Schwarz, Einsele and Herm, 1975; Harwood, 1990; Bertrand-Sarfati, 1994; Soudry and Weissbrod, 1995; Schieber, 1998; Braga and Martín, 2000; Draganits and Noffke, 2004; Druschke et al., 2009; Ferronato et al., 2021), reinforcing that the process of trapping and binding is not dependent on grain composition, but on environmental factors that can occur in either carbonatic, siliciclastic or mixed depositional systems.

That brings us to the subject of this study: the siliciclastic stromatolites of Guará Formation. It differs from all published specimens of both carbonate and siliciclastic agglutinated stromatolites for not being deposited in a marine influenced environment; these siliciclastic stromatolites were deposited in a strict continental setting, with special environmental conditions that enabled their development. The goal of this study is to provide the evidences of microbial origin for these structures and discuss the conditions of the environment which allowed agglutinated stromatolites to exist in a continental setting.

## GEOLOGICAL CONTEXT

Covering an area of 1,400,000 km<sup>2</sup>, the Paraná Basin (Fig 1A) is an intracratonic basin located partly in Argentina, Brazil, Paraguay, Uruguay and in lesser extent, the correlate Huab Basin in Namibia (Milani et al., 1998). The basin contains the subsidence and sedimentation record from the Ordovician to the Cretaceous. The Guará Formation is a distinct depositional sequence in the Paraná Basin, dating from the Upper Jurassic (Scherer and Lavina, 2005). In Brazil, the Guará Formation ranges from 12 to 110 m thick, with outcrops appearing in the Rio Grande do Sul and Paraná states. It unconformably overlies the Sanga do Cabral Formation in the Rio Grande do Sul state and Pirambóia Formation in the Paraná state, and is unconformably overlain by the Botucatu Formation in both states (Scherer et al., 2021). In Uruguay, the Batovi Member of the Tacuarembó Formation, which is up to 200 m thick, is stratigraphically equivalent to the Guará Formation.

In the Rio Grande do Sul state, the Guará Formation exhibits a lateral variation of facies associations. In the northern portion, near the cities of Jaguari and São Francisco de Assis, medium to coarse sandstones occur, which were deposited by braided fluvial systems. In the southern portion, around the cities of Rosário do Sul and Santana do Livramento (study area, Fig. 1B) fine to medium sandstones instead occur, deposited by intercalated fluvial channels, aeolian dunes and sand sheets, defining wetting upward cycles (Scherer and Lavina, 2006).

## FACIES ANALYSIS

In this study, 14 stratigraphic logs of Guar Formation were described in two outcrops (Fig. 1B) about 30 km southwest of the city of Rosário do Sul. These two outcrops, 2 km distant from one another, are stratigraphically correlate, occurring at the same elevation, traceable through the silicified layer that caps off the sections. The sections are in average 10 m thick, cropping out in the steeper portions of isolated rounded hills.

They contained aeolian and fluvial facies (Fig. 2A), which were differentiated by inverse and normal gradation respectively, and also by the presence of coarse sand and granules in the fluvial deposits. The aeolian facies consist of fine to medium-grained, tangential cross stratified sandstones and low angle cross stratified sandstones (Fig. 2E), composed mainly of detrital quartz sand and rare K-feldspar and smectite. The fluvial facies consist of fine to medium-grained, amalgamated sets of tangential cross stratified sandstones (Fig. 2D) and massive sandstones (Fig. 2C), composed mainly of detrital quartz sand and rare chert granules, K-feldspar and smectite.

In addition to these physical deposition facies, there are microbial facies, which consist of laterally linked domes (Fig. 3A, D, E) composed by alternating detrital and in-situ precipitated layers (Fig. 4A). These domes gradually accrete upward from centimeter wide wavy lamination (Fig. 3B) of the aeolian sand sheet deposits (Fig. 2B), building to decimeter wide undulated layers that reach up to 0.7 m thick and 1.5 m wide at the top of the studied sections.

The detrital laminae are composed mainly of fine to medium-grained quartz (> up to 97% total volume), and in lesser extent by K-feldspar (up to 3%) and smectite (up to 0.2%). These layers have ample preserved porosity (Fig. 4A), enhanced by the general dissolution of K-feldspar and clay minerals. In the base of some of these detrital layers, millimeter-wide dark-wavy laminae occur.

The precipitated layers, on the other hand, are composed almost entirely by chert, which possesses mainly a laminated texture evidenced by the changing amount and size of inclusions in individual layers. It can also appear in a nodular, bulging texture which can alter and disrupt lamination in the detrital layers (Fig. 4A). It is, in some cases, fractured perpendicular to the lamination, from the top.

## MICROBIAL EVIDENCES

In previous works (Scherer and Lavina, 2005, 2006), Guar Formation structures like wrinkled and undulated lamination were interpreted as product of physical adhesion in wet substrate (Kocurek and Fielder, 1982), but the stromatolite domes found at the outcrops described are incompatible in size with the structures generated by purely physical adhesion, and possess structural, textural and fossil evidences of microbial origin that are detailed below.

The structural evidence of microbial origin consists of the interlayering of detrital sediment with in-situ precipitation, typically generated by the process of trapping and binding (Reid et al., 2000); and the resulting dome shapes that have steep flanks, evidence for the microbial stabilization of the substrate. The process of trapping and binding inherently consists of two successive stages (Burne and Moore, 1987): trapping, when sediment brought to the microbial mat is trapped by the EPS and the microbial filaments, burying the microbial mat; and binding, when the colony, through

positive phototactic response (i.e. moving towards the light), rises to the top of the sediment and binds it to the microbial edifice. In this period of non-deposition, the microbial mat fully develops, and via the degradation of organic matter (also metabolic processes, in the case of carbonate precipitation), creates conditions favorable for in-situ precipitation of silica (Butts, 2014).

The millimeter-wide, dark-wavy laminae (Fig. 4B) present in the base of the detrital are textural evidence of the organic matter once present (Noffke et al., 2013), which accumulated directly beneath the mat surface as living microbes rose to the top. When the developed microbial mat is buried in a depositional event, there's an accumulation of organic matter that generates the brownish, undulated layers. The original organic material is not well-preserved, due to the silica precipitation that occurs in the organic-rich layers. Some small amount of organic material is incorporated on the chert layers as inclusions.

The fossil microbial evidence occurs in the chert-embedded inclusions (Fig 4C, D, E). Through transmitted light microscopy, it is possible to see dark material trapped in spheroidal inclusions, which fluoresces green when exposed to ultraviolet light. They are interpreted to be coccoid cells from the original microbial mat.

## DEPOSITIONAL ENVIRONMENT

As above mentioned, there are three main facies on the sections studied: fluvial, aeolian and microbial. In the base of the outcrops, predominantly aeolian facies occur. These aeolian deposits are repeatedly overlain by fluvial sets. In the sand sheet deposits, some small, up to 20 cm wide, non-silicified domes appear. In one specific layer, near the top of the outcrops, the large silicified domes gradually accrete, reaching their maximum development and dimensions, eventually being overlain once more by fluvial deposits and then by aeolian dune deposits.

This stratigraphical data shows that the depositional environment for these is entirely continental, consisting of an active erg, with partly wet conditions that received periodic fluvial incursion microbial deposition. But the silicification processes found in these outcrops add more to our understanding of this environment. A modern example, the Sua Salt Pan, in Botswana, has microbial silcrete deposits that share characteristics with the silicified domes found in the Guar Formation (Shaw, Cooke and Perry, 1990).

In the Sua Pan, two different types of microbial silcrete are found: chert, which is chemically precipitated from the water, with the organic matter serving as nucleation sites for silica crystals (Butts, 2014); i.e. biologically-influenced mineralization, *sensu* Dupraz et al. (2009)); and grain-supported, which are formed by trapping and binding of quartz and carbonate grains in the microbial mats, which are later cemented by silica. Those two silcretes, compositionally and texturally, are similar to the two types of layers (detrital and precipitated) of the Guar Formation stromatolites.

The difference between the Sua Pan silcretes and the Guar Formation stromatolites is the microbial accretion. In the Sua Pan, the silcrete occurs as thin layers at the top portion of the pan's substrate (Shaw, Cooke and Perry, 1990). This contrasts with the large domes that are described in this study. Going back to the environmental controls to the process of trapping and binding (Suarez-Gonzalez et al., 2019), it is clear that the Sua Pan does not possess ample sediment supply, with dominance of

aeolian deflation in the surrounding area and relative low energy in the pond to supply sediment to the microbial mats. Also, the early precipitation of sodium carbonate in the microbial mats may lower their capacity for trapping and binding.

The facies analysis of Guará Formation points to a different interpretation of depositional environment. The facies found show an active erg with ample sediment supply, delivered by both aeolian and fluvial processes. The water, necessary for the life of the microbial colony, had, for a period, a high content of dissolved silica, evident by the ample in-situ precipitation. There's also no evidence of early carbonate precipitation that could lower mat adhesion. This may suggest a more acidic water, in comparison to the alkaline waters of Sua Pan that favor carbonate precipitation, but could also only reflect the instability of early carbonate minerals in such a silica-rich environment.

The desertic siliciclastic stromatolites of Guará Formation are product of a delicate balance of environmental factors that facilitated the rare process of trapping and binding, resulting in unique specimens of non-marine agglutinated stromatolites. This opens new possibilities for identification of life in previously unheard depositional environments, be it in Earth or Mars.

#### ACKNOWLEDGMENTS

Thanks to ANP - PRH-ANP, which supported this study with resources from oil companies considering the contract clause nº 50/2015 of R, Del of the ANP.

#### REFERENCES

- Bertrand-Sarfati, J. (1994) 'Siliciclastic-Carbonate Stromatolite Domes, in the Early Carboniferous of The Ajers Basin (Eastern Sahara, Algeria)', *Phanerozoic Stromatolites II*, pp. 395–419. doi: 10.1007/978-94-011-1124-9\_15.
- Black, M. (1932) 'The algal sediments of Andros Island, Bahamas', *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Containing Papers of a Biological Character*, 222(483–493), pp. 165–192. doi: 10.1098/rstb.1932.0015.
- Braga, J. C. and Martín, J. M. (2000) 'Subaqueous Siliciclastic Stromatolites: A Case History from Late Miocene Beach Deposits in the Sorbas Basin of SE Spain', in *Microbial Sediments*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 226–232. doi: 10.1007/978-3-662-04036-2\_25.
- Burne, R. V. and Moore, L. S. (1987) 'Microbialites: Organosedimentary Deposits of Benthic Microbial Communities', *PALAIOS*, 2(3), p. 241. doi: 10.2307/3514674.
- Butts, S. H. (2014) 'Silicification', *The Paleontological Society Papers*, 20, pp. 15–34. doi: 10.1017/S1089332600002783.
- Davis, R. A. (1968) 'Algal stromatolites composed of quartz sandstone', *Journal of Sedimentary Research*, 38(3), pp. 953–955. doi: 10.1306/74d71ac8-2b21-11d7-8648000102c1865d.
- Draganits, E. and Noffke, N. (2004) 'Siliciclastic Stromatolites and Other Microbially Induced Sedimentary Structures in an Early Devonian Barrier-Island Environment (Muth Formation, NW Himalayas)', *Journal of Sedimentary Research*, 74(2), pp. 191–202. doi: 10.1306/091903740191.

Druschke, P. A. et al. (2009) 'Stromatolites in the Late Ordovician Eureka Quartzite: implications for microbial growth and preservation in siliciclastic settings', *Sedimentology*, 56(5), pp. 1275–1291. doi: 10.1111/j.1365-3091.2008.01033.x.

Dupraz, C. et al. (2009) 'Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats', *Earth-Science Reviews*, 96(3), pp. 141–162. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.10.005.

Ferronato, J. P. F. et al. (2021) 'Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in a mesoproterozoic storm-dominated ramp: Depositional processes and stromatolite development', *Precambrian Research*, 361(September 2020), p. 106240. doi: 10.1016/j.precamres.2021.106240.

Harwood, G. (1990) 'Sandstone stromatolites-An example of algal-trapping of sand grains from the Permian Yates Formation, New Mexico, USA', in Nottingham, England: 13th International Sedimentological Congress. England Abstracts of Posters.

Hofmann, H. J. (1973) 'Stromatolites: Characteristics and utility', *Earth-Science Reviews*, 9(4), pp. 339–373. doi: 10.1016/0012-8252(73)90002-0.

Kocurek, G. and Fielder, G. (1982) 'Adhesion Structures', *SEPM Journal of Sedimentary Research*, Vol. 52(4). doi: 10.1306/212F8102-2B24-11D7-8648000102C1865D.

Logan, B. W. (1961) 'Cryptozoon and Associate Stromatolites from the Recent, Shark Bay, Western Australia', *The Journal of Geology*, 69(5), pp. 517–533. doi: 10.1086/626769.

Marcinowski, R. and Szulczewski, M. (1972) 'Condensed Cretaceous sequence with stromatolites in the Polish Jura Chain', *Acta Geologica Polonica*, 22(3), pp. 515–540. Available at: <https://geojournals.pgi.gov.pl/agp/article/view/9898/8431>.

Martin, J. M., Braga, J. C. and Riding, R. (1993) 'Siliciclastic stromatolites and thrombolites, late Miocene, S.E. Spain', *Journal of Sedimentary Research*, 63(1), pp. 131–139. doi: 10.1306/D4267AAA-2B26-11D7-8648000102C1865D.

Milani, E. J. et al. (1998) 'Sequences and stratigraphic hierarchy of the Parana Basin (Ordovician Cretaceous), Southern Brazil', *Boletim IG-USP Serie Cientifica*, 29. Available at: <https://www.osti.gov/etdweb/biblio/20183601> (Accessed: 12 February 2022).

Noffke, N. et al. (2013) 'Microbially Induced Sedimentary Structures Recording an Ancient Ecosystem in the ca. 3.48 Billion-Year-Old Dresser Formation, Pilbara, Western Australia', *Astrobiology*, 13(12), pp. 1103–1124. doi: 10.1089/ast.2013.1030.

Noffke, N. and Awramik, S. M. (2013) 'Stromatolites and MISS-Differences between relatives', *GSA Today*, 23(9), pp. 4–9. doi: 10.1130/GSATG187A.1.

Reid, R. P. et al. (2000) 'The role of microbes in accretion, lamination and early lithification of modern marine stromatolites', *Nature*, 406(6799), pp. 989–992. doi: 10.1038/35023158.

Riding, R. (1991) 'Classification of Microbial Carbonates', in *Calcareous Algae and Stromatolites*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 21–51. doi: 10.1007/978-3-642-52335-9\_2.

Riding, R. (2011) 'Microbialites, stromatolites, and thrombolites', *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, (9781402092114), pp. 635–654. doi: 10.1007/978-1-4020-9212-1\_196.

Scherer, C. M. dos S. et al. (2021) 'Estratigrafia da sucessão sedimentar mesozoica da Bacia do Paraná no Rio Grande do Sul', in *Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Compasso Lugar-Cultura, pp. 289–304. doi: 10.29327/537860.1-17.

Scherer, C. M. S. and Lavina, E. L. C. (2005) 'Sedimentary cycles and facies architecture of aeolian-fluvial strata of the Upper Jurassic Guarú Formation, southern Brazil', *Sedimentology*, 52(6), pp. 1323–1341. doi: 10.1111/j.1365-3091.2005.00746.x.

Scherer, C. M. S. and Lavina, E. L. C. (2006) 'Stratigraphic evolution of a fluvial-aeolian succession: The example of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous Guarú and Botucatu formations, Paraná Basin, Southernmost Brazil', *Gondwana Research*, 9(4), pp. 475–484. doi: 10.1016/j.gr.2005.12.002.

Schieber, J. (1998) 'Possible indicators of microbial mat deposits in shales and sandstones: examples from the Mid-Proterozoic Belt Supergroup, Montana, U.S.A.', *Sedimentary Geology*, 120(1–4), pp. 105–124. doi: 10.1016/S0037-0738(98)00029-3.

Schwarz, H.-U., Einsele, G. and Herm, D. (1975) 'Quartz-sandy, grazing-contoured stromatolites from coastal embayments of Mauritania, West Africa', *Sedimentology*, 22(4), pp. 539–561. doi: 10.1111/j.1365-3091.1975.tb00245.x.

Shaw, P. A., Cooke, H. J. and Perry, C. C. (1990) 'Microbialitic silcretes in highly alkaline environments: some observations from Sua Pan, Botswana', *South African Journal of Geology*, 93(5–6), pp. 803–808.

Soudry, D. and Weissbrod, T. (1995) 'Morphogenesis and facies relationships of thrombolites and siliciclastic stromatolites in a Cambrian tidal sequence (Elat area, southern Israel)', *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 114(2–4), pp. 339–355. doi: 10.1016/0031-0182(94)00087-O.

Suarez-Gonzalez, P. et al. (2019) "'Trapping and binding": A review of the factors controlling the development of fossil agglutinated microbialites and their distribution in space and time', *Earth-Science Reviews*, 194(May), pp. 182–215. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.05.007.

FIGURE CAPTIONS

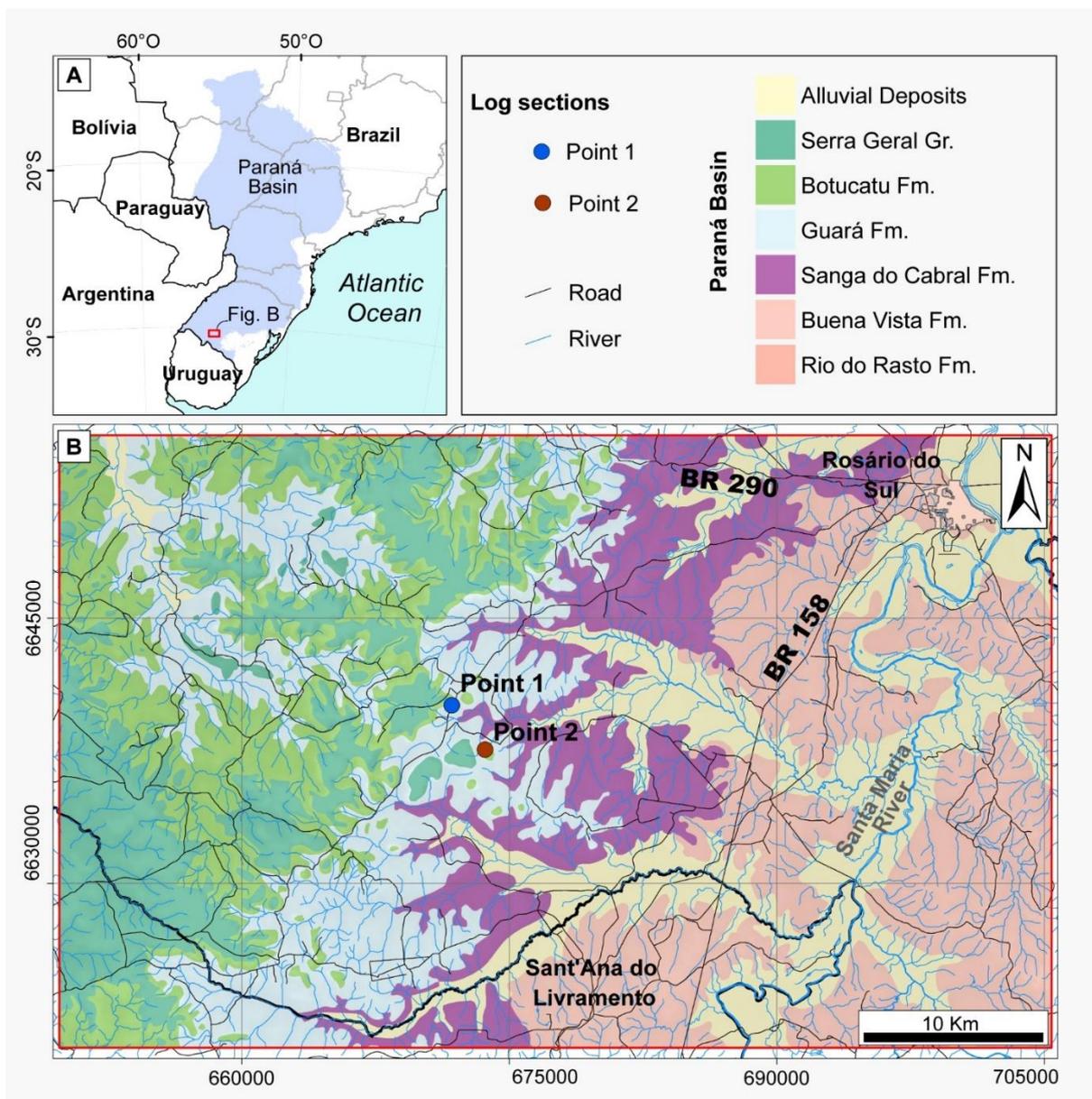


Figure 1. Location map of studied area; a) Paraná Basin extension in Brazil, b) Geological Map of Paraná Basin units, showing the location of the studied outcrops. Datum WGS 84, UTM Zone 21S.

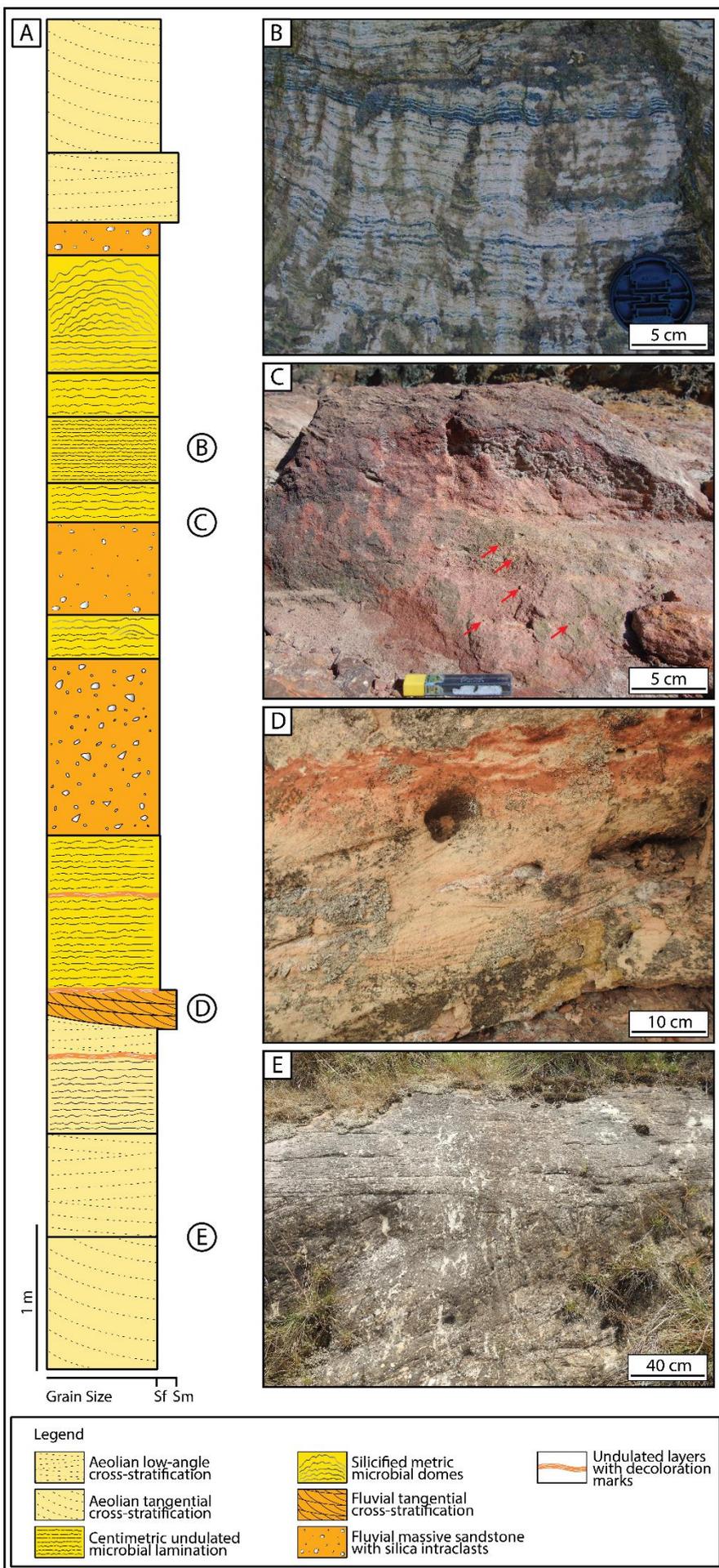


Figure 2. Facies found at the outcrops studied. A) Composite stratigraphic log of the outcrops studied; b) Fine laminated microbial sand sheet deposits; c) Fluvial massive sandstone. The arrows point to silica granules; d) Fluvial tangential cross-stratified sandstone; e) Low-angle cross-stratified sandstone.

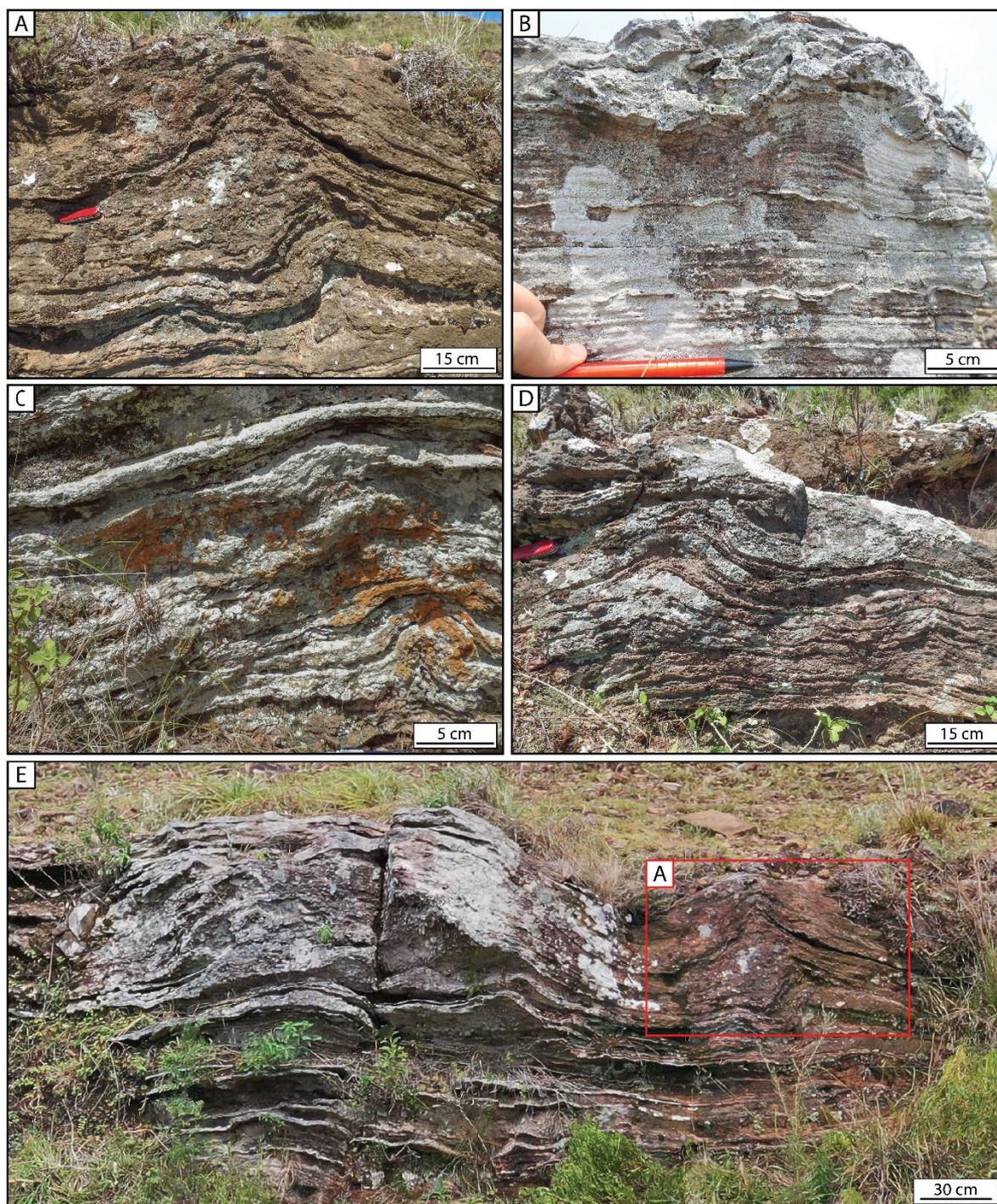


Figure 3. Siliciclastic domic stromatolites. A) Conical dome with abundant nodular silica within its structure; b) Domes gradually forming from horizontally laminated sandstone; c) Dome starts with steep sides that gradually get more horizontal; d) Assymmetric laterally-linked domes; e) Large silicified laterally linked domes.

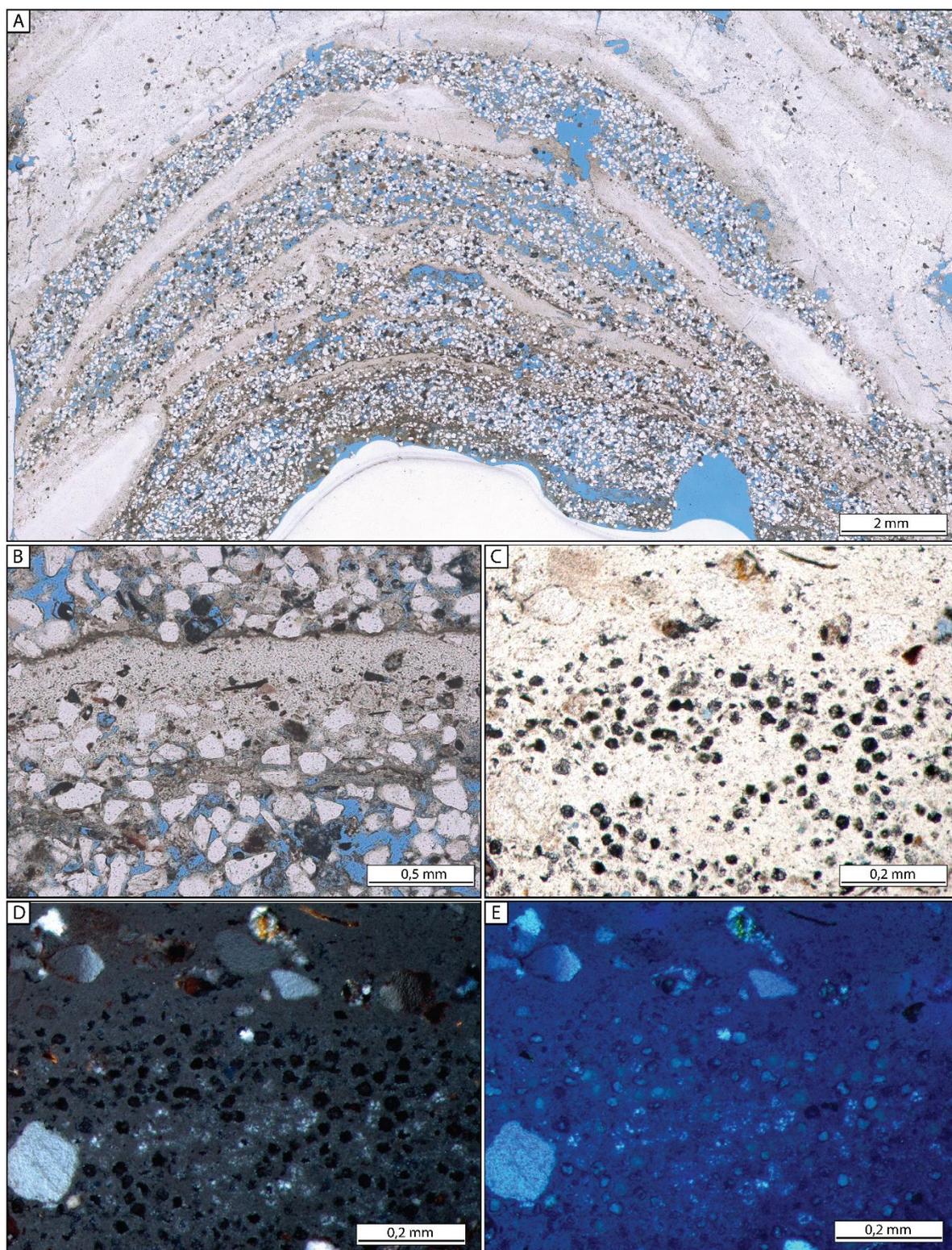


Figure 4. Microscopical features of the stromatolites. A) Centimeter-wide silicified dome, composed by detrital and precipitated silica laminae; b) Dark-wavy laminae on the detrital-precipitated interface; c) Organic matter preserved within chert layers, PP; d) Organic matter preserved within chert layers, XP; e) Organic matter fluoresces when exposed to UV light, revealing ghosts of former coccoid cells.

<b>ANEXO I</b>
Título da Dissertação:
<b>“ESTROMATÓLITOS DESÉRTICOS SILICICLÁSTICOS DA FORMAÇÃO GUARÁ, JURÁSSICO SUPERIOR DA BACIA DO PARANÁ: TRAPEAMENTO E AGLUTINAÇÃO EM UM CONTEXTO NÃO-MARINHO”</b>
Área de Concentração: Estratigrafia
Autor: <b>BRUNO SILVERSTON ANGONESE</b>
Orientador: Prof. Dr. Claiton Marlon Dos Santos Scherer
Examinador: Prof. Dr. Adriano Domingos dos Reis
Data: 19/03/2024
Conceito: A
<b>PARECER:</b>
<p>A dissertação cumpre todos os requisitos para a atribuição do grau de Mestre ao candidato.</p> <p>O tema é inovador, relatando a ocorrência de estromatólitos que são peculiares nos aspectos composicionais, deposicionais e temporais. Apresenta um avanço científico que raramente é alcançado em um mestrado.</p> <p>A dissertação está apresentada de maneira adequada. Muito bem escrita em forma e conteúdo, demonstra uma habilidade de escrita concisa, mas bastante informativa. O contexto geológico exigiria um pouco mais de elaboração e referências importantes. O estado da arte, por outro lado, é uma peça educativa para quem conhece pouco do tema.</p> <p>A parte ilustrativa, embora não inadequada, poderia ter sido melhor trabalhada, especialmente nos resultados, com mais exemplos em fotografias e fotomicrografias, bem como modelos e figuras síntese. A figura de localização, repetida 3 vezes ao longo do volume, é sem dúvida o ponto mais baixo, demonstrando pressa e falta de cuidado com a parte ilustrativa.</p> <p>Entendo que os resultados acabaram melhor expostos na porção integradora em língua portuguesa do que na versão do manuscrito submetido à “Geology”. Embora compreenda a escolha dos autores por uma revista de alto impacto, a riqueza do texto integrador me faz querer ler este artigo em um artigo mais extenso, fugindo ao formato excessivamente resumido da “Geology”. Contudo, o apelo da descoberta certamente credencia o manuscrito para publicação na revista escolhida.</p> <p>Por fim, apenas como discussão, não concordo com a escolha de modelo deposicional. A Fm . Guará não se sustenta como um erg, e muito menos como um complexo e abrangente sistema desértico com as evidências apresentadas no trabalho. Menos ainda se vista na completude da bibliografia sobre esta unidade. Uma revisão bibliográfica mais abrangente necessariamente teria gerado uma discussão mais madura deste aspecto.</p> <p>Parabens Bruno e seu orientador pelo trabalho e agradeço pelo convite e consideração.</p>



Documento assinado digitalmente  
ADRIANO DOMINGOS DOS REIS  
Data: 19/03/2024 22:42:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura:

Data:

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

<b>ANEXO I</b>
Título da Dissertação:
<b>“ESTROMATÓLITOS DESÉRTICOS SILICICLÁSTICOS DA FORMAÇÃO GUARÁ, JURÁSSICO SUPERIOR DA BACIA DO PARANÁ: TRAPEAMENTO E AGLUTINAÇÃO EM UM CONTEXTO NÃO-MARINHO”</b>
Área de Concentração: Estratigrafia
Autor: <b>BRUNO SILVERSTON ANGONESE</b>
Orientador: Prof. Dr. Claiton Marlon Dos Santos Scherer
Examinadora: Profa. Dra. Amanda Goulart Rodrigues
Data: 21/03/2024
Conceito: B
<b>PARECER:</b>
<p>A dissertação cumpre plenamente os requisitos para dar ao candidato o título de mestre. O tema tem relevância científica e acrescenta importante contribuição no entendimento dos microbialitos de composição siliciclástica. Parabéns ao Bruno Angonese e seu orientador Prof. Claiton Scherer pela escolha e desenvolvimento desta interessante pesquisa. O texto integrador tem boa redação, apresentando poucos erros ortográficos e gramaticais. Em relação ao conteúdo, seguem algumas observações específicas abaixo:</p> <p>Resumo: Há uma contradição nas seguintes frases: “A estrutura laminada dos domos resulta de trapeamento e aglutinação de grãos siliciclásticos por esteiras microbiais e <i>PRECIPITAÇÃO IN-SITU DE SÍLICA MICROCRISTALINA</i>, facilitada pela decomposição de matéria orgânica nas esteiras microbiais”.</p> <p>Que contradiz: “Uma comparação com a salina Sua Pan, no Botswana, na qual ocorrem atualmente processos de silicificação em esteiras microbiais, mostra que o amplo suprimento sedimentar e <i>AUSÊNCIA DE CIMENTAÇÃO PRECOCE</i> é chave para a origem dos estromatólitos siliciclásticos da Formação Guará”. A precipitação <i>in situ</i> também pode vir a cimentar grãos, e, portanto, ser considerada, -neste caso, como uma cimentação precoce.</p> <p>Dada a importância da ocorrência, as figuras e legendas no artigo são pouco exploradas e muitas devem ser substituídas por imagens de detalhe para a melhor observação das feições apontadas.</p> <p><i>Abstract:</i> especificar quais são as condições/fatores ambientais que permitem a formação dos microbialitos e o porquê da sua excepcional preservação.</p> <p>Pág. 30 – Na frase: “Esses dois afloramentos, distantes 2 km um do outro, são estratigraficamente correlacionáveis, ocorrendo na mesma cota, rastreáveis através da camada silicificada que capeia os trechos”. Não é representada no perfil</p>

colunar a camada silicificada que foi utilizada na correlação dos pontos 1 e 2 e nem é explicada sua origem.

Não usar o termo granulação, pois se refere a cristais e não clastos. O termo correto é granulometria.

A esmectita presente nas amostras é detrítica ou diagenética? Como foi feita a caracterização dessas argilas sem análises de Difração de Raios X?

Pág. 34 – Na frase: “Por vezes, ocorrem lâminas onduladas escuras com milímetros de largura”. As lâminas escuras não estão descritas corretamente, pois não são especificados quais são os constituintes que as compõem.

Pág. 36 – Na frase: “As camadas precipitadas, por outro lado, são compostas quase inteiramente por chert, ou sílica microcristalina, que possui principalmente uma textura laminada evidenciada pela mudança na quantidade e tamanho das inclusões nas camadas individuais”. Qual a diferença entre chert e sílica microcristalina?

Pág. 36 – Na frase: “Neste período de não deposição, a esteira microbial desenvolve-se plenamente e, através da degradação da matéria orgânica (e processos metabólicos, no caso da precipitação de carbonatos), cria condições favoráveis para a precipitação in situ de sílica (Butts, 2014)”. Quais são as condições favoráveis? Os mecanismos responsáveis pela gênese da sílica (em termos de Ph, Eh, reações biomedidas, etc) não são discutidos no trabalho.

Pág. 38 - Na frase: “Voltando aos controles ambientais relacionados ao processo de captura e encadernação (Suarez-Gonzalez et al., 2019)”. Substituir encadernação por trapeamento.

Pág. 38 – Na frase: “Além disso, a precipitação precoce de carbonato de sódio nas esteiras microbiais pode diminuir a capacidade de trapeamento do EPS”. Você quis dizer carbonato de cálcio?

**Fig. 1** - Incluir a idade (ou o período) das unidades litoestratigráficas na legenda. Na legenda, incluir mais informações sobre as relações entre as unidades apresentadas no mapa.

**Fig. 2** – Algumas imagens devem ser substituídas, como a presente no item (C), pois não é possível ver os grânulos de sílica. Além disso, na legenda gráfica diz que são intraclastos de sílica e na legenda escrita diz que são grânulos de sílica. Não usar como sinônimos, pois cada um apresenta uma conotação genética distinta.

**Fig. 3** - Não é possível enxergar os nódulos de sílica na Figura 3A.

**Fig. 4** – Descreva o que compõem as lâminas onduladas escuras, seriam argilominerais e matéria orgânica? Sugere-se a inclusão de imagens com maior detalhe das cocoides, além de imagens eletrônicas de MEV, tanto no modo BSE quanto SE.



Documento assinado digitalmente  
AMANDA GOULART RODRIGUES  
Data: 21/03/2024 11:26:19-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura:

Data: 21/03/2024

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

<b>ANEXO I</b>
Título da Dissertação:
<b>“ESTROMATÓLITOS DESÉRTICOS SILICICLÁSTICOS DA FORMAÇÃO GUARÁ, JURÁSSICO SUPERIOR DA BACIA DO PARANÁ: TRAPEAMENTO E AGLUTINAÇÃO EM UM CONTEXTO NÃO-MARINHO”</b>
Área de Concentração: Estratigrafia
Autor: <b>BRUNO SILVERSTON ANGONESE</b>
Orientador: Prof. Dr. Claiton Marlon Dos Santos Scherer
Examinador: Prof. Dr. Ernesto Luiz Correa Lavina
Data: 20 de abril de 2024
Conceito: Excelente
PARECER:
<p>Trabalho sensacional! A dissertação do Bruno se insere de modo notável na concepção de paradigma/quebra de paradigma, de Thomas Khun. Os quebra-cabeças vão aparecendo e sendo resolvidos pela ciência. Ao longo dos trabalhos desenvolvidos em colaboração com o Dr. Claiton Scherer, criei a idealização de uma bacia interior influenciada por processos eólicos e fluviais, onde estromatólitos jamais foram pensados. Entretanto, após a leitura do texto, fica evidente que a Formação Guará é muito mais complexa que imaginei.</p> <p>O texto do Bruno é claro, sucinto, preciso, sem erros. Somente o texto integrador inicial poderia ter sido apresentado, que eu já consideraria o trabalho como plenamente ajustado ao esperado para uma dissertação. Mas foi além, tem um artigo breve, porém absolutamente claro e preciso.</p> <p>O texto integrador apresenta objetivo claro, e considero como uma introdução primorosa ao artigo enviado para o Geology. Os estromatólitos aglutinantes são apresentados, discutidos em termos sedimentológicos, e corroborados por evidências precisas. O item chave – trapeamento e aglutinação – é fundamental para a compreensão de tudo que vem depois.</p> <p>Quanto ao artigo, penso que será aceito, pois contém uma novidade conceitual importante.</p> <p>Deixo apenas uma questão para ser pensada, um ponto não abordado: no final da introdução, foi afirmado que os estromatólitos siliciclásticos da Formação Guará são diferentes de todos os demais publicados por não terem sido depositados em ambiente sob influência marinha. Entretanto, dito assim, a afirmação pode não ser verdadeira, pois a presença de estromatólitos pode ser a primeira evidência de influência marinha registrada na Formação Guará. Pessoalmente, concordo com o autor, porém, fica o registro de que a questão não foi resolvida no texto. Quero</p>

dizer com isto que temos de ter, sempre, a mente aberta, e lembrar de Karl Popper: "os mesmos dados se adaptam a um número enorme de hipóteses, desde as nossas até aquelas em que nunca pensamos". Pode ser este o caso. Não se trata de negar a evolução de um erg ativo com sedimentos eólicos e fluviais. Apenas, deixar aberta a possibilidade de breves momentos com influência marinha muito restrita.

Como sugestão para o futuro doutorado, penso que o estudo deve ser expandido para explorar o Tacuarembó. Lembro de ter visto níveis pelíticos intensamente bioturbados nas proximidades da cidade. Na época, só achei curioso, pois estavam intercalados com lençóis de areia eólicos. Também, na Formação Pedra de Fogo, do Permiano da Bacia do Parnaíba, no Maranhão, as fácies pelíticas do Arroio Pedra de Fogo (seção tipo), consideradas como lacustre, apresentam muitos níveis com estromatólitos.

Parabéns Bruno e Claiton.

Assinatura:

Data: 21/04/2024



Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno: