

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de Pós-Graduação em Geologia

Márcio Vinicius Santana Dantas

**ESTRATIGRAFIA, GEOQUÍMICA ISOTÓPICA (C-O) E
PALEOGEOGRAFIA DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ (EDIACARANO-
CAMBRIANO), GRUPO BAMBUÍ, MINAS GERAIS**

Nº 63

Belo Horizonte

22/09/2022

Márcio Vinicius Santana Dantas

**ESTRATIGRAFIA, GEOQUÍMICA ISOTÓPICA (C-O) E
PALEOGEOGRAFIA DA FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ (EDIACARANO-
CAMBRIANO), GRUPO BAMBUÍ, MINAS GERAIS**

Versão Final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Uhlein

Coorientador: Prof. Dr. Gabriel Jubé Uhlein

Belo Horizonte

2022

D192e
2022

Dantas, Márcio Vinicius Santana.

Estratigrafia, geoquímica isotópica (C-O) e paleogeografia da Formação Lagoa do Jacaré (Ediacarano-Cambriano), Grupo Bambuí, Minas Gerais [manuscrito] / Márcio Vinicius Santana Dantas. – 2022.

121 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Alexandre Uhlein.

Coorientador: Gabriel Jubé Uhlein.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2022.

Área de concentração: Geologia Regional.

Bibliografia: f. 115-121.

1. Geologia estratigráfica – Teses. 2. Geoquímica – Teses. 3. Geologia isotópica – Teses. 4. Fácies (Geologia) – Minas Gerais – Teses. 5. Carbonatos – Teses. I. Uhlein, Alexandre. II. Uhlein, Gabriel Jubé. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDU: 551.3.051(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA DO IGC-UFMG



FOLHA DE APROVAÇÃO

**ESTRATIGRAFIA, GEOQUÍMICA ISOTÓPICA (C-O) E PALEOGEOGRAFIA DA
FORMAÇÃO LAGOA DO JACARÉ, GRUPO BAMBUÍ, MINAS GERAIS**

MÁRCIO VINICIUS SANTANA DANTAS

Tese submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOLOGIA, como requisito para obtenção do grau de Doutor em GEOLOGIA, área de concentração GEOLOGIA REGIONAL, pelo Programa de Pós-graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais.

Aprovada em 22 de setembro de 2022, pela banca constituída pelos membros:

Prof. Alexandre Uhlein - Orientador
UFMG

Prof. Fabrício de Andrade Caxito
UFMG

Prof. Tiago Amâncio Novo
UFMG

Prof. Juliana Okubo
UNESP

Prof. Egberto Pereira
UERJ

Belo Horizonte, 22 de setembro de 2022.

*A toda minha família, em especial Edivaldo e
Sônia, meus pais.*

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar um ciclo tão longo e intenso de convivência, sou grato a muitas coisas boas que aconteceram. Já com outras, fica apenas a tristeza das perdas e o duro aprendizado. A pandemia de covid-19 foi uma novidade para toda esta geração, nos tirando muita coisa a um preço muito alto. Mas com muita confiança na ciência, estamos conseguindo superar esta fase difícil. Momentos difíceis sempre existirão, e servem para nos deixar mais fortes durante a caminhada.

Enfim, primeiramente, não posso deixar de ser grato ao meu orientador, Alexandre Uhlein, pela oportunidade de ser seu aluno e com o qual aprendi mais do que Geologia. Obrigado, mestre, pela oportunidade de trabalhar com você! Espero ter honrado a sua história acadêmica. Meu coorientador, Gabriel Uhlein, também agradeço pela oportunidade de trabalhar com você. Incrível jovem pesquisador com um futuro brilhante pela frente. Que continuemos nossa jornada e parceria!

Em segundo lugar, agradeço a toda minha família por me apoiar nas minhas decisões, meu pai Edivaldo, minha mãe Sônia, meus irmãos, Gustavo e Marcelo, por sempre me darem força para continuar. Peças fundamentais no meu crescimento pessoal e profissional! À minha noiva, Isadora, agradeço pelas palavras de incentivo a cada nova conquista. Vocês são a base de tudo, com certeza, e o que faço na vida, é para vocês. Meus amigos-irmãos do Rala que me dizem palavras de incentivo, amo vocês! Obrigado!

Impossível não agradecer aos meus colegas de caminhada acadêmica, todos meus parceiros da salinha da pós-graduação da Geologia da UFMG no IGC, que chegaram e passaram, quantas boas histórias vivemos e temos para contar... quantos cafezinhos e quantas festinhas boas para dividir nossos momentos, sejam eles de angústias ou de felicidades. Meus amigos Alex (Leco) e Marco, Tobias, Anderson, Salomão, Marcelo, Sofia, Sassá, Thaís, e a todos que me ajudaram de alguma forma, obrigado, pessoal! Em especial minha amiga Raíssa Santiago, obrigado por tudo! Valeu, pessoal! Vivemos uma jornada muito legal juntos, imagina se não tivesse acontecido a pandemia... Sucesso a todos e contem comigo! Quero agradecer especialmente meu amigo Zé Arthur, jovem geólogo com um grande futuro, por todas as sugestões que me fez durante os últimos 4 anos, além das diversas revisões, e por toda a parceria geológica dos últimos anos. Valeu demais!

Obrigado a todos os professores que convivi na UFMG, especialmente os da nova geração. Com certeza vocês fazem parte de uma das maiores e melhores universidades do Brasil. Lutem por ela sempre! Serei sempre orgulhoso de dizer que fui aluno da Universidade Federal de Minas Gerais.

Agradeço aos órgãos de fomento à ciência, que, apesar de tudo nos últimos anos, ainda existem, em especial à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela minha bolsa de pesquisa. Agradeço também à Petrobras pelo financiamento do meu projeto de doutorado através do Projeto “Caracterização Multiescalar e Modelagem Diagenética Preditiva em Depósitos de Coquinas e Folhelhos Intercalados da Formação Morro do Chaves, Bacia, Sergipe/Alagoas”. Agradeço ao PROGEOLOGIA/UFS e seus integrantes sob a coordenação do Prof. Antônio Garcia e Luiz Mário, em Sergipe, pelo apoio logístico durante a pandemia. Agradeço ao programa de pós-graduação em Geologia do IGC-UFMG, à Pró-reitoria de Pós-graduação, ao Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa e aos técnicos dos laboratórios do IGC. Por último, agradeço nosso secretário da pós-graduação, William Viegas, pela paciência, dedicação e atenção com todos os alunos do nosso curso. Obrigado!

Um viva à ciência!

RESUMO

A Formação Lagoa do Jacaré ocorre na parte média do Grupo Bambuí, constituída por carbonatos cinza escuros com valores positivos altos de $\delta^{13}\text{C}$ ($> +10\text{‰}$) depositados próximos ao limite Ediacarano-Cambriano, fazendo parte do intervalo Middle Bambuí Excursion (MIBE). Fácies sedimentares e dados isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ foram analisados em quatro afloramentos no estado de Minas Gerais, com análises petrográficas convencionais e com Microscopia Eletrônica de Varredura com Detector de Energia Dispersiva, além de interpretação de uma linha sísmica e três perfis de poços nos arredores do Alto de Januária. Oito fácies sedimentares foram definidas e agrupadas em 5 associações de fácies que compõe uma rampa carbonática homoclinal com sedimentação mista carbonato-siliciclástica. Representam ambientes de planície de marés (FA1), siliciclásticos finos de *offshore* (FA2), tempestitos de rampa média na transição *offshore-shoreface* (FA3), carbonato fino de *offshore* em rampa externa (FA4), e bancos carbonáticos ooidais em rampa interna (*shoals*) (FA5). Foi possível reconhecer grainstones e wackestones com intraclastos piritizados, micro-oncoides e ooides, além de material terrígeno fino (quartzo, feldspato, muscovita, biotita, apatita) com alguns minerais autigênicos/diagenéticos (pirita, fluorita, titanita, rutilo). Ao sul, na região de Paraopeba-Curvelo, a seção apresenta espessuras de até 100 m, com valores isotópicos médios de $+12,60\text{‰}$ para $\delta^{13}\text{C}$. Ao norte, entre Montes Claros e Ubaí, a espessura aumenta para cerca de 300 m, identificado através dos poços, com menor médio dos valores positivos de $\delta^{13}\text{C}$ ($+9,53\text{‰}$). Valores muito positivos como estes apresentados podem ser resultado de altas taxas de soterramento de matéria orgânica e/ou baixa circulação de águas em um mar estratificado. A diferença nos valores médios está relacionada aos diferentes intervalos estratigráficos da Formação Lagoa do Jacaré: inferior ao sul e superior ao norte. Ao sul, predomina uma rampa homoclinal com cerca de 100 m de espessura, depositada nos setores de *forebulge*, *foredeep* e *wedge-top* de uma bacia do tipo *foreland* (antepaís). Entre o Alto de Januária (oeste) e o orógeno Araçuaí (a leste), desenvolveu-se um sistema de rampas carbonáticas no setor *back-bulge* com direção N-S, de acordo com medidas de paleocorrentes obtidas (direções principais W-E). Os menores valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ na parte superior da seção estão relacionados a uma possível reconexão dos oceanos previamente isolados da Formação Lagoa do Jacaré com oceanos globais ou uma diminuição gradativa da produtividade orgânica, nos estágios finais de deposição desta unidade no período Cambriano.

Palavras-chave: Análise de fácies. Bacia *foreland*. Grupo Bambuí. Carbonatos ediacaranos-cambrianos.

ABSTRACT

The Lagoa do Jacaré Formation occurs in the middle section of the Bambuí Group, composed by dark gray carbonates with high values of $\delta^{13}\text{C}$, being part of the Middle Bambuí Excursion (MIBE), deposited during the Ediacaran-Cambrian boundary. Sedimentary facies and $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ isotopic data were analyzed in four outcrops in the Minas Gerais state, coupled with conventional petrographic analysis and SEM with EDS, besides the interpretation of a seismic line and three well logs in the surroundings of the Januária High. Eight sedimentary facies were recognized and grouped into five facies associations that corresponds to a homoclinal carbonate ramp model with mixed carbonate-siliciclastic sedimentation. They represent peritidal environments (FA1), offshore fine siliciclastics (FA2), mid-ramp tempestites in the offshore-shoreface transition (FA3), offshore fine carbonate on outer ramp (FA4), and ooidal carbonate banks shoals in the inner ramp (FA5). It was possible to recognize grainstones and wackestones with pyritized intraclasts, micro-oncoids and ooids, as well as fine terrigenous material (silt fraction) (quartz, feldspar, muscovite, biotite, apatite) with some autigenic/diagenetic minerals (pyrite, fluorite, titanite, rutile). Towards the south, in the region of Paraopeba-Curvelo, the section studied has up to 100 m of thicknesses, with mean isotopic value of +12,60‰ to $\delta^{13}\text{C}$. To the north, between Montes Claros and Ubaí cities, the thickness increases to 300 m, as identified in the well log, although with the lowest mean value of $\delta^{13}\text{C}$ (+9.53‰). These high values are believed to result from high rates of organic matter burial and/or low water circulation in a stratified sea. These difference in mean values may be related to different stratigraphic intervals of the Lagoa do Jacaré Formation: the lower in the south and the upper in the north. To the south, a 100 m-thick homoclinal ramp predominates, deposited in the forebulge, foredeep and wedge-top sectors of a foreland type basin. Between the Januária High (west) and the Araçuaí orogeny (east), a large carbonate ramp with N-S direction was developed in the back-bulge sector, according to the paleocurrent measurements (directions main W-E). The lower mean values of $\delta^{13}\text{C}$ in this upper part of the section may be related to a possible reconnection of the previously isolated oceans of the Lagoa do Jacaré Formation with global oceans or a gradual decreasing of organic productivity, in the final stages of deposition of this unit in the Cambrian period.

Keywords: Facies analysis. Foreland basin. Bambuí Group. Ediacaran-Cambrian carbonates.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	9
1.1.	Localização da área de estudo	9
1.2.	Objetivos	11
1.3.	Materiais e métodos	11
2.	BREVE REVISÃO HISTÓRICA: O GRUPO BAMBUÍ.....	19
3.	GEOLOGIA REGIONAL	22
3.1.	Bacia do São Francisco.....	24
3.2.	Grupo Bambuí.....	25
3.3.	Formação Lagoa do Jacaré	30
3.4.	Eventos Glaciais neoproterozoicos	31
4.	ARTIGO 1 – PUBLICADO EM 2022 NO BRAZILIAN JOURNAL OF GEOLOGY	33
5.	ARTIGO 2 – SUBMETIDO AO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES	52
6.	DISCUSSÕES DA TESE.....	108
7.	CONCLUSÕES	112
	REFERÊNCIAS	115

1. INTRODUÇÃO

A presente Tese de Doutorado pretende contribuir com o avanço dos conhecimentos estratigráficos sobre as rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré, tradicional unidade do Grupo Bambuí, depositada próxima do limite Ediacarano/Cambriano, importante registro sedimentar do Brasil. O Grupo Bambuí correlaciona-se com outras unidades ao redor do mundo, no qual registra-se a ocorrência de carbonatos de capa pós-glacial (Hoffman *et al.* 1998) em um pequeno intervalo da sua seção basal. Além disto, apresenta uma particularidade geoquímica com causas ainda incompreendidas, nomeadamente os altos valores de $\delta^{13}\text{C}$ ($> +10\%$), que atingem o máximo na seção relativa à Formação Lagoa do Jacaré, que constitui a maior parte do intervalo conhecido como Middle Bambuí Excursion (MIBE) (Uhlein *et al.* 2019).

Apesar de constituir uma seção geológica que adentra os limites do Cambriano segundo os mais recentes trabalhos publicados (Warren *et al.* 2014; Moreira *et al.* 2020), nunca foi observado no Grupo Bambuí fósseis macroscópicos relativos à reconhecida explosão de vida do Cambriano, sendo importante desafio entender o porquê desta distinta evolução, como estudado por diversos pesquisadores (Caxito *et al.* 2021). Neste sentido, aspectos quimioestratigráficos, petrográficos e paleogeográficos da Formação Lagoa do Jacaré são aqui discutidos em detalhes a fim de contribuir com o entendimento da sua evolução deposicional e geotectônica próximas ao limite Ediacarano/Cambriano, e que contribuíram para a sedimentação de rochas carbonáticas com elevados valores de $\delta^{13}\text{C}$.

Neste trabalho, visando simplificar os termos geológicos, por vezes utiliza-se o termo Bacia Bambuí como sinônimo do termo litoestratigráfico Grupo Bambuí (Dardenne, 1978).

O estudo foi apoiado pelo Projeto de P&D “CAMURES-Diagênese”, financiado pela Petrobras em parceria entre as universidades UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) e UFS (Universidade Federal de Sergipe). Os dados sísmicos e os dados de poços foram fornecidos pela ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis).

1.1. Localização da área de estudo

A Formação Lagoa do Jacaré aflora em diversos setores da Bacia Bambuí, distribuída espacialmente em uma faixa alongada de direção N-S no estado de Minas Gerais, região sudeste

do Brasil. Nesta tese, duas áreas de estudo foram escolhidas, com o intuito de estudar o comportamento da bacia nos seus setores sul e central. As áreas estudadas localizam-se nos domínios dos municípios de Ubaí e Montes Claros ao norte do estado de Minas Gerais, e Curvelo e Paraopeba ao norte do estado de Minas Gerais (Figura 1). Perfis litológicos verticais de afloramentos com coletas de amostras desta formação foram levantados em cada uma dessas áreas.

Os poços e linhas sísmicas fornecidos pela ANP estão localizados no setor central da bacia, próximos às cidades de Ubaí e Montes Claros (Figura 1), que se estende ainda para norte, dentro do estado da Bahia.

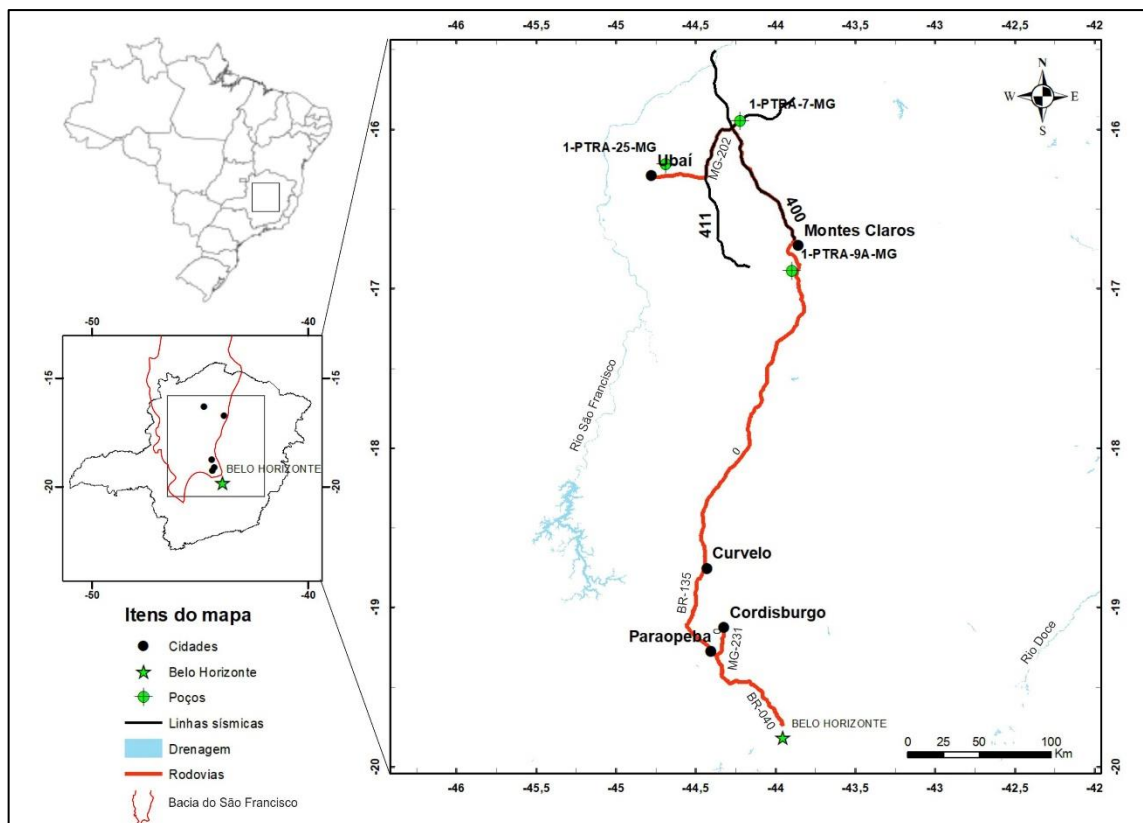


Figura 1 – Mapa de localização mostrando os limites da Bacia do São Francisco no Estado de Minas Gerais, as principais cidades (referência para os grandes afloramentos estudados), as principais estradas de acesso, e a localização das linhas sísmicas e dos poços estudados em detalhe.

1.2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é compreender a evolução deposicional e a paleogeografia da Bacia Bambuí durante a deposição da Formação Lagoa do Jacaré em duas regiões do estado de Minas Gerais, central e norte, para contribuir com os estudos desta bacia sedimentar neoproterozoica-cambriana, integrando para isso dados de afloramentos, dados geoquímicos isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$), sísmicos e de poços.

Para atingir o objetivo principal desta tese, algumas atividades foram desenvolvidas a fim de alcançar objetivos específicos. Estas atividades foram:

- Análise estratigráfica de perfis verticais em afloramentos selecionados;
- análise de afloramentos em multiescala com ferramentas diversas (GPR e raios-gama);
- descrição de lâminas petrográficas;
- análise de dados isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$;
- obtenção e análise de dados petrográficos com Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva) acoplado;
- análise estratigráfica de perfil composto de poços;
- análise sismoestratigráfica.

1.3. Materiais e métodos

A seguir, apresenta-se de forma resumida a metodologia de cada atividade realizada e as ferramentas utilizadas para levantamento e interpretação dos dados e consequente confecção dos artigos apresentados. Apresenta-se também o acervo de dados cedidos pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP).

Dados sísmicos e poços

A ANP cedeu para a realização deste trabalho o projeto sísmico da Bacia do São Francisco levantado nos anos início dos anos 2010. Além disto, cedeu também três poços e seus dados de perfil compostos (Figura 1): 1-PTRA-25-MG, 1-PTRA-7-MG e o 1-PTRA-9A-MG. Foram enviados seus dados base como arquivos *.sgy* e *.dlis* que puderam ser importados em

softwares específicos para obtenção dos dados. Todos os poços apresentam um acervo de dados como os mostrados na Figura 4. Para a correlação estratigráfica dos poços foram utilizados os dados de raios-gama.

Perfis de raios gama

O perfil de raios-gama é uma ferramenta básica levantada nas fases iniciais das campanhas exploratórias de bacias, pois facilitam sobremaneira a diferenciação entre as rochas sedimentares, dado que os valores geralmente são discrepantes entre arenitos, folhelhos, calcários e rochas ígneas do embasamento. Baseia-se no princípio da radioatividade natural das rochas, a qual está ligada ao decaimento atômico dos elementos químicos Th, U e K. Estes elementos estão relacionados aos sedimentos finos, a exemplo dos folhelhos ricos em matéria orgânica, e também às rochas siliciclásticas ricas em K, como os arenitos arcóseanos.

A unidade convencionalmente utilizada é o grau API (API°), determinado pelo Instituto Americano de Petróleo. Nos trabalhos com espectrômetros portáteis, para uso em afloramentos, a unidade geralmente usada para o valor total de radiação é CPS, contagens por segundo. A conversão pode ser feita através da fórmula que segue (Ellis e Singer, 2008), visto que os espectrômetros mais modernos também apresentam os valores espectrais de cada elemento (Th, U e K).

$$^{\circ}\text{API} = 16 \times \text{K}(\%) + 8 \times \text{U}(\text{ppm}) + 4 \times \text{Th}(\text{ppm})$$

Estratigrafia de Sequências

A análise estratigráfica se deu a partir dos conceitos de sequências deposicionais Transgressivas (ciclos T-R) de Embry e Johannessen (1992) (Figura 2), a qual define apenas dois tratos: o trato de sistemas transgressivo e o trato de sistemas regressivo. A sequência é limitada no topo do trato de sistemas regressivo pela Superfície Regressiva Máxima (SRM). Associada a esta superfície, pode-se delimitar no topo dos padrões retrogradacionais, a Superfície Transgressiva Máxima (STM) ou Superfície de Inundação Máxima (SIM). Quando da recorrência dessa superfície durante um ciclo completo de mudança na acomodação ou suprimento sedimentar, se obtém uma sequência deposicional como definido por Catuneanu et al. (2011). Neste trabalho foi usada a SRM como limite de sequências.

Para o desenvolvimento da interpretação estratigráfica desta tese, os dados sedimentológicos foram analisados e interpretados para definição das fácies. A seguir, foram definidas a sucessão vertical de fácies e suas associações, as quais podem ser agrupadas em sistemas deposicionais. Consequentemente, foi possível obter os tratos de sistemas deposicionais. Os padrões de empilhamento dos tratos de sistemas deposicionais definem os ciclos transgressivos e regressivos a partir da interpretação das variações da linha de costa.

Nos poços estudados, os padrões dos tratos de sistema foram observados de acordo com a tendência de aumento ou diminuição dos valores do raios-gama associado aos dados litológicos, como feito tradicionalmente na interpretação deste tipo de dado na indústria petrolífera. O aumento do raios-gama representa tendências de afogamento e a sua diminuição indica raseamento para o topo da sucessão.

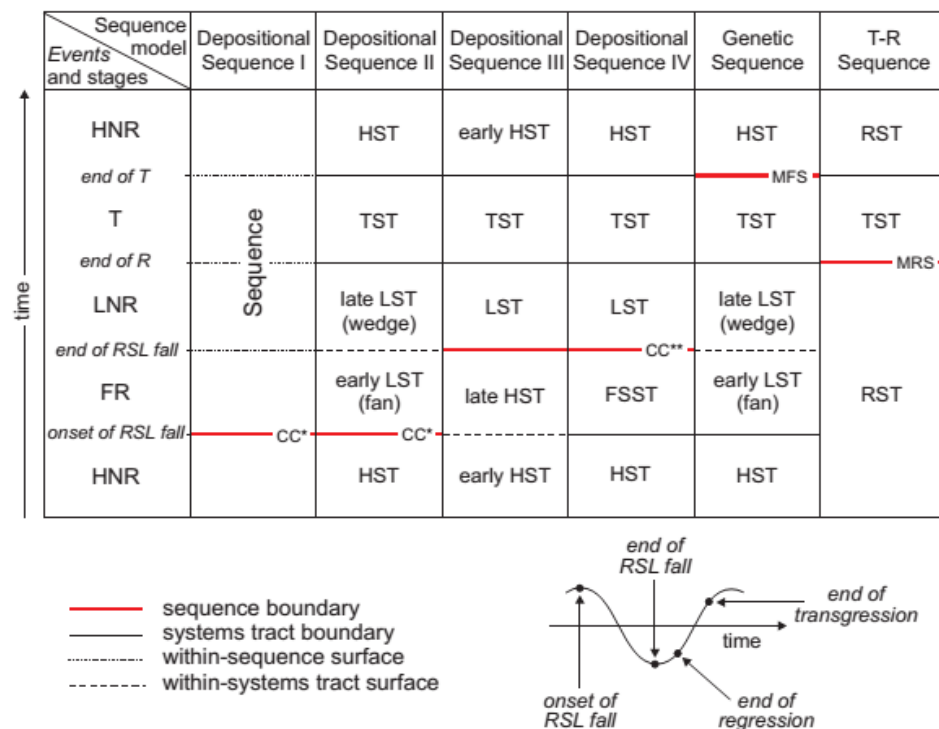


Figura 2 – Tipos de seqüências deposicionais definidas por diversos autores, relacionadas às superfícies estratigráficas e à sucessão de tratos de sistemas que as definem. (Catuneanu, 2006) Siglas em inglês: LST- lowstand systems tract; TST - transgressive systems tract; HST - highstand systems tract; FSST - falling-stage systems tract; RST - regressive systems tract; T-R - transgressive-regressive.

Geoquímica Isotópica

As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Isótopos Estáveis (LABISE) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e também no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica (LGQM) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Para extração do gás CO₂ foram utilizados 20 mg de pó de cada amostra. O pó de amostra foi atacado com ácido ortofosfórico a 25°C para liberar CO₂. O gás CO₂ obtido foi analisado para isótopos de O e C em espectrômetros de massa Thermofinnigan Delta V Advantage (UFPE) e Kiel IV carbonate device (UERJ). Os resultados apresentados estão expressos na notação δ em permil (‰), calibrados relativamente ao padrão Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB), com precisão de $\pm 0,1\%$.

Análise Sismoestratigráfica

Para a análise sismoestratigráfica, foi utilizada uma linha sísmica regional (Linha 400) de direção NW-SE, localizada na parte norte do estado de Minas Gerais, que vai da região do município de Januária ao município de Montes Claros. A linha foi interpretada no software livre OpenDetect. A amarração *sísmica x poço* foi feita a partir dos dados de tempo de trânsito integrado (TTI) disponível no arquivo do perfil composto dos poços, e seguindo as indicações do *header* do arquivo “.sgy”, que traz informações relativas ao processamento dos dados sísmicos.

Os padrões dos refletores sísmicos foram definidos de acordo com as características de cada um, visto que variam conforme a litologia e distribuição areal, tais como: terminações dos refletores (Figura 3), intensidade da reflexão, amplitude e contraste de impedância entre as camadas. Desta forma, foi possível identificar os intervalos sísmicos e padrões de sismofácies relativos à cada formação atravessada pelos poços e assim fazer a amarração *sísmica x poço*. As linhas sísmicas são apresentadas em TWT (Two-way travel time) em ms. As cartas 1:100.000 dos projetos de mapeamento “Norte de Minas” e “Fronteira de Minas” foram utilizadas como base para a análise dos padrões de sismofácies que alcançam a superfície.

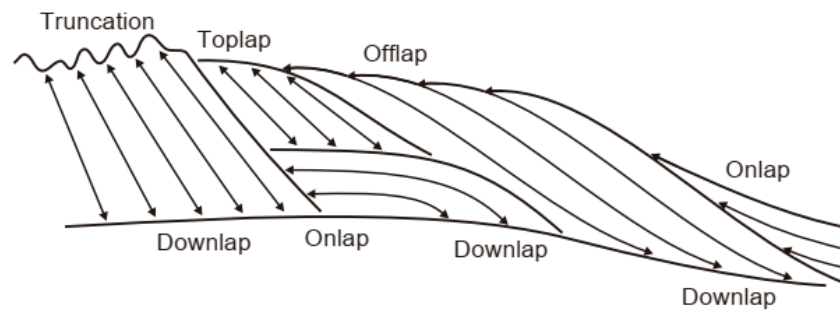


Figura 3 – Terminação dos refletores sísmicos de acordo com Emery e Myers (1996).

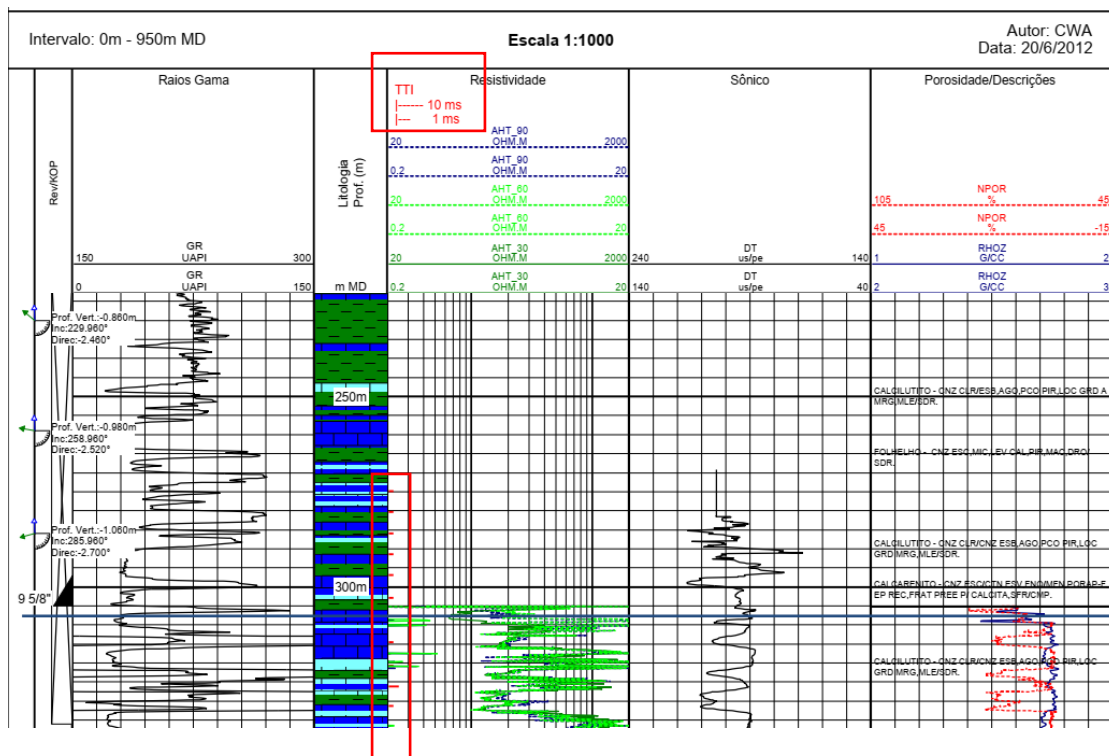


Figura 4 – Recorte de parte do perfil composto do poço 1-PTRA7-MG com destaque para os dados de TTI disponíveis no perfil, utilizados para amarração poço x sísmica.

Ground Penetrating Radar (GPR)

O método GPR (*Ground Penetrating Radar*) consiste no levantamento de informações da subsuperfície rasa através emissão e reflexão de pulsos eletromagnéticos. Dois tipos básicos de levantamentos geofísicos são classificados: Ativo e Passivo. Os métodos ativos se configuram naqueles que medem as respostas do substrato rochoso após o estímulo por ondas eletromagnéticas, elétricas ou sísmicas. Os métodos passivos se utilizam das propriedades elétricas gravimétricas ou eletromagnéticas naturais da superfície terrestre.

O GPR se configura como um método ativo, de alta frequência (10 MHz – 2,5 GHz) no qual os dados são obtidos a partir da emissão em direção ao solo de ondas eletromagnéticas por uma antena transmissora. A qualidade da aquisição dependerá, dentre outros fatores, da frequência da antena utilizada. Ao atingirem os substratos com diferentes propriedades eletromagnéticas, a velocidade de propagação das ondas é alterada, refletindo parte da energia e difratando o restante em direção às camadas mais profundas até encontrar outro contraste ou ser atenuada pelo meio. A energia refletida é capturada pela antena receptora, que na unidade de controle, registrará a intensidade do sinal refletido. De forma análoga aos dados obtidos em levantamentos sísmicos, ao tempo percorrido entre a emissão e a recepção da energia refletida por parte da antena receptora se denomina "Tempo Duplo".

Alguns parâmetros devem ser definidos previamente antes da utilização do modelo de equipamento utilizado nesta tese. São eles: o diâmetro da roda, a velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas no solo estudado e o intervalo de pontos. As linhas obtidas nos levantamentos com GPR devem ser processadas para que seja possível proceder a interpretação das principais feições geológicas ou materiais de interesse. Esta etapa consiste de operações de correção e filtragem, dos radargramas, e buscam trazer imagens resultantes com melhor resolução das radarfácies para que sejam passíveis de interpretação e de utilização em demais *softwares* de interesse. De forma geral, os passos incluem filtragem de frequências excessivas, remoção de ganhos e ruídos oriundos da aquisição, conversão de tempo em profundidade e correções topográficas e de georreferenciamento. A abaixo ilustra cada uma das ferramentas aplicadas e descreve o princípio de cada uma.



Figura 5 – Equipamento de GPR completo utilizado nos levantamentos de dados desta tese, montado com roda, antena, haste e controlador em operação.

Quadro 1 – Velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em alguns materiais.

Material	Velocidade (m/ns)
Ar	0.30
Água	0.033
Água do Mar	0.01
Areia Seca	0.15
Areia Saturada	0.06
Calcário	0.12
Folhelho	0.09
Argila	0.06
Gelo	0.16
Granito	0.13

Quadro 2 – Principais ferramentas de processamento de linhas GPR que podem ser aplicadas aos dados obtidos e suas funções.

Ferramenta	Descrição
Remoção do Ganho de Aquisição	Remove o ganho que foi aplicado durante a aquisição.
Correção do Tempo Inicial (move start time)	Remove os registros nulos gravados no período de tempo em que a antena transmissora emitiu sinal mas estes ainda não haviam retornado à antena receptora.
Dewow	Remove o ruído de baixa frequência gerado pela indução eletromagnética entre as antenas.
Filtro passa-banda (bandpass frequency)	Remove ruídos de alta frequência que estão fora da banda de sinal da frequência central da antena utilizada.
Background removal	Remove sinais indesejados oriundos de ondas terrestres diretas e aéreas.
Aplicação de ganho	Corrige os efeitos de perda de sinal relacionados a propagação das ondas e realça os refletores de interesse.
Conversão tempo-profundidade	Construção do campo de velocidade e em seguida realiza a conversão de dados em tempo (nanossegundos) para metros.
Correção topográfica	Atribui a cada traço específico do radargrama sua cota Z, o que permite verificar as topografias ao longo da linha adquirida.
Georreferenciamento dos traços	Atribui a cada traço específico do radargrama suas respectivas coordenadas X, Y, Z, para posterior visualização em ambiente 3D.

Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) com Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) acoplado

Os trabalhos de análise petrográfica em microscópio eletrônico foram realizados sob orientação do grupo de estudos da UNESP (Universidade Estadual Paulista, campus de Rio Claro). Durante o período de uma semana, uma parte foi voltada para treinamento no equipamento, e outra parte para obtenção dos dados utilizados nesta tese.

Os dados de microscopia eletrônica foram obtidos utilizando o equipamento JEOL JSM 6010LA SEM equipado com EDS, no Departamento de Geologia. As lâminas foram devidamente preparadas com polimento e metalização com carbono na mesma universidade. Todas as imagens de BSE (Backscattered eletron) e SE (secondary electron) foram obtidas com distância de focal de 10 mm e tensão de aceleração de 15 keV. As análises obtidas com o EDS

(incluindo os mapas elementares) foram adquiridas com a mesma tensão de aceleração e correntes de 20 nA para identificação de elementos maiores.

2. BREVE REVISÃO HISTÓRICA: O GRUPO BAMBUÍ

O Grupo Bambuí é uma cobertura sedimentar cratônica predominantemente plana na sua parte central e dobrada nas bordas devido influência das Faixas dobradas Brasília e Araçuaí (Zalán e Romeiro-Silva, 2007). Assenta-se através de contato erosivo sobre rochas do embasamento paleoproterozóico e arqueano do cráton do São Francisco. Aflora na região central do Brasil nos estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia e Mato Grosso.

Os primeiros estudos nesta unidade remetem ainda ao século XIX, quando as rochas sedimentares carbonatadas e argilosas aflorantes na região do vale do São Francisco foram denominados por Derby (1880) de “Série São Francisco”. Depois, em 1917, Rimann cunhou o termo “Série Bambuí” trabalhando nos arredores da cidade homônima no centro-oeste do estado de Minas Gerais, que viria a ser consagrado posteriormente com a criação do Código de Nomenclatura Estratigráfica.

Em 1961, a Série Bambuí recebeu a primeira divisão litoestratigráfica de caráter regional pelos pesquisadores Costa e Branco. Apesar de ainda persistirem conflitos estratigráficos e as entidades estratigráficas não serem as mesmas, a divisão feita pelos autores já era próxima da qual está definida atualmente: Formação Carrancas na base, passando à Formação Sete Lagoas e depois Formação Rio Paraopeba, esta última dividida nos membros Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Três Marias e Serra da Saudade. Diversas publicações posteriores buscaram definir melhor a litoestratigrafia da série, como Barbosa (1965) e Oliveira (1967), buscando alterações que contemplassem as variações litológicas observadas em suas áreas de trabalho, transferindo entidades de membros para formações e vice-versa, além de alterar a posição estratigráfica de algumas unidades. Nomeadamente, a Formação Três Marias passou a ser posicionada no topo da sucessão no trabalho de Oliveira (1967).

Já em 1968, Braun definiu pela primeira vez a série como Grupo Bambuí, apesar de sua divisão litoestratigráfica proposta como Formação Paranoá, Formação Paraopeba e Formação Três Marias da base para o topo não ter vingado. Na década seguinte, Scholl (1973, 1976) definiu a litoestratigrafia do grupo com as formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa

do Jacaré e Três Marias, tendo a Formação Carrancas incluída na seção basal junto aos calcários da Formação Sete Lagoas.

Finalmente em 1978, Dardenne propôs a organização litoestratigráfica mais aceita para o Grupo Bambuí na região centro-leste do Brasil, propondo correlações a nível regional nos estados da Bahia, Minas Gerais e Goiás. Esta classificação tinha na base os diamictitos da Formação Jequitaí, paraconglomerados com matriz esverdeada com seixos de quartzitos, calcários, dolomitos, chert, gnaisses, granitos, micaxistos e rochas vulcânicas. Acima, os calcários dolomíticos e pelíticos da Formação Sete Lagoas. A Formação Serra de Santa Helena, subsequente, segundo o autor constitui um nível chave de folhelhos e siltitos entre dois horizontes carbonáticos. Calcários oolíticos e pisolíticos lenticulares fétidos compõe a Formação Lagoa do Jacaré. De acordo com o autor, suas melhores exposições estão na região cratônica estável e recebem o nome de Formação Nhandutiba. A Formação Serra da Saudade é composta de folhelhos verdes que passam a siltitos feldspáticos para o topo. Encerrando a sedimentação do grupo, a Formação Três Marias é composta por siltitos e arcóseos verde escuros, sobrespostos gradativamente à formação anterior.




Com o avanço dos estudos de mapeamento e técnicas disponibilizadas para estudos geológicos nas mais diversas áreas, o enfoque dos trabalhos passou a ser mais detalhado, ou seja, buscando detalhar a litologia das unidades existentes nos diversos setores da bacia com a criação de novas unidades e melhor entendimento da evolução geotectônica e deposicional da bacia Bambuí. Dos anos 1980 até os anos 2010, diversos projetos de mapeamento dos governos federal e do Estado de Minas Gerais ajudaram sobremaneira a detalhar as unidades litoestratigráficas no estado de Minas Gerais. Os mais recentes, dos Projetos Fronteira de Minas, Norte de Minas e Alto Paranaíba, produziram mapas em escala 1:100.000, fruto da parceria CODEMIG/UFMG, contribuição importante para o entendimento da litoestratigrafia do grupo.

Além das questões litoestratigráficas, a idade de sedimentação do Grupo Bambuí sempre foi motivo de grandes debates científicos, pois, diante da ausência de uma assembleia fossilífera abundante, métodos geocronológicos não se fazem sempre certos. Bonhomme (1976) conseguiu idades de 619 ± 17 Ma utilizando o método Rb/Sr para datar ilitas de pelitos da Formação Sete Lagoas em Januária. Pelo método K/Ar, Thomaz Filho e Bonhomme (1979) conseguiram idades entre 662 e 576 Ma. Parenti-Couto et al. (1981) dataram galenas extraídas de rochas sedimentares finas (siltitos ou folhelhos) pelo método Rb/Sr com idade 640-590 Ma.

Kawashita (1996) apresenta síntese das datações e inferências quimioestratigráfica do Grupo Bambuí com os dados levantados até o final dos anos 1990.

Nos anos 2000, Babinski et al. (2007) chegaram à idade de 740 ± 22 Ma utilizando o método Pb-Pb em pseudomorfo de aragonita da Formação Sete Lagoas, o que foi relacionado aos carbonatos de capa pós glaciação Sturtiana (Hoffman e Schrag, 2002; Halverson et al. 2005). Paula-Santos et al. (2015) trouxeram novas discussões para esta questão pois forneceram idades máximas de sedimentação de 557 Ma através de dados U-Pb em zircões detríticos da parte superior da mesma formação, relacionando à idades mais novas do que a glaciação Marinoana. Estes dados combinam com as idades sugeridas por Caxito et al. (2012), que compararam carbonatos de capa da Formação Sete Lagoas com outros carbonatos de capa ao redor do mundo (~635-610 Ma) através de seus dados sedimentológicos e quimioestratigráficos de C, O e Sr. Em meados dos anos 2010, a discussão se afinou de vez para uma idade ediacarana para maior parte do Grupo Bambuí devido fóssil de *Cloudina* (Warren et al., 2014) ter sido catalogado em afloramento da Formação Sete Lagoas no norte da bacia, na região da cidade de Januária. A *Cloudina* é um fóssil guia do Ediacarano com ocorrência conhecida entre 549-542 Ma (Germs, 1972 e Amthor et al. 2003).

Recentemente, tentativas de datação do Grupo Bambuí foram realizadas por diversos autores. Caxito et al. (2018) datou a Fm. Sete Lagoas com o método Pb-Pb em 608 ± 19 Ma. Moreira et al. (2020) propuseram idade de 520.2 ± 5.3 Ma, ao datar zircão ígneo de tufos vulcânicos intercalados aos folhelhos verdes (verdetes) da Formação Serra da Saudade. Rossi et al. (2020) e Tavares et al. (2020) conseguiram idades máximas de deposição de 555 ± 17 Ma e 527 ± 4 Ma respectivamente ao datarem zircões detríticos coletados nos arenitos da Formação Três Marias, sobrepostas à Formação Lagoa do Jacaré. Caxito et al. (2021) datou com o método U-Pb em cristais de aragonita toda a seção relativa à Formação Sete Lagoas com três idades principais, confirmando hiato deposicional na sua parte média de aproximadamente 35 Ma, com idade de topo de 566 ± 15 Ma. Além destes autores, Sanchez et al. (2021) encontraram o icnofóssil índice *Treptichnus pedum* na Formação Três Marias, topo do Grupo Bambuí, importante indicador do limite Cambriano-Ediacarano. A Figura 6 apresenta um compilado dos principais dados geocronológicos já obtidos para o Grupo Bambuí.

Sudoeste 1, 2	Noroeste 3, 4, 5, 6, 7	Central e Leste 8, 9, 10
Fm. Três Marias	Fm. Três Marias ★ 630 (11)	Fm. Três Marias ▲ 620±40 (RT) (12) ★ 555±17(19) ★ 527±4(20) ★ 580 (13)  Limite Ediac-Camb.(21)
Fm. Lagoa Formosa ★ 560±3 (2)	Fm. Serra da Saudade	Membro Jaíba Fm. Serra da Saudade 630 (ilita) ▲ 573±18 (ilita/clorita) 465±21 (esmectita/FeMg-ilita) (14) ▲ 590±40 (12)  520.2 ± 5.3 (18)
Fm. Serra da Saudade	★ 612 (11)	Fm. Lagoa do Jacaré ▲ 695±12 (RT) ▲ 610±9 (FF) (15)
Fm. LJ	Fm. Lagoa do Jacaré	★ 630 (13) Fm. Serra de Santa Helena
Fm. Serra de Santa Helena	★ 650 (11)	★ 630 (13) Fm. Serra de Santa Helena
Fm. Samburá	★ 660 (11) Fm. Sete Lagoas  <i>Cloudina sp</i> 550-542 Ma (22)	★ 557 (16) Fm. Sete Lagoas ▲ 608±19 Ma (23) ★ 610 (11) 566±15 ★ 573±11 ★ 593±1.7 (16) ★ 615±5.9(24) ▲ 740±22 (17)

1 - Castro & Dardenne (2000); 2 - Uhlein et al. (2017); 3 - Santos et al. (2000); 4 - Santos et al. (2004); 5 - Alvarenga et al. (2007); 6 - Alvarenga et al. (2012); 7 - Alvarenga et al. (2014); 8 - Costa & Branco (1961); 9 - Dardenne (1978); 10 - Reis & Suss (2016); 11 - Rodrigues (2008); 12 - Parenti-Couto et al. (1982); 13 - Kuchenbecker et al. (2016a); 14 - Bonhomme (1976); 15 - Thomaz-Filho & Bonhome (1979); 16 - Paula-Santos et al. (2015); 17 - Babinski et al. (2007); 18 - Moreira et al. (2020); 19 - Rossi et al. (2020); 20 - Tavares et al. (2020); 21 - Sanchez et al. (2021); 22 - Warren et al. (2014); 23 - Caxito et al. (2018); 24 - Caxito et al. (2021)

▲ Pb-Pb ★ U-Pb (zircão detrítico) ▲ Rb-Sr (RT - Rocha Total; FF - Fração fina não diferenciada)  Icnofóssil
 U-Pb (zircão em tufo)  Fóssil
★ U-Pb (aragonita)

Figura 6 – Alguns dados geocronológicos disponíveis para o Grupo Bambuí. Modificado de Uhlein, G. (2017). Dados de U-Pb indicam idades máximas de sedimentação.

3. GEOLOGIA REGIONAL

O Grupo Bambuí está incluído no contexto litoestratigráfico da Bacia do São Francisco, depositada sobre o cráton homônimo (Figura 7). Esta bacia apresenta evolução policíclica e se estende ao longo de 800 Km na direção N-S, limitada pelas faixas dobradas neoproterozoicas adjacentes (Dominguez, 1993; Alkmim e Martins-Neto, 2001; Zalán e Romeiro-Silva, 2007, Alkmim e Martins-Neto, 2012), Araçuai e Brasília.

De acordo com Reis et al. (2017) existem pelo menos três principais sequências pré-cambrianas de 1ª ordem na Bacia do São Francisco:

- (i) Sequência Mesoproterozoica a Neoproterozoica Paranoá-Espinhaço Superior;
- (ii) Sequência neoproterozoica Macaúbas;
- (iii) e a Sequência ediacarana-cambriana Bambuí.

A sequência ediacarana-cambriana é o foco do presente trabalho, em particular a Formação Lagoa do Jacaré, de provável idade cambriana de acordo com os estudos mais recentes. Esta formação compreende carbonatos marinhos rasos a pouco profundo, cinza escuro, fino a grosso, ooidal/oncoidal, intraclástico, retrabalhados por tempestades, com valores positivos altos de $\delta^{13}\text{C}$ (normalmente superiores a +10‰). O Grupo Bambuí é uma das principais unidades de cobertura neoproterozóica do cráton do São Francisco. Muitas publicações (Dardenne, 1978; Campos e Dardenne, 1997; Alvarenga et al. 2007; Alkmim e Martins-Neto, 2012; Caxito et al. 2012; Alvarenga et al. 2014, entre outros) tornaram esta unidade uma das seções neoproterozóicas mais estudadas no Brasil porque seu registro geológico ajuda a entender a ocorrência de eventos glaciais deste período (Snowball Earth de Hoffman et al. 1998), além da amalgamação do supercontinente Gondwana, constituindo parte importante do entendimento global deste intervalo da história da Terra.

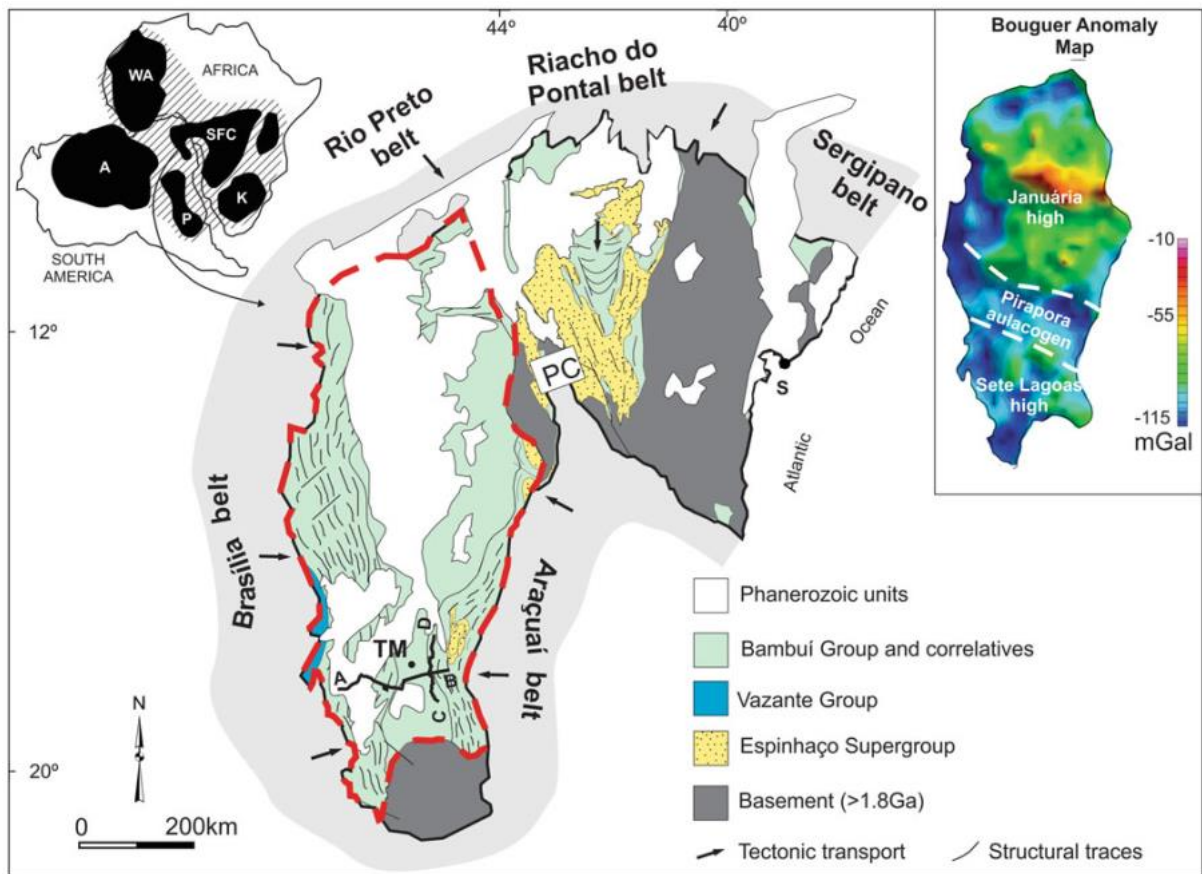


Figura 7 – Mapa geológico simplificado do Cráton do São Francisco e da bacia homônima (marcada pela linha tracejada vermelha) que o recobre (Baseado em Alkmim e Martins-Neto, 2001). (Reis *et al.*, 2017)

3.1. Bacia do São Francisco

A Bacia do São Francisco é uma bacia intracratônica policíclica menos afetada por tectonismo na parte central e deformada nas bordas por duas faixas orogênicas: a oeste (Faixa Brasília) e a leste (Faixa Araçuaí) (Zalán & Romeiro-Silva, 2007). Por este motivo, pode ser dividido em três setores distintos: oeste, central e leste (Alkmim e Martins-Neto, 2001) (Figura 8). Segundo Alkmim e Martins-Neto (2001), a Bacia do São Francisco desenvolveu-se na parte sul do cráton homônimo e atuou como bacia pelo menos em quatro diferentes estágios após 1,8 Ga. Possui 350.000 km² e está localizada nos estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia.

Segundo Alkmim e Martins-Neto (2001) podem ser consideradas como embasamento da bacia intracratônica do São Francisco todas as rochas com mais de 1,8 Ga. Os componentes mais antigos detectados no cráton incluem rochas tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) e

associações de granito-*greenstone* juntamente com rochas de alto grau, todas com registro isotópico que se estende de 4,1 a 2,5 Ga.

A bacia é preenchida principalmente por rochas sedimentares Paleoproterozóicas (Formações São João da Chapada e Sopa-Brumadinho) e sucessões Mesoproterozóicas (Formação Galho do Miguel e Grupo Conselheiro Mata), sendo estas unidades incluídas no Supergrupo Espinhaço (Alkmim e Martins-Neto, 2001, Knauer 2007, Uhlein, 2012); e com sucessões neoproterozóicas do Supergrupo São Francisco (Formação Jequitáí e Grupo Bambuí), recobertas por rochas sedimentares permo-carboníferas (Grupo Santa Fé), e rochas sedimentares e vulcânicas formadas no Cretáceo Superior (Grupos Areado, Mata da Corda e Urucuia).

3.2. Grupo Bambuí

O Grupo Bambuí representa uma sucessão de rochas neoproterozóicas depositadas em ambientes de plataforma na base passando a plataformal e fluvial-deltaico no topo, e pode ser dividido litoestratigraficamente em seis formações segundo Dardenne (1978): Jequitáí, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade e Três Marias. Considera-se ainda nesta tese, além dessas, a Formação Carrancas (Uhlein et al., 2016), que ocorre abaixo da Formação Jequitáí em áreas restritas no sul do cráton do São Francisco, em Minas Gerais, como base do Grupo Bambuí. De acordo com Uhlein et al. (2016) esta formação é composta de conglomerado, preservada de forma esparsa na base do grupo, e foi depositada em um sistema de leque aluvial conglomerático próximo às margens da falha, antes mesmo da sedimentação da Formação Jequitáí. A Formação Samburá forma a base do Grupo Bambuí na parte sudoeste da bacia (Figura 8), onde conglomerados, arenitos e siltitos foram depositados em contato com unidades pré- a sin- orogênicas da Faixa Brasília a oeste (Castro e Dardenne, 2000) (Uhlein et al. 2017). Fragoso et al. (2011) e Uhlein et al. (2011) descreveram a Formação Lagoa Formosa na região do Alto Rio Paranaíba em Minas Gerais. Compreende diamictitos maciços com rara intercalação de siltitos e uma associação de arenitos, siltitos, conglomerados e rochas carbonáticas bem estratificados. Está em contato gradacional com a Formação Serra da Saudade. Essas rochas representam a sedimentação por fluxo gravitacional em leques submarinos.

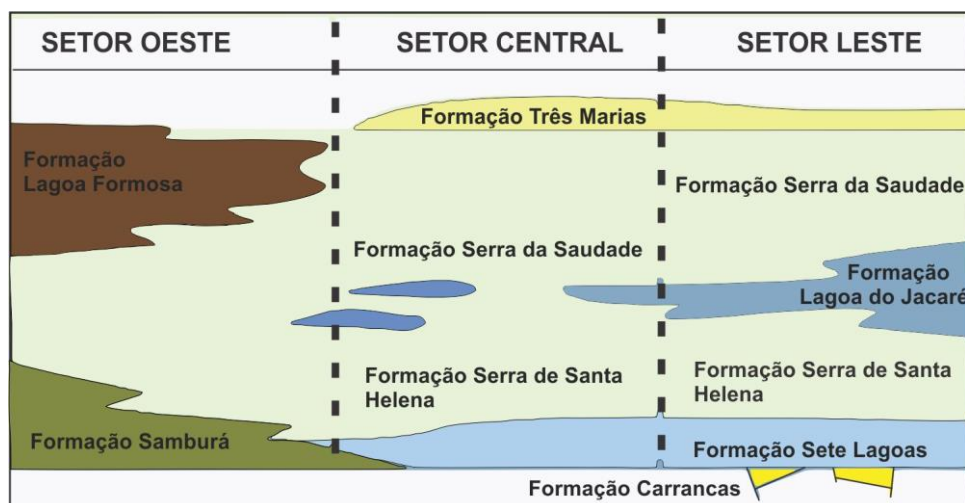


Figura 8 – Diagrama esquemático W-E da distribuição das formações do Grupo Bambuí nos três setores definidos. (Uhlein et al. 2017)

- Formação Sete Lagoas

A Formação Sete Lagoas marca o início da deposição carbonática no Grupo Bambuí. Possui aproximadamente 200 m de espessura média (Caxito et al., 2012) e compreende carbonatos, dolomitos e margas e siltito intercalados (Dardenne, 1978). Geralmente se encontra em discordância com o embasamento Arqueano-Paleoproterozóico do cráton do São Francisco e, localmente, sobrepõe-se de forma concordante a diamictitos glaciogênicos da Formação Jequitai e suas unidades correlativas.

Rochas carbonáticas depositadas sobre unidades diamictíticas são muito comuns em todo o mundo, como ocorre em sucessões glacio-marinhas no Grupo Otavi, cráton do Congo na Namíbia (Hoffman et al. 1998), Formação Egan, em Kimberly, Austrália (Corkeron, 1998) e na plataforma carbonática neoproterozóica na Índia (Kaufman et al. 1997). Essas rochas carbonáticas são conhecidas como carbonatos de capa (Grotzinger e Knoll, 1995; Kennedy, 1998; Hoffman e Schrag, 2002) e apresentam características típicas espessos cimentos de fundo oceânico, *wave ripples* gigantes, mounds microbiais com estruturas tubulares verticais, cimento primário eodiagenético de barita, além de valores moderadamente negativos de isótopos de carbono ($-5 < \delta^{13}\text{C} < 0\text{‰}$).

As fácies sedimentares descritas e o conteúdo isotópico geral de $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para as rochas carbonáticas da Formação Sete Lagoas indicam assinaturas pós-glaciais típicas (Santos et al. 2000; Kuchenbecker 2011; Caxito et al. 2012; Alvarenga et al. 2014) (Reis et al., 2017). Paula-Santos et al. (2017) dividiram a Formação Sete Lagoas em três diferentes intervalos quimioestratigráficos (CI) baseados nos isótopos de C e O. O CI-1 compreende os carbonatos de capa, com excursões negativas de C seguidas por excursões positivas coevas de Sr e C, formando típico perfil em “U” de sucessões depositadas após a glaciação Marinoana (Shields, 2005), observado também em Caxito et al. (2012). O CI-2 compreende a parte média da Formação Sete Lagoas onde é registrada a ocorrência do fóssil índice *Cloudina* e valores de $\delta^{13}\text{C}$ em torno de 0 ‰. O CI-3 compreende a parte superior desta formação além das formações Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré com valores positivos altos de $\delta^{13}\text{C}$. Uma discordância de aproximadamente 20 Ma é proposta por Martins e Lemos (2007) a partir da comparação de seus dados quimioestratigráficos com a curva de variação global do $\delta^{13}\text{C}$ de Kaufman et al. (1997).

- Formação Serra de Santa Helena

Os folhelhos e siltitos intercalados com arenitos e carbonatos escuros desta formação representam um importante intervalo estratigráfico segundo Dardenne (1978) devido à sua deposição entre duas importantes seções carbonáticas. Apresenta espessura entre 200 e 400 m. Marca a subida do nível do mar na Bacia Bambuí, resultando na deposição de sedimentos finos de águas profundas em ambiente marinho. Martins e Lemos (2007) definiram a Superfície Máxima de Inundação (MFS) da Megassequência São Francisco nesta formação. Por vezes, no setor oeste da bacia, pode se confundir com a Formação Serra da Saudade, visto terem rochas sedimentares de granulometria fina bastante semelhantes, quando da ausência das fácies carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré.

- Formação Lagoa do Jacaré

Segundo Dardenne (1978), a Formação Lagoa do Jacaré é composta por lentes carbonáticas ooidais e pisoidais, cinza escuro, fétidas, intercaladas com margas e siltitos. Martínez (2007) descreveu na cidade de Lontra, Norte de Minas Gerais, três litofácies para esta

unidade: calcarenitos e calcissiltito neomorfizado, carbonatos e siltitos impuros e calcissiltito. Próximo à cidade de Presidente Olegário, Fragoso et al. (2011) descreveram calcissiltito, biolíticos, margas e siltitos, com laminação e/ou estratificação paralela e, localmente, laminação cruzada. Santos et al. (2018) descreveram diversas fácies estromatolíticas nas regiões de Luz, Bom Despacho, Jaíba e São João da Ponte, incluindo formas colunares, dômicas e estratiformes, que contribuíram sobremaneira para as discussões paleoambientais da unidade. O ambiente deposicional da Formação Lagoa do Jacaré é interpretado como de marinho pouco profundo gradando para marinho raso influenciado por marés e correntes, inserida em um contexto de trato de sistemas de nível alto (Martins e Lemos, 2007), tendo sido depositada em uma rampa homoclinal inclinada com sedimentação mista carbonático-siliciclástica.

Isotopicamente, a Formação Lagoa do Jacaré tem valores elevados e incomuns de $\delta^{13}\text{C}$ para esta seção neoproterozoica, em torno de +10 a + 15‰ (Iyer et al. 1995; Santos et al. 2004; Martins e Lemos, 2007; Caxito et al., 2012; Reis, 2013, Paula-Santos et al., 2017, Uhlein et al. 2019; Cui et al. 2020; Dantas et al. 2022). Esses altos valores de $\delta^{13}\text{C}$ estão associados a uma série de fatores como por exemplo: alta produtividade primária, metanogênese, retrabalhamento de antigas plataformas carbonáticas, soterramento da matéria orgânica e ambiente pobre em sulfato. Esta excursão positiva na curva de $\delta^{13}\text{C}$ reflete uma mudança de mar aberto ventilado para mares estratificados com baixa circulação oceânica, com grande potencial de preservação de matéria orgânica (Martins e Lemos, 2007).

- Formação Serra da Saudade

Esta unidade é composta de folhelhos verdes (“verdetes”) e argilitos que gradam para siltitos feldspáticos ou arcóseos para o topo. Intercalado ao siltito ocorrem lentes métricas de verdetes que é um siltito verde rico em potássio, por vezes com alto teor de fósforo (Fragoso et al., 2011). A Formação Serra da Saudade recobre a Formação Lagoa do Jacaré em contato concordante e gradacional, e apresenta mais arenitos arcoseanos em direção ao topo (Lima, 2005).

Apresenta até 100 m de espessura segundo Iglesias e Uhlein (2009) na região da Serra do Jaíba, Norte de Minas Gerais. Na área mapeada da folha de Presidente Olegário, noroeste de Minas Gerais, possui 200 m de espessura (Fragoso et al., 2011). Nesta formação, os dados de

datação U-Pb em zircão ígneo de camada de tufo vulcânico em $520,2 \pm 5,3$ Ma foram obtidos por Moreira et al. (2020).

- Formação Três Marias

Esta unidade é composta por siltitos e arcóseos verde-escuros (Dardenne, 1978) geralmente concordantes com os siltitos subjacentes e, em algumas partes da bacia, sobrepõe-se de forma discordante aos siltitos e folhelhos da Formação Serra da Saudade. Os arenitos arcoseanos são de médio a grosso e apresentam estratificação cruzada de pequeno a médio porte (Iglesias e Uhlein, 2009) quando são de ambiente fluvial. Apresentam também estratificação cruzada tangencial ao topo e base além de estratificação cruzada tipo hummocky quando são de ambientes deltaico e de plataforma, respectivamente (Chiavegatto, 1992).

Essa unidade representa a última etapa de sedimentação do Grupo Bambuí preservada. É marcada pelo forte aporte de sedimentos, que indica a ocorrência de um evento regressivo de preenchimento da bacia. Neste contexto, arenitos com uma variedade de matriz pelítica e concentração de feldspatos foram depositados. Baixa maturidade mineralógica e textural indicam deposição rápida próximo à área de origem (Fragoso et al., 2011). Segundo Chiavegatto (1992), a Formação Três Marias registra deposição em ambiente marinho raso a fluvial e corresponde ao assoreamento final da bacia do tipo foreland (Fragoso et al., 2011). Estudos de proveniência sedimentar (Chiavegatto 1992, Alkmim e Martins-Neto, 2001) indicam uma contribuição da Faixa Araçuaí para a porção superior da formação (Paula-Santos e Babinski, 2018, Tavares et al. 2020; Rossi et al. 2020).

3.2.1. Arcabouço estratigráfico do Grupo Bambuí

A definição do arcabouço estratigráfico do Grupo Bambuí apresenta pequenas divergências, visto que não existe uma metodologia única da Estratigrafia de Sequências aplicada nos trabalhos já realizados. No geral, as unidades siliciclásticas finas (Formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade) marcam episódios transgressivos regionais nesta bacia. Dardenne (1981) definiu três grandes ciclos (megaciclos) de raseamento para o topo (Formação Sete Lagoas, Formação Serra de Santa Helena para Formação Lagoa do Jacaré, Formação Serra da Saudade para Formação Três Marias), reconhecidos por Martins-Neto (2009). Martins-Neto

(2009) e Reis e Alkmim (2015) apresentaram arcabouço estratigráfico com quatro sequências de raseamento ascendente de 2ª ordem para o Grupo Bambuí, inspirados pelas definições litoestratigráficas de Costa e Branco (1961), Braun (1968) e Dardenne (1978, 1981).

Martins e Lemos (2007) apresentou trabalho pioneiro usando conceitos mais modernos da Estratigrafia de Sequências à época, apoiado em dados sismoestratigráficos. Definiram quatro sequências deposicionais de 3ª ordem para o grupo, separadas por discordâncias marcadas por descontinuidades faciológicas e fortes quebras isotópicas, que compõem a Megassequência São Francisco, intervalo litoestratigráfico relativo ao Grupo Bambuí: marinha glacial (sequência 1); rampa carbonática distalmente escarpada (sequência 2); rampa homoclinal estaqueada com sedimentação mista carbonática-siliciclástica (sequência 3); e plataforma marinha rasa siliciclástica (sequência 4).

Mais recentemente, outros trabalhos foram realizados a fim de definir o arcabouço estratigráfico em diversos setores da Bacia do São Francisco em toda a Megassequência homônima ou em intervalos isolados, como Reis e Suss (2016), Perrella et al. (2017), Caetano-Filho et al. (2019) e DaSilva et al. (2022). Uhlein et al. (2017) definiram 5 sequências transgressivas-regressivas de 2ª ordem no setor leste de ocorrência do Grupo Bambuí em toda sua sucessão.

3.3. Formação Lagoa do Jacaré

Apesar de existirem alguns trabalhos de dissertação e de graduação mais recentes na Formação Lagoa do Jacaré (Reis, 2013; Cunha, 2015; Santos, 2018; Neves, 2020; Tito, 2020), o registro de trabalhos de detalhe publicados em revistas e/ou periódicos que tratem exclusivamente desta formação é escasso. Muitos dos trabalhos publicados sobre o Grupo Bambuí tratam esta unidade de forma secundária, sendo a maioria sobre as formações Sete Lagoas ou Três Marias. Em 2013, alguns trabalhos de graduação foram importantes pois contribuíram para o mapeamento da unidade na parte norte da bacia, produzindo mapas geológicos importantes, que compuseram projetos regionais de mapeamento para a CODEMIG (Freitas e Júnior, 2013; Pereira e Batista, 2013; Pacheco e Magalhães, 2013; Oliveira et al. 2013; Joncew e Vasconcelos, 2013) e deram suporte a trabalhos de detalhe posteriores.

Reis e Suss (2016) detalharam fácies da Formação Lagoa do Jacaré em um furo de sondagem da região do Alto de Sete Lagoas. Uhlein et al. (2019) levantaram um perfil na região sul do Alto de Januária no qual detalharam algumas fácies desta mesma formação. Cabe destacar também o importante detalhamento pioneiro dos microbialitos e estromatólitos feito por Santos et al. (2018) nas regiões sul e central da bacia Bambuí, além dos recentes trabalhos de Freitas et al. (2021), Moura et al. (2022) e Dantas et al. (2022), que focaram exclusivamente nas rochas da Formação Lagoa do Jacaré e suas particularidades texturais, faciológicas e geoquímicas.

Nos últimos anos, outros trabalhos de graduação com análises de fácies da formação no setor norte da bacia foram produzidos, a exemplo de Tito (2020) e Neves (2020), além de dados geoquímicos de C, O e Sr que foram levantados regionalmente por Cunha (2015).

3.4. Eventos Glaciais neoproterozoicos

Rochas depositadas na Bacia do São Francisco no Neoproterozóico registram um evento glacial global conhecido como Snowball Earth (Hoffman et al., 1998). Na região, essa sequência é representada pela Formação Jequitaí, que compreende depósitos glaciogênicos, diamictitos, arenitos e raros pelitos, que apresenta espessura média de 100 m. Recobre em discordância rochas graníticas do Cráton do São Francisco e rochas mesoproterozóicas do Supergrupo Espinhaço e Grupo Paranoá (Uhlein et al., 2004 e Uhlein et al., 2011). Os diamictitos são compostos por clastos angulares variados de quartzito, arcóseo, granito e dolomito, dispersos em uma matriz síltico-argilosa (Karfunkel e Hoppe, 1988), e sua origem é interpretada como fluxo gravitacional em ambiente glacio-marinho (Uhlein et al. 2004, Uhlein et al., 2011a). Estes diamictitos apresentam afloramentos importantes na região da Serra da Água Fria, próximo à Jequitaí, como descrito por Isotta et al. (1969), nos quais estes autores descreveram, pela primeira vez, pavimentos estriados formados pela ação do gelo.

De acordo com Kaufman et al. (1997), valores negativos de $\delta^{13}\text{C}$ são registrados em carbonatos de capa sobrepostos aos diamictitos das glaciações Sturtiana e Marinoana ao redor do globo. Com os avanços dos estudos nestes intervalos, algumas características próprias de cada carbonato de capa foram definidas. Na Bacia do São Francisco, as discussões sobre a idade desse evento de glaciação na base do grupo têm sido intensas ao longo dos anos, divergindo se

é um evento Sturtiano (Alvarenga et al., 2007; Babinski et al., 2007; Vieira et al., 2007) ou um evento Marinoano (Caxito et al., 2012; Alvarenga et al., 2014). Recentemente, um grande acervo de dados sedimentológicos, geoquímicos e estratigráficos de diversos autores como por exemplo Perrella et al. (2017), Caxito et al. (2018), Rossi et al. (2020) e Caxito et al. (2021) confirmam a hipótese de uma glaciação marinoana como proposta por Caxito et al. (2012) ou ainda mais jovem como proposto por Lima (2011). Nesta linha, fósseis de *Cloudina* (Warren et al., 2014) descobertos na parte média da Fm. Sete Lagoas restringem sua idade aos estágios finais do Ediacarano, em torno de 550-542 Ma, ou seja, mais próximo do evento da glaciação Gaskiers, deixando em aberto possíveis incompatibilidades nas propostas levantadas até o momento.

4. ARTIGO 1 – PUBLICADO EM 2022 NO BRAZILIAN JOURNAL OF GEOLOGY

Neste capítulo, é apresentado o artigo publicado no periódico internacional *Brazilian Journal of Geology*, em seu número 1, do volume 52. Neste artigo, são apresentados e discutidos os dados geoquímicos e estratigráficos obtidos no afloramento da Pedreira GMD, no município de Paraopeba, Minas Gerais. As referências estão citadas dentro do texto.

ARTICLE

<https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200135>



Carbonate storm deposits and C, O isotopes of the Lagoa do Jacaré Formation (Ediacaran) in the Paraopeba area, Bambuí Group, Brazil

Marcio Vinicius Santana Dantas^{1,2*} , Alexandre Uhlein¹ , Gabriel Jubé Uhlein¹ , Alex Rodrigues de Freitas¹ , Thaís Keuffer Mendonça¹ , José Arthur Oliveira Santos² , Samuel Amaral Moura Silva¹

Abstract

A section investigated in the region of Paraopeba, Minas Gerais, provided detailed sedimentologic, stratigraphic and chemostratigraphic data from the Ediacaran Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, Southeast Brazil. This information allowed interpretation of tempestite facies in transgressive-regressive cycles, reinforcing the previously proposed storm-influenced sedimentation model and clarifying how it is associated with unusually high C-isotope values related to the Middle Bambuí Excursion (MIBE). Facies analysis of nine lithofacies identified at the GMD quarry based on field and petrographic descriptions showed distal tempestite facies grading upwards to a shallower, oncoidal/ooidal carbonate marine environment, then to basinal shales. The entire succession comprises a low-order transgressive hemicycle, recording the transition from a storm-influenced carbonate ramp to a siliciclastic-dominated platform. Chemostratigraphic data yielded high $\delta^{13}\text{C}$ values ranging between +11.11‰ and +13.94‰. Our data contribute to the revision of the previously proposed interpretation and as well as to the understanding of paleoenvironmental conditions and C isotope signatures across the MIBE, near the Ediacaran-Cambrian boundary in the Bambuí Basin.

KEYWORDS: Bambuí Group; Lagoa do Jacaré Formation; stratigraphy; chemostratigraphy; ediacaran.

INTRODUCTION

The Bambuí Group is one of the most researched Neoproterozoic basins worldwide, representing the main cover of the São Francisco craton in central Brazil. Important studies have been conducted in the last few years, mainly due to its highly positive C excursion, previously described as MIBE (Middle Bambuí positive Excursion) by Uhlein *et al.* (2019), which can reach $\delta^{13}\text{C}$ values as high as +15‰ (Martins and Lemos 2007, Santana 2011, Reis 2013, Paula-Santos *et al.* 2015, Hippert *et al.* 2019, Cui *et al.* 2020, Caetano-Filho *et al.* 2021). More and more studies are being performed on the cause behind these high values and it is currently hypothesized that a local carbon cycle anomaly triggered by methane emissions to the atmosphere overtook such $\delta^{13}\text{C}$ positive anomaly (Cui *et al.* 2020, Caetano-Filho *et al.* 2021). Therefore, it is a

primary necessity to properly characterize the stratigraphic patterns and depositional settings generated in this epicontinental basin with such a unique biochemical condition. However, there is a historical lack of detailed sedimentological and stratigraphic investigations on the other units, mainly the Lagoa do Jacaré Formation.

The Bambuí Group is also an important succession since its geological record contributes to the understanding of the Neoproterozoic glaciation events (Snowball Earth of Hoffman *et al.* 1998), the fragmentation of Rodinia and amalgamation of Gondwana supercontinents (Condie 2016), as well as the evolution of Ediacaran marine environments (Johnston *et al.* 2012, Li *et al.* 2016). Many authors have been worked with C, O, Sr and S isotopes and lithochemical data for years, providing insights on the evolution of this neoproterozoic succession (Alvarenga *et al.* 2007, Babinski *et al.* 2007, Sial *et al.* 2009, Caxito *et al.* 2012, Vieira *et al.* 2015, Kuchenbecker *et al.* 2016, Sial *et al.* 2016, Paula-Santos *et al.* 2017, Uhlein *et al.* 2019 among others), especially aimed in the cap carbonate succession of the Sete Lagoas Formation.

In this way, we present detailed sedimentological and stratigraphic data that serve as a basis for carbon and oxygen isotope discussion of an outcrop in the region of Paraopeba, central Minas Gerais, Brazil (Fig. 1). Carbonate lithofacies are also present and discussed along with field, well log, and isotope data, contributing to the understanding of the processes involved in the deposition of the Lagoa do Jacaré carbonates

¹Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Centro de Pesquisas Professor Manoel Teixeira da Costa, Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brazil. E-mails: marcio_ufs08@hotmail.com, aulin@ufmg.br, guhlein@gmail.com, lecaorf@gmail.com, thaismendonca@gmail.com, amaralms.samuel@gmail.com

²PROGEOLOGIA Laboratory, Núcleo de Competência em Petróleo e Gás de Sergipe, Universidade Federal de Sergipe - São Cristóvão (SE), Brazil. E-mail: arthur.geol@hotmail.com

*Corresponding author.



© 2022 The authors. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons license.

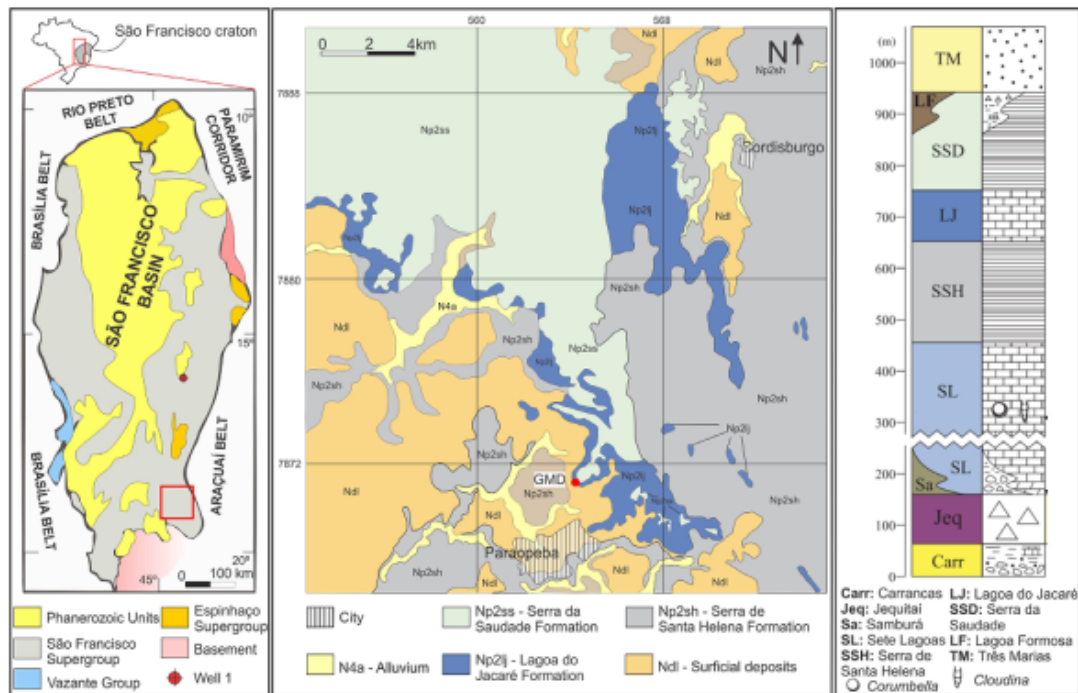


Figure 1. Geological map of the studied area and general stratigraphic column of the Bambuí Group. Based on the Sete Lagoas geological map by Tuller (2010) and Alkmim and Martins-Neto (2001). Stratigraphic chart from Uhlein et al. (2017).

as well as proposing new interpretations to what is currently considered.

Geological settings of the São Francisco Basin and Bambuí Group

The Bambuí Group corresponds to the post-glacial sequence of the São Francisco Supergroup (Megasequence by Martins and Lemos 2007). It is limited by two orogens or fold-thrust belts: the Brasília Belt to the west and the Araçuaí Belt to the east (Dardenne 2000, Zalán and Romeiro-Silva 2007, Reis and Alkmim 2015). The Bambuí Group comprises carbonate rocks intercalated with shales and sandstones deposited in a foreland type basin (Dardenne 2000, Martins-Neto et al. 2001, Coelho et al. 2008). Its role as a foreland basin during the rising of the Brasília Belt (650-600 Ma) during the Brasiliano orogenic event (Castro and Dardenne 2000, Dardenne 2000, Martins-Neto et al. 2001, Rodrigues 2008, Pimentel et al. 2011, Reis et al. 2017, Uhlein et al. 2017) is still discussed, even though recent geochronological data claims much younger ages (Warren et al. 2014, Paula-Santos et al. 2015, Moreira et al. 2020). Alkmim and Martins-Neto (2001) divided the Bambuí Basin in three sectors or structural domains: western, where the rocks yield to the influence of the Brasília Belt tectonics and present folds and thrusts; eastern domain, with folds and thrusts influenced by the Araçuaí Belt; and central domain, where the layers are mainly undeformed.

The Bambuí Group represents an Ediacaran-Cambrian succession deposited in marine environments at the base, grading upward to a fluvial-deltaic-marine environment at the top (Martins and Lemos 2007, Zalán and Romeiro-Silva 2007,

Alvarenga et al. 2012, Paula-Santos et al. 2015, Uhlein et al. 2019, Moreira et al. 2020). It represents a mixed carbonate-siliciclastic sedimentation deposited by clear transgressive (shales) and regressive (carbonate rocks) cycles (Dardenne 1978, Martins and Lemos 2007, Alkmim and Martins-Neto 2012). Its lithostratigraphy is divided in six formations according to Dardenne (1978, 2000): Jequitai Formation, mainly formed by diamictites, rare sandstones and rhythmites; Sete Lagoas Formation, composed of a succession of dolomites and carbonates; Serra de Santa Helena Formation, presenting shales and siltstones with carbonate lenses; Lagoa do Jacaré Formation, alternating dark carbonates (sometimes ooidal) with siltstones and marls; Serra da Saudade Formation, composed of shales, sandstones and green claystones; Três Marias Formation, presenting arkosic sandstones and siltstones. Regionally, from the central basin areas to the eastern sector, the Lagoa do Jacaré Formation outcrops as sparse occurrences (Fig. 1). According to Dardenne (1978), it is composed of ooidal and pisoidal carbonate lenses, fetid when broken apart, usually presenting storm-influenced sedimentary structures, intercalated with marl, sandstone and siltstones. Microbialites also occur (Fragoso et al. 2011, Uhlein et al. 2019) in sparse outcrops. The main depositional environment of the Lagoa do Jacaré Formation is interpreted as shallow marine, influenced by tidal waves (fair and storm weather) and currents (Martins and Lemos 2007, Reis and Suss 2016, Uhlein et al. 2019). More recently, Freitas et al. (2021) has detailed the lithofacies and depositional model of the Lagoa do Jacaré Fm. in an outcrop located at the central part of the basin.

Several attempts to define its stratigraphic framework were made since Dardenne (1978). Using seismic and well logs, Martins and Lemos (2007) defined four 3rd-order depositional sequences separated by unconformities marked by faciological discontinuities and strong isotopic breaks that comprise the São Francisco Megasequence, described as following: Glacial marine (sequence 1- Jequitai Formation); progradational distal steepened carbonate ramp (sequence 2- Sete Lagoas Fm.); carbonate-siliciclastic homoclinal ramp (sequence 3- Serra de Santa Helena Fm., Lagoa do Jacaré Fm.); and mainly siliciclastic shallow marine progradational platform (sequence 4- Serra da Saudade Fm. and Três Marias Fm.). More recently, Reis *et al.* (2013) and Uhlein *et al.* (2017) presented 2nd-order stratigraphic cycles for the Bambuí Group sedimentary succession using different methods. The former recognized four 2nd-order shallowing upward sequences, while the latter recognized five 2nd-order transgressive-regressive sequences.

Concerning isotope geochemistry, since the mid 2000's, many isotopic data had been gathered in different parts of the basin, as mentioned above, in order to correlate its deposition with the Marinoan or Sturtian glaciations (Babinski *et al.* 2007), in addition to the better understanding of its evolution during the boundary between Neoproterozoic and Cambrian (Santos *et al.* 2004, Alvarenga *et al.* 2012). Currently, it is well known that the cap carbonate from the base of the group starts with negative values of $\delta^{13}\text{C}$ (Caxito *et al.* 2012, Paula-Santos *et al.* 2015) in the order of -4,5‰, grading upward to extremely positive values at the top of Sete Lagoas Formation (+8‰, +10‰) and in the Lagoa do Jacaré Formation (+14‰, +15‰) (Iyer *et al.* 1995, Santos *et al.* 2000, Uhlein *et al.* 2017). The causes for this isotopic behavior are under investigation but may correspond to a regional rather than global carbon cycle anomaly (Uhlein *et al.* 2019, Cui *et al.* 2020, Caetano-Filho *et al.* 2021).

Attempts of dating the Bambuí Group started back in the 1980's using different methods (Cloud and Dardenne 1973, Cordani *et al.* 1978, Parenti-Couto *et al.* 1981). In the last 20 years, much of the discussion spun around the question of whether the Bambuí Group was the aftermath of the early Cryogenian (Sturtian) or late Cryogenian (Marinoan) glaciations (e.g., Alvarenga *et al.* 2007, Caxito *et al.* 2012). More recently, geochronological and paleontological studies concerning the depositional age of the Bambuí suggest a depositional age spanning through the Ediacaran and Cambrian periods (Warren *et al.* 2014, Paula-Santos *et al.* 2015, Uhlein *et al.* 2017, 2019, Moreira *et al.* 2020).

METHODS

Fieldwork campaigns were carried in a disabled quarry (named GMD; location 564131.00/7871233.00 UTM 23K) in the vicinities of Paraopeba, central Minas Gerais (Fig. 1). We described a 125 m-thick vertical composite section at the location using standard field methodology description and yielding detailed sedimentological and stratigraphic data (Figs. 2 and 3). Twenty-nine (29) samples were collected in order to perform C and O isotopic analysis. We also made

23 thin sections of the main intervals. The lithofacies were described according to the Dunham (1962) and Embry and Klovan (1971) classifications and the results are in accordance with Freitas *et al.* (2021). Sequence stratigraphy was described following concepts defined by Embry and Johannessen (1993) and Zecchin and Catuneanu (2017). We interpreted two GPR profiles collected with a 160 MHz frequency antenna using the Mala Ground Explorer. They were set perpendicular and longitudinal to the outcrop in order to identify the different geometries of the layers. Data processing using the ReflexW software comprised time-zero adjustment, background removal, band-pass frequency filters and gain equalization.

Isotopes analyses were performed at NEG-LABISE in the Universidade Federal de Pernambuco, according to the following method: 20 mg of powdered sample was used for the extraction of CO_2 gas. The powder reacted with the orthophosphoric acid (H_3PO_4) at 25°C to release CO_2 . The gas was then analyzed in a Thermofinnigan Delta V Advantage mass spectrometer and the results were expressed in δ per mil (‰), normalized to the VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) e V-SMOW standards for $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ respectively, with precision higher than $\pm 0,1\%$.

RESULTS

Facies and stratigraphy

The composite vertical profile is composed of two vertical profiles (Figs. 2 and 3): one in detail for better understanding of the facies occurrence inside the quarry (GMD quarry, 26 m thick) and another (125 m thick) in the vicinities that encompass the former, therefore presenting a thicker interval of the Lagoa do Jacaré Formation. In general, the GMD quarry is mainly composed of carbonate breccias intercalated with finer facies such as grainstone, wackestone, mudstone, and siltstone (Fig. 4). The breccias generally present a lenticular geometry and erosive base and are composed of intraclasts of mudstone with diverse shapes and sizes, oriented or chaotically distributed (Fig. 4B). The bed thickness ranges laterally from 5 to 20 cm, showing grading bedding, tabular cross-stratification and massive structures. Grey to dark grey, fine- to coarse-grained grainstone beds (up to 20 cm-thick) are recurrent facies that present hummocky cross-stratification (HCS) (Fig. 4F), planar and trough cross-lamination, planar cross-stratification and wave ripples, likely deposited by oscillatory, unidirectional and combined flows (Fig. 4D). Some grainstones may present few mudstone intraclasts. Sparse dark grey massive siltstone with parallel lamination and wackestone with syneresis cracks (Fig. 4C) occur between grainstones and breccias. Toward the top and completing the composite section, there is an increase in pisolitic-oncoidal rudstone (Figs. 4A and 4E), fine sandstone and mudrock beds. A detailed description of the lithofacies and their sedimentary structures can be found in Table 1 and illustrated in Figure 4.

GPR profile interpretations have provided results on the depositional geometry of lithofacies (Fig. 5), an important

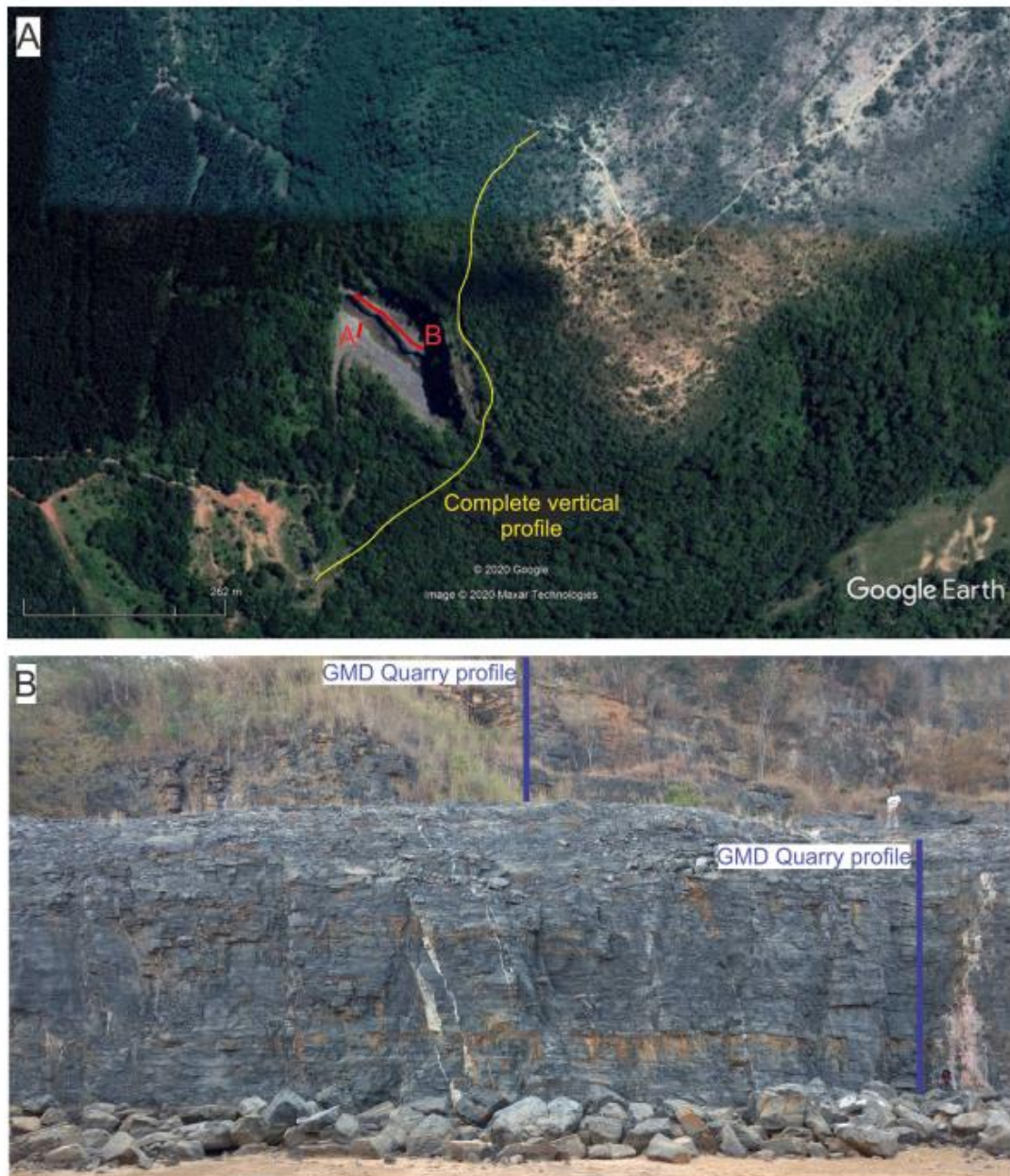


Figure 2. The GMD quarry: (A) Google Earth image presenting the location of the GPR profiles in red and the trail of the surrounding profile in yellow; (B) location of the detailed vertical lithological profile inside the quarry (blue lines).

aspect to unveil depositional systems. A diagnostic geometry identified is the progradational pattern of the radarfacies, as the hummocky and sigmoidal types seen in profile B in NW-SE direction (see location of the profiles in Fig. 2). They represent the migration of large wave ripples in the offshore/shoreface transitional environment during storm events. From the direction of the GPR profile B, cross-stratification structures migrate to SE. In the N-S direction, the main radarfacies is the parallel stratification, as seen in profile A, with the beds showing great lateral continuity, and in accordance with field observations. Those radarfacies are related to low energy events,

such as deposition by suspension in the mid and outer ramp after storm events.

Petrographic analysis has provided detailed descriptions of the carbonate lithofacies and consequently the differentiation of the main components and identification of major diagenetic features (Fig. 6). We agree with the lithofacies proposed by Freitas *et al.* (2021) at the first part of the GMD outcrop and extend it to the entire section, coupled with new ones. We briefly present their characteristics as follow: main allochemical components are micro-oncoids (Fig. 6C), oncoids and ooids, present in oncoidal-oidal intraclastic grainstone (oiG).

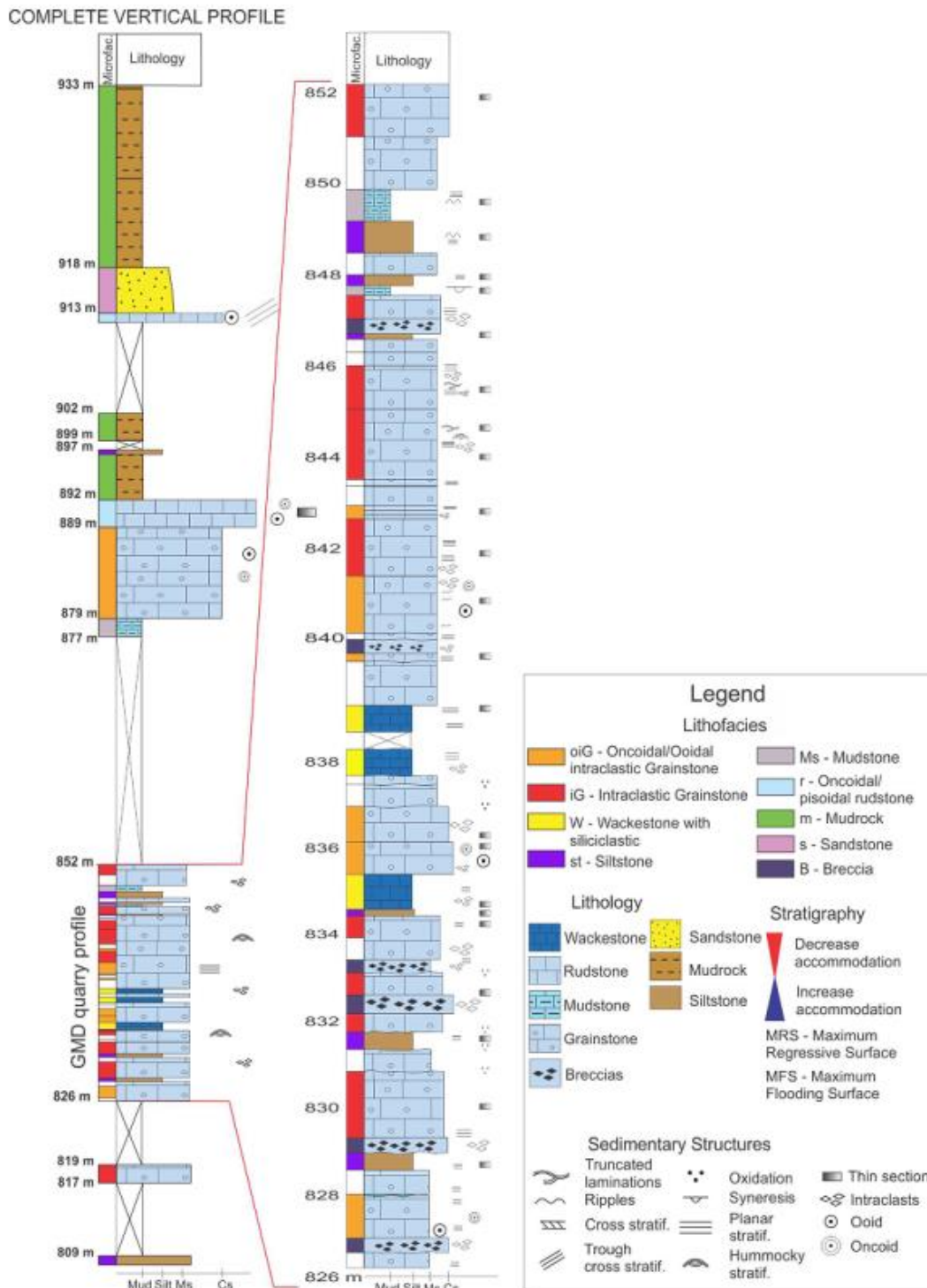


Figure 3. Vertical profiles of the GMD quarry and its surroundings (125 m-thick) presenting the main sedimentary structures, lithologies and lithofacies interpreted. Symbol description can be found in Fig. 10.

The intraclastic grainstone (iG) has similar textural aspects to oiG without significant coated grains. Instead, intraclasts are up to 2 mm, making up to 50% of the allochemical components and are often micritized. Oncoidal-pisoidal rudstone (r) has pisoids and oncoids as main components, with predominantly

equant calcite cement in a loose packing. Wackestone with siliciclastic extraclasts (W) (Fig. 6D) and mudstones (Fig. 6E) (Ms) are the finest grained lithofacies. A distinct characteristic of the GMD quarry is the presence of siliciclastic content in all lithofacies, even in the carbonate facies. Siltstone (st)

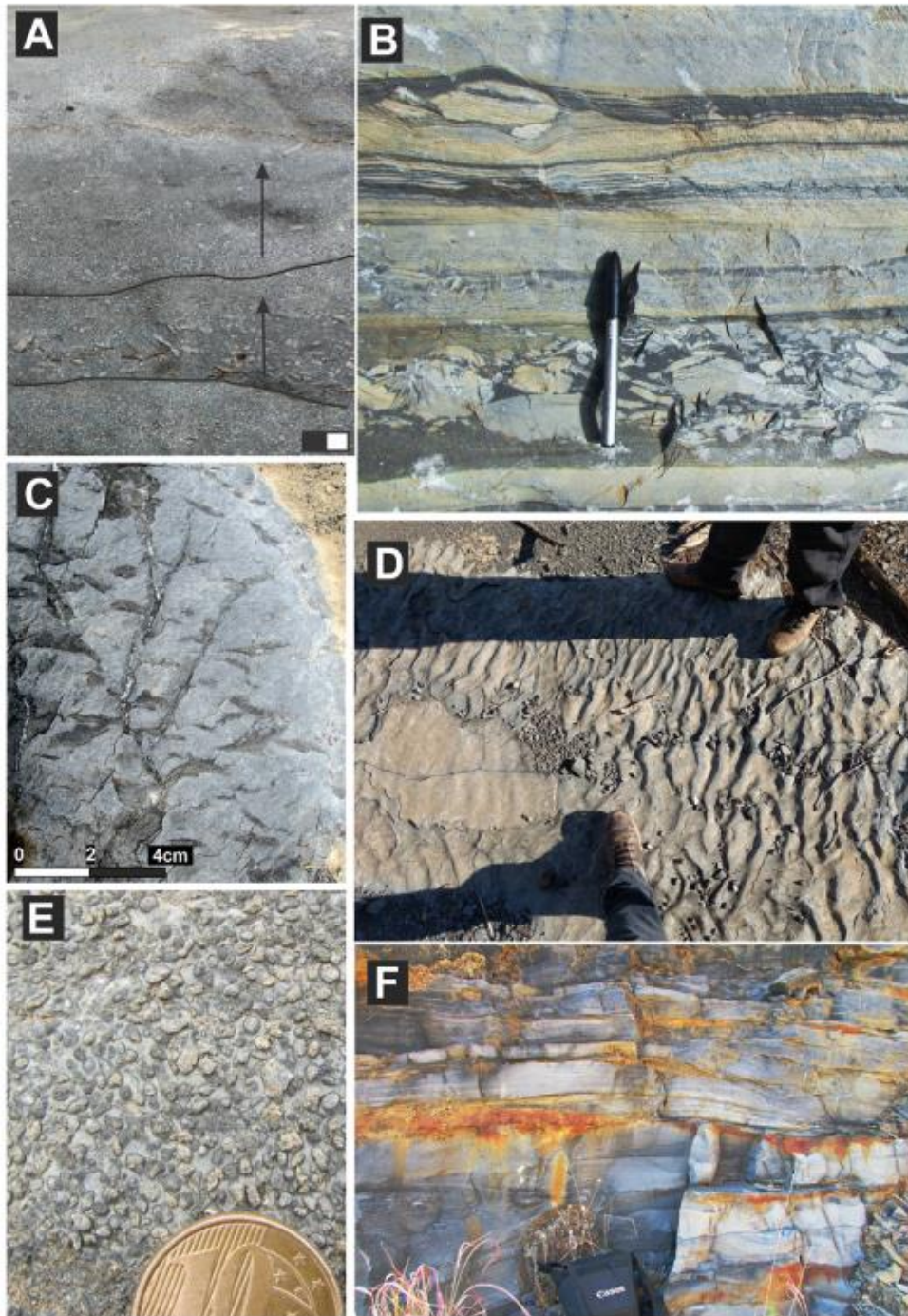


Figure 4. Main lithofacies and their sedimentary structures in the GMD quarry. (A) Detail of oncolidal/oidal intraclastic grainstone with erosive contacts and graded beds. (B) Non-oriented, normally graded breccias grading up to fine to medium grainstones and siltstones. (C) Syneresis cracks in wackestone. (D) Current ripples in fine to medium grainstone. (E) Detail of oncolidal-pisoidal rudstone. (F) Coarse grainstone with hummocky cross-stratification.

(Fig. 6F) presents more than 50% of siliciclastic grains with some carbonate micrite (< 20%). We described only macroscopic aspects of the breccia (B), as well as the siliciclastic facies, mudrock (m) and sandstone (s) at the top of the section. Detailed lithofacies description can be seen in Table 1.

Diagenetic features were described in order to evaluate possible C and O isotopic alterations. In general terms, early diagenesis plays the most important role in the diagenetic evolution of the carbonates in the GMD quarry. Micritization of intraclasts, ooids, and oncoids is easily observed (red arrows

Table 1. Main lithofacies described in the outcrop of the GMD quarry and surroundings and their interpretation.

Lithofacies	Description	Petrographic aspects	Depositional process	Interpretation
Oncoidal- ooidal intraclastic grainstone (oiG)	Dark grey, massive, laminated, with wave ripple or HCS, laminations and cross stratifications. Lenticular or tabular geometry. Micritized micro-oncoids, oncoids and ooids are present. Cm- to m-thick.	Fine grained (0,076 to 0,32 mm), fine blocky calcite cement (20-70%), ooids/peloids (30-65%), angular to subrounded intraclasts (< 40%), quartz (5-10%) and 1% average of opaque minerals. Some mica can be present. Peloids/ooids and micritized micro-oncoid are 0,14 to 0,35 mm and commonly subrounded to rounded, occasionally presenting "ghosts" of concentric structure. Plane parallel lamination. Micritization and pyritization processes.	Oscillatory or combined flows with high to low energy.	Storm events in mid to outer ramp.
Intraclastic grainstone (iG)	Dark grey, massive, laminated, with wave ripple or HCS, laminations and cross stratifications. Lenticular or tabular geometry. Intraclasts are the main component. Cm- to m-thick.	Commonly laminated, grain size between silt and medium sand (0,028 - 0,35 mm). In general, 40-70% blocky calcite cement content, 10-50% of mudstone intraclasts. Intraclasts are up to 2 mm, angular to subangular, sometimes with elongated shape. Micras are present (< 5%). Ooids and micro-oncoids are rare, poorly preserved.	Oscillatory or combined flows with high to low energy.	Storm events in mid to outer ramp.
Breccia (B)	Intraclasts of mudstone with diverse sizes and shapes oriented or chaotically distributed in a carbonatic matrix. Sharp contact or erosive base. Mainly lenticular geometry.	-	Erosive process. Turbulent and high energy flow.	Storm events in mid to outer ramp.
Wackestone with siliciclastic (W)	Fine, light grey, generally massive, eventually laminated. Intraclasts and siliciclastic grains may be present (< 15%).	Silt to fine grained carbonate with siliciclastic grains. Generally laminated. Carbonate matrix (50-70%), angular to subangular quartz grains (15-50%), mudstone intraclasts (< 15%), opaques (< 15%), white micras (< 5%), rarely clay minerals and feldspar.	Suspension, low energy.	Deposition by suspension and precipitation in protected area or outer ramp.
Mudstone (Ms)	Fine, massive to poorly laminated, rare siliciclastic content (< 10%). Syneresis cracks.	Carbonate rock with 5-10% of siliciclastic content (grains of quartz, mica and opaque minerals).	Suspension, low energy.	Deep marine, outer ramp.
Oncoidal- pisoidal rudstone (r)	Dark grey. Oncoids and pisoids with intraclasts. Tabular cross-stratification. Lenticular geometry.	Oncoids, pisoids, ooids, rare intraclasts, sparry calcite cement predominates.	Unidirectional tractive flow, moderate to low energy.	Sand bars in inner ramp.
Siltstone (st)	Dark grey, massive or plane parallel lamination.	Medium to coarse silt (0,034 - 0,056 mm), laminated. Composed mainly of angular to subangular quartz grain (50-85%), surrounded by carbonate cement, oriented mica, cloritized clay matrix and disperse opaque (5-10%). Few carbonate matrix (< 20%)	Low energy, suspension	Deep marine, outer ramp to basin.
Mudrock (m)	Massive, brown. Fine laminated, with tabular geometry. Cm- to mm-thick beds.	-	Suspension, low energy.	Deep marine sedimentation, outer ramp to basin.
Sandstone (s)	Fine, light brown, massive.	-	High-energy tractive flow	Shoreface to foreshore (?)

in Fig. 6C) and the texture of the grains is altered to a massive, brown colored, sometimes shapeless, different from cement and matrix (Dias-Brito 2017) (Figs. 6B and 6C). When the process is more intense, it transforms the grains into peloids. Fringes around the coated grains are observed in lithofacies

oiG, iG and r (Figs. 6A and 6B). Sparry calcite, equant calcite and drusy cements are second and occasionally third phases of cementation, filling almost all the remaining porosity (Figs. 6B, 6G and 6H). The geopetal feature in Figure 6H presents examples of these cements. Pyrite precipitation is

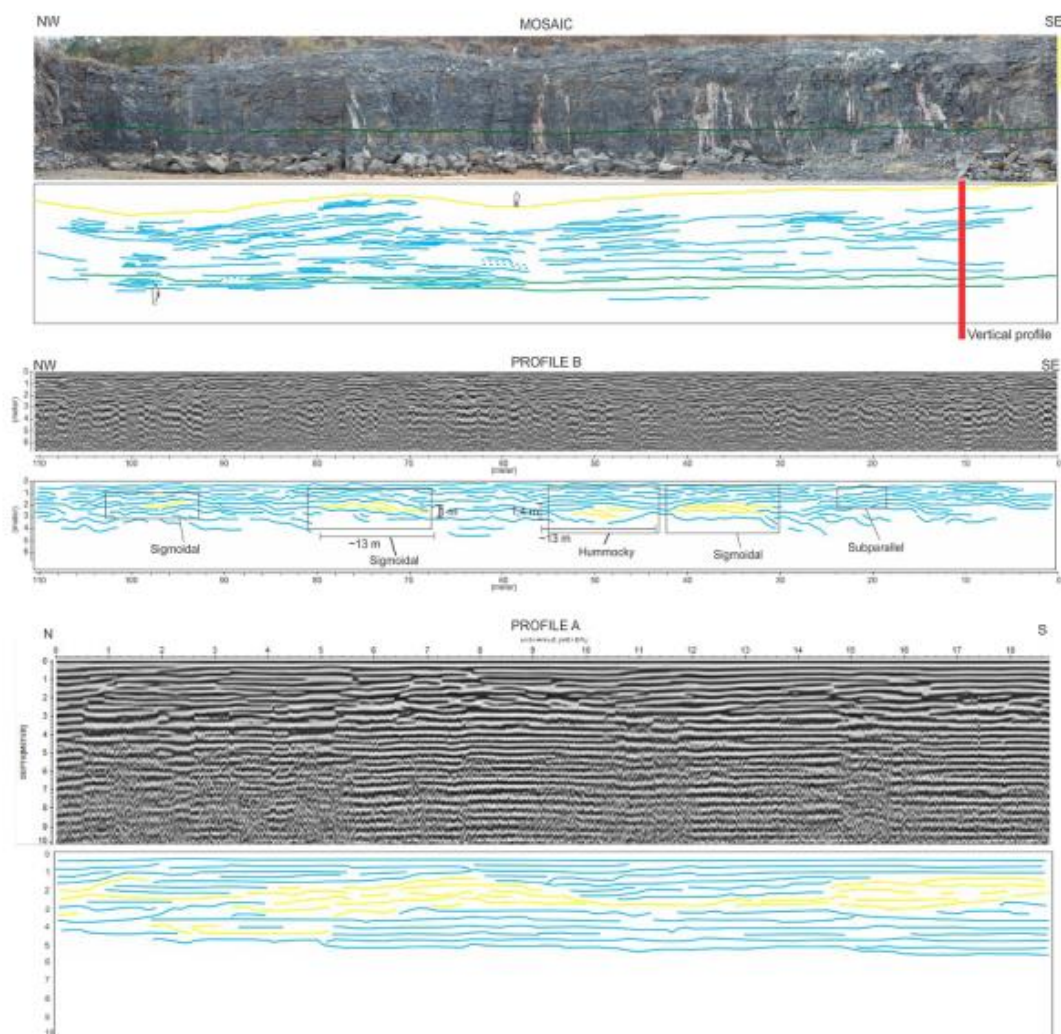


Figure 5. GPR profiles and mosaic of the outcrop and their interpretations. Beds interpreted on the mosaic. In the GPR profiles, note the progradational geometry (yellow lines) to SE in parallel to outcrop profile B and the predominant plane-parallel geometry in the transversal profile A.

also an important diagenetic process, suggesting active sulfate and iron cycles in sediment pores. During early or late diagenesis (Taylor and Macquaker 2000), pyrite substitutes the organic matter present in the micro-oncoids and oncoids, as seen in Figure 6B.

Recrystallization processes occur in burial environment during mesodiagenesis. In Figure 6B we can see recrystallized crystals have been part of an oncoïd and the cement at the same time. With a progressive burial, stylolites and seams are formed via chemical compaction (Fig. 6C) (Flügel 2010). At this level, it is possible to develop sutured grain contact and fracturing of the grains (Fig. 6G). Microfractures also develop during compaction on this phase (Fig. 6E) and dissolution processes are almost inexistent. Only one feature was found and its textural relationship is difficult to understand (Fig. 6I). All characteristics of lithofacies and their interpretations are summarized in Table 1, and some photomicrographs can be found in Figure 6.

DISCUSSION

Facies interpretation and sequence stratigraphy

The lithofacies described in the GMD quarry suggest deposition in a marine carbonate environment, often influenced by storm and fair-weather waves. The widespread high-frequency intercalation of grainstones with hummocky cross-stratification (HCS), truncated laminations, wave ripples and mud intraclasts suggest a mid-ramp sedimentation or lower to middle shoreface deposits (Fig. 3). These facies are recurrently positioned in a predictive arrangement and likely make up episodic storm-deposited beds, often named tempestites (Brenchley 1985, Einsele 1992, Myrow and Southard 1996, Flügel 2010, Pérez-López and Pérez-Valera 2012) (Fig. 7). They represent a class of event deposits, resulting of short-term sedimentation processes that produce characteristic sedimentary signatures (Flügel 2010). Tempestites or storm-deposited beds represent

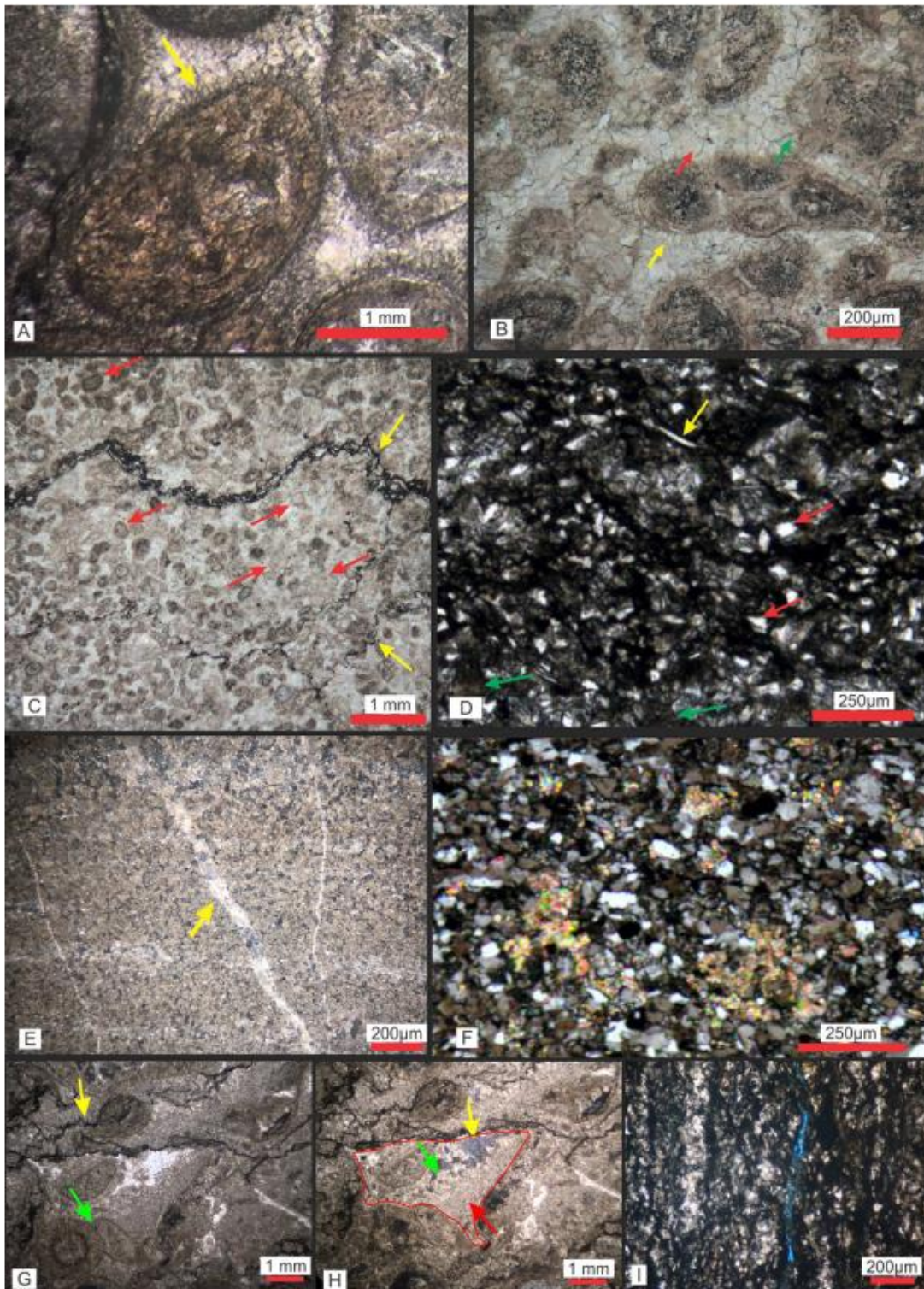


Figure 6. Lithofacies studied in the GMD quarry and main diagenetic features. (A) Detail of a fringe in an oncoidal-pisoidal rudstone. (B) Poor fringe pointed by yellow arrow, equant calcite cement pointed by the red arrow and an example of recrystallization (green arrow) in an oncoidal grainstone. Note pyrite dissemination inside oncoids. (C) Micro-stylolites (yellow arrows) and intraclasts and micritized micro-oncoids pointed by red arrows in an oncoidal/peloidal grainstone. (D) Wackestone with high siliciclastic extraclasts (quartz and mica, red and yellow arrows respectively) content, general view. Matrix pointed by the green arrow; E Mudstone, microfractures in detail. (F) Quartz grains in siltstone with some limestone cement (high birefringence). (G) Sutured contacts and stylolite indicated by green and yellow arrow respectively (PPL). (H) Geopetal feature: recrystallization of matrix, equant calcite and drusy calcite indicated by red, green and yellow arrows respectively (XPL). (I) Micro dissolution feature.

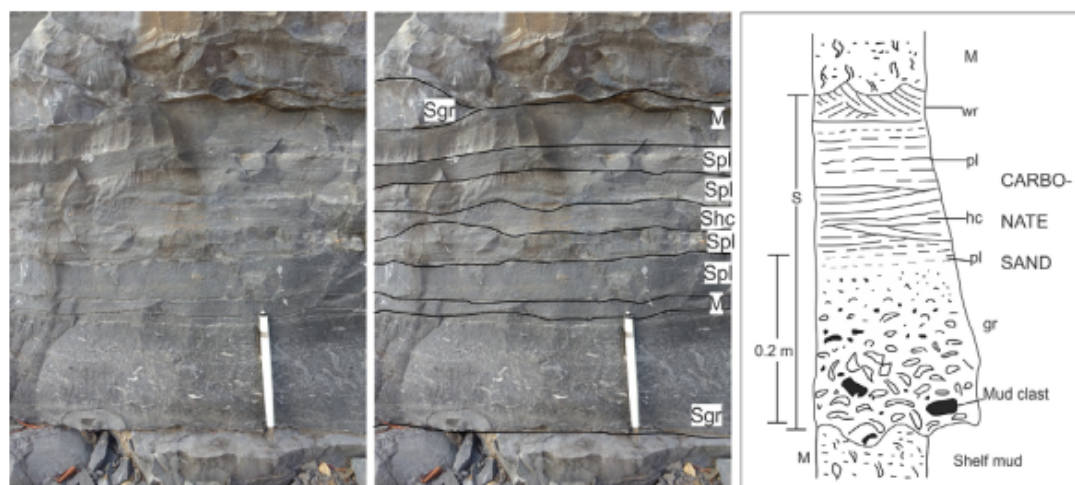


Figure 7. Interpretation of a tempestite cycles that outcrops in the GMD quarry (center image) as described by Einsele (1992) (sketch on the right) resulting of consecutive storms events throughout time. Codes used in the sketch: Wave ripples and wave ripple cross-stratification (Swr) - Low-angle hummocky cross-stratification (Shc) - Parallel lamination and current ripple cross-stratification (Spl) - Graded layer with basal lag deposit (Sgr) - Normal shelf mud, intensely bioturbated (M).

the deposition of carbonate or siliciclastic sediments reworked during successive storm events and deposited across the shelf as the storm decreases in energy. Fining-upward and varying sedimentary structures along successive beds are related to decreasing energy conditions (Aigner 1985). Storm bottom currents, which eroded carbonate sediments from shallower environments, deposited the carbonate grains, mud intraclasts and ooids in the lower to middle shoreface and likely formed a large portion of the beds of the GMD quarry. Some works have detailed the expected structures from storm-dominated sedimentation in carbonate settings (Molina *et al.* 1997, Mohseni and Al-Aasm 2004, Pérez-López and Pérez-Valera 2012). Mud intraclasts (or shells in the Phanerozoic) occur at the base of the bed and are formed during the higher energy moments of the storm; when the waves cause erosion reaching the seabed (Sgr from Einsele 1992 tempestite model showed in Fig. 7). According to Flügel (2010), some erosive structures are difficult to recognize in ancient carbonate facies due to bioturbation (not the case of Precambrian units) and diagenetic overprint. As the storm's energy decreases and the sedimentation continues, this facies grades upward to grainstones with parallel lamination, hummocky cross-stratification, and horizontal wave-ripple lamination (Spl, Shc, Swr in Fig. 7). Finer sediments, such as mudstone and wackestone, deposited by suspension during the lowest energy phases represent the upper part of the tempestite cycle (Einsele 1992, Nichols 2009, Flügel 2010). The record of significant and recurrent wave action on the sea floor and evidence of deposition by decreasing flow energy are good diagnostic markers of tempestites, although care must be taken since the facies in a tempestite bed may vary widely. When the time between storm events is long enough, hardgrounds and/or background sedimentation may occur, developing surfaces with calcite and/or ferric and ferrous iron cementation, as well as the deposition of mudstones with syneresis and siltstones (Fig. 4C). Recent weathering results in oxidation of the hardground layers containing

iron minerals represent a stratigraphic-controlled feature, as seen in some parts of the outcrop (Fig. 2).

Overall, it is possible to correlate each lithofacies described in the GMD quarry to the facies predicted in tempestite intervals. Breccia (B) lithofacies are set at the base of the cycle, deposited by the higher energy conditions of the storm. This facies is related to the erosion process and to the generation and redeposition of cm-sized mudstone intraclasts that constitute the breccia beds. Lithofacies oiG and iG correspond to a waning of the storm and are deposited in the middle part of the tempestite cycle. They comprise stratified grainstones (Shc, Spl, Swr) of intermediate energy with micro intraclasts, micro oncoids and peloids that vary laterally and vertically between each other (Fig. 7). W, s and m represent the top of the tempestites and are related to the low energy (suspension) sedimentation process after the end of each storm event. All interpretations and correlations between theoretical lithofacies and lithofacies are summarized in Figure 8.

This general order of sedimentation can be altered if storm events occur repeatedly, and it is necessary to consider the lateral facies distribution in these cycles. Indeed, it is rare to identify the complete sequence of facies of one tempestite, and the oiG and iG lithofacies (or any other lithofacies) could continue to present one after the other. Pérez-López and Pérez-Valera (2012) observed this process in the Triassic carbonate tempestite where the deposits were composed of coarse-grained basal facies capped by mudstones. This phenomenon is known as cannibalism or amalgamation (Aigner 1985, Einsele 1992), and it occurs when the upper parts of pre-existing thick tempestites are reworked by storms of particularly high erosional capacity. The left image in Figure 7 shows the best tempestite cycle seen in an outcrop and its interpretation in the central image, in comparison with the ideal tempestite defined by Einsele (1992) on the right.

The predominance of each lithofacies in the geological record is a clue to the prevalence of proximal and distal depositional

Tempestite Facies (Einsele, 1992)	Lithofacies (this work)	Components	Structures/ Texture
Sgr - Graded or not graded with basal lag deposit. Erosional base with sole marks (in places bipolar or multi-directional)	Breccias	cm-sized Intraclasts Carbonate cement	Massive or oriented tabular cross-stratification normal grading
Shc - Low angle hummocky cross-stratification	Oncoidal-oidal Grainstone	micritized oncoids oids mm-sized Intraclasts Cement	HCS - Hummocky cross-stratification
Shc - Low angle hummocky cross-stratification	Intraclastic grainstone	mm-sized Intraclasts Cement	HCS - Hummocky cross-stratification
Spl Parallel lamination and current ripple cross-stratification	Wackestone	Rare intraclast Micrite	laminated few intraclasts
Sm/M - Normal or redeposited shelf mud	Mudstone	Micrite	massive syneresis cracks
Sm - redeposited shelf silt	Siltstone	Siliciclastic silt	massive or laminated

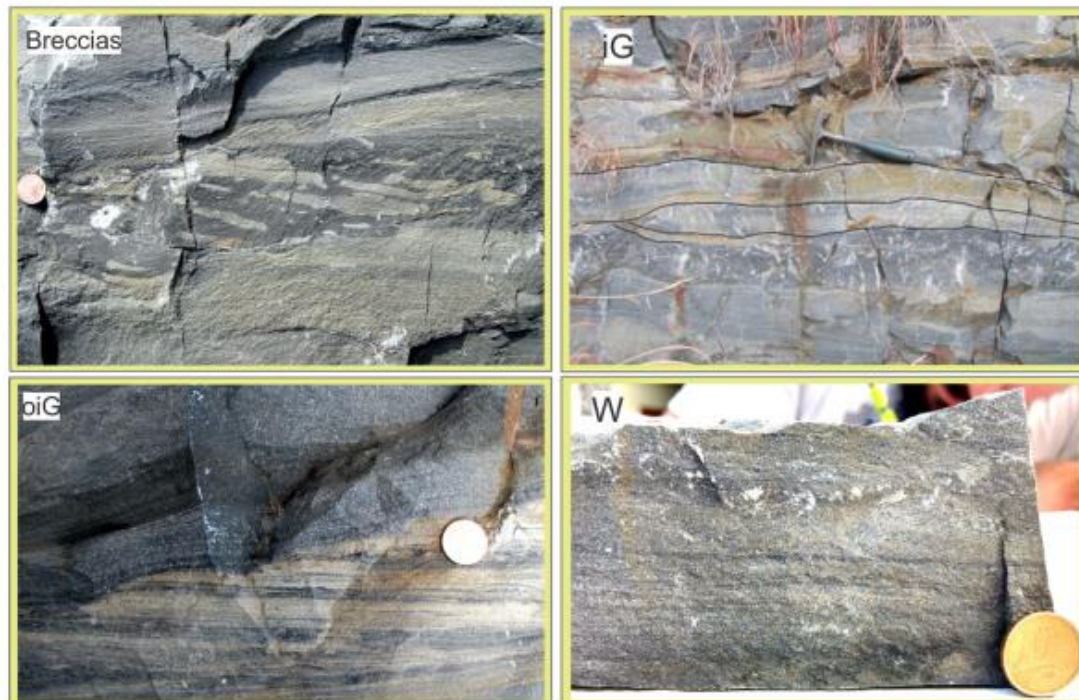


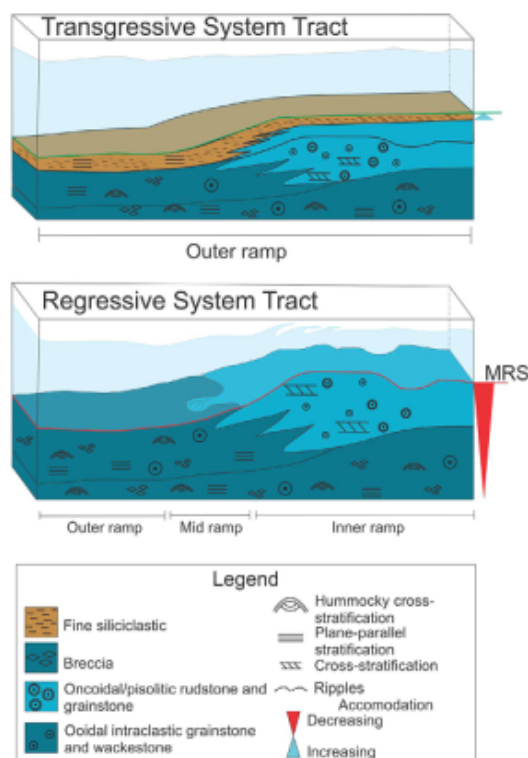
Figure 8. Theoretical tempestite facies correlated to lithofacies described for the Lagoa do Jacaré Formation in the GMD quarry. The most important lithofacies in the outcrop in detail: breccias (B), intraclastic grainstone (iG), oncoidal-oidal grainstone (oiG). Wackestone with siliciclastic representing finer lithofacies.

conditions, important characteristics in order to understand stratigraphic depositional evolution. According to Aigner (1985), Einsele and Seilacher (1991), Molina *et al.* (1997), Mohseni and Al-Aasm (2004), Nichols (2009), Pérez-López and Pérez-Valera (2012) as well as other authors, structures like sharp boundaries, thin layers (1-5 cm), minor differences in composition, high content of lutite facies, localized hummocky cross-stratification, and undulated top of the bed are diagnostic of a distal sedimentation environment (Figs. 4B, 4D and 4F). The lithofacies described in this paper fit the ones presented above and thus suggest that distal tempestite cycles generated in a carbonate ramp (ramp model of Burchette and Wright 1992) were mainly responsible for the deposition of the Lagoa do Jacaré Formation in the GMD quarry.

Carbonates from the middle Bambuí Group were formed in a conspicuously high energy marine environment that likely dominated the entire basin system at slightly different times. Storm-deposited beds are apparently a hallmark of the Lagoa do Jacaré Formation and although storm-influenced depositional facies are also important facies described in the GMD quarry, the upper part of the composite section, until the 913 m mark, presents a thick ooidal intraclastic grainstones and rudstones. They likely represent shoreface deposits in inner ramp, reworked by the action of constant fair-weather waves, intercalated with mudrock and sandstones. These coarser carbonate facies depict a remarkable change in the stratigraphic record, as explained below.

In a sequence stratigraphic context, the lower part of the section, from the base and up to the 892 m-mark, a regressive pattern is interpreted due to the occurrence of repeated tempestite facies capped by a 10 m-thick ooidal-oncoidal grainstone, shown in detail in Figures 3, 9 and 10. In this coarser interval, important changes in lithofacies were described, where ooids with carbonate fringes in a loose packing make up the main allochemical grains, presenting planar cross-stratification and beds with lenticular geometry. These characteristics are related to shallower marine environments (Fig. 9), similar to ooid shoals deposited parallel to the shoreline in the inner ramp, under the action of fair-weather waves (Jones 2010). A maximum regressive surface (MRS) is then positioned at the top of this regressive hemicycle.

Above this interval, the second part of the section has completely changed the depositional context, where fine sediments of likely deep marine environment are deposited. Siliciclastic rocks are common, with thick mudrock and sandstone intercalated with thin ooidal grainstone beds. The significant change from carbonate to a mixed siliciclastic-carbonate sedimentation likely marks the gradual transition from the Lagoa do Jacaré Formation to the Serra da Saudade Formation. The base of the latter is marked by the contact between the fine-grained sandstone bed and the ooidal rudstone in the 913 m-mark. It is possible that this contact is controlled by tectonic and/or climatic changes, working in tandem to change the sea level and control the intercalation between carbonate and siliciclastic inputs. Drier climate phases with lower continental runoff could enable the sedimentation of carbonates in the context of a mixed siliciclastic-carbonate sedimentation, such as the



MRS: maximum regressive surface.

Figure 9. Depositional environment and sequence stratigraphy interpreted to the Lagoa do Jacaré Formation.

Sergipe-Alagoas Basin occurrence, where the sedimentation of encrusting algae and corals right above sandstones and conglomerates is well documented (Falcone 2006, Turbay *et al.* 2013, Dias-Brito and Tibana 2015). The entire interval from the 892 m-mark toward the top, marked at the base by the MRS, can be interpreted as part of the last regional drowning event of the Bambuí Basin that represents the end of the carbonate deposition, as shown in Caxito *et al.* (2018) and Uhlein *et al.* (2019), here described as a transgressive hemicycle.

The two hemicycles described above relate to higher frequency cycles. However, under a lower resolution approach, it is possible to set a single transgressive system tract to the entire section, which expresses the evolution from a mid/outer carbonate ramp represented by the Lagoa do Jacaré Formation to an offshore siliciclastic environment, represented by the Serra da Saudade Fm., as shown in Figure 9.

Geochemistry × depositional environment

In the studied section $\delta^{13}\text{C}$, values ranged from +11.11‰ to +13.94‰, and $\delta^{18}\text{O}$ values ranged from -10.94‰ to -5.94‰, with only three values lower than -10‰, which is considered the limit for primary values (Fölling and Frimmel 2002) (Tab. 2).

Positive or negative correlations between C and O values have been widely used as a tool for the evaluation of post-depositional alteration of carbon isotopes in carbonate rocks, related to meteoric water burial diagenesis coupled with

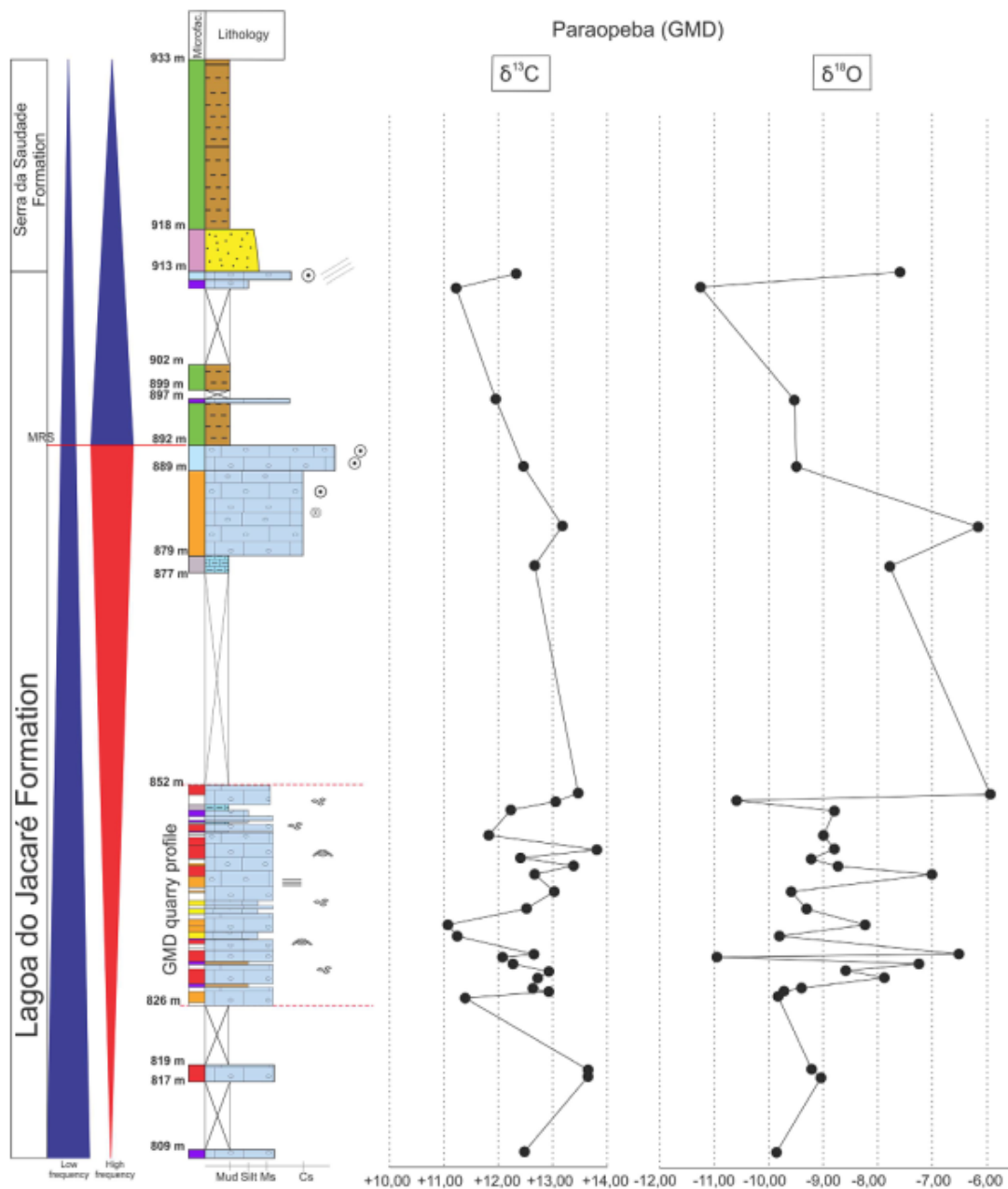


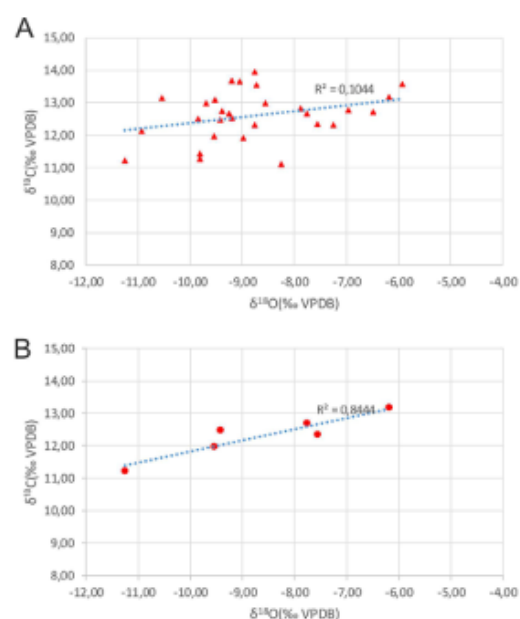
Figure 10. Interpreted composite vertical profile of the GMD quarry and surroundings in Paraopeba area. A regressive hemicycle at the lower part grading to a transgressive hemicycle at the top.

organic matter oxidation (Jacobsen and Kaufman 1999, Pandit *et al.* 2003). Elemental geochemistry is also commonly used to track possible alteration of isotopes, such as Mn/Sr and Mg/Ca ratios versus $\delta^{13}\text{C}$ data (e.g., Cui *et al.* 2018, Uhlein *et al.* 2019). Values obtained from our samples have a scattered distribution in a C and O isotopes cross-plot (Fig. 11), therefore suggesting little to no impact of post-depositional processes regarding this data. The coefficient of determination (R^2) for our entire data set is 0.104, however, if we look carefully, a certain genetic link between C and O isotopes is seen in different parts of the studied section. Samples above

(877-973 m) and below (808-826 m) in the GMD quarry section have a correlation factor of 0.84 and 0.95, respectively, which could suggest possible post-depositional alteration of the isotopic signal. One other option may be a case of subsampling. The main interval of the studied section has 20 samples in 26 m, almost a sample per meter, yielding a R^2 of only 0.05. Considering the upper interval of the section, we collected 6 samples in a 36 m-thick interval, making it one sample per 6 m. Consequently, its R^2 factor rises to 0.84 (Fig. 11). Taking into account these results and those particularities of the diagenetic evolution presented in the previous topic, the parameters

Table 2. C and O results.

Sample	m	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
PP09	809	12.496	-9.842
PP08B	815	13.651	-9.045
PP08A	819	13.679	-9.202
G4-16	826.4	11.43	-9.81
G4-15	827	12.98	-9.7
G4-14	827.8	12.73	-9.39
G4-12	830.1	12.82	-7.88
G4-11	831	12.99	-8.56
G4-9	832.8	12.31	-7.25
G4-8	833.6	12.12	-10.94
G4-7	834.3	12.72	-6.49
G4-4	836	11.26	-9.81
G4-2	837.3	11.11	-8.26
G5-1	839	12.65	-9.26
G5-2	839.6	13.08	-9.53
G5-4	841.9	12.77	-6.96
G5-5	842.9	13.54	-8.73
G5-6	844	12.52	-9.21
G5-7	844.7	13.94	-8.77
G5-11	847.7	11.92	-8.98
G5-14	849.7	12.31	-8.77
G5-15	851	13.14	-10.54
G5-16	852	13.56	-5.94
PP07	877	12.673	-7.767
PP06	881	13.169	-6.185
PP05C	892	12.46	-9.429
PP04A	901	11.957	-9.538
PP03	912	11.203	-11.251
PP02	913	12.329	-7.563

**Figure 11.** Values of C and O isotopes obtained in our samples: all samples in A and samples from 877-973 m interval in B.

already explained, and the similarity of the values with other studies, C and O isotopes from the GMD quarry studied here are likely primary, although some levels may have been lightly altered. From the 826 m to the 852 m-mark, there is a fluctuation of $\delta^{13}\text{C}$ values between +11.4 to +13.9‰. This is likely not linked to post-depositional processes (C and O correlation factor = 0.104; n = 11). Rather, this variation may reflect high-frequency changes in variables that rule the marine carbon cycle, such as the fraction of carbon buried as organic matter, the carbon isotope fractionation during photosynthesis, among others (e.g., Schrag *et al.* 2013, Cui *et al.* 2020).

Our facies descriptions and petrographic characterization show that primary macro and micro carbonate fabrics are well preserved. Due to those reasons, we were able to interpret a depositional setting of lower to middle shoreface frequently reworked by storm and fair-weather waves. Furthermore, the integrity of depositional and mineralogical features corroborates the interpretation that the highly positive $\delta^{13}\text{C}$ values are mainly of primary origin. In light of that, it is unlikely that burial diagenetic fluids interacted significantly with the sediments. Our data also show that the high $\delta^{13}\text{C}$ values occur throughout the section, regardless of sedimentary facies. The tendency of less positive $\delta^{13}\text{C}$ values from the base to the top as well as facies distributions are similar to the Lagoa do Jacaré Formation described in the northern portion of Minas Gerais (Uhlein *et al.* 2019). The GMD quarry carbonates here investigated represent the KM7-14 section of Cui *et al.* (2020) and therefore our novel sedimentologic, stratigraphic and isotopic data are complementary and go in unison toward primary physical and chemical characteristics for the Lagoa do Jacaré Formation and the MIBE.

The extremely high $\delta^{13}\text{C}$ values indicate an environment heavily depleted in ^{12}C in comparison to ^{13}C . In normal marine conditions, a small increase in $\delta^{13}\text{C}$ values may be explained by a high organic matter burial rate, consuming and insulating much of the marine water ^{12}C isotope (Rodrigues and Fauth 2013). However, based on a steady-state model, it is expected that almost 70% of organic carbon is buried in the sediments in order to achieve the highly positive $\delta^{13}\text{C}$ values of the Lagoa do Jacaré Formation (Uhlein *et al.* 2019, Cui *et al.* 2020, Caetano-Filho *et al.* 2021). As a simple comparison, this represents over 3 times the amount (i.e., ca. 20%) of organic carbon burial in the modern oceans. This scenario is unlikely since the carbonates and shales of the Lagoa do Jacaré Formation are lean in organic content (organic content < 0.2%, Uhlein *et al.* 2019, Cui *et al.* 2020) and the organic burial is self-limiting through the production of O_2 (and derived electron acceptors), creating negative feedback through enhanced respiration. Regarding the purported absence of high organic content levels, our up to date understanding of the middle Bambuí interval is limited by inner to outer ramp settings. Organic-rich facies may be present at the basin depocenter, far from the carbonate ramp context, being deposited simultaneously to the shallower carbonatic facies of the Lagoa do Jacaré Formation. As a starting point to this discussion, a well in the Janpovar region drilled by Petra Energia and provided by ANP (Brazilian National Petroleum Agency), in northern

Minas Gerais and 370 km northern of the GMD quarry, has logged the middle Bambuí interval (from the Serra de Santa Helena Formation to the lower Lagoa do Jacaré Formation), showing an extremely radioactive carbonate-shale succession (up to 320° API) (Fig. 12). At this interval, the core samples at the base of the Lagoa do Jacaré Fm. are described as micaceous, lightly calciferous dark grey shale with a high pyrite content. Since uranium is concentrated in organic constituents, black organic-rich shales tend to be more radioactive than most other shales (100° API; e.g., Doveton and Merriam 2004, Ellis and Singer 2008). Thus, the high radioactivity (average 165°API) and core description of this interval (from 550 m to 300 m) fit to likely organic-rich shales and carbonates in the middle Bambuí interval. We understand that this is not a turning point to the interpretation of the highly positive $\delta^{13}\text{C}$ values, but it does suggest hidden basinal organic-rich facies below hundreds of meters of sedimentary rocks in basin distal areas, which must be further explored and eventually considered in future isotope modeling. Therefore, we suggest that a higher organic burial rate may help explaining the MIBE, acting in

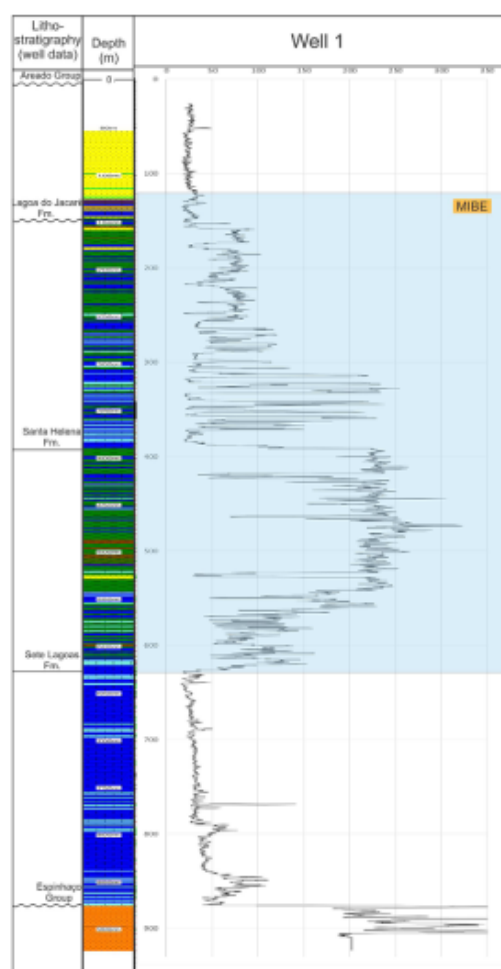


Figure 12. Well 1, located in northern Minas Gerais. The black line represents total gamma-ray in °API.

tandem with water column methanogenesis and reworking of ancient carbonate platforms, as previously suggested by Uhlein *et al.* (2019), Cui *et al.* (2020) and Caetano-Filho *et al.* (2021).

Although it was never investigated in detail in terms of depositional facies, the Lagoa do Jacaré Formation shows features from storm-deposited beds to peritidal microbialites (e.g., Santos *et al.* 2018, Uhlein *et al.* 2019, Freitas *et al.* 2021), depicting a completely structured ancient carbonate ramp that likely covered hundreds of thousands of square kilometers. A restrictive, anoxic, and methanogenic basin during this time is hypothesized by many authors (e.g. Martins and Lemos 2007, Uhlein *et al.* 2019, Cui *et al.* 2020, Caetano-Filho *et al.* 2021) mainly from stable isotopes evidence. The methanogenic basin model from Cui *et al.* (2020) and Caetano-Filho *et al.* (2021) proposes a restricted and likely fully anoxic basin water, in which the methanogenic zone occurs up the water column. From inner ramp to deep basin settings, the produced and exported organic carbon may be subjected to methanogens population.

However, it is expected the development and maintenance of a well-mixed and likely oxic surface water layer that should be an efficient zone of rapid aerobic methane oxidation for a late Ediacaran ramp highly influenced by storm events and yielding oolitic shoals and lagoonal facies. (e.g., Carini *et al.* 2005). The process of methanotrophy, if relevant, would then become a conflict to the model proposed by Cui *et al.* (2020) and Caetano-Filho *et al.* (2021). Thus, it is relevant to the understanding of the MIBE that stratigraphic stacking patterns, facies associations and depositional settings of the shallow and deep facies of the MIBE are properly interpreted and associated to the novel geochemical tools that should be applied in the near future.

CONCLUSIONS

This work provides carbonate facies description, and a chemostratigraphic profile of part of the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, in the region of Paraopeba, central Brazil. Storm-wave sedimentary facies (tempestite cycles) were detailed relating to the occurrence of nine lithofacies in the GMD quarry and surroundings. High-energy micro- and macrofacies were described at the base, grading upward to low energy facies in a storm-dominated carbonate ramp. The occurrence of shallower ooidal facies was also described, grading to deep marine siliciclastic sediments at the top.

Stratigraphic analysis provided the interpretation of two high-frequency hemicycles in a 124 m-thick section, making up a transgressive hemicycle in a lower frequency. This interpretation is in line with the general drowning trend expected within the changes from the Lagoa do Jacaré Formation (carbonate ramp with wave action) to the Serra da Saudade Formation (siliciclastic deep marine).

New $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ isotopic data from an interval exposed in the GMD quarry region was also presented, bringing new light to the previous interpretations of this unit's isotopic signal. Highly positive $\delta^{13}\text{C}$ values are still considered to be caused by a highly restricted marine environment, but well log data

evidence of local high rates of organic matter burial is highlighted. The investigation of similar organic-rich intervals and U content in other well logs is proposed.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal de Sergipe

(UFS) and ANP/Petrobras (Project CAMURES-Diagenese/FUNDEP 5850.0106111.17.9) for funding and releasing data. We also thank the Universidade Federal de Pernambuco and Universidade do Estado do Rio de Janeiro for isotope analyses. MVSD thanks the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for scholarship. The authors also thank anonymous reviewers to comments and suggestions that actually improved the quality of the original manuscript.

ARTICLE INFORMATION

Manuscript ID: 20200135. Received on: 29 DEC 2020. Approved on: 29 NOV 2021.

How to cite this article: Dantas M.V.S., Uhlein A., Uhlein G.J., Freitas A.R., Mendonça T.K., Santos J.A.O., Silva S.A.M. Carbonate storm deposits and C, O isotopes of the Lagoa do Jacaré Formation (Ediacaran) in the Paraopeba area, Bambuí Group, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52(1):e20200135, 2022. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200135>.

M.D. is the leader, therefore wrote the first draft of the manuscript and prepared all figures; G.U. provided main discussions about geochemistry and also detailed English language review. A.U. is the advisor and coordinates the development of the main ideas of the manuscript and writing of regional geology and fieldwork data interpretation. T.K. and A.R. participated in the fieldwork and collecting data, in addition to collaborating in petrographic descriptions and discussions. J.A. made significant contributions to diagenesis evaluation. S.A. contributed to fieldwork campaigning and sample description.

Competing interests: the authors declare no competing interests.

REFERENCES

- Aigner T. 1985. Storm depositional systems. Lecture Notes in Earth Sciences. Berlin: Springer Verlag, 174 pp.
- Alkmim F.F., Martins-Neto M.A. 2001. A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Martins-Neto M.A., Pinto C.P. (Eds.). *Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais*. Belo Horizonte: SBG/MG, p. 9-30.
- Alkmim F.F., Martins-Neto M.A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1):127-139. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>
- Alvarenga C.J.S., Dardenne M.A., Vieira L.C., Martinho C.T., Guimarães E.M., Santos R.V., Santana R.O. 2012. Estratigrafia da borda ocidental da Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 20(1-2):145-164.
- Alvarenga C.J.S., Della Giustina M.E.S., Silva M.G.C., Santos R.V., Gioia S.M.C., Guimarães E.M., Dardenne M.A., Sial A.N., Ferreira V.P. 2007. Variações dos isótopos de C e Sr em carbonatos pré e pós-glaciação Jequitai (Esturiano) na região de Bezerra-Formosa, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4):147-155.
- Babinski M., Vieira L.C., Trindade R.L.F. 2007. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambuí Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. *Terra Nova*, 19(6):401-406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00764.x>
- Brenchley P.J. 1985. Storm influenced sandstone beds. *Modern Geology*, 9:369-396.
- Burchette T.P., Wright V.P. 1992. Carbonate ramp depositional systems. *Sedimentary Geology*, 79(1-4):3-57. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(92\)90003-A](https://doi.org/10.1016/0037-0738(92)90003-A)
- Caetano-Filho S., Sansjofre P., Ader M., Paula-Santos G.M., Guacaneme C., Babinski M., Bedoya-Rueda C., Kuchenbecker M., Reis H.L.S., Trindade R.L.F. 2021. A large epeiric methanogenic Bambuí sea in the core of Gondwana supercontinent? *Geoscience Frontiers*, 12(1):203-218. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.04.005>
- Carini S., Bano N., LeClerc G., Joye S.B. 2005. Aerobic methane oxidation and methanotroph community composition during seasonal stratification in Mono Lake, California (USA). *Environmental Microbiology*, 7(8):1127-1138. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00786.x>
- Castro P.T.A., Dardenne M.A. 2000. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southern boundary of the São Francisco craton, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(3):345-437.
- Caxito F.A., Frei R., Uhlein G.J., Dias T.G., Ártng T.B., Uhlein A. 2018. Multiproxy geochemical and isotope stratigraphy records of a neoproterozoic oxygenation event in the Ediacaran Sete Lagoas cap carbonate, Bambuí Group, Brazil. *Chemical Geology*, 481:119-132. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.007>
- Caxito F.A., Halverson G.P., Uhlein A., Stevenson R., Dias T.G., Uhlein G.J. 2012. Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Research*, 200-203:38-58. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2012.01.005>
- Cloud P., Dardenne M.A. 1973. Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil. *Geological Society of America Bulletin*, 84(5):1673-1676. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1973\)84%3C1673:PAOTBG%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1973)84%3C1673:PAOTBG%3E2.0.CO;2)
- Coelho J.C.C., Martins-Neto M.A., Marinho M.S. 2008. Estilos estruturais e evolução tectônica da porção mineira da bacia proterozoica do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 38(Suppl. 2):149-165.
- Condie K.C. 2016. *Earth as an evolving planetary system*. San Diego: Elsevier, 436 p.
- Cordani U.G., Kawashita K., Thomaz Filho A. 1978. Applicability of the rubidium-strontium method to shales and related rocks. *Studies in Geology*, 6:93-117.
- Cui H., Kaufman A.J., Peng Y., Liu X., Plummer R.E., Lee E.I. 2018. The Neoproterozoic Hüttenberg $\delta^{13}C$ anomaly: Genesis and global implications. *Precambrian Research*, 313:242-262. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.05.024>
- Cui H., Warren L.V., Uhlein G.J., Okubo J., Liu X., Plummer R.E., Baele J., Goderis S., Claeys P., Li F. 2020. Global or local? Constraining the origins of the middle Bambuí carbon cycle anomaly in Brazil. *Precambrian Research*, 348:105861. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105861>
- Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 30., 1978, Recife. *Proceedings... v. 2*, p. 507-610.
- Dardenne M.A. 2000. The Brasília fold belt. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (Eds.) *Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, p. 231-264.
- Dias-Brito D. 2017. *Guia petrográfico dos carbonatos do Brasil*. Rio Claro: UNESP, 232 p.
- Dias-Brito D., Tibana, P. 2015. *Calcários do cretáceo do Brasil*. Rio Claro: UNESP, 576 p.

- Doveton J.H., Merriam D.F. 2004. Borehole petrophysical chemostratigraphy of Pennsylvanian black shales in the Kansas subsurface. *Chemical Geology*, 206(3-4):249-258. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2003.12.027>
- Dunham R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to their depositional texture. In: Ham W.E. (Ed.). *Classification of Carbonate Rocks: a symposium*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1:108-121.
- Einsele G. 1992. *Sedimentary basins: evolution, facies and sedimentary budget*. Berlin: Springer-Verlag, 628 p.
- Einsele G., Seilacher A. 1991. Distinction of tempestites and turbidites. In: Einsele G., Ricken W., Seilacher A. (Eds.). *Cycles and events in stratification*. Heidelberg-New York: Springer, p. 377-382.
- Ellis D.V., Singer J.M. 2008. *Well logging for Earth scientists*. 2ª ed. Berlin: Springer.
- Embry A.F., Johannessen E.P. 1993. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic Canada. *Norwegian Petroleum Society Special Publication*, 2:121-146.
- Embry A.F., Klovan J.E. 1971. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N.W.T. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19(4):730-781. <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.19.4.730>
- Falcone C.M.O. 2006. *Sedimentação mista carbonato-silicidástico durante o Albo-aptiano na porção emergida da Bacia Sergipe-Alagoas*. PhD Thesis, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 193 p.
- Flügel E. 2010. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*. Berlin: Springer-Verlag, 976 p.
- Fölling P.G., Frimmel H.E. 2002. Chemostratigraphic correlation of carbonate successions in the Gariep and Saldania Belts, Namibia and South Africa. *Basin Research*, 14(1):69-88. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.2002.00167.x>
- Fragoso D.G., Uhlein A., Sanglard J.C., Suckau G.L., Guerzoni H.T., Faria P.H. 2011. Geologia dos Grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na folha de Presidente Olegário (1:100.000), MG: registro deposicional do Neoproterozoico ao Neocretáceo da Bacia do São Francisco. *Geonomos*, 19(1):28-38. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v19i1.60>
- Freitas A.R., Uhlein A., Dantas M.V.S., Mendonça T.K. 2021. Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozoicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG. *Geologia USP. Série Científica*, 21(1):103-120. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-163573>
- Hippert J.P., Caxito F.A., Uhlein G.J., Nalini H.A., Sial A.N., Abreu A.T., Nogueira L.B. 2019. The fate of a Neoproterozoic intracratonic marine basin: Trace elements, TOC and IRON speciation geochemistry of the Bambuí Basin, Brazil. *Precambrian Research*, 330:101-120. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.05.001>
- Hoffman P.F., Kaufman A.J., Halverson G.P., Schrag D.P. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, 281(5381):1342-1346. <https://doi.org/10.1126/science.281.5381.1342>
- Iyer S.S., Babinski M., Krouse H.R., Chemale Jr. F. 1995. Highly ^{13}C enriched carbonate and organic matter in the Neoproterozoic sediments of the Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, 73:271-282.
- Jacobsen S.B., Kaufman A.J. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chemical Geology*, 161:37-57.
- Jones B. 2010. Warm-water neritic carbonates. In: James N.P., Dalrymple R.W. (Eds.). *Facies Models 4*. Canada: Geological Association of Canada, p. 167-200.
- Johnston D.T., Macdonald F.A., Gill B.C., Hoffman P.F., Schrag D.P. 2012. Uncovering the Neoproterozoic carbon cycle. *Nature*, 483(7389):320-323. <https://doi.org/10.1038/nature10854>
- Kuchenbecker M., Babinski M., Pedrosa-Soares A.C., Lopes-Silva L., Pimenta F. 2016. Chemostratigraphy of the lower Bambuí Group, southwestern São Francisco craton, Brazil: insights on Gondwana paleoenvironments. *Brazilian Journal of Geology*, 46(Suppl. 1):145-162. <https://doi.org/10.1590/2317-488920160030285>
- Li C., Hardisty D.S., Luo G., Huang J., Algeo T.J., Cheng M., Shi W., An Z., Tong J., Xie S., Jiao N., Lyons T.W. 2016. Uncovering the spatial heterogeneity of Ediacaran carbon cycling. *Geobiology*, 15(2):211-224. <https://doi.org/10.1111/gbi.12222>
- Martins M., Lemos V.B. 2007. Análise estratigráfica das seqüências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4):156-167.
- Martins-Neto M.A., Pedrosa-Soares A.C., Lima S.A.A. 2001. Tectono-sedimentary evolution of sedimentary basins from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 141-142:343-370. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00082-3)
- Mohseni H., Al-Aasm I.S. 2004. Tempestite deposits on a shore-influenced carbonate ramp: an example from the Pabdeh Formation (Paleogene), Zagros basin, SW Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 27(2):163-178. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2004.tb00051.x>
- Molina J.M., Ruiz-Ortiz P.A., Vera J.A. 1997. Calcareous tempestites in pelagic facies (Jurassic, Betic Cordilleras, Southern Spain). *Sedimentary Geology*, 109(1-2):95-109. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(96\)00057-7](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(96)00057-7)
- Moreira D.S., Uhlein A., Dussin I.A., Uhlein G.J., Misuzaki A.M.P. 2020. A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcanoclastic bed. *Journal of South American Earth Sciences*, 99:102503. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102503>
- Myrow P.M., Southard J.B. 1996. Tempestite deposition. *Journal of Sedimentary Research*, 66(5):875-887. <https://doi.org/10.1306/D426842D-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- Nichols G. 2009. *Sedimentology and stratigraphy*. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 419 p.
- Pandit M.K., Sial A.N., Malhotra G., Shekhawat L.S., Ferreira V.P. 2003. C, O Isotope and Whole-rock Geochemistry of Proterozoic Jahazpur Carbonates, NW Indian Craton. *Gondwana Research*, 6(3):513-522.
- Parenti-Couto J.G., Cordani U.G., Kawashita K., Iyer S.S., Moraes N.M.P. 1981. Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí, com base em análises isotópicas de Sr e Pb. *Revista Brasileira de Geociências*, 11(1):5-16.
- Paula-Santos G.M., Caetano-Filho S., Babinski M., Trindade R.L., Guacaneme C. 2017. Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco Basin through isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 42:280-305. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2016.10.012>
- Paula-Santos G.V., Babinski M., Kuchenbecker M., Caetano-Filho S., Trindade R.L., Pedrosa-Soares A.C. 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U-Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 28(2):702-720. <https://doi.org/10.1016/j.jgr.2014.07.012>
- Pérez-López A., Pérez-Valera F. 2012. Tempestite facies models for the tectonic Triassic carbonates of the Betic Cordillera (southern Spain). *Sedimentology*, 59(2):646-678. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2011.01270.x>
- Pimentel M.M., Rodrigues J.B., Della Giustina M.E.S., Junges S., Matteini M., Armstrong R. 2011. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U-Pb sedimentary provenance data: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, 31:345-357.
- Reis C. 2013. *Geologia, sistemas deposicionais e estratigrafia isotópica do Grupo Bambuí na região de Santa Maria da Vitória, BA*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 97 p.
- Reis H.L.S., Alkmim F.F. 2015. Anatomy of a basin-controlled foreland fold-thrust belt curve: The Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 66(4):711-731. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.013>
- Reis H.L.S., Alkmim F.F., Fonseca R.C.S., Nascimento T.C., Suss J.F., Prevatti L.D. 2017. The São Francisco Basin. In: Heilbron M., Cordani U.G., Alkmim F.F. (Eds.). *São Francisco Craton, Eastern Brazil. Regional Geology Reviews*, Switzerland: Springer International, p. 117-143. https://doi.org/10.1007/978-3-319-01715-0_7
- Reis H.L.S., Fonseca R.C.S., Alkmim F.F., Nascimento T.C., Suss J. 2013. A Bacia do São Francisco (MG): registro de uma longa história de ativações e reativações em domínio cratônico. In: Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 17.; Simpósio de Geologia do Sudeste, 13., Sociedade Brasileira de Geologia. *Proceedings... Juiz de Fora: Sociedade Brasileira de Geologia*.

- Reis H.L.S., Suss J.F. 2016. Mixed carbonate-siliciclastic sedimentation in forebulgegrabens: an example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*, 339:83-103. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.04.004>
- Rodrigues G.B., Fauth G. 2013. Isótopos estáveis de carbono e oxigênio em ostracodos do Cretáceo: metodologias, aplicações e desafios. *Terrae Didática*, 9(1):34-49. <https://doi.org/10.20396/td.v9i1.8637408>
- Rodrigues J.B. 2008. *Proveniência de sedimentos dos grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí - um estudo de zircões detriticos e Idades Modelo Sm-Nd*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 128 p.
- Santana R.O. 2011. *Estratigrafia, geoquímica e isótopos de C, O e Sr do Grupo Bambuí a leste da Falha de São Domingos, NE de Minas Gerais*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 93 p.
- Santos D.M., Sanchez E.A., Santucci R.M. 2018. Morphological and petrographic analysis of identified stromatolitic occurrences in Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, state of Minas Gerais, Brazil. *Journal of the Brazilian Society of Paleontology*, 21(3):195-207. <https://doi.org/10.4072/rbp.2018.3.01>
- Santos R.V., Alvarenga C.J.S., Babinski M., Ramos M.L.S., Cukrov N., Fonseca M.A., Sial A.N., Dardenne M.A., Noce C.M. 2004. Carbon isotopes of Mesoproterozoic-Neoproterozoic sequences from Southern São Francisco craton and Araçuaí Belt, Brazil: Paleographic implications. *Journal of South American Earth Science*, 18(1):27-39. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2004.08.009>
- Santos R.V., Alvarenga C.J.S., Dardenne M.A., Sial A.N., Ferreira V.P. 2000. Carbon and oxygen isotope profiles across Meso-Neoproterozoic limestones from central Brazil: Bambuí and Paranoá groups. *Precambrian Research*, 104(3-4):107-122. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00082-6)
- Schrag D.P., Higgins J.A., Macdonald F.A., Johnston D.T. 2013. Authigenic carbonate and the history of the global carbon cycle. *Science*, 339(6119):540-543. <https://doi.org/10.1126/science.1229578>
- Sial A.N., Dardenne M.A., Misi A., Pedreira A.J., Gaucher C., Ferreira V.P., Silva Filho M.A., Uhlein A., Pedrosa-Soares A.C., Santos R.V., Egidio-Silva M., Babinski M., Alvarenga C.J.S., Fairchild T.R., Pimentel M.M. 2009. The São Francisco Palaeocontinent. In: Gaucher C., Sial A.N., Halverson G.P., Frimmel H.E. (Eds.). *Neoproterozoic-Cambrian Tectonics, Global Change and Evolution: a focus on southwestern Gondwana*. *Developments in Precambrian Geology*, 16. Amsterdam: Elsevier, p. 31-69.
- Sial A.N., Gaucher C., Misi A., Boggiani P.C., Alvarenga C.J.S., Ferreira V.P., Pimentel M.M., Pedreira J.A., Warren L.V., Fernández-Ramírez R., Galdes M., Pereira N.S., Chiglino L., Cezario W.S. 2016. Correlations of some Neoproterozoic carbonate-dominated successions in South America based on high-resolution chemostratigraphy. *Brazilian Journal of Geology*, 46(3):439-488. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201620160079>
- Taylor K.G., Macquaker J.H.S. 2000. Early diagenetic pyrite morphology in a mudstone-dominated succession: the Lower Jurassic Cleveland Ironstone Formation, eastern England. *Sedimentary Geology*, 131(1-2):77-86. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00002-6)
- Tuller M.P. (Coord.). 2010. *Projeto Sete Lagoas-Abate - Folha Sete Lagoas (SE.23-C-Z-II)*. Belo Horizonte: Serviço Geológico do Brasil, 160 p.
- Turbay C.V.G., Cesero P., Garcia A.J.V., Silva R.C. 2013. Depositional, diagenetic and stratigraphic aspects of microfacies from Riachuelo Formation, Albian, Sergipe Basin, Brazil. *Geologia USP. Série Científica*, 13(4):29-48. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201300040002>
- Uhlein G.J., Uhlein A., Pereira E., Caxito F.A., Okubo J., Warren L.V., Sial A.N. 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 517:39-51. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.12.022>
- Uhlein G.J., Uhlein A., Stevenson R., Halverson G.P., Caxito F.A., Cox G.M. 2017. Early to Late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, 299:101-116. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.020>
- Vieira L.C., Nédélec A., Fabre S., Trindade R.L.F., Almeida R.P. 2015. Aragonite crystallites in Neoproterozoic cap carbonates: a case study from Brazil and implications for the post-snowball earth coastal environment. *Journal of Sedimentary Research*, 85(3):285-300. <https://doi.org/10.2110/jsr.2015.21>
- Warren L.V., Quaglio F., Riccomini C., Simões M.G., Poiré D.G., Strikis N.M., Anelli L.E., Strikis P.C. 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, 42(5):391-394. <https://doi.org/10.1130/G35304.1>
- Zalán P.V., Romeiro-Silva P.C. 2007. Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2):561-571.
- Zecchin M., Catuneanu O. 2017. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves VI: Mixed siliciclastic-carbonate systems. *Marine and Petroleum Geology*, 88:712-723. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2017.09.012>

5. ARTIGO 2 – SUBMETIDO AO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES

Neste item segue o artigo 2, como submetido ao periódico internacional Journal of South American Earth Sciences de conceito *qualis* B1. Neste trabalho, os dados regionais de afloramentos, poços e sísmica da Fm. Lagoa do Jacaré foram integrados para propor sua evolução paleogeográfica, geoquímica e estratigráfica no contexto do limite Ediacarano-Cambriano.

**STRATIGRAPHY, ISOTOPE GEOCHEMISTRY, SEISMIC STRATIGRAPHY
AND PALEOGEOGRAPHY OF THE LAGOA DO JACARÉ FORMATION, BAMBUÍ
FORELAND BASIN (EDIACARAN-CAMBRIAN), SOUTHEAST BRAZIL**

**Márcio Vinicius Santana Dantas ^{a,*}, Alexandre Uhlein ^{a,b}, Gabriel Jubé Uhlein ^b,
Juliana Okubo ^c, Samuel Amaral Moura**

^a *Programa de pós-graduação em Geologia - Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil*

^b *Centro de Pesquisas Manoel Teixeira da Costa, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Campus Pampulha, Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil*

^c *Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Avenida 24A, 1515, 13506-900 Rio Claro, SP, Brazil*

** Corresponding author*

Abstract

The Bambuí Group is a lithostratigraphic unit that comprises a mixed carbonate-siliciclastic platform deposited in a foreland basin. It is a 1st order sequence that filled the São Francisco Basin during the Ediacaran-Cambrian in southeast Brazil. The Lagoa do Jacaré Formation is the second carbonate unit of the Bambuí Group and is related to a 2nd-order regressive hemicycle composed of dark grey shallow water carbonates with high positive $\delta^{13}\text{C}$ values ($>+10\%$) related to the upper part of the Middle Bambuí Excursion (MIBE). We described four outcrops in the center-north of Minas Gerais state (Paraopeba, Curvelo, Montes Claros and Ubaí areas) coupled with $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$, and SEM-EDS analysis in order to support detailed facies analyses. One seismic line and three well logs in the south part of the Januária High were also used to define the stratigraphic framework of the Lagoa do Jacaré Formation in the Bambuí Foreland Basin system. Eight facies were interpreted from the outcrop data and grouped into five facies associations, that represent peritidal zone (FA1), ooidal sand shoals (FA5), tempestites of mid ramp (FA3), fine-grained carbonate of outer ramp (FA4), and fine-grained siliciclastic from offshore (FA2). The strong presence of terrigenous material (quartz, feldspars, muscovite, biotite, apatite) with some authigenic/diagenetic minerals (pyrite, titanite, rutile) in all facies are the main petrographic aspect of the studied carbonate rocks, related to high sedimentary input and some events during early diagenesis. FA1 with lower mean values

of $\delta^{13}\text{C}$ (+9‰) predominates in the north, meanwhile FA3 is the main association in the south with higher $\delta^{13}\text{C}$ mean values (+12‰). This difference is probably related to the stratigraphic differences between the basal section (at south) and upper section (at north) of the Lagoa do Jacaré Formation. The Januária High was the main controlling element for the deposition of the carbonate ramp in the north sector of the basin, close to the Ubaí and Montes Claros cities. Probably, this structural high also played an important role as source area in the forebulge sector, uplifted by flexure due to the orogeny of the Brasília and Araçuaí (still in development) Belts (~540-520 Ma). To the east, a N-S carbonate ramp system was developed in the back-bulge sector according to the main paleocurrents measurements. This ramp is related to a 300 m thickness section of the Lagoa do Jacaré Formation that was firstly identified and correlated to the successions on the surface using well logs, possibly registering at the top the decreasing in the $\delta^{13}\text{C}$ values, after the main stages of the MIBE probably in close association with Ediacaran-Cambrian boundary, related to the assembling of the Gondwana Supercontinent recorded in this region of southeast Brazil.

Keywords: Facies analysis, foreland basin, Bambuí Group, Ediacaran-Cambrian carbonate.

1. Introduction

The Bambuí Group is the main stratigraphic unit of the intracratonic São Francisco Basin (southern Brazil), being of great interest of the geological community in recent decades. This unit presents several relevant scientific questions to the understanding of the geology of the Neoproterozoic era in South America. First, the age of the Jequitaiá glaciation (Sturtian - Babinski *et al.* 2007 or Marinoan - Caxito *et al.* 2012), and the presence of cap carbonates in the base of the Sete Lagoas Formation. Second, the age of the upper succession of the Bambuí Group, whether they are Late Ediacaran or Cambrian, according to recent dating by detrital zircon (Paula-Santos *et al.* 2015; Rossi *et al.* 2020) and igneous zircon in volcanoclastic tuff (520±5 Ma by Moreira *et al.* 2020). Finally, the high positive $\delta^{13}\text{C}$ values found in the MIBE (Middle Bambuí Excursion) (Uhlein *et al.* 2019) is a matter of debate. All these issues are still reason for discussions related to the origin and evolution of the Bambuí Group in Minas Gerais state and consequently his role during the Gondwana assemblage.

The Lagoa do Jacaré Formation represents the second main carbonate interval of the Bambuí Group (Dardenne, 1978; 2000), stratigraphically positioned in the upper part of the MIBE, which begins at the top of Sete Lagoas Formation according to Uhlein *et al.* (2019) and Caxito *et al.* 2021. $\delta^{13}\text{C}$ values reach averages above +10‰ (Iyer *et al.* 1995; Misi *et al.* 2007; Paula-Santos *et al.* 2017; Uhlein *et al.* 2019; Cui *et al.* 2020), and this positive anomaly may be explained by several hypotheses. Recently, some authors (Paula-Santos *et al.* 2017; Uhlein *et al.* 2019; Cui *et al.* 2020; Caetano-Filho *et al.* 2021; Dantas *et al.* 2022) trying to solve this conundrum raised some causes such as accumulation of organic matter, low water circulation, and methanogenesis in the water column. On the other hand, paleogeographic analysis using outcrop sections and subsurface data integrated with the use of sequence stratigraphy can help to elucidate these chemostratigraphic issues. Few detailed works on facies and sequence stratigraphy of the Lagoa do Jacaré Formation that may contribute to these questions had been carried out in the last few years, such as Tonietto (2010), Reis and Suss (2016), Uhlein *et al.* (2019), DaSilva *et al.* (2022), and Moura *et al.* (2022).

Considering those issues and the relevance of the Bambuí Group in the context of the Ediacaran-Cambrian boundary and Gondwana formation, the objective of this work is to analyze the tectono-stratigraphic evolution of the Lagoa do Jacaré Formation (central sector of Bambuí Basin) in the north region of the Minas Gerais state, southeastern Brazil. In order to

carry out a regional study, four areas were selected, located in the municipalities of Paraopeba, Curvelo, Montes Claros and Ubaí (Figure 1). We performed an unprecedented sedimentary facies analysis, facies association and recognition of depositional systems, using outcrop and well data, besides seismostratigraphic analysis, supported by isotopic geochemistry data ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$), and scanning electron microscopy (SEM) with energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) to propose a paleogeographic model and compartmentation of the Bambuí foreland basin in the Ediacaran-Cambrian boundary.

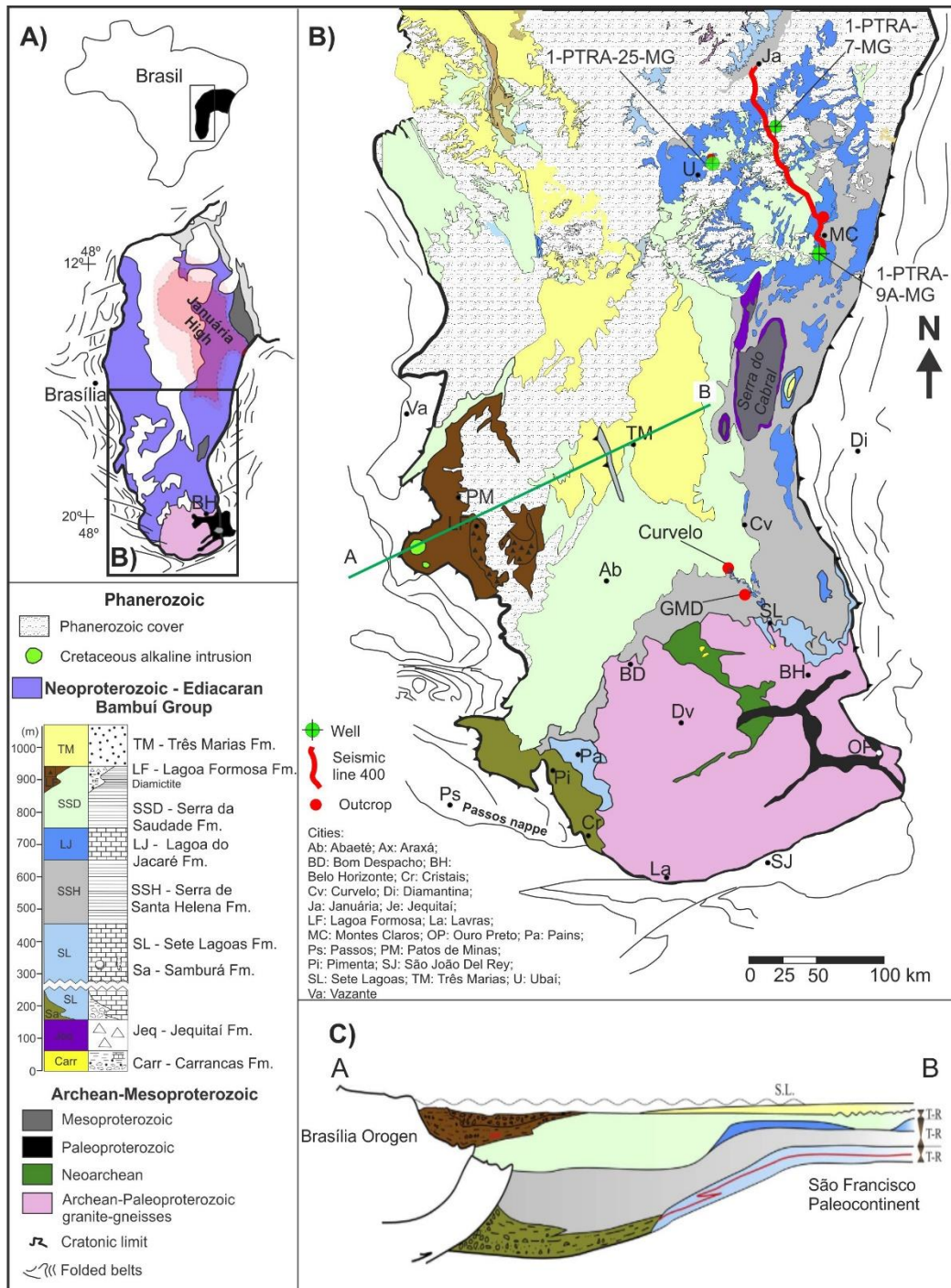


Figure 1 – A) Location of the São Francisco Craton and the Januária High in Brazil, beside the limits of the São Francisco Basin; (B) Simplified geologic map with location of the studied outcrops, seismic line and well logs; (C) SW-NE section by Uhlein et al. (2017) showing how the basin is structured in its southern part.

(Adapted from Uhlein et al. 2017 and Pedrosa-Soares et al. 2013)

2. The São Francisco Basin

The São Francisco Basin is filled with Mesoproterozoic sedimentary rocks (Galho do Miguel Formation and Conselheiro Mata Group) belonging to the Espinhaço Supergroup (Knauer, 2007; Alkmim and Martins-Neto, 2001, 2012; Uhlein, 2012), Neoproterozoic Cryogenian glacial deposits (Jequitaí Formation) and the Ediacaran-Cambrian Bambuí Group. They are covered by permo-carboniferous sedimentary rocks of the Santa Fé Group (Campos and Dardenne, 1994) and Late Cretaceous sedimentary and volcanic rocks (Areado, Mata da Corda and Urucuia Groups), belonging to the San Franciscana Basin (Campos and Dardenne, 1997; Sgarbi *et al.* 2001). In the central regions of the São Francisco Basin, the Bambuí Group shows sub-horizontal layers, and presents folded beds at the borders of the basin, close to the thrusts-fold belts of the orogenic belts Brasília (west) and Araçuaí (east) (Alkmim and Martins-Neto, 2001; Zalán and Romeiro- Silva, 2007; Pimentel *et al.* 2011).

2.1 The Bambuí Basin and the middle Bambuí Group

The Bambuí Group represents an Ediacaran-Cambrian succession deposited in a mixed siliciclastic-carbonate platform environment at the base, passing to siliciclastic platform and fluvio-deltaic at the top, in a foreland-type basin context (Dardenne, 1978, 2000; Martins-Neto *et al.*, 2001; Alkmim and Martins- Neto, 2012; Uhlein *et al.*, 2017). It is composed of six formations (Costa and Branco, 1964 and Dardenne, 1978): Jequitaí, Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré, Serra da Saudade and Três Marias. The Jequitaí Formation is composed of glacial diamictite, siltstones and sandstones, and is up to 100 m thick. Locally, it shows striated pavements of glacial origin (Uhlein *et al.*, 2011a). The Sete Lagoas Formation presents in its base post-Marinoan cap carbonates (Vieira *et al.*, 2007; Caxito *et al.*, 2012; Perrella *et al.*, 2017; Okubo *et al.*, 2018; Caxito *et al.*, 2021) and also comprises limestones, dolomites and intercalated marls and siltstones, with laminites and columnar stromatolites in some locations towards the top. The Serra de Santa Helena Formation comprises a thick layer of shales and siltstones intercalated with fine dark sandstones and limestones. It grades upward concordantly to the platform dark carbonate rocks of the Lagoa do Jacaré Formation. The Serra da Saudade Formation represents a thick layer of green shales (“*verdetes*”) rich in potassium (Moreira, 2020) and claystones that grade to feldspathic or arkose siltstones towards the top

deposited concordantly above the Lagoa do Jacaré Formation. The Três Marias Formation is deposited at the top of the succession, composed of arcoses and dark green siltstone (Dardenne, 1978; Chiavegatto, 1992), generally concordant with the underlying siltstones and, at the eastern border of the basin, it overlaps discordantly the siltstones and shales from the Serra da Saudade Formation (Rossi et al., 2019). This unit represents the last preserved stage of sedimentation of the Bambuí Group in the sedimentary record of the São Francisco Basin, already in the Cambrian (Tavares et al. 2020; Sanchez et al., 2021).

Although the age of sedimentation of the Bambuí Group still raises some questions, important contributions have been made to this problem in recent years. *Cloudina sp.* fossil (550-542 Ma) were described in the middle section of the Sete Lagoas Formation carbonates (Warren et al., 2014), determining a Cambrian age to the most part of the group. Moreira et al. (2020) dated zircons in volcanic tuff of the Serra da Saudade Formation at 520.2 ± 5.3 Ma, which confirms the Cambrian age for the uppermost section of the Bambuí Group suggested by the *Cloudina* fossil. In addition to these authors, Sanchez et al. (2021) found the *Treptichnus pedum* trace fossil (used to define the Ediacaran-Cambrian boundary), and four types of microbial induced sedimentary structures (MISS) in the Três Marias Formation, that is concordant with U-Pb dating of Tavares et al. (2020), that suggests a maximum depositional age of 527 ± 4 Ma to this formation.

The definition of the stratigraphic framework of the Bambuí Group presents small divergences, since there is not only one methodology of sequence stratigraphy applied in the works previously carried out. In general, the fine siliciclastic deposits from the Serra de Santa Helena and Serra da Saudade formations are interpreted as the product of regional transgressive episodes in the basin. Dardenne (1981) defined for the first time three major cycles (megacycles) of shallowing upward (Sete Lagoas Formation, Serra de Santa Helena Formation to Lagoa do Jacaré Formation, Serra da Saudade Formation to Três Marias Formation), recognized by several researchers that work in the region. In a pioneer work using sequence stratigraphy, Martins and Lemos (2007) defined four 3rd order depositional sequences for the group. They are separated by unconformities limited by faciological discontinuities and strong isotopic breaks, which comprises the São Francisco Megasequence: glacial marine (sequence 1); distally steep carbonate ramp (sequence 2); stacked homoclinal ramp with mixed carbonate-siliciclastic sedimentation (sequence 3); and siliciclastic shallow marine platform (sequence 4).

After that, Martins-Neto (2009) and Reis and Alkmim (2015) presented a stratigraphic framework with four 2nd order shallowing upward sequences for the Bambuí Group, inspired by the lithostratigraphic definitions of Costa and Branco (1961), Braun (1968) and Dardenne (1978, 1981). Recently, in a detailed work, Uhlein *et al.* (2017) defined five 2nd order transgressive-regressive sequences in the eastern sector of the Bambuí Group, since the base of Sete Lagoas Formation until the top of Três Marias Formation.

The Lagoa do Jacaré Formation facies are placed in the third 3rd-order sequences of Martins and Lemos (2007) stratigraphic framework. In Minas Gerais, this formation occurs in outcrops mainly in a narrow N-S trend from the center (Paraopeba city) to the north (Montes Claros to Montalvânia cities) of the state, on the limits with the state of Bahia, south of Januária High (Alkmim and Martins-Neto, 2001) (Figure 2). The most abundant facies of the Lagoa do Jacaré Formation are tempestites facies (grainstone with hummocky cross stratification), occurring both in the Paraopeba region (Dantas *et al.* 2022, Cui *et al.* 2020) and Januária-Lontra (Uhlein *et al.* 2019). Stromatolites in Luz, Bom Despacho, São João da Ponte and Jaíba (Iglesias and Uhlein, 2009, Santos *et al.* 2018), microbialites in Ubaí (Moura *et al.* 2022) and tidal flat laminites in Brasília de Minas (Neves, 2020) play a second role in the formation, although important to the understanding of the paleogeographic context.

Sequence stratigraphy and paleogeographic studies of the Bambuí Group (Martins and Lemos, 2007; Martins-Neto, 2009; Alkmim and Martins-Neto, 2012; Perrella *et al.* 2017; Uhlein *et al.*, 2017; Caetano-Filho *et al.* 2019, DaSilva *et al.* 2022) proposed some interpretations for the unit in different parts of the basin and helped in the understanding of its paleogeographic evolution. Other important studies of regional scope that used seismostratigraphy are Hercos *et al.* (2008), Coelho *et al.* (2008), Alkmim and Martins-Neto (2012), Reis and Suss (2016) and Reis *et al.* (2017), who consolidated interpretations of a foreland-type basin for the sedimentary basin in which the Bambuí Group rocks were deposited.

3. Material and methods

The dataset analyzed in this work consists of four outcrops in the central-north region of Minas Gerais state (Figure 2). We also analyzed one seismic line and three well logs in the northern region of the state, close to the cities of Ubaí (1-PTRA-25-MG, coord.: 16°:13':08,55"/44°:41':27,37"), Janpovar (1-PTRA-7-MG, coord.: 15°56'47"/44°13'28") and

Montes Claros (1-PTRA-9A-MG, coord.: 16°53'16,77"/43°53'51,68") (Figure 2) provided by ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis). The well data comprises complete well logging data such as gamma ray, resistivity, sonic, density and porosity, and the composite profile. Some intervals have core samples and their descriptions are among the analyzed data.

Vertical profiles of outcrops were surveyed at 1:20 scale. The GMD quarry is a disabled mine and is located in the municipality of Paraopeba (coord.: 19°15'05"/44°23'22"), by local access via secondary road, east of the BR-040. It is the same outcrop analyzed by Cui *et al.* (2020) (named Km 14), Freitas *et al.* (2021) and Dantas *et al.* (2022). The Curvelo outcrop is located on the side of the BR-135, 37 km south of the city center (coord.: 19°05'3.81"/44°32'35.49" of the base and 19°04'46.95"/44°32'17.37" of the top). The vertical lithological profile described in Montes Claros is composed of small sections along the BR-135 highway at the northern exit of the city, stacked according to the top and base coordinates, and height and dip measured at each location (Figure 2). Likewise, several small outcrops were used to build the composite vertical profile presented in Ubaí (see Moura *et al.*, 2022).

3.1 Facies analysis and Sequence Stratigraphy

Field description, petrography, geochemistry and facies analysis data resulted in a high-resolution stratigraphic analysis of approximately 150 m thickness of sedimentary rocks. We integrated these data with well log and seismic line to perform a high-resolution sequence stratigraphy study of the Lagoa do Jacaré Formation. We described the carbonate facies according to and the concepts of Flugel (2010) who consider lithological and textural characteristics, such as color, granulometry and sedimentary structures. Thin sections were described according to the concepts of Dunham (1962) and Embry and Klovan (1971) in order to characterize the microscopic aspects of the Lagoa do Jacaré Formation concerning the main components, texture and diagenesis. We defined the depositional environments using facies associations.

We carried out stratigraphic interpretation following the concept of transgressive-regressive sequences (T-R) of Embry and Johannessen (1992), considering the MRS (Maximum Regressive Surface) as the limit of sequences, with the hemicycles being marked

by the cycles of Karagodin (1975), which denote increase or decrease in subsidence. This allowed the definition of high frequency sequences as defined by Zecchin and Catuneanu (2013), with the order as proposed by Vail *et al.* (1991).

We analyzed a NW-SE regional seismic line (400 line) in TWT (Two way travel time), located at the northern region of Minas Gerais state. The line was interpreted in the OpenDetect open-source software. Seismic to well tie was made using the ITT (Interval transit time) available in the composite profile, following the instructions of the header in the “SGY” files, that contain the acquisition and processing information. Seismic reflectors patterns were interpreted according to some characteristics as reflectors terminations, reflection intensity, frequency and amplitude of bedforms. After that, it was possible to identify seismic intervals and seismofacies related to each formation recorded in the well logs.

3.2 Carbon and Oxygen stable isotope analyses in carbonates

C and O isotopic analyses of the samples collected in the outcrops were carried out at the LGQM laboratory (Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica) at UERJ (State University of Rio de Janeiro) and at LABISE (Laboratory of Stable Isotopes) at UFPE (Federal University of Pernambuco) according to the following methodology. No altered samples (ex: calcite precipitation in fractures, recrystallized minerals, and oxidation) were selected in order to avoid possible changes in their isotopic content. Carbonate powder was recovered through a microdrill in a bench drill, always avoiding calcite microveins and portions with visible post-depositional changes. 20 mg of powdered sampled was used to the extraction of CO₂ gas. The powder was dissolved with orthophosphoric acid (H₃PO₄) at 25°C to liberate CO₂. The gas was analyzed in a Thermo Finnigan Delta V Advantage mass spectrometer. The results are expressed in δ per mil (‰) related to the VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) standard for $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$, with a precision better than $\pm 0.1\text{‰}$.

3.3 Scanning Electron Microscope (with Energy-Dispersive Spectroscopy)

Two rock samples from the GMD quarry and one from Ubaí sections were prepared as slabs carbon-coated, which were then analyzed via scanning electron microscopy (SEM). All SEM analyses were conducted at an accelerating voltage of 15 keV and a working distance of

10 mm and resulted in secondary electron (SE) and backscattered electron (BSE) images with compositional contrast (Muscente and Xiao, 2015). In addition, all samples were analyzed under energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) for chemical composition determination. The work was conducted at the Department of Geology (São Paulo State University, UNESP), using a JEOL JSM 6010LA SEM. All EDS data (including elemental maps) were acquired at accelerating voltages of 15 keV and probe currents of 20nA in order to identify major elements.

4. Results

4.1 Sedimentary facies of the Lagoa do Jacaré Formation in Minas Gerais state

The Lagoa do Jacaré Formation presents dark gray, fine to coarse grainstones, rudstones (breccias), and microbialites. These facies present massive to laminated bedforms, with cross-stratifications of different types, and high content of allochems such as ooids, oncoids and intraclasts. It is worth to mention the remarkable presence of siliciclastic grains (up to 15%) in all facies. Microbialites are also present in some sectors of the basin. The main characteristics of the sedimentary facies are summarized in Table 1 and are illustrated in Figure 3 and Figure 4. The interpreted facies and the vertical lithological profiles described in detail in this work are presented as follow (Figure 4 and Figure 5).

Microbial laminite (Lm)

Microbial laminite occurs as dark gray mudstone facies, presenting irregular, crenulated or conspicuous planar laminations. Sedimentary structures such as desiccation cracks, syneresis cracks, tepees, salt pseudomorphs (Figure 2F), swaley cross lamination, parallel lamination and low angle lamination comprises the main features of microbialites and associated lithologies.

Microbial laminites are interpreted as organic compounds of microbial origin formed by organomineralization processes (Dupraz *et al.*, 2009). They are related to the metabolic activity of microbial mat associations, and the complex interaction between these biofilms and the surrounding environment can result in the production of microbialites and associated facies (Ridding, 2011; Bosak *et al.*, 2013; Vasconcelos and Bahniuk, 2015). The microbial layers present a process of organic deposition by trapping and binding of suspended particles. Even though a variety of microbialite textures occurs in the studied profiles, they are more abundant

in the region of Ubaí (Moura *et al.*, 2022) as microbial mats, microbial mats with boudin-like structure and thrombolite (Figure 2B, C and E).

Massive to stratified grainstone (Gm)

Facies composed of fine to medium dark gray carbonate sand with lenticular geometry. It occurs in centimeter to decimeter layers, massive or with planar to tangential cross bedding (Figure 3E). It may occur wavy bedding or wave truncations. Subordinate grains such as ooids or millimeter intraclasts are described, but are difficult to identify on macroscale. It is one of the most common facies in the Lagoa do Jacaré Formation in all succession.

Ooidal grainstone (Go)

Composed of fine to coarse, dark gray limestone, rich in fine ooids, sometimes pisoids (>2 mm), microoncooids and rare mm-sized intraclasts. It presents low angle to planar cross bedding, and forms centimeter to metric layers, sometimes lenticular.

Oncoidal-pisoidal rudstone (Rop)

Very coarse to conglomeratic, grain-supported limestone composed of millimeter ooid and oncoids. It may have planar or low-angle cross stratification. They present well-developed sparry calcite cement. They occur as lenticular layers intercalated with finer sediments deposited by medium to high energy tractive flows.

Siltstone (S)

Brown colored siltstone, usually with very fine plan-parallel laminations, with quartz and rare feldspar grains. Detrital micas may also be present. It may contain carbonate or quartz cement. Thick layers of siltstones are usually intercalated with limestones at different levels.

Heterolith (H)

It is composed of millimeter intercalations of dark gray mud/wackestone and fine brown grainstone, generally laminated, with planar and cross lamination (Figure 3A). Wavy and flaser-like structures may be present. They form centimeter to decimeter tabular layers. They can sediment in shallow or deep waters, in low energy zones.

Breccias (B)

Centimeter-sized intraclasts dispersed in the framework, oriented or not, supported by fine to medium sized carbonate matrix. It is common to form layers 10 to 30 cm thick, with lenticular geometry (Figure 2G). Formed from the action of high-energy traction currents or waves in tidal channels. Constitute the base of storm cycles and gravitational flows associated with storm waves (Nichols, 2009).

Mudstone (M)

Dark gray, fine carbonate facies, massive to slightly laminated. It is a very common facies intercalated with several lithotypes, such as microbialites and siltstones (Figure 3E). They may have desiccation cracks and syneresis cracks.

Columnar and domal stromatolites (Et)

These are not frequent in the Lagoa do Jacaré Formation, but some occur in the vicinities of the cities of Jaíba and São João da Ponte, northern region of Minas Gerais state, as described in Santos *et al.* (2018). Stromatolites are biochemical carbonates precipitated by cyanobacteria through binding and trapping (Srivastava, 2004). The stromatolites described in the unit have mainly columnar and domal forms and present a shrub structure (arborescent), lacking associated allochemical grains, being interpreted as deposits of intertidal environments.

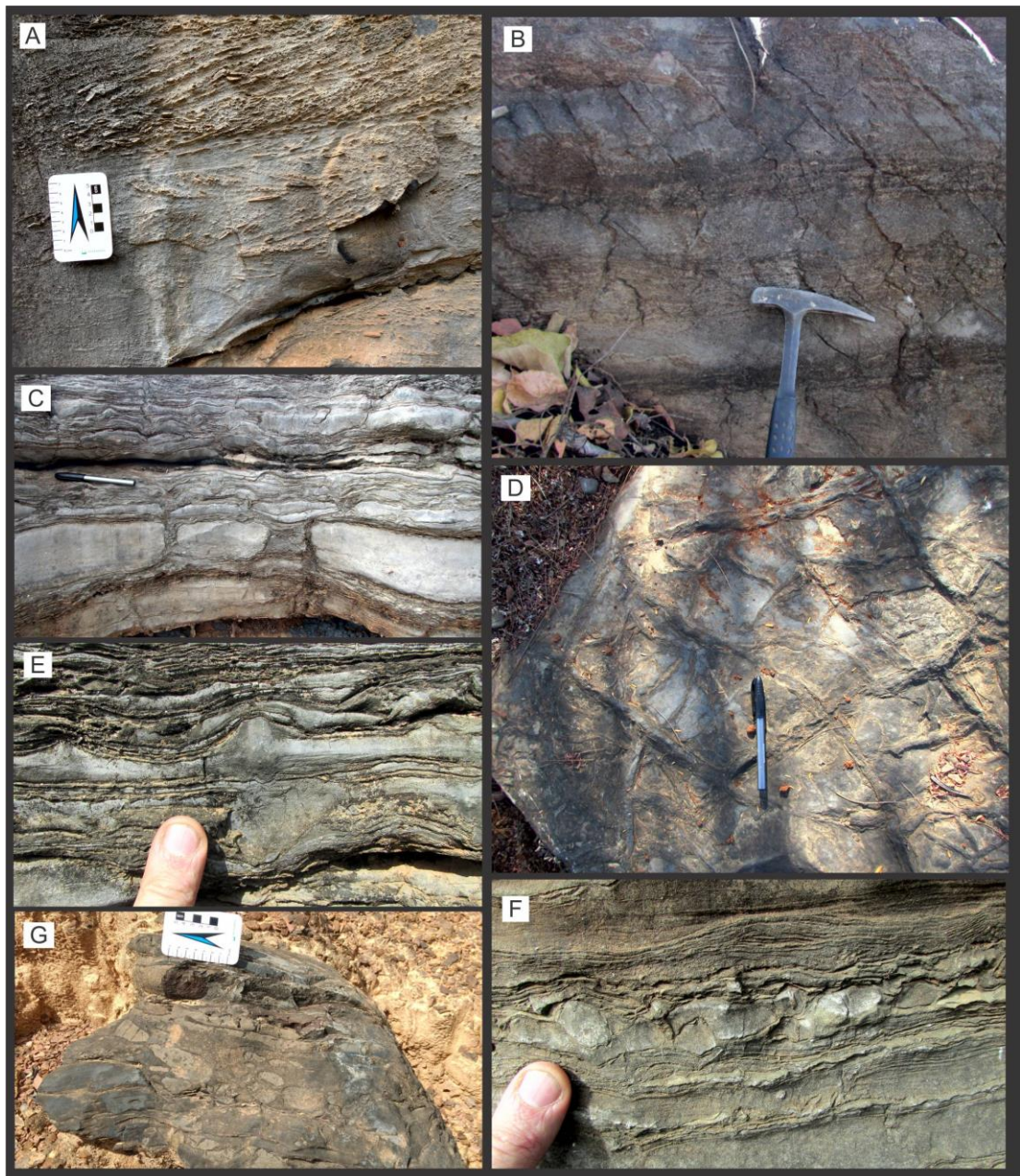


Figure 2 – Main carbonate sedimentary facies of the Lagoa do Jacaré Formation. A – Intraclastic coarse grainstone to rudstone with herringbone cross stratification; B - Microbial laminites with typical irregular laminations, intercalated with massive grainstones; C – Microbial laminites intercalated with fine massive grainstone, with boudin structure; D – Desiccation cracks in mudstone associated with microbial laminites; E – Teepee structure in laminites intercalated in mudstone; F – Salt pseudomorph, gypsum or halite replaced by calcite; G – Carbonate breccias lenticular layer (tidal channel).

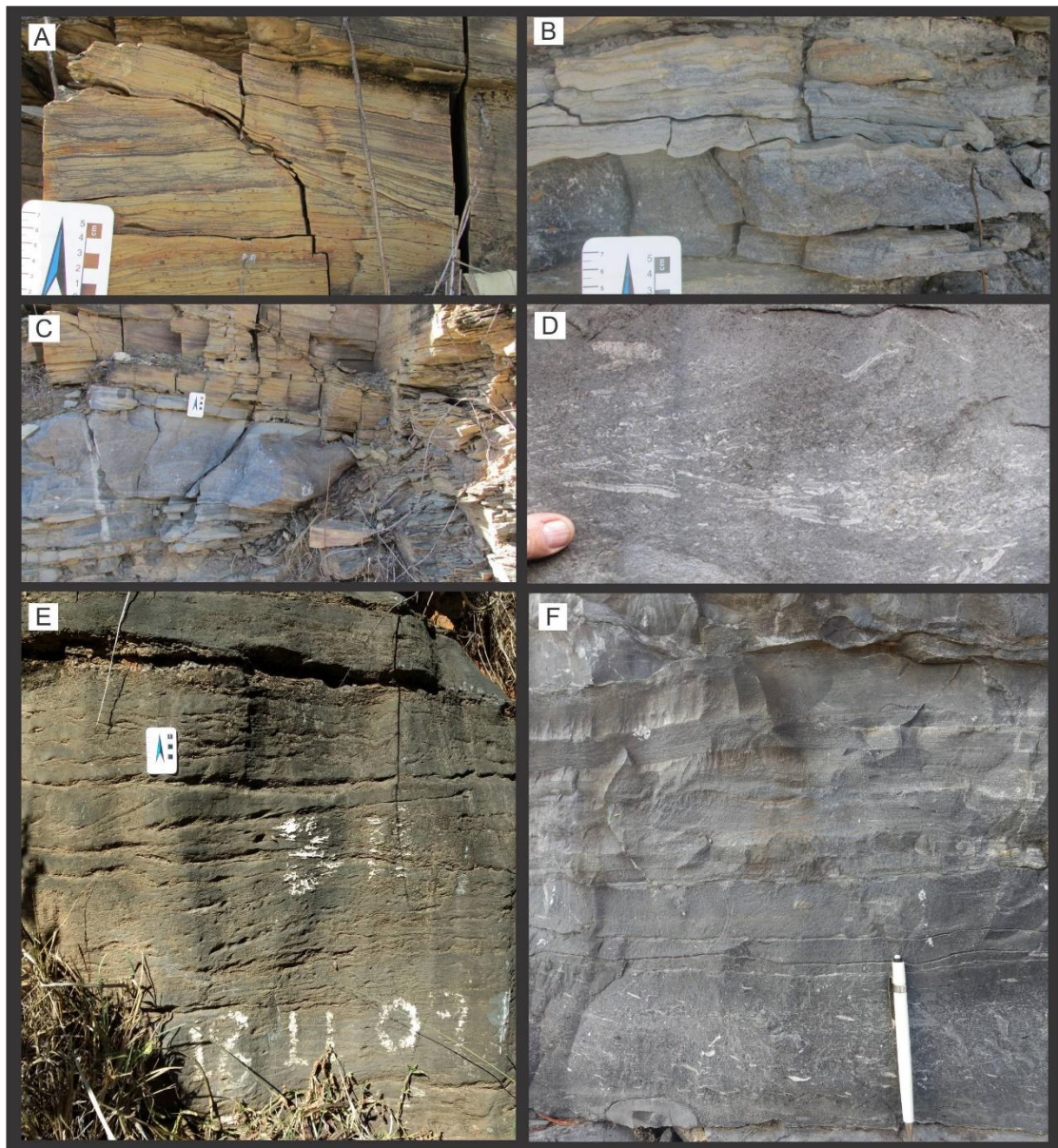


Figure 3 - Main carbonate sedimentary facies of the Lagoa do Jacaré Formation. A –Heterolith (mudstone-fine grainstone) with planar and swaley laminations; B- Oncoidal rudstone lens with ripples at the top; C- Oncoidal rudstone lens intercalated in heterolith; D- Planar cross stratification in intraclastic rudstone; E- Amalgamated lens of rudstone with tangencial cross stratification; F- tempestite cycle (from base to top: breccias-grainstone -mud/wackestone) (Dantas et al., 2022).

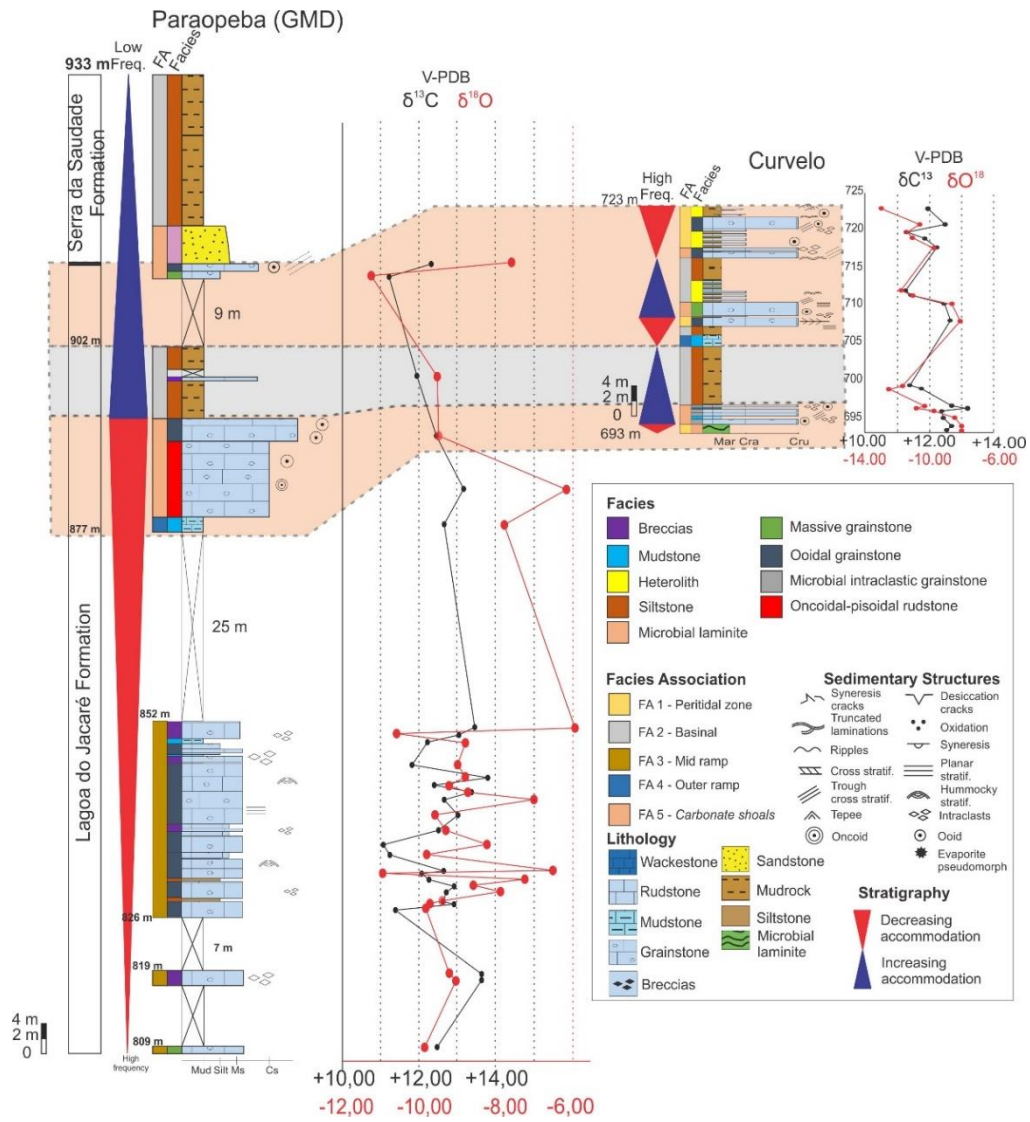


Figure 4 – Proposed chemostratigraphic correlation of Paraopeba and Curvelo vertical profiles using the facies association rich in oncoids and ooids as reference.

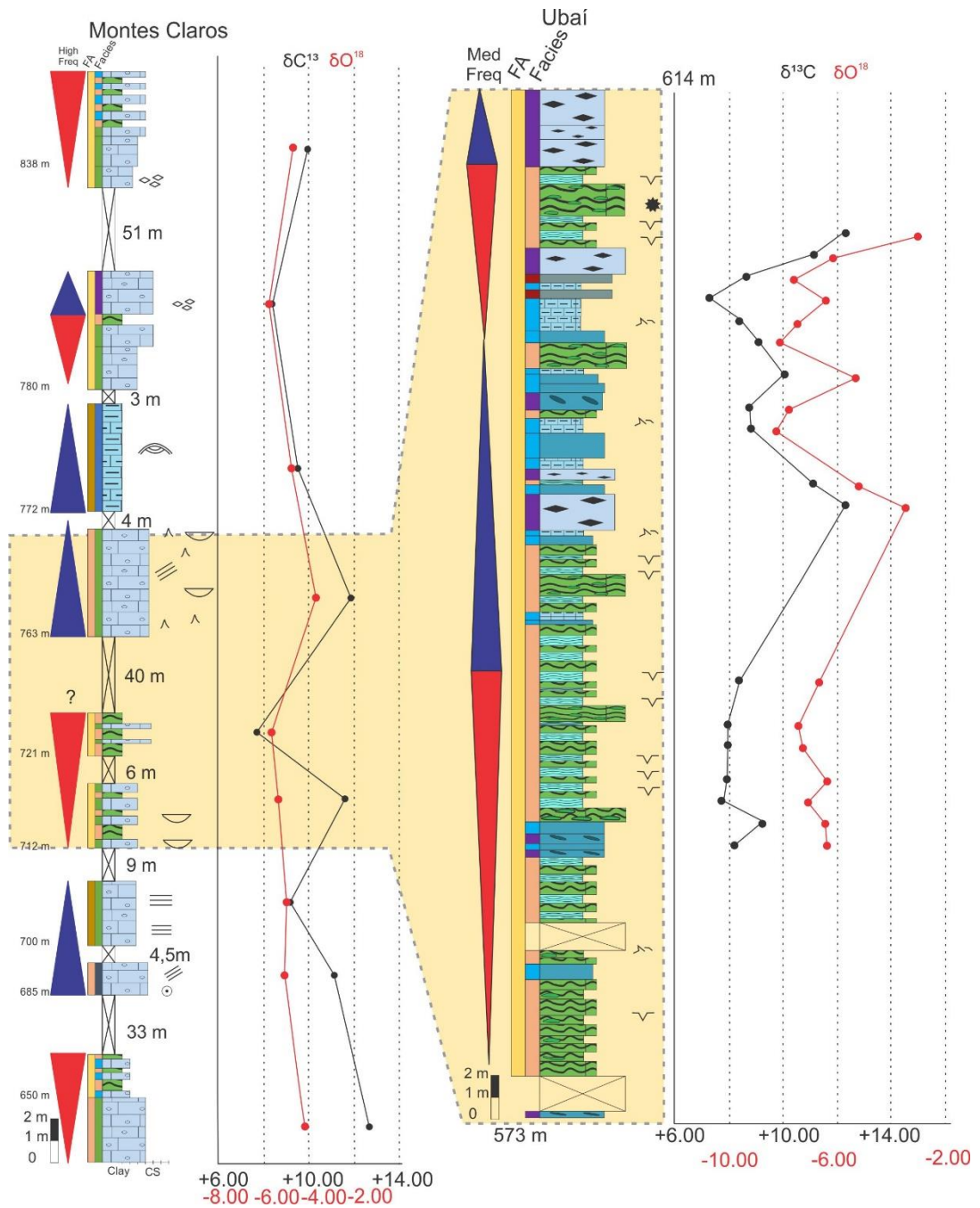


Figure 5 – Correlation of Montes Claros and Ubaí vertical profiles based in the occurrence of microbalites and facies association. See legend in Figure 4

Table 1 – Sedimentary facies and related facies association interpreted for the Lagoa do Jacaré Formation in the studied outcrops.

Code	Facies	Description	Facies Association	Interpretation
Lm	Microbial laminite (microbialite) (Lm)	Millimeter to decimeter irregular layers of microbial origin. Three types of occurrences: laminated, laminated with boudin and thrombolite. Tepees, desiccation cracks and salt pseudomorphs are associated.	FA1	Organic deposition by trapping and binding of suspended particles.
Gm	Massive to stratified grainstone (Gm)	Dark grey fine to medium carbonate sand, centimeter to decimeter layers, massive or with planar or tangential cross stratification, with sparry calcite cement. May contain subordinated grains like ooids or millimeter intraclasts, difficult to identify in macroscale. Fine-grained siliciclastic grains also occurs (<5%).	FA1 / FA3 / FA5	Low to high energy tractive flow.
Go	Ooidal grainstone (Go)	Fine to coarse, dark grey, ooidal, intraclastic limestone. Bidirectional, low angle to planar cross stratification are common.	FA5	Tractive flow in the shallow shoreface, with tidal currents action.
Rop	Oncooidal-pisoidal rudstone (Rop)	Very coarse, dark grey rudstone, with oncoids and pisoids. Tabular cross stratification. Lenticular geometry.	FA1	Tractive flow of medium and high energy in intertidal environment.
S	Siltstone (S)	Silt grain size, with high content of extrabacinal quartz (subordinate feldspar and mica).	FA2	Deposited by suspension in deep waters.
H	Heterolith (H)	Millimeter intercalation between dark grey and brown mud/wackestone and fine grainstones. Plane parallel and cross laminations.	FA1	Deposited by suspension with posterior reworking by waves in low energy waters.
B	Breccias (B)	Millimeter to decimeter intraclasts of mudstone (possibly microbialites) supported by fine carbonate matrix.	FA3 / FA1	High energy erosive flows.
M	Mudstone (M)	Very fine dark grey carbonate grain, massive, with rare laminations. May presents desiccation cracks or syneresis depending of the environment. May be associated with microbialites in shallow water or siltstones in deep water.	FA1 / FA3 / FA4	Deposited by suspension

4.2 Facies association (FA) and depositional systems

The spatial distribution and lateral correlation of facies in the outcrops studied in detail led to the recognition of five facies associations and their depositional systems, described below and listed in Table 2.

Table 2 – Depositional systems interpreted for the facies associations.

Depositional system	Facies Association	Facies
Peritidal	FA1	Lm, Gm, H, Rop, M, B (?)
Basinal	FA2	S
Mid ramp	FA3	Go, Gm, B, M
Outer ramp	FA4	M
Carbonate shoals	FA5	Go and Gm

The association of peritidal zone facies (FA1) comprises mainly microbialite-rich facies, as well as fine carbonate facies, such as mudstone with desiccation cracks and tepees, as observed in the Ubaí region (Moura *et al.* 2022). Lens-shaped breccias in tidal channels may also occur. Grainstone with microbialite intraclasts with tabular (and herringbone) cross stratification and heterolith also occur associated with microbialites. The former is interpreted as a result of high energy erosive processes and the latter by combined traction and suspension processes. Some oncoids and pisoids were observed intercalated in tidal facies, denoting tidal channel environments (Figure 3B and C). This association is defined by the Lm, Gim, H, Rop, B and M facies.

The basinal facies association (FA2) is characterized by the occurrence of siltstone facies (S) intercalated with mudstone, deposited by a low energy process (suspension). The deposition of this facies association is mainly related to the greater contribution of siliciclastic material in the basin. Carbonate cement may also occur in the siltstones and marlstones.

The mid ramp facies association (FA3) is mainly characterized by the occurrence of breccia (B), ooidal grainstone (Go), stratified to massive grainstone (Gm), and mudstone (M) facies, forming tempestites in the upper offshore-shoreface zone. They are characterized by the occurrence of breccias (B) at the base, due to erosive reworking by storm waves, marked by erosive surface. Hummocky cross stratification in the fine to medium facies are diagnostic of the structure. Stratified mudstone are set at the top. Tempestite deposits by the combination of oscillatory and unidirectional flows during storm episodes on the platform (Einsele, 1992; Plint, 2010). In the study area, they were described in detail at the GMD Quarry in Paraopeba (Figure 3F), comprising a vertical section of approximately 25 m (Freitas *et al.* 2021; Dantas *et al.*, 2022). In other parts of the basin, several authors also described tempestite cycles with hummocky cross stratification (Iglesias and Uhlein, 2009, Uhlein *et al.* 2019).

The outer ramp facies association (FA4) is composed of low energy fine carbonate rocks deposited mainly in the upper offshore-lower offshore transition zone, with low input of siliciclastic content. Carbonate mudstone was formed by deposition of lime-mud in low energy environment, below the storm wave base level. Very fine grainstone with ripples and truncated laminations may be present, and may represent distal part of tempestite.

Carbonate shoals facies association (sand shoals) (FA5) is composed by facies with ooids and oncoids, oncoid-pisoidal rudstone (Rop), ooidal grainstone (Go) and massive grainstone (Gm). They occur associated in higher energy zones of the inner ramp, in the shoreface zone. It is characterized by constant reworking of the sediments at moderate energy and presents lenticular geometry.

According to the described facies and facies association, the depositional model proposed for the Lagoa do Jacaré Formation is the homoclinal carbonate ramp (Figure 6). The peritidal facies are distributed in the shoreline sector, representing the shallower depositional environments. They alternate between subtidal and intertidal environments, with periodic subaerial exposure, with sedimentation of the FA1 facies. The sedimentary rocks of the inner ramp include the facies of greater energy and with constant reworking, with ooids and oncoids as the main allochemical components. Lenticular layers, with varied cross bedding, are common sediments in this part of the ramp, defined by FA5. In the mid to outer ramp transition, sediments from the tempestite cycles and related fine sediments of FA3 are deposited. Some paleocurrent data measured in planar cross bedding indicate a deposition toward southeast (110

and 150), as well as GPR data obtained at the GMD quarry indicate clinoforms migration to SE (Freitas *et al.* 2021 and Dantas *et al.* 2022). In the deepest sector, defined as basin in this model, mudstones or shales and siltstones from FA4 and FA2, respectively, were deposited.

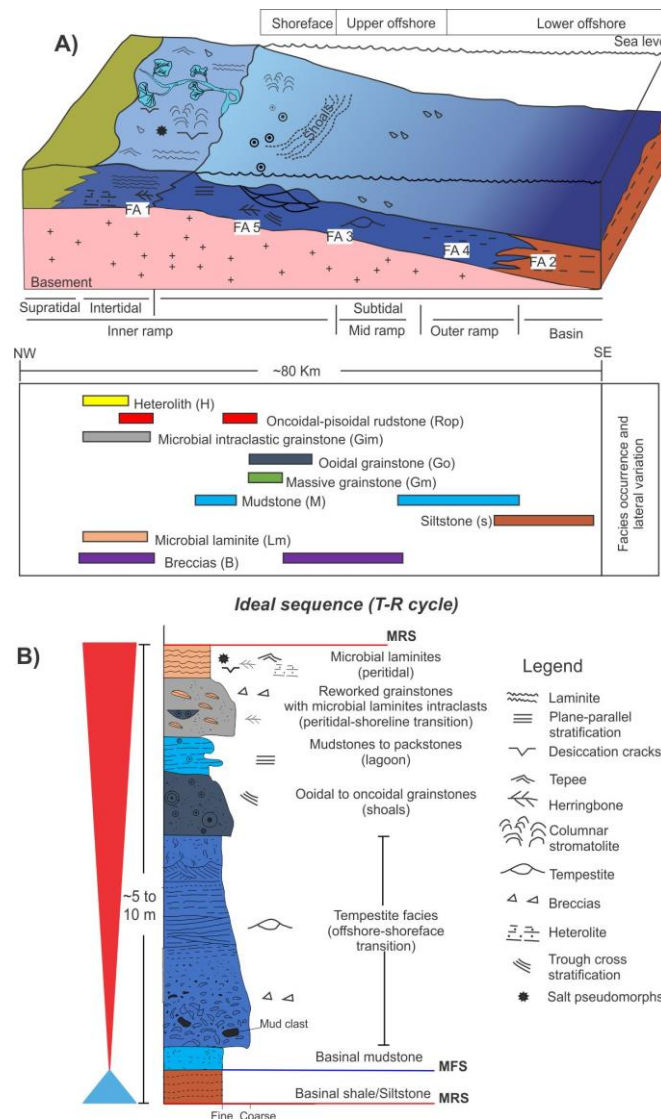


Figure 6 – A - Carbonate ramp depositional model proposed for the Lagoa do Jacaré Formation and the distribution of identified sedimentary facies; B – Conceptual transgressive-regressive sequence proposed for the studied deposits. Basin shale/siltstone represents the maximum transgressive event. To the top, shallower carbonate facies deposit composes the regressive hemicycle.

4.3 Sequence Stratigraphy of Lagoa do Jacaré Formation

4.3.1 Ideal sequence

Ideal (or elementary) sequences are formed by facies and their associations in the corresponding depositional systems arranged as high-frequency T-R cycles in a vertical profile. In the sketch of Figure 6, we present how a complete vertical stacking of the Lagoa do Jacaré Formation should be if all facies identified and interpreted in this work were present in a single T-R sequence during a complete variation of sea level. At the base of the cycle, it starts with deep water basinal shales. They represent the development of a transgressive system tract, marked at the top by a maximum flooding surface. Above these facies, the development of the carbonate factory is set by the occurrence of carbonate mudstone, representing the beginning of the regressive hemicycle and the predominance of a regressive system tract. It is followed by tempestite cycles in the offshore-shoreface transition in the outer ramp sector. Towards the top, it is recorded the sedimentation of ooidal/oncoidal sand shoals in the shoreface, mudstone to packstone in lagoonal settings, and reworked grainstones with microbial laminites intraclasts in the transition of shoreline to peritidal zone. The apex of the regressive hemicycle (and the maximum regressive surface) is marked by the occurrence of the microbial laminites in peritidal depositional environments, where it is identified sub-aerial exposure structures like desiccation cracks and salt pseudomorphs.

4.3.2 Outcrop stratigraphic analysis and stratigraphic correlation

The GMD Quarry outcrop (125 m thick) presents a vertical succession of dark gray intraclastic grainstone, breccia, mudstones, and wackestone at the base (FA3), composing tempestite cycles (Figure 4 and Figure 3F). To the top, there are thick beds of ooidal/oncoidal, intraclastic grainstones, with normal grading and planar cross stratification at some levels, deposited by shoal in the inner ramp (FA5). Therefore, a regressive hemicycle is marked from the base to the top. Facies from FA3 and FA5 grades upwards to siltstone layers (FA2) in the transition to the Serra da Saudade Formation, resulting in a transgressive system tract.

The vertical profile described in Curvelo, with total thickness of 30 m, presents only a 1 m- thick layer of microbialites at the base (FA1), which grades upward to a 3m-thick intraclastic ooidal grainstones intercalated with thin layers of mudstone and marlstone (FA5).

Thick siltstone layer deposits above with rare intercalated mudstone (FA2). Amalgamated layers of intraclastic ooidal grainstone with bidirectional cross stratification (herringbone) are deposited above (FA1). Above the grainstones there are heterolith (mudstone and very fine grainstones), which gradually grades upward to brown siltstone at the top (FA2). It is followed by massive dark gray grainstone with intraclasts and cross bedding (FA5). To the top, it presents a predominance of heterolithic layers (mud/wackestones-very fine grainstone) intercalated with 40 cm thick ooidal/oncoidal grainstone lenses with bidirectional stratification and breccias, (Figure 3B and C) deposited in tidal channels (FA1). The FA1 indicates the maximum regressive of the section, which presents two high frequency depositional sequences. The maximum transgression is marked in the siltstone facies at elevation 705 m (FA4).

In the Montes Claros section (located at the BR-040 road close to the homonymous city), with total thickness of approximately 190 m, the base presents a thick layer of fine to medium gray, massive, recrystallized grainstone, which grades upward to very fine grainstone to mudstone intercalated with microbial laminites (FA1). Above, there are ooidal intraclastic grainstones with cross and plane-parallel stratification from FA3. In the middle part of the section, microbial laminites predominates over fine grainstone (FA1). Above it, the section presents lenses of medium grainstone with cross stratification from FA5. It is followed by a 5m-thick dark gray wacke-packstone with hummocky cross stratification (FA 3). To the top, fine to coarse grainstone is intercalated with laminites at some levels, besides some breccia horizons, composing a FA1.

In the 41 m-thick Ubaí profile (Figure 5), centimeter microbialites layers (microbial mats – algal laminites) are predominant, intercalated with centimeters to millimeters mudstones, with localized occurrences of salt pseudomorphs, tepees and desiccation cracks, structures that refer to subaerial exposure in peritidal zone (Moura *et al.* 2022), composing the FA1. These facies indicate the development of a regressive system tract at lower rank sequences, marked at the top by the regressive surfaces in this section. The microbialites present a wide variety of textures, highlighting the microbial mats and the “boudinated” microbialites (Figure 2C). Other structures such as syneresis cracks and breccias are subordinate. Towards the top of the section, discrete thrombolite facies occur. The vertical succession of these facies refers to cycles of very high frequency deposited in peritidal environments.

Considering the distance between the sections and the lack of hard stratigraphic markers, beds with allochemical grains such as ooids and oncoids were used as markers for the correlation between Paraopeba and Curvelo sections. In the 30 m section described in Curvelo, the carbonate levels show a predominance of these components, intercalated with fine sediments from the outer ramp (FA3) in distal settings, and at the GMD quarry they occur at the top composing the FA5 in proximal settings (Figure 4). The peritidal sediments described in the vertical profile of Ubaí, microbial laminites-bearing layers (FA1) intercalated with breccia and grainstone, were correlated to the middle part of the Montes Claros column, between 712 and 767 m (Figure 5).

Considering the depositional evolution presented in each column, we believe that the complete cycle of sedimentation of the Lagoa do Jacaré Formation starts with deposits of limestone reworked by waves in mid to outer ramp, changing to ooidal/oncoidal shoreface bars in the inner ramp. After that, sediments from peritidal zone predominated, identified by sub-aerial exposure features. To the top, sediments of progressively deeper waters occur until the contact with the Serra da Saudade Formation. The stratigraphic correlation of the outcrops is shown in Figure 4 and Figure 5. Reis and Suss (2016) described 80 m of similar facies association working with well log data (peritidal channels and sand shoals/tidal delta) in the southern part of São Francisco Basin, which represents shallowing upward trends. Uhlein *et al.* (2019) described in the northern part of the basin approximately 100 m of a section essentially carbonate (dark-gray grainstone, mudstone and rudstone of shallow water) at the base that represent a regressive system tract, and a mixed siliciclastic-carbonate (shales and rhythmites) to the top, representing a transgressive system tract.

4.3.3 Wells stratigraphic analysis and correlation

Well logs were used to interpret facies in the subsurface and correlate the well sections and the outcrops. Well 1-PTRA-25-MG was drilled close to the Ubaí region and the 1-PTRA-9A-MG is located in the Montes Claros region.

A 320 m-thick interval was interpreted as deposits of the Lagoa do Jacaré Formation. It was based in the vertical succession of lithofacies available in the well logs coupled to the gamma-ray profiles. In general, they present grainstones at the base grading upward to a shale

rich interval in the middle of the section. Limestone predominates to the top of the wells. Dark, fine and laminated grainstones with cross stratification with some breccias lenses represents the shallow water facies association. They have low gamma-rays values. Dark micas-bearing siltstone and shale facies represent deeper waters, and has high gamma-rays values. Vertical alternation of these facies results in transgressive and regressive hemicycles.

Following the premise determined above, it is possible to correlate the well logs. We obtained the sequences rank comparing them with the sequences proposed by Reis and Suss (2016). Therefore, our lower rank sequences are related to the 2nd order ones of those authors. The Maximum Flooding Surface (MFS) was marked at the top of the 3rd order transgressive hemicycle (Figure 7). This level presents the highest peak of gamma rays within the studied interval, rich in shales and siltstones. It marks a succession of thickening-upward of the 4th order transgressive hemicycles in the 1-PTRA-9A-MG well.

Thirteen complete 4th order-sequences comprise the thickest part of the studied interval, in the northern region of Minas Gerais, lithostratigraphically related to the Lagoa do Jacaré Formation, deposited along the Ediacaran-Cambrian boundary. At high frequency, this succession represents the onset of a carbonate ramp with periodic flooding events. It has a total thickness of 335 m, with a well-marked serrated bell and funnel-shaped gamma-rays curve. At distal zone, shale layers predominate at the base of the well 1-PTRA-9A-MG, which grade upward to dark to light gray limestone. To northwest wells at the proximal zone (1-PTRA-25-MG), grainstones, siltstones and mudstones predominate at the base. This interval marks the first 3rd-order regressive hemicycle of the studied succession.

Very high peaks of gamma rays profiles (90-150 °API) in the 1-PTRA-25-MG mark sharply the following 3rd-order transgressive hemicycle that comprises thick siltstones intercalated with limestone. Laterally, in the 1-PTRA-7-MG well, layers of mudstones and fine grainstones are recorded at the base grading upward to shales (Figure 7). At the top of this succession, the MFS is marked. The final 3rd-order regressive hemicycle is marked at the top by unconformities in the wells located in the northwest. The “unconformity” marked in Figure 7 records erosion of the upper sediments of the Neoproterozoic/Paleozoic succession, placing the studied interval in contact with the Cretaceous sediments of the Urucua Group. This unconformity also occurs in the 1-PTRA-7-MG well, but its record in the 1-PTRA-9A-MG well is a correlative conformity, as the succession does not present lack of sediments (Figure 7).

“Unconformity 2” represents the erosion or non-deposition of Cretaceous sediments from the São Francisco Basin in the area of the 1-PTRA-9A-MG well, and overlays the “unconformity” in the other wells.

Considering the framework presented above, we propose the correlation between outcrops and wells, which supports the following interpretation. The regressive and the transgressive hemicycles interpreted in the GMD can be correlated to the studied wells when analyzed approximately at the same scale (Figure 7). It seems that the upper 3rd-order regressive hemicycle of the section in the 1-PTRA-25-MG is related to the Lagoa do Jacaré Formation that outcrops all around the Ubaí region, according to the geological map (Figure 1). The outcrops studied in this work only reach a 120 m thickness succession in the GMD quarry and approximately 150 m in Montes Claros, the same as other authors like Uhlein *et al.* (2019) for example. Therefore, we suggest that in the studied wells, the Lagoa do Jacaré Formation comprises an interval of more than 300 m of thickness, not recognized before.

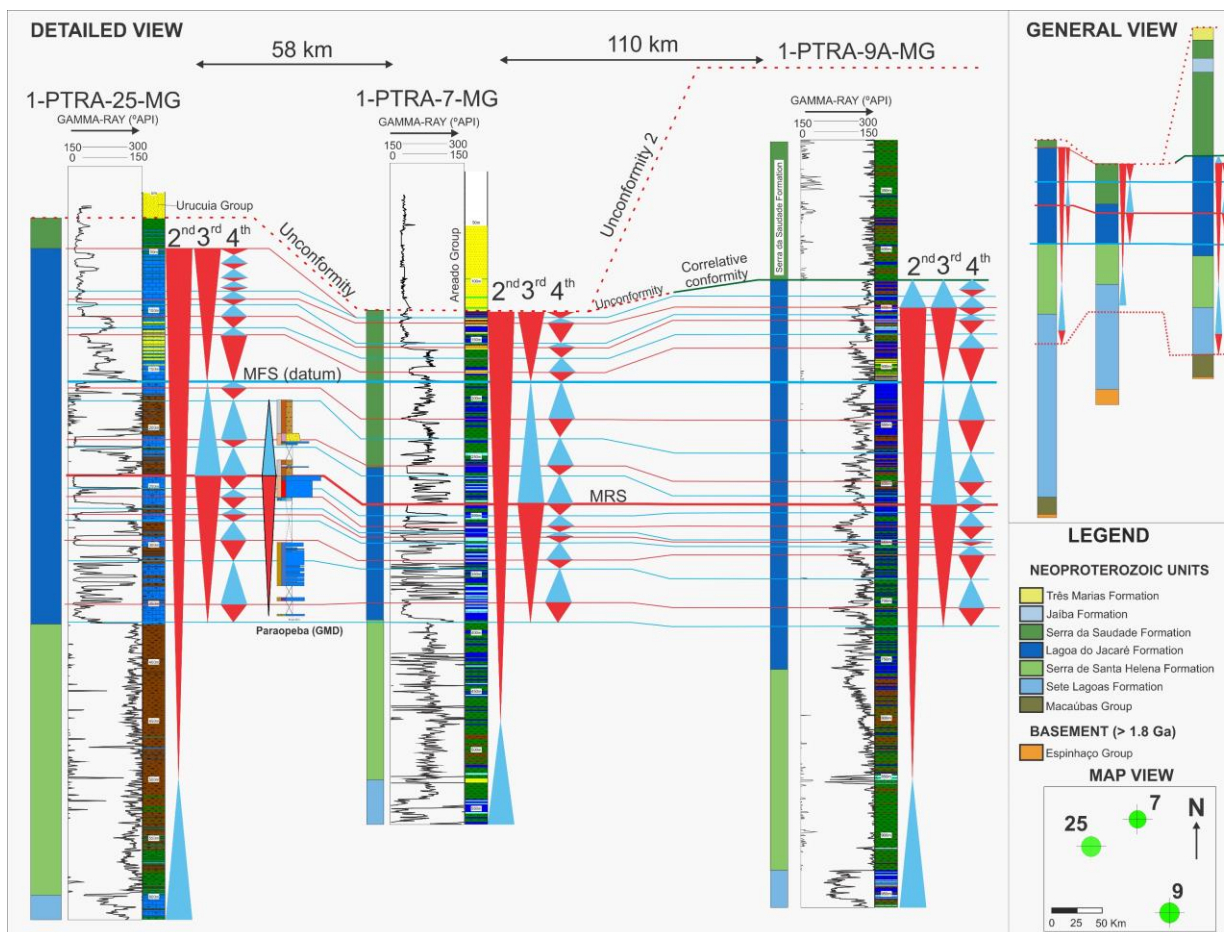


Figure 7 – Stratigraphic correlation of the studied well logs proposed to the interval related to Lagoa do Jacaré Formation. Also note the correlation between the GMD quarry and the well 1-PTRA-25-MG. The lower frequency hemicycles of GMD quarry correlate with the 3rd-order frequency hemicycles of the well according to the vertical facies succession. See the legend in Figure 4 for the lithotypes along the wells.

4.4 Petrography and diagenetic aspects of the carbonate rocks of the Lagoa do Jacaré Formation

4.4.1 Petrographic characterization

Main allochemical components are oncoids, ooids (Figure 8A and B) and micro-oncoids (Figure 8C), present in ooidal grainstone (Go), oncoidal rudstone (Rop), and Gm facies. Intraclastic grainstone (Gm) (D) has similar textural aspects to Go but without significant coated grains. Instead, intraclasts are up to 2 mm, make up to 50% and are often micritized. Oncoidal-pisoidal rudstone (Rop) has pisoids and oncoids as main components, with predominantly equant calcite cement in a loose packing. We described only macroscopic aspects of breccia (B), as well as the shale and sandstone. Microbial laminites may have boudin-like structures, salt pseudomorphs, fenestrae pores filled by blocky calcite, and plane-parallel lamination (E and F). Moura *et al.* (2022) described in more details the microbialite facies. Wackestone with siliciclastic extraclasts and mudstones (M) (Figure 8G) are the finest facies. Siltstone (S) (Figure 8H) have more than 50% of siliciclastic grains although they also have some carbonate micrite (<20%).

We characterize for the first time a different mineral assemblage for the Lagoa do Jacaré Formation using SEM-EDS data. Some terrigenous minerals, such as quartz, plagioclase, biotite, muscovite, and apatite were found in the studied areas (Figure 9). Other minerals, like framboidal and euhedral pyrite, authigenic/diagenetic fluorite, and authigenic/diagenetic titanite have also been identified in the studied samples. Framboidal pyrite occurs filling the secondary porosity or incrusting the Fe mica minerals (Figure 9B and H) in both studied areas (Ubaí and GMD quarry). Fluorite occurs as prismatic to rounded crystals (Figure 9G) at the GMD quarry. They are often associated with calcite and quartz. Detrital apatite occurs as rounded grains (5-20 μm) in the studied samples (Figure 9D). Titanite occurs as rounded and prismatic grains (4-150 μm), sometimes with dissolved rims, mainly at the GMD quarry. They can be zoned where rutile occurs at the center (Figure 9H) or filling some fractures in a quartz grain and has been incrustated by some pyrite grains (Figure 9F).

4.4.2 Diagenetic alterations

We described minerals and main features using conventional petrography and SEM-EDS analysis in order to evaluate possible C and O isotopic alterations (Figure 8, Table 1). Only few works have detailed diagenetic aspects of the Lagoa do Jacaré Formation, (e.g. Tonietto, 2010). Comparisons with this work supported some interpretation about the different diagenetic features and their order of occurrence.

Cement fringes around the coated grains are observed in the Gm, Go and Rop facies (Figure 8A-B). Sparry calcite, equant calcite and drusy cements are second and sometimes third phases of cementation, filling almost all the remaining porosity (Figure 8B) during eo and mesodiagenesis. Micritization of intraclasts, ooids, and oncoids is observed in ooidal and oncoidal grainstone (Figure 8B). Pyrite precipitation is also an important diagenetic process, suggesting active sulfate and iron cycles in sediment pores. During early or late diagenesis (Taylor and Macquaker, 2000), the precipitation of pyrite is controlled by the oxidation of organic matter and reduction of ferric iron and sulphate. It occurs associated with organic films (Figure 8B), and occurs isolated in stylolite or disperse in the framework under two main forms, framboidal or cubic.

Intense neomorphism process occurs in burial environment during mesodiagenesis, with limpid equant blocky calcite occupying the inter- and intragrain space (Figure 8B). In Figure 8B we can see recrystallized crystals been part of an oncoid and the cement at the same time. Dissolution processes and preserved open pores are rare.

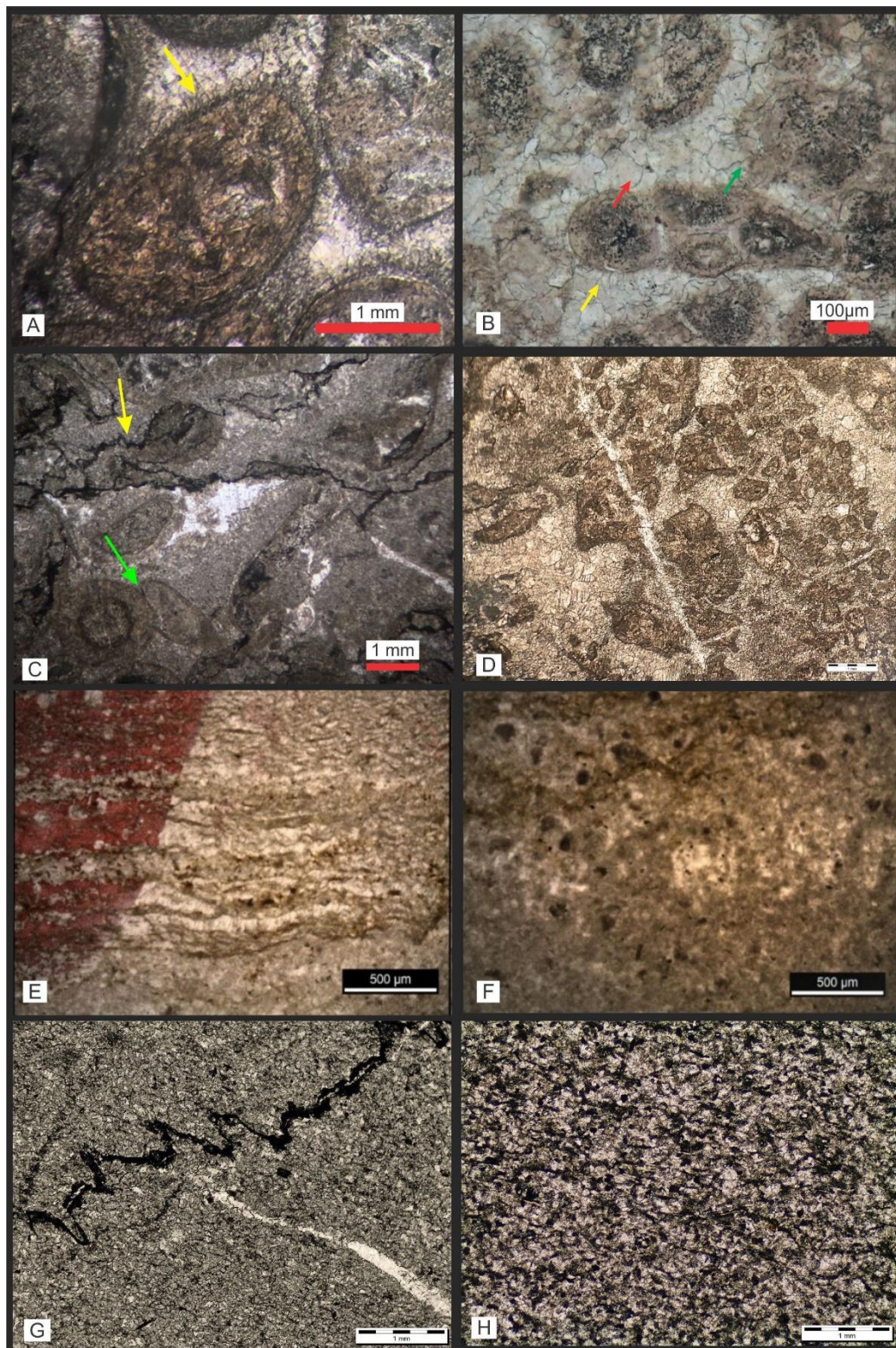


Figure 8 – Main petrographic aspects of the Lagoa do Jacaré Formation. A- Detail of acicular cement in an oncoidal-pisoidal rudstone; B- Fringe around oncoid pointed by yellow arrow, equant calcite cement pointed by the red arrow and an example of recrystallization (green arrow) in an oncoidal grainstone. Note pyrite dissemination within oncoids; C- Sutured contacts and stylolite indicated by green and yellow arrow respectively

(PPL); D – Intraclastic breccia/rudstone with fracture; E – Laminated microbial laminite with Alizarin staining to highlight calcite; F – Microbial laminite with massive texture; G – Mudstone with fracture and stylolite; H – Massive siltstone.

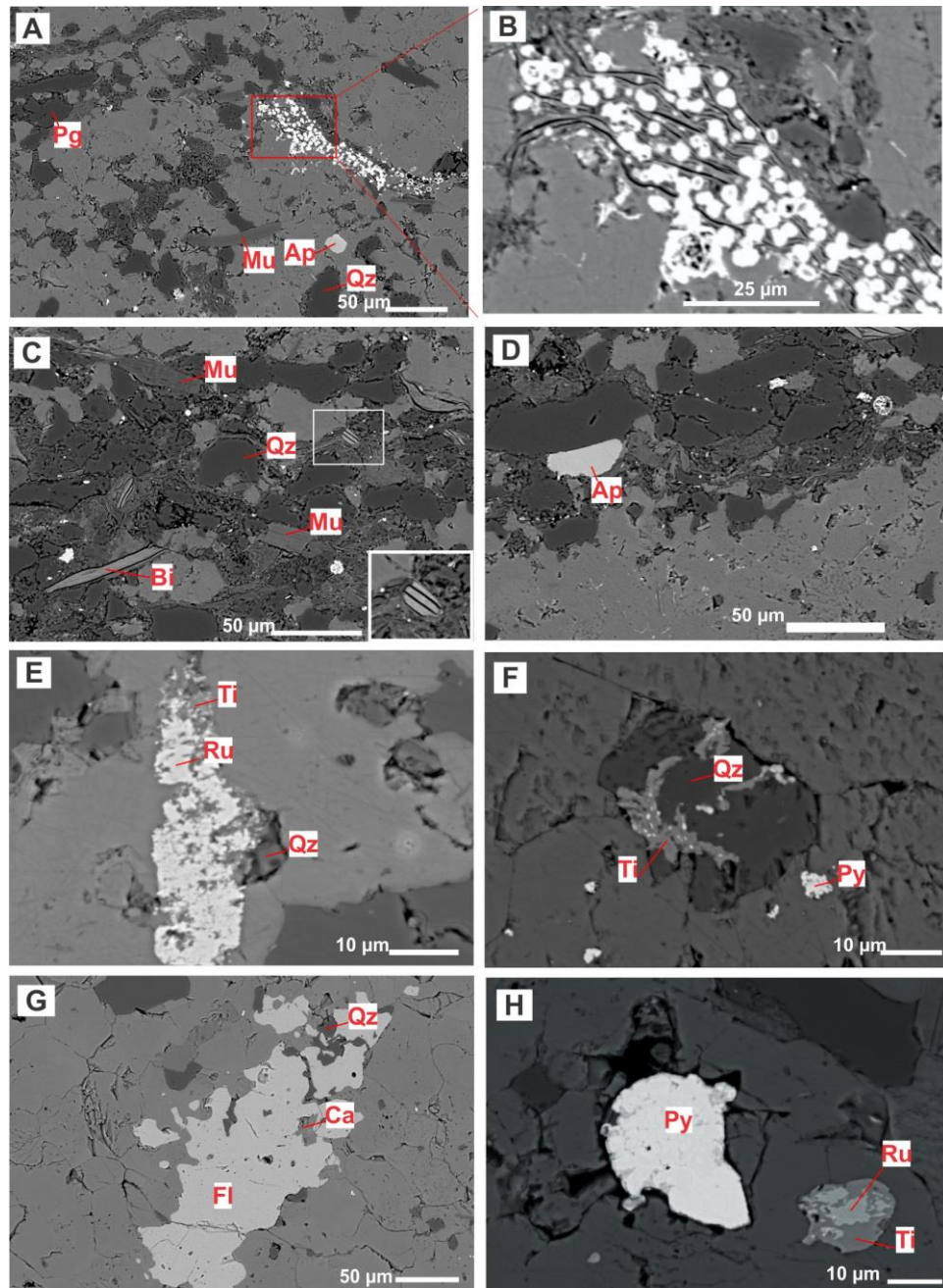


Figure 9 – Photomicrographs A to D from Ubaí area and E to H from GMD quarry. A and B – Detail of the interaction between pyrite and biotite (Bi). B – Detail of A. Note pyrite crystals bending the biotite layers. C – Detrital minerals such as quartz (Qz), muscovite (Mu), biotite (Bi); D – Detail of apatite (Ap). E – Center of image: interaction of quartz, titanite (Ti) and possible rutile (Ru). F – Interaction in quartz, titanite and pyrite in

the same grain. G – Detail of fluorite showing interaction with quartz and calcite crystals. H – Possible process of substitution of rutile by titanite, besides framboidal pyrite in the center of image. Pg: Plagioclase.

4.5 Chemostratigraphy

The chemostratigraphic data ($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$) of the Lagoa do Jacaré Formation from Ubaí, Montes Claros, Curvelo and Paraopeba sections are presented in Table 3 and illustrated in Figure 4 and Figure 5. The minimum and maximum values of $\delta^{13}\text{C}$ were +7.1‰ and +13.9‰, respectively. These high positive values of $\delta^{13}\text{C}$ correspond to part of the Middle Bambuí Excursion (MIBE), defined by Uhlein et al. (2019). For the values of $\delta^{18}\text{O}$, the maximum was -2.9‰ and the minimum was -12.9‰. The correlation factor (R^2) in the scatter plot between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ show values of 0.10, 0.41, 0.36 and 0.61 to Paraopeba, Curvelo, Montes Claros, and Ubaí respectively. The R^2 factor for the entire data is 0.10. Given the low covariation between $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ and $\delta^{18}\text{O}_{\text{carb}}$, these values are interpreted to be pristine, without post-diagenetic alteration (Figure 10). Although some of these values suggest post-depositional alteration (such as 0.6102 in Ubaí), in general, these values are similar to those found by other authors in several sections of the Lagoa do Jacaré Formation in Minas Gerais (Paula-Santos et al. 2015; Hippertt et al. 2019; Uhlein et al. 2019; Cui et al. 2020; Caetano-Filho et al. 2021; Dantas et al. 2022). Therefore, they can be used for chemostratigraphic interpretations.

We noted that the data have a slight difference in the mean values of $\delta^{13}\text{C}$, around +12.17‰ in Curvelo, +10.29‰ in Montes Claros and +9.06‰ in Ubaí, all of which are lower than the average value found in the tempestite deposits described in the GMD Quarry in Paraopeba (+12.60‰). Uhlein et al. (2019) already noted these tendencies of decreasing in the $\delta^{13}\text{C}$ values from the base to the top of the formation working in the region of the Januária paleo-high, consistent with the Ubaí section according to Moura et al. (2022). The Montes Claros section also has this decreasing tendency to the top (Figure 5). It is clear that these findings may be related to stratigraphic or paleogeographic factors. Therefore, it must be further investigated, looking for other correlatable sections that comprises similar geochemical intervals. Shallow water carbonate rocks are expected to have higher values of $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ than deep-water limestones, considering the consumption of ^{12}C by photosynthetic processes and kinetic disequilibria by evaporation in shallow waters is higher, making the $\delta^{13}\text{C}$ more positive (Shackleton et al. 1983; Kroopnick, 1985). Considering the non facies-dependent relationship

of the $\delta^{13}\text{C}$ (Figure 4 and Figure 5), we assume that these differences may be more related to stratigraphic/temporal evolution than paleogeographic conditions, as we demonstrate with well logs and outcrops correlations. In this way, we suggest that the sections studied are probably from different stratigraphic intervals of the Lagoa do Jacaré Formation: the lower section is exposed in the Paraopeba region and the upper section is exposed in the Ubaí region (Figure 7), corresponding to a negative excursion from +12 to +9‰ respectively. The implication of this correlation in the evolution of the Bambuí foreland basin system is discussed as follows.

Table 3 – $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values obtained in this study.

Locality	Sample	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$
Curvelo	CUP 01	11.98	-12.99
Curvelo	CUP 16	11.77	-12.42
Curvelo	CUP 08	11.30	-11.76
Curvelo	CUP 15	11.41	-11.70
Curvelo	CUP 04	11.36	-11.35
Curvelo	CUP 09	11.46	-11.07
Curvelo	CUP 05	11.87	-11.04
Curvelo	CUP 18	13.12	-10.83
Curvelo	CUP 03	12.50	-10.62
Curvelo	CUP 17	12.70	-10.32
Curvelo	CUP 19	12.39	-9.76
Curvelo	CUP 06	12.25	-9.74
Curvelo	CUP 11	12.51	-8.62
Curvelo	CUP 20	12.45	-8.43
Curvelo	CUP 13	12.67	-8.10
Curvelo	CUP 22	12.54	-7.97
Curvelo	CUP 21	12.70	-7.96
Montes Claros	MC 09	7.84	-5.79
Montes Claros	MC 13	8.19	-5.72
Montes Claros	MC 15	10.75	-5.56
Montes Claros	MC 08	11.72	-5.32
Montes Claros	MC 07	11.23	-5.06
Montes Claros	MC 06	9.17	-4.93
Montes Claros	MC 14	9.54	-4.70
Montes Claros	MC 11-2	9.99	-4.66

Montes Claros	MC 12	10.26	-4.17
Montes Claros	MC 05	12.71	-4.13
Montes Claros	MC 10	11.84	-3.66
Paraopeba	PP03	11.20	-11.25
Paraopeba	G4-8	12.12	-10.94
Paraopeba	G5-15	13.14	-10.54
Paraopeba	PP09	12.50	-9.84
Paraopeba	G4-4	11.26	-9.81
Paraopeba	G4-16	11.43	-9.81
Paraopeba	G4-15	12.98	-9.70
Paraopeba	PP04A	11.96	-9.53
Paraopeba	G5-02	13.08	-9.53
Paraopeba	PP05C	12.46	-9.42
Paraopeba	G4-14	12.73	-9.39
Paraopeba	G5-01	12.65	-9.26
Paraopeba	G5-06	12.52	-9.21
Paraopeba	PP08A	13.68	-9.20
Paraopeba	PP08B	13.65	-9.04
Paraopeba	G5-11	11.92	-8.98
Paraopeba	G5-14	12.31	-8.77
Paraopeba	G5-07	13.94	-8.77
Paraopeba	G5-05	13.54	-8.73
Paraopeba	G4-11	12.99	-8.56
Paraopeba	G4-2	11.11	-8.26
Paraopeba	G4-12	12.82	-7.88
Paraopeba	PP07	12.67	-7.76
Paraopeba	PP02	12.33	-7.56
Paraopeba	G4-9	12.31	-7.25
Paraopeba	G5-04	12.77	-6.96
Paraopeba	G4-7	12.72	-6.49
Paraopeba	PP06	13.17	-6.18
Paraopeba	G5-16	13.56	-5.94
Ubaí	P2A	8.70	-8.22
Ubaí	P2E	8.96	-8.04
Ubaí	P2B	8.63	-7.76
Ubaí	P2H	8.50	-7.52
Ubaí	PIFL	7.85	-7.43

Ubaí	P2FL	8.30	-7.43
Ubaí	PIEL	7.81	-7.27
Ubaí	PICL	7.67	-7.04
Ubaí	23UC	8.25	-6.64
Ubaí	PIB	9.14	-6.42
Ubaí	P2GL	7.16	-6.38
Ubaí	PIDL	7.82	-6.38
Ubaí	PIA	8.13	-6.34
Ubaí	P2I	11.01	-6.18
Ubaí	P2D	9.93	-5.30
Ubaí	27UC	10.99	-5.18
Ubaí	PIG	12.14	-3.42
Ubaí	7UA	12.15	-2.99

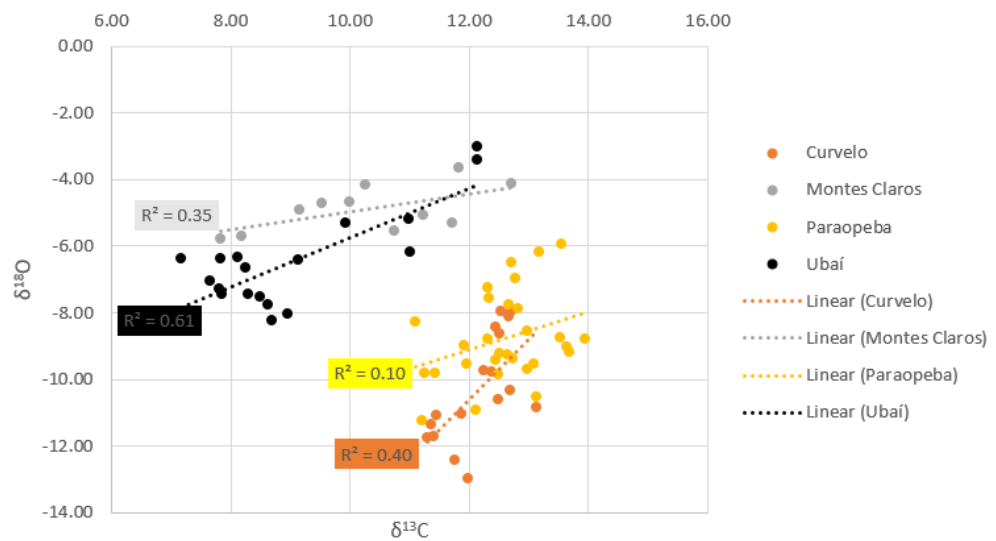


Figure 10 – Scatter plot of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values. R^2 coefficient is low for the correlation of $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{18}\text{O}$ except for the Ubaí section. Total R^2 factor is 0.10.

5. Discussion

5.1. Foreland Basin – Sedimentation of the Lagoa do Jacaré Formation in a back-bulge

Foreland basins present strong tectonic compartmentalization that controls the types of sediments deposited in each sector. These basins present conglomerate wedges grading to sandstones and siltstones in the wedge-top (associated with thrust faults), deep-water shales and siltstones in the foredeep, and carbonate ramp sediments in the forebulge/back-bulge (Decelles & Giles, 1996; Catuneanu 2004). Several works support interpretations of a foreland-type basin for the southern area of the Bambuí Basin (Dardenne, 2000; Alkmim and Martins-Neto, 2001; Hercos *et al.* 2008; Coelho *et al.* 2008; Martins-Neto, 2009; Uhlein *et al.* 2011b; Alkmim and Martins-Neto 2012; Reis and Alkmim, 2015; Reis and Suss, 2016; Uhlein *et al.* 2017). Conglomerates are mapped in the regions of Lagoa Formosa and Patos de Minas, Pimenta and Cristais (Figure 12) in the western sector of the basin (wedge-top), mudstones in the central area (foredeep) and limestones intercalated with pelites in the eastern portion (forebulge), in the Sete Lagoas High region.

In the central region of the Bambuí basin, in northern Minas Gerais, Lopes (1981) and Reis and Alkmim (2015) suggest that the Januária High was formed during the early stages of development of the São Francisco Basin, remaining as a structural high (forebulge) during the sedimentation of the Bambuí Group due to tectonic reactivation caused by the Brasiliano orogeny. Therefore, Rossi *et al.* (2020) considered the existence of a back-bulge sector in the eastern area of the Bambuí Basin during the sedimentation of the Lagoa do Jacaré Formation in this region. The seismostratigraphic analysis of the seismic line 400 (Figure 11) also supports this interpretation. We observed that the sedimentary deposits of the Lagoa do Jacaré Formation get thicker from the Januária High to the south/southeast, towards to Montes Claros, following the progressive dipping of the basement from northwest to southeast (1° in all directions according to Perrella *et al.* 2017) due to increasing in the accommodation space. Paula-Santos *et al.* (2015), Kuchenbecker *et al.* (2020), Tavares *et al.* (2020), using different methods, confirmed the role of the Araçuaí Belt as a source area in this region after the sedimentation of the Lagoa do Jacaré Formation. Therefore, this orogen is the eastern margin of the back-bulge sector in the central region of the basin (Figure 12 and Figure 13), limited by regional thrust faults observed on geological maps.

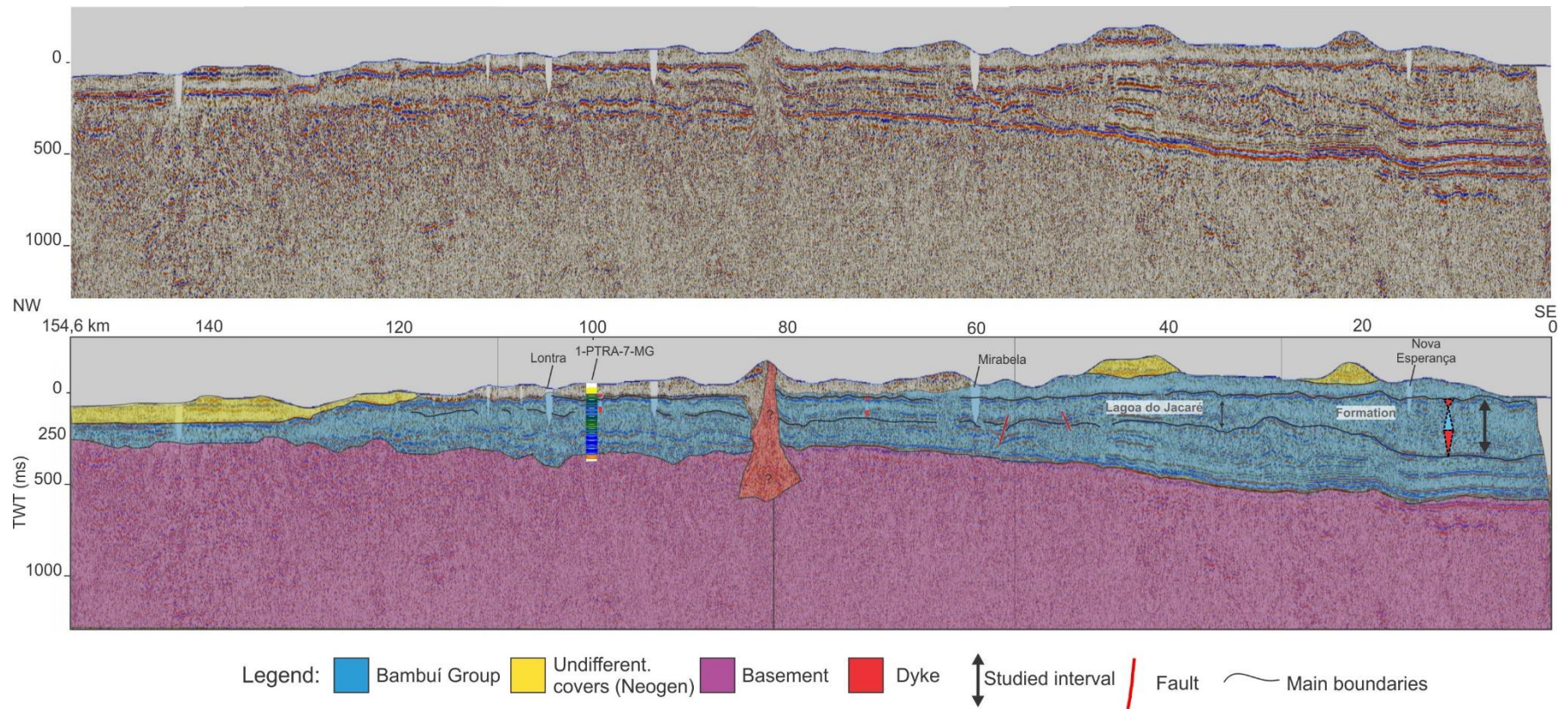


Figure 11 – Interpretation of the 400 seismic line and the 1-PTRA-7-MG well. Note the thickening of the Bambuí Group to southeast, including the Lagoa do Jacaré related interval.

According to the data acquired for the Lagoa do Jacaré Formation, we can list some important characteristics of the Ubaí-Montes Claros region (northern Minas Gerais): i) lack of record of conglomeratic wedge-top facies to the west; ii) larger outcropping areas; iii) faciological diversity; iv) greater thickness of stratigraphic succession (>300 m). According to our data, in this region, shallow water carbonate facies predominate in a carbonate ramp system influenced by storm events with the formation of an extensive peritidal zone, due to the ramp enlargement to the north (north of Serra do Cabral) (Figure 12). Limestone observed in the outcrops of Ubaí grade laterally to siltstone, shale and mudstone of deeper water, towards to Montes Claros (Figure 11 and Figure 12). The enlargement of the carbonate ramp is reflected in a thickening of the carbonate rocks in the section lithostratigraphically related to the Lagoa do Jacaré Formation, reaching more than 300 m, such as those recorded at Ubaí and Montes Claros (Figure 7). Vertical profiles surveyed in outcrops by several authors (Paula-Santos *et al.* 2017; Uhlein *et al.* 2019; Cui *et al.* 2020; Dantas *et al.* 2022; Moura *et al.* 2022) achieved 150 m of thicknesses for this unit in other areas of the basin.

In summary, we interpreted that the carbonate rocks of the Lagoa do Jacaré Formation were deposited in a carbonate ramp in the forebulge and back-bulge sectors of the Bambuí foreland basin, developed in the surroundings of the Januária High until the north of Serra do Cabral. It has approximately 230 km wide in its larger section in a N-S trend in the northern region of the Minas Gerais. It underwent tectonic reactivation during the Brasiliano orogeny as a response to the negative flexure of the foredeep (Decelles & Giles, 1996; Catuneanu 2004), formed due to uplift of the Brasilia Belt. Unlike the south region of the basin, conglomeratic deposits of wedge-top (Samburá and Lagoa Formosa Formations) are absent (Figure 12). Very fine siliciclastic rocks from the Serra da Saudade Formation and sandstones from the Três Marias Formation filled the foredeep sector (red lines in Figure 12) according to the geological map, being developed under a paleogeographic configuration as discussed in the following topic.

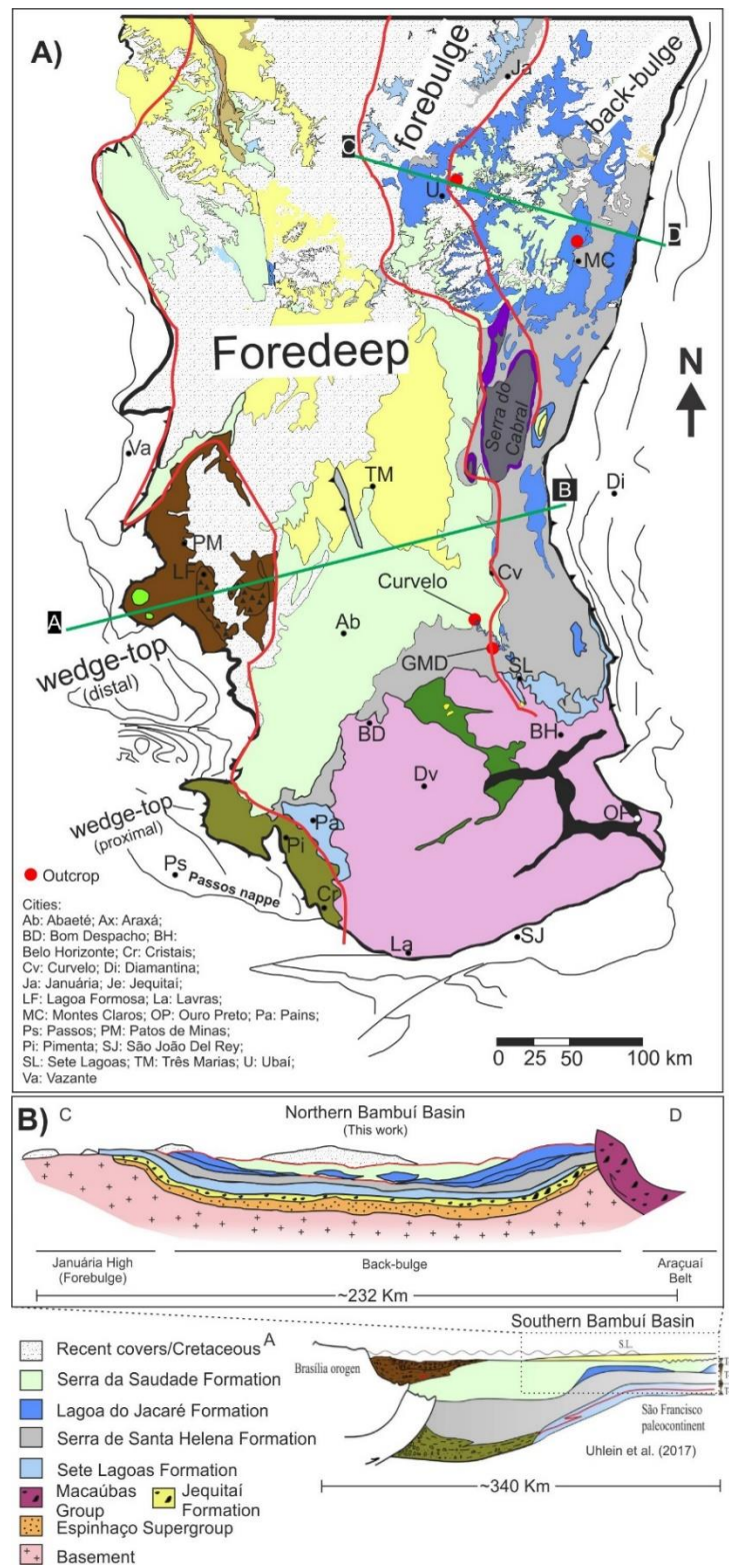


Figure 12 – Simplified geological map for the Bambuí Group. (A) Domains of the foreland basin: foredeep, forebulge and back-bulge delimited by the red lines. (B) Profiles with different geometries for the Bambuí basin. See text for details.

5.2. Paleogeographic evolution of the Lagoa do Jacaré Formation

The most recent tectonic and geochronological data obtained for the Bambuí Group show that the deposition of this group occurred between the early Ediacaran (Warren *et al.* 2014; Paula-Santos *et al.* 2015; Caxito *et al.* 2021) and the early Cambrian (Moreira *et al.* 2020, Tavares *et al.* 2020; Sanchez *et al.* 2021), around 635 to 520 ± 5 Ma. The entire Gondwana supercontinent was amalgamated close to the southern hemisphere (Merdith *et al.* 2017) at this point of the evolution of the paleocontinents, in the final stages of the event that uplifted the Brasília Belt (Dardenne, 2000; Pimentel *et al.* 2011), and also the formation of the Araçuaí Belt (Pedrosa-Soares *et al.*, 2001; Brito-Neves *et al.* 2014; Kuchenbecker *et al.* 2020). The mixed carbonate-siliciclastic sediments of the Lagoa do Jacaré Formation were deposited in this context, around late Ediacaran-early Cambrian, which presents faciological variation (Iglesias and Uhlein, 2009) controlled by paleogeographic and tectonic aspects (Piatti, 2022). We propose in this work the paleogeographic evolution of this formation in the north-central region of the state of Minas Gerais, obtained after discussing a series of data.

The outcrops studied in this work allowed the identification of 8 facies, grouped in 5 facies associations deposited in a homoclinal carbonate ramp system. The following depositional systems were recognized in this ramp model, developed according to the main geomorphological features existing at that time: 1- peritidal, 2- platform (offshore siliciclastic), 3- external ramp, 4- platform (offshore carbonate), and 5- shoal-type carbonate bars (Figure 6). In the area close to Ubaí, the deposition of biochemical sediments from shallow waters predominated (microbial laminites), with occurrences of desiccation cracks, possible pseudomorphs of salt and tepees (Moura *et al.*, 2022) (Figure 3). This area is located at the southern borders of the Januária High, being, therefore, a place for the development of extensive peritidal environments. The Montes Claros area presents a succession of facies that register greater shoreline variations, with the deepest water deposits of the studied interval, deposited in the distal sector of the basin, represented by a thick layer of carbonate mudstone in the middle part of this section. However, in moments of marine regression, at high frequency, thin shallow water deposits (microbialites) were also deposited. Towards the southern part of the basin, in the Curvelo region, we identified lenticular layers of ooidal/oncoidal shoals intercalated with deep water siltstones, showing high frequency interaction of proximal and distal environments. In the Paraopeba region, south of the study area, tempestite deposits predominate at the base,

sedimented in mid ramp in the offshore-shoreface transition, that grade upwards to ooidal grainstones from shoreface shoals (Freitas *et al.* 2021; Dantas *et al.* 2022).

The main paleocurrents data show trends to E/SE, as in the GMD quarry, with some occurrences also for W in other locations, such as in Cordisburgo area (Uhlein, 1991; Uhlein *et al.* 2019; Rossi *et al.* 2019; Dantas *et al.* 2022; Moura, 2022). Thus, we interpreted that the Bambuí Basin developed in the general N-S direction, with a shoreline following this direction, considering the current position of the continents. However, in the paleogeographic model of Merdith *et al.* (2017), between 540-520 Ma, the cratonic blocks that composed this region were positioned between latitudes of -60° and -30° , with the geographic north as shown in Figure 13. Therefore, the real direction of the Bambuí Basin coastline at the time of the deposition of the Lagoa do Jacaré Formation would be close to SW-NE. Transposing the values of known paleocurrents would result in transport directions for approximately SE and NW at the time of deposition. In its central region, the basin was larger than in the southern part, forming a carbonate ramp with deposits of microbialites and stromatolites intercalated with intraclastic grainstones and rudstones, with slightly different isotopic characteristics between both areas. A coastal zone can be probably located in the surroundings of the Januária High. Small rivers delivered siliciclastic grains (mainly silt-sized grains) from the continent to the basin (Hippert *et al.* 2019; Caxito *et al.* 2021) (Figure 13). The accommodation space increased to the east, according to the smooth deepening of the basement (Figure 11).

The chemostratigraphic data collected during the last years (Martins and Lemos, 2007; Paula-Santos *et al.* 2015, Kuchenbecker *et al.* 2016; Paula-Santos *et al.* 2017; Uhlein *et al.* 2019; Hippert *et al.* 2019; Caetano-Filho *et al.* 2019; Caxito *et al.* 2021) show distinct stratigraphic intervals in the succession of the Bambuí Group. In the middle Bambuí, the $\delta^{13}\text{C}$ data for carbonates from the Lagoa do Jacaré Formation have mean values above $+10\text{‰}$, decoupled from the global $\delta^{13}\text{C}$ curve (Caxito *et al.* 2021), in accordance with the main part of the MIBE interval. A period of permanent isolation of the basin during the sedimentation of the Lagoa do Jacaré Formation is suggested due to the elevation of the surrounding fold belts (Uhlein *et al.* 2019; Kuchenbecker *et al.* 2020; Caxito *et al.* 2021). However, towards the top of the studied interval, in the region of Ubaí, the average value of $\delta^{13}\text{C}$ is around $+9\text{‰}$. According to our stratigraphic interpretation, it can be inferred that the upper succession of the Lagoa do Jacaré Formation in Ubaí, thicker than in other areas, already shows this possible

tendency of decreasing in $\delta^{13}\text{C}$ values. It is possible to associate with the initial process of re-coupling to the global curve, due to the reconnection to global seas (Caxito *et al.* 2021; Moura *et al.* 2022), registered by local high-frequency (4th order) transgressive events (Figure 7), acting in tandem with a possible decreasing of organic matter primary production.

In summary, the depositional systems identified in this work show vertical alternation related to high frequency variations in the sea level of the Bambuí Basin during the deposition of the Lagoa do Jacaré Formation. It resulted from the combined action of the limiting folding belts (Kuchenbecker *et al.* 2020), Araçuaí and Brasília, during the interval between 540-520 Ma (Moreira *et al.* 2020; Caxito *et al.* 2021). The tectono-structural data already collected define a tectonic compartmentation of the basin (Reis and Suss, 2016; Kuchenbecker *et al.* 2020). The Januária High was an important region of deposition of shallow water sediments of the Lagoa do Jacaré Formation in the forebulge and back-bulge in the central region of the basin (Lopes, 1981; Santos *et al.* 2018; Uhlein *et al.* 2019), with an ancient shoreline in SW-NE direction at the time of deposition (current N-S). In the southern region of the basin, a continuous east-west carbonate platform developed in the forebulge, foredeep and wedge-top sectors (Uhlein *et al.* 2017). The most recent studies support that the Bambuí sea was already isolated from the global oceans at 540 Ma. The Brasília Belt already configured a mature orogen, mainly reworking the orogenic fronts at that moment. At the same time, that the Araçuaí Belt was being built. Therefore, both orogens constituted important source areas of sediments to the entire Bambuí Group (Paula-Santos *et al.* 2015, Kuchenbecker *et al.* 2020), as evidenced by the high content of siliciclastic grains we observed for the Lagoa do Jacaré Formation. At the end of the deposition of the formation, it is suggested moments of greater water circulation in a wide carbonate platform possibly due to the reconnection with global oceans, given the tendency of decreasing average values of $\delta^{13}\text{C}$ towards the top of the unit during the Ediacaran-Cambrian boundary.

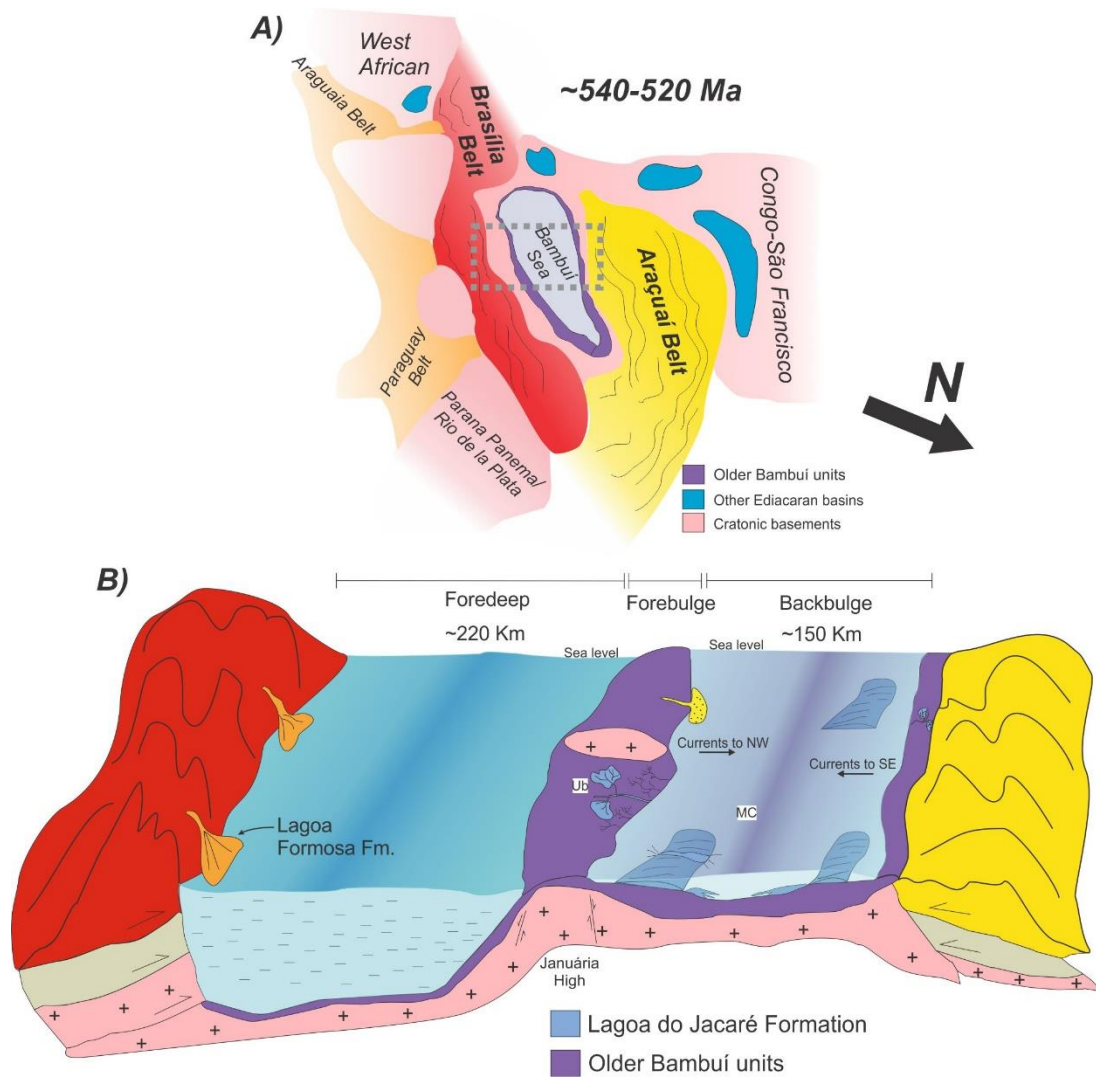


Figure 13 – A- Paleogeographic map suggested for the Bambuí Basin in the Ediacaran-Cambrian boundary (~540-520 Ma) in the northern region of Minas Gerais state (adapted from Caxito et al. 2021); B- Tectonic/paleogeographic profile of the situation during the deposition of the Lagoa do Jacaré Formation. Januária High played a role as basin's forebulge in this region. MC: Montes Claros region; Ub: Ubaí region.

6. Conclusions

From sedimentary facies and stratigraphic and chemostratigraphic profiles, as well as seismic and well data, we propose the following conclusions regarding the sedimentary and paleogeographic evolution of the Lagoa do Jacaré Formation, in the central sector of the Bambuí Basin in the central-north region of the Minas Gerais state:

- the profiles described in Paraopeba, Curvelo, Montes Claros and Ubaí show that the Lagoa do Jacaré Formation presents a homoclinal carbonate ramp depositional model. Eight facies were identified, grouped in 5 facies association: FA1 - Microbialites with desiccation cracks, grainstones, mudstones and breccias, deposited in the peritidal zone; FA2 - Siltstones from deep water deposited in the lower offshore of the carbonate ramp toward to the basin depocenter; FA3 – ooidal/oncoidal grainstones with hummocky cross stratification, breccia, and mudstones (tempestite cycles) in mid to outer ramp; FA4 – mudstones in the upper offshore; FA5 - Shoal carbonate sediments influenced by wave and tidal in inner ramp.

- the Lagoa do Jacaré Formation is composed of a 2nd order regressive hemicycle with more than 300 m thickness in Ubaí and Montes Claros regions. Towards the south the thickness decreases, reaching approximately 100 m, as in the Paraopeba region. The stratigraphic data obtained showed alternating high frequency cycles (3rd and 4th order in wells), with up to 5th order in outcrops;

- According to the seismic interpretation, the Lagoa do Jacaré Formation increases in thickness from the Januária High to southeast, in the region of Montes Claros;

- Thin sections description provided identification of main allochemical grains, like micro-oncoids, oncoids, ooids and intraclasts, besides the different types of cement and structures of diagenetic stages. We also identified great mineral assemblage using SEM-EDS analysis, which is composed of quartz, plagioclase, biotite, muscovite, pyrite, fluorite, titanite, and apatite;

- A slight difference in the mean values of $\delta^{13}\text{C}$ were observed from south to the north: Paraopeba (+12.6‰), Curvelo (+12.1‰), Montes Claros (+10.2‰), and Ubaí (+9.0‰). We interpreted that the sections outcropping in the north, like Montes Claros and Ubaí, are from the upper section of the Lagoa do Jacaré Formation, and Paraopeba and Curvelo are from the lower section. High frequency transgressive events (4th order) increased water circulation in the

basin possibly due to reconnection to global oceans, increasing the ^{12}C content, in the final stages of the Ediacaran;

- The sedimentary rocks of the Lagoa do Jacaré Formation were deposited in a foreland basin system, forming a wide carbonate ramp in the forebulge and back-bulge sectors, in the surroundings of the Januária High, unlike the southern part of the basin, where sedimentation is recorded in the forebulge and foredeep. This structure played important role during the evolution of both the Bambuí Basin and the São Francisco Craton in the southeast Brazil along the assembling of the Gondwana Supercontinent.

Author statement

MVSD, AU, and SAM participated the fieldwork. MVSD and JO did SEM-EDS analysis. MVSD prepared the manuscript. AU, GJU, and JO revised the manuscript.

Acknowledgments

The authors are grateful to the Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Universidade Federal de Sergipe (UFS) and ANP/Petrobras (Project CAMURES-Diagênese/FUNDEP 5850.0106111.17.9) for funding and releasing data. We also thank the Universidade Federal de Pernambuco and Universidade do Estado do Rio de Janeiro for isotope analyses, and Unesp for SEM-EDS analyses. MVSD thanks the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for scholarship (88887.484150/2020-00). M.V.S.D thanks to PPGEOL-UFMG and IGC-UFMG for sample analysis and supporting. The authors also thank anonymous reviewers to comments and suggestions that actually improved the quality of the original manuscript.

References

- Alkmim, F. F., Martins-Neto, M. A. 2001. A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Martins-Neto, M. A., Pinto, C. P. (eds.). Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais, Belo Horizonte, SBG/MG, p. 9-30.
- Alkmim, F. F., Martins-Neto, M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1):127-139. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>
- Babinski, M., Vieira, L.C., Trindade, R.I.F. 2007. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambuí Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. *Terra Nova*, 19:401–406. <https://10.1111/j.1365-3121.2007.00764.x>
- Beurlen, H. 1973. Ocorrências de chumbo, zinco e fluorita nas rochas sedimentares do Precambriano Superior no Grupo Bambuí em Minas Gerais (Brasil Central). Tese de doutorado. (tradução do autor). Faculdade de Ciências Naturais, Universidade Karl Ruprecht, Heilderberg (Alemanha), 165 p.
- Brito-Neves, B. B., Fuck, R. A., Pimentel, M. M. 2014. The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, 44(3):493-518. <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030010>
- Bosak T., Knoll A. H., Petroff, A. P. 2013. The meaning of stromatolites. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41:21-44. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105327>
- Caetano-Filho, S., Paula-Santos, G. M., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Peloso, M., Amorim, K., Afonso, J., Matheus Kuchenbecker, M., Reis, H. L. S., Trindade, R. I. F., 2019. Sequence stratigraphy and chemostratigraphy of an Ediacaran-Cambrian foreland-related carbonate ramp (Bambuí Group, Brazil). *Precambrian Research*. 331. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.105365>
- Caetano-Filho, S., Sansjofre, P., Ader, M., Paula-Santos, G.M., Guacaneme, C., Babinski, M., Bedoya-Rueda, C., Kuchenbecker, M., Reis, H.L.S., Trindade, R.I.F. 2021. A large epeiric methanogenic Bambuí sea in the core of Gondwana supercontinent? *Geoscience Frontiers*. 12, 203-218. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.04.005>

- Campos, J. E. G., Dardenne, M. A. 1994. A glaciação neopaleozóica na porção meridional da Bacia Sanfranciscana. *Revista Brasileira de Geociências*, 24(2): 65-76.
- Campos, J. E. G., Dardenne, M. A. 1997. Estratigrafia e sedimentação da Bacia Sanfranciscana: uma revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 21 (3), 269–282.
- Catuneanu, O. 2004. Retroarc foreland systems – evolution through time. *Journal of African Earth Sciences*, 38: 225-242. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2004.01.004>
- Caxito, F. A., Halverson, G. P., Uhlein, A., Stevenson, R., Dias, T. G., Uhlein, G. J., 2012a. Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Research*, 200–203: 38–58. <https://10.1016/j.precamres.2012.01.005>
- Caxito, F. A., Lana, C., Frei, R., Uhlein, G. J., Sial, A. N., Dantas, E. L., Pinto, A. G., Campos, F. C., Galvão, P., Warren, L. V., Okubo, J., Ganade, C. E. 2021. Goldilocks at the dawn of complex life: mountains might have damaged Ediacaran–Cambrian ecosystems and prompted an early Cambrian greenhouse world. *Scientific Reports*, 11: 20010. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99526-z>
- Chiavegatto, J. R. S. 1992. Análise estratigráfica das sequências tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior) na porção meridional da Bacia do São Francisco. MS Dissertation, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, pp. 216p.
- Coelho, J. C. C., Martins-Neto, M. A., Marinho, M. S., 2008. Estilos estruturais e evolução tectônica da porção mineira da bacia proterozoica do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (2 – Suppl. o), 149–165.
- Costa M. T., Branco, J. J. R. 1961. Roteiro para a excursão Belo Horizonte-Brasília. 14º Congresso Brasileiro de Geologia. UFMG, Belo Horizonte, vol. 15, 25 p.
- Cui, H., Warren, L. V., Uhlein, G. J., Okubo, J., Liu, X., Plummer, R. E., Baele, J., Goderis, S., Claeys, P., Li, F. 2020. Global or local? Constraining the origins of the middle Bambuí carbon cycle anomaly in Brazil. *Precambrian Research*. 348, 105861. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105861>
- Dantas, M. V. S., Uhlein, A., Uhlein, G. J., Freitas, A. R., Mendonça, T. K., Santos, J. A.O., Silva, S. A. M. 2022. Carbonate storm deposits and C, O isotopes of the Lagoa do Jacaré

- Formation (Ediacaran) in the Paraopeba area, Bambuí Group, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52 (01): 1-18. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200135>
- Dardenne, M. A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: 30º Congresso Brasileiro de Geologia. Recife, PE. *Anais*. v. 2, p. 597–610.
- Dardenne, M. A. 1981. Os grupos Paranoá e Bambuí na Faixa Dobrada Brasília. In: 1st Simpósio sobre o Cráton do São Francisco e suas Faixas marginais, Salvador, *Anais*, 140-157.
- Dardenne, M. A. 2000. The Brasília fold belt. In: Cordani, U. G., Milani, E. J., A. Thomaz Filho, Campos, D. A. (eds.) Tectonic Evolution of South America. In: 31st International Geological Congress. Rio de Janeiro, p. 231–264.
- DaSilva, L. G., Pufahl, P. K., James, N. P., Guimarães, E. M., Reis, C. 2022. Sequence stratigraphy and paleoenvironmental significance of the Neoproterozoic Bambuí Group, Central Brazil. *Precambrian Research*, 379, 1-32.
- Decelles, P. G., Giles, K. A. 1996. Foreland basin systems. *Basin Research*, 8(1): 05–123.
- Dunham, R. J. 1962. Classification of carbonate rocks according to their depositional texture. In: Ham, W. E. (eds.) Classification of Carbonate Rocks - a symposium: Tulsa, OK, *American Association of Petroleum Geologists Memoir*. 1:108-121.
- Dupraz C., Reid, R. P., Braissant, O., Decho, A. W., Norman, R.S., Visscher, P. T. 2009. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats. *Earth-Science Reviews*, 96(3):141-162. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.005>
- Einsele, G. 1992. Sedimentary Basins: evolution, facies and sedimentary budget. Berlin, Springer-Verlag, 628 p.
- Embry, A. F., Johannessen, E. P. 1992. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic. *Arctic Geology and Petroleum Potential*. NPF Special Publication, 2:121–146.
- Embry, A. F., Klovan, J. E. 1971. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, N. W. T.: *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, v. 19, p. 730-781.

- Ferreira, E. F., Vargas, A. M., Castilho, L. S., Velásquez, L. N., Fantinel, L. M., Abreu, M. H. 2010. Factors associated to endemic dental fluorosis in Brazilian rural communities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(8): 3115-3128. <https://doi.org/10.3390/ijerph7083115>
- Flügel, E. 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Berlin. Springer-Verlag. 976 p.
- Freitas, A. R., Uhlein, A., Dantas, M. V. S., Mendonça, T. K. 2021. Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG. *Geologia USP. Série Científica*, 21(1): 103-120. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-163573>
- Hercos, C. M., Martins-Neto, M. A., Danderfer-Filho, A. 2008. Arcabouço estrutural da Bacia do São Francisco nos arredores da Serra da Água Fria (MG), a partir da integração de dados de superfície e subsuperfície. *Revista Brasileira de Geociências*, 38 (2-suplemento), 197-212.
- Hippert, J. P., Caxito, F. A., Uhlein, G. J., Nalini, H. A., Sial, A. N., Abreu, A. T., Nogueira, L. B. 2019. The fate of a Neoproterozoic intracratonic marine basin: Trace elements, TOC and Iron speciation geochemistry of the Bambuí Basin, Brazil. *Precambrian Research*. 330:101-120. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2019.05.001>
- Iglesias, M., Uhlein, A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozoicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 39 (2), 256-266.
- Iyer, S. S., Babinski, M., Krouse, H. L., Chemale, F. 1995. Highly ¹³C enriched carbonate and organic matter in the Neoproterozoic sediments of the Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, 73, 271–282. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(94\)00082-3](https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)00082-3)
- Knauer, L. G. 2007. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. *Geonomos*, v.15 n. 1, 81-90.
- Kroopnick, P. 1985. The distribution of ¹³C of ΣCO₂ in the world oceans. *Deep-Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 32(1), 57–84. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(85\)90017-2](https://doi.org/10.1016/0198-0149(85)90017-2)

- Kuchenbecker, M., Babinski, M., Pedrosa-Soares, A.C., Lopes-Silva, L., Pimenta, F., 2016. Chemostratigraphy of the lower Bambuí Group, southwestern São Francisco craton, Brazil: insights on Gondwana paleoenvironments. *Brazilian Journal of Geology*, 46(1):145–162. <https://10.1590/2317-488920160030285>
- Kuchenbecker, M., Pedrosa-Soares, A. C., Babinski, M., Reis, H. L. S., Atman, D., Costa, R. D. 2020. Towards an integrated tectonic model for the interaction between the Bambuí basin and the adjoining orogenic belts: Evidences from the detrital zircon record of syn-orogenic units. *Journal of South American Earth Sciences*. 104, 102831. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102831>
- Lopes, O. F. 1981. Evolução paleogeográfica e estrutural da porção central da Bacia Bambuí no norte do Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, 11:116-127.
- Martins, M., Lemos, V. B. 2007. Análise estratigráfica das sequências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4):156-167.
- Martins-Neto, M. A. 2009. Sequence Stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 163-176. <https://10.1016/j.marpetgeo.2007.10.001>
- Martins-Neto, M. A, Pedrosa-Soares, A. C, Lima, S. A. A. 2001. Tectono- sedimentary evolution of sedimentary basis from Late Paleoproterozoic to Late Neoproterozoic in the São Francisco craton and Araçuaí fold belt, eastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 142:343–370. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00082-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00082-3)
- Merdith, A. S., Williams, S. E., Collins, A. S., Tetley, M. G., Mulder, J. A., Blades, M. L., Young, A., Armistead, S. E., Cannon, J., Zahirovic, S., Müller, R. D. 2021. Extending full-plate tectonic models into deep time: Linking the Neoproterozoic and the Phanerozoic. *Earth-Science Reviews*. 214, 103477 <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103477>
- Misi, A., Kaufman, A. J., Veizer, J., Powis, K., Azmy, K., Boggiani, P. C., Gaucher, C., Teixeira, J. B., Sanches, A. L., Iyer, S. S., 2007. Chemostratigraphic correlation of Neoproterozoic successions in South America. *Chemical Geology*. 237, 143–167. <https://10.1016/j.chemgeo.2006.06.019>

- Moreira, D. S. 2020. Estratigrafia e Geocronologia da Formação Serra da Saudade (Grupo Bambuí): registro de bacia de antepaís no Ediacarano/Cambriano. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG. 173 pp.
- Moreira, D. S., Uhlein, A., Dussin, I. A., Uhlein, G. J., Misuzaki, A. M. P. 2020. A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcanoclastic bed. *Journal of South American Earth Sciences*. 102503. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102503>
- Moura, S. A., Uhlein, A., Uhlein, G. J., Dantas, M. V. S. 2022. High-resolution stratigraphy of peritidal microbial carbonates from the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, north of Minas Gerais state, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52 (02): e20210040. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120210040>
- Muscente, A. D., Xiao, S. 2015. Resolving three-dimensional and subsurficial features of carbonaceous compressions and shelly fossils using backscattered electron scanning electron microscopy (BSE-SEM). *Palaios*, 30(6):462-481. <http://dx.doi.org/10.2110/palo.2014.094>
- Nichols, G. 2009. Sedimentology and Stratigraphy. Wiley-Blackwell. 419 pp.
- Neves, P. V. F. 2020. A plataforma carbonática de alta energia da Formação Lagoa Do Jacaré (Grupo Bambuí) na região de Brasília de Minas, MG: arquitetura sedimentar, feições pós-deposicionais e potencial relação com sistemas petrolífero e cárstico locais. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 72 pp.
- Okubo, J., Muscente, A. D., Luvizotto, G. L., Uhlein, G. J., Warren, L. V. 2018. Phosphogenesis, aragonite fan formation and seafloor environments following the Marinoan glaciation. *Precambrian Research*. 311, 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.04.002>
- Paula-Santos, G. M., Caetano-Filho, S., Babinski, M., Trindade, R. I., Guacaneme, C. 2017. Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco Basin through isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 42:280–305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.012>

- Paula-Santos, G. V., Babinski, M., Kuchenbecker, M., Caetano-Filho, S., Trindade, R. I., Pedrosa-Soares, A. C. 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 28:702-720. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.012>
- Pedrosa-Soares, A. C., Noce, C. M., Wiedemann, C. M., Pinto, C. P. 2001. The Araçuaí-West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research*, 110: 307-323.
- Pedrosa-Soares, A. C., Voll, E., Colaboradores. (Org.). 2013. Projeto Norte De Minas - Mapeamento Geológico Escala 1:100.000 (www.portalgeologia.com.br). 1ª ed. Belo Horizonte. CODEMIG-Companhia de Desenvolvimento Geológico de Minas Gerais.
- Pe-Piper, G., Karim, A., Piper, D. J. W. 2011. Authigenesis of titania minerals and the mobility of Ti: new evidence from pro-deltaic sandstones, cretaceous scotian basin, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 81:762-773. <https://doi.org/10.2110/jsr.2011.63>
- Perrella, P., Uhlein, A., Uhlein, G. J., Sial, A. N., Pedrosa-Soares, A. C., Lima, O. N. B. 2017. Facies analysis, sequence stratigraphy and chemostratigraphy of the Sete Lagoas Formation (Bambuí Group), northern Minas Gerais State, Brazil: evidence of a cap carbonate deposited on the Januária basement high. *Brazilian Journal of Geology*. 47 (1), 59–77. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201720160112>
- Piatti, B. G. 2022. Arcabouço estrutural e evolução tectônica da porção sudeste do Alto de Januária, Bacia do São Francisco (MG): registros de uma longa história de deformação intracratônica. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 144 pp.
- Pimentel, M. M., Rodrigues, J. B., Della Giustina, M. E. S., Junges, S., Matteini, M., Armstrong, R. 2011. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U e Pb sedimentary provenance data: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, 31: 345-357. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.02.011>

- Plint, A. G. 2010. Wave- and storm-dominated shoreline and shallow-marine systems. In: N. P. James, R. W. Dalrymple (Eds.), *Facies Models 4*. Kingston: Geological Association of Canada, 167-200 pp.
- Reis, H. L. S., Alkmim, F. F. 2015. Anatomy of a basin-controlled foreland fold-thrust belt curve: The Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 66:711–731. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.013>
- Reis, H. L. S., Suss J. F. 2016. Mixed carbonate–siliciclastic sedimentation in forebulge grabens: An example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*. 339, 83-103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.04.004>.
- Reis, H. L., Suss, J. F., Fonseca, R. C., Alkmim, F. F., 2017. Ediacaran forebulge grabens of the southern São Francisco basin, SE Brazil: craton interior dynamics during West Gondwana assembly. *Precambrian Research*. 302, 150–170. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.09.023>.
- Riding, R. 2011. Microbialites, stromatolites, and thrombolites. In: Reitner J., Thiel V. (Eds.). *Encyclopedia of geobiology*. Switzerland: Springer, p. 635-654. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9212-1_196
- Rossi, A. V. A., Danderfer Filho, A., Bersan, S. M., Kelmer, L. R., Tavares, T. D., Lana, C. C., 2020. Stratigraphic, isotopic, and geochronological record of a superposed proforeland basin in the eastern São Francisco craton during west Gondwana amalgamation. *Journal of South American Earth Sciences*. 97, 102406. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102406>
- Sanchez, E. A., Uhlein, A., Fairchild, T. R. 2021. *Treptichnus pedum* in the Três Marias Formation, south-central Brazil, and its implications for the Ediacaran-Cambrian transition in South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 105:102983. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102983>
- Santos, D. M., Sanchez, E. A., Santucci, R. M. 2018. Morphological and petrographic analysis of identified stromatolitic occurrences in Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, state of Minas Gerais, Brazil. *The Journal of the Brazilian Society of Paleontology*, 21(3):195-207. <https://doi.org/10.4072/rbp.2018.3.01>

- Sgarbi, G. N. C., Sgarbi, P. B. A., Campos, J. E. G., Dardenne, M. A., Penha, U. C. 2001. Bacia Sanfranciscana: O registro Fanerozóico da Bacia do São Francisco. In: Pinto, C. P., Martins-Neto, M. A. (eds.) Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais, Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo de Minas Gerais, Belo Horizonte, 93-138.
- Shackleton, N. J., Imbrie, J., Hall, M. 1983. Oxygen and carbon isotope record of east Pacific core V19-30: Implications for the formation of deep water in the late Pleistocene North Atlantic. *Earth and Planetary Science Letters*. 65, 233-244. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90162-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90162-0)
- Srivastava, N. K. 2004. Estromatolito. In: Ismar de Sousa Carvalho (Org.). Paleontologia. 2ed. Rio de Janeiro: Interciências v. 1, p. 171-190.
- Tavares, T. D., Martins, M. S., Alkmim, F. F., Lana, C. 2020. Detrital zircons from the Upper Três Marias Formation, São Francisco basin, SE Brazil: Record of foreland deposition during the Cambrian? *Journal of South American Earth Sciences*. 97. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102395>
- Taylor, K. G., Macquaker, J. H. S. 2000. Early diagenetic pyrite morphology in a mudstone-dominated succession: the Lower Jurassic Cleveland Ironstone Formation, eastern England. *Sedimentary Geology*. 131(1):77-86. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00002-6)
- Tonietto, S. N. 2010. Diagênese e hidrotermalismo em rochas carbonáticas proterozoicas: Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. 196 pp.
- Uhlein, A. 1991. Transição cráton – Faixa dobrada: Exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Araçuaí (Ciclo Brasileiro) no estado de Minas Gerais. Aspectos estratigráficos e estruturais. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. 295 pp.
- Uhlein, A. 2012. Coberturas cratônicas proterozóicas do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v. 21, p. 9-38.
- Uhlein, A., Alvarenga, C. J. S., Dardenne, M. A., Trompette, R. R. 2011a. The glaciogenic Jequitaí Formation, southeastern Brazil. In: Arnaud, E., Halverson, G.P., Shields- Zhou,

- G. (Eds.) The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations, vol. 36. Geological Society of London, London, Memoir, pp. 51–66.
- Uhlein, A., Baptista M.C., Seer H.J., Caxito F.A., Uhlein G.J., Dardenne M.A. 2011b. A Formação Lagoa Formosa, Grupo Bambuí (MG): Sistema Depositional de Leque Submarino em Bacia de Ante-País. *Geonomos*, 19 (2):163-172.
- Uhlein, G. J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G. P., Caxito, F. A., Cox, G. M. 2017. Early to Late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, 299:101-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.020>
- Uhlein, G. J., Uhlein, A., Egberto, P., Caxito, F. A., Okubo, J., Warren, L. V., Sial, A. N. 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 517:39-51. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.12.022>
- Vasconcelos, C., Bahniuk A. 2015. Microbialitos recentes da região dos Lagos, Estado do Rio de Janeiro. In: Fairchild T.R., Rohn R., Dias-Brito D. (Eds.). Microbialitos do Brasil: do Pré-Cambriano ao Recente. São Paulo: IGCE/UNESP, p. 60-75.
- Vieira, L. C., Trindade, R. I. F., Nogueira, A. C. R., Ader, M., 2007. Identification of a Sturtian cap carbonate in the Neoproterozoic Sete Lagoas carbonate platform, Bambuí Group, Brazil. *Comptes Rendus Geoscience*, 339, 240–258. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.003>
- Warren, L. V., Quaglio, F., Riccomini, C., Simões, M. G., Poiré, D. G., Strikis, N. M., Strikis, P. C. 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil Cloudina reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, 42(5): 391-394. <http://dx.doi.org/10.1130/G35304.1>
- Zalán, P. V., Romeiro-Silva, P. C. 2007. Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2): 561-571.
- Zecchin, M., Catuneanu, O. 2013. High-resolution sequence stratigraphy of clastic shelves I: units and bounding surfaces. *Marine and Petroleum Geology*, 39:1–25. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.08.015>

6. DISCUSSÕES DA TESE

No desenvolvimento desta tese de doutorado, em especial através dos dois artigos apresentados, diversos assuntos foram apresentados e sintetizados, os quais serão aqui oportunamente discutidos:

- 1) Apresentou-se uma importante correlação de intervalos estratigráficos com descrição detalhada de fácies sedimentares e de dados quimioestratigráficos relativos à Formação Lagoa do Jacaré, que ajudará, sobremaneira, no entendimento da sedimentação regional desta importante unidade durante a evolução da bacia *foreland* do Grupo Bambuí;
- 2) Foi possível demonstrar diferentes situações geotectônicas da bacia *foreland* para o Grupo Bambuí, comparando a porção centro-sul (predomínio de rampa, com pequena espessura da Formação Lagoa do Jacaré) com a porção central (baixa declividade, elevadas espessuras- até 300 m), em função da ocorrência do Alto de Januária, no Estado de Minas Gerais;
- 3) Foram apresentados importantes dados quimioestratigráficos (C-O) para os carbonatos da Formação. Lagoa do Jacaré, discutindo os modelos atualmente conhecidos para explicar os elevados valores positivos de $\delta^{13}\text{C}$ ($> +10\%$) do intervalo conhecido como MIBE (Uhlein et al. 2019);
- 4) Com relação aos dados petrográficos das fácies carbonáticas, caracterizou-se de forma pioneira uma distinta mineralogia com auxílio do MEV com EDS acoplado, que contribuiu para a construção de uma evolução diagenética;
- 5) Por fim, discute-se brevemente neste tópico algumas questões relacionadas à abordagem litoestratigráfica versus estratigrafia de sequências para esta unidade, a partir da identificação de seções ricas em calcários com espessuras maiores que 300 m, nunca antes observada por outros autores para a Formação Lagoa do Jacaré.

No primeiro artigo, caracterizou-se um afloramento na região sul da bacia (Pedreira GMD – conforme Freitas et al. 2021, também chamada “Km 14” de Cui et al. 2020) no qual predomina a ocorrência de ciclos tempestíficos na base da seção, passando a fácies de águas rasas como grainstones/rudstones intraclásticos oncoidais/ooidais com estratificações cruzadas. Esta sucessão de fácies se configura em um hemicycle regressivo de 3ª ordem, que, para o topo,

passa para um hemicírculo de mesma ordem rico em fácies siliciclásticas finas de águas profundas da associação de fácies 2. A caracterização destas fácies de alta energia do hemicírculo regressivo é importante porque remonta a ambientes de grande circulação de águas com constante retrabalhamento, propiciando formação de ambientes oxigenados, opostos aos ambientes redutores. O modelo de metanogênese para explicar a MIBE proposto por alguns autores como Cui *et al.* (2020) e Caetano-Filho *et al.* (2021) sugerem ambientes de baixa energia com águas estratificadas, não condizentes com o modelo de fácies aqui apresentado, que em vez de metanogênico seria provavelmente metanotrófico. Nesta linha, o baixo teor de matéria-orgânica (m.o) aferido nas rochas da Fm. Lagoa do Jacaré também não se faz condizente com propostas de alto soterramento de matéria orgânica para explicar o MIBE. Nesta relação entre ausência de fácies de águas calmas e ausência de altos teores de matéria orgânica, sugere-se, neste trabalho, através da análise dos dados de poços que, é possível que em contextos deposicionais de águas profundas estejam sedimentadas rochas carbonáticas e folhelhos relacionados ao intervalo da Fm. Lagoa do Jacaré ricos em m.o, sugerido pelos altos valores de raios-gama nos poços estudados. Estes intervalos estariam relacionados a setores distais da rampa carbonática, sedimentados sob altas taxas de soterramento.

No segundo artigo desta tese, com os dados estratigráficos obtidos no setor central da bacia através da análise sísmica, da interpretação dos poços e das fácies em afloramentos, e ao comparar com os mapas geológicos disponíveis, sugere-se que a sedimentação do Grupo Bambuí neste setor da bacia se deu em uma rampa carbonática homoclinal nos setores de *forebulge* e *back-bulge* do sistema *foreland*, sendo o Alto de Januária importante anteparo estrutural desta região de deposição, diferentemente da parte sul da bacia (Uhlein *et al.* 2017), próxima ao Alto de Sete Lagoas. Um total de oito fácies foram identificadas e as 5 associações de fácies (AF) indicam os seguintes sistemas deposicionais: AF1- Planície de marés; AF2- bacinal; AF3- rampa média; AF4- rampa externa; AF5- *shoals* carbonáticos. A ampliação da área aflorante da Formação Lagoa do Jacaré logo ao norte da Serra do Cabral é condizente com a maior espessura da unidade observada nos perfis dos poços. Outros autores observaram estruturação semelhante para esta parte da bacia trabalhando com dados de outras formações do Grupo Bambuí (Rossi *et al.* 2020; Kuchenbecker *et al.* 2020).

Como dito anteriormente, diversos minerais foram identificados a partir dos dados coletados no MEV-EDS. Importante assembleia mineralógica foi observada, contendo material

terrígeno fino (quartzo, feldspato, muscovita, biotita, apatita) com alguns minerais autigênicos/diagenéticos (pirita, fluorita, titanita, rutilo). Esta assembleia mineralógica rica em grãos detríticos é compatível com a forte interação das faixas dobradas marginais na sedimentação do Grupo Bambuí, Araçuaí e Brasília, fornecendo aporte terrígeno a partir do intemperismo e erosão das áreas-fonte.

A partir da correlação dos poços com os dados do afloramento da Pedreira GMD foi proposta a separação estratigráfica entre os setores sul e central da bacia. Comparando com as sequências estratigráficas propostas por Reis *et al.* (2017), sugere-se que o intervalo relativo à Formação Lagoa do Jacaré compreenda uma seção de 2ª ordem com mais de 300 m de espessura no setor central da bacia na região de Ubaí e Montes Claros. Este intervalo, pode ainda ser dividido em três hem Ciclos de 3ª ordem, sendo os dois hem Ciclos basais (regressivo e transgressivo da base para o topo respectivamente) correlacionáveis ao afloramento da Pedreira GMD. Seguindo o zoneamento estratigráfico proposto, observou-se ainda a ocorrência de pelo menos uma dezena de sequências de 4ª ordem na seção mais espessa do intervalo estudado no poço 1-PTRA-25-MG, que podem ser comparadas a seções em afloramentos que alcançam maiores resoluções.

Com a identificação dos intervalos estratigráficos da seção estudada como discutido no parágrafo anterior, ficou mais claro o entendimento com relação à diminuição dos valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ entre as partes sul (+12,60‰) e norte (+9,53‰) da bacia, independente do modelo de fácies atribuído. Ocorre que a seção no norte de Minas Gerais compreende o topo da seção relativa ao intervalo litoestratigráfico da Formação Lagoa do Jacaré (hem ciclo regressivo do topo na Figure 7 do artigo 2, p. 81), que teve, provavelmente, condições bioquímicas distintas. Alguns autores como Moura *et al.* (2022) sugerem um intervalo de possível reconexão com mares globais, marcada por eventos de alta frequência na sucessão estratigráfica, trazendo ^{12}C para o sistema. É possível ainda que este intervalo reflita uma diminuição na produção orgânica primária (Caxito *et al.* 2021) devido ambiente com condições impróprias para os seres vivos à época.

Por fim, sob a ótica da estratigrafia de sequências, ficou claro com os dados levantados nesta tese que durante muitos anos propagou-se uma confusão entre os termos lito e cronoestratigráfico para o Grupo Bambuí e suas seções estratigráficas. Na correlação

apresentada na Figure 7 da página 81 deste volume, observa-se que o intervalo litoestratigráfico relativo à Formação Lagoa do Jacaré em sua maior seção no poço 1-PTRA-25-MG apresenta espessas camadas de folhelhos e siltitos, atribuídos à Formação Serra da Saudade quando vistos em afloramentos. Em termos litoestratigráficos não se configura um erro esta classificação, mas deve-se destacar que em termos cronoestratigráficos sucessões ricas em rochas carbonáticas pura estão intercaladas com siltitos e folhelhos, como no hemicíclo de 3ª ordem do topo da correlação dos poços (Figure 7), sendo possível até mesmo relacionar com fácies proximais e distais no modelo de rampa carbonática assumido neste trabalho.

7. CONCLUSÕES

Esta Tese de Doutorado apresenta um inovador trabalho estratigráfico sobre a Formação Lagoa do Jacaré, unidade carbonática tradicional do Grupo Bambuí, que aflora nas regiões sudeste e nordeste do Brasil. Foram identificadas e interpretadas diversas fácies sedimentares carbonáticas a partir de diferentes e importantes afloramentos na região centro-norte do Estado de Minas Gerais, além de perfis quimioestratigráficos isotópicos ($\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$), assim como a interpretação de dados de sísmica e de poços, propondo uma análise estratigráfica detalhada desta unidade litoestratigráfica.

Dois artigos fundamentais compõem esta Tese, um já publicado no periódico *Brasilian Journal Geology – BJG*, 2022, vol 52, número 1 e outro artigo presentemente em processo de submissão/avaliação no *Journal South America Earth Sciences -JSAES*.

Neste primeiro artigo, são apresentados e discutidos os dados estratigráficos e geoquímicos isotópicos obtidos no afloramento da Pedreira GMD, no município de Paraopeba, Minas Gerais intitulado “*Carbonate storm deposits and C, O isotopes of the Lagoa do Jacaré Formation (Eldiacaran) in the Paraopeba area, Bambuí Group, Brazil*” e cujas principais conclusões foram:

- Fácies sedimentares depositadas por eventos de tempestade (tempestitos) em rampa carbonática homoclinal foram detalhadas nas rochas expostas da Pedreira GMD: fácies de alta energia na base gradam para fácies de baixa energia no topo da sucessão;

- Dois hemisíclos transgressivos-regressivos de 3ª ordem foram interpretados na sucessão vertical de 124 m, que indicam tendência de afogamento para o topo da seção;

- Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ altamente positivos da seção inferior da Formação Lagoa do Jacaré são considerados como sendo causados por um ambiente marinho restrito, sem conexão com mares abertos, mas propõe-se também que as altas taxas locais de soterramento de matéria orgânica podem ter influenciado os altos valores isotópicos do carbono. Sugere-se para trabalhos futuros a investigação de intervalos similares ricos em matéria orgânica e de alto teor de U em outros poços disponíveis para a bacia, que tenham atravessado sedimentos finos de águas profundas do mesmo intervalo estratigráfico;

No segundo artigo, submetido ao JSAES, foram descritos quatro afloramentos na região centro-norte de Minas Gerais, diversas fácies sedimentares foram descritas e interpretadas, e quatro perfis quimioestratigráficos foram apresentados, além de dados petrográficos convencionais e com MEV-EDS, contendo também interpretação de seção sísmica e de poços cedidos pela ANP. A partir da integração e discussão destes dados, as seguintes conclusões podem ser propostas a respeito da evolução estratigráfica, geoquímica e paleogeográfica da Formação Lagoa do Jacaré (Bacia Bambuí) em Minas Gerais:

- Os perfis descritos em Paraopeba, Curvelo, Montes Claros e Ubaí mostram que a Formação Lagoa do Jacaré apresenta um modelo deposicional de rampa carbonática homoclinal. Oito fácies foram identificadas, agrupadas em 5 associações de fácies: FA1 - microbialitos com gretas de contração, grainstones, mudstones e brechas depositados em planície de maré; FA2 – siltitos de águas profundas depositados no *offshore* inferior da rampa carbonática em direção ao depocentro da bacia; FA3 – grainstones ooidais/oncooidais com estratificações cruzadas hummocky, brechas e mudstones (ciclos tempestíficos) na rampa média e externa; FA4 – mudstones de *offshore* superior; FA5 – bancos carbonáticos (*shoals*) influenciados por ondas e marés na rampa interna;

- A Formação Lagoa do Jacaré é composta por um hemicyclo regressivo de 2ª ordem com mais de 300 m de espessura em Ubaí e Montes Claros, conforme dados de poços. Os dados obtidos mostraram ainda a alternância de ciclos de alta frequência (3ª e 4ª ordem nos poços), sendo até de 5ª ordem em afloramentos;

- De acordo com a interpretação sísmica, a Formação Lagoa do Jacaré aumenta de espessura do Alto de Januária para sudeste, na região de Montes Claros, chegando a cerca de 300 m, atestado por dados de poços na região;

- Os principais grãos aloquímicos identificados a partir da descrição de lâminas petrográficas foram micro-oncoides, oncoides, ooides e intraclastos, além de diferentes tipos de cimentos e estruturas de diferentes estágios diagenéticos. Uma assembleia mineralógica importante também foi observada a partir das análises de MEV-EDS, composta por quartzo, plagioclásio, biotita, muscovita, pirita, fluorita, titanita e apatita;

- Uma sutil diferença nos valores médios de $\delta^{13}\text{C}$ foram observados de sul para norte: Paraopeba (+12.60‰), Curvelo (+12.17‰), Montes Claros (+10.29‰), and Ubaí (+9.06‰). A

partir da análise estratigráfica interpreta-se que as seções ao norte (Ubaí e Montes Claros) fazem parte da seção superior da Formação Lagoa do Jacaré, enquanto que Paraopeba e Curvelo fazem parte da seção inferior. Esta diferença é resultado de eventos transgressivos de alta frequência (4ª ordem) que aumentaram a circulação de águas na bacia com incremento de ^{12}C no sistema, devido possivelmente à reconexão com mares globais, nos estágios finais do Ediacarano.

- As rochas sedimentares da Formação Lagoa do Jacaré foram depositadas em uma bacia *foreland* (antepaís) estabelecida a partir de evento colisional precoce de formação do orógeno neoproterozoico Brasília, com diferentes geometrias bacinais. Na porção sul da bacia Bambuí a sedimentação ocorreu no *forebulge* e *foredeep*, ligados lateralmente ao setor de *wedge-top* à oeste, formando lentes carbonáticas de pequena espessura (30-100 m, como na região de Paraopeba e também de Curvelo). Na parte norte da Bacia Bambuí em Minas Gerais, próximo ao Alto de Januária, formou-se uma ampla e espessa rampa carbonática nos setores de *forebulge* e *back-bulge*, com cerca de 300 m, entre o Alto de Januária a oeste e o orógeno Araçuaí, a leste, como observado nos perfis de Montes Claros e Ubaí, correlacionados aos dados de poços.

REFERÊNCIAS

- ALKMIM, F. F., MARTINS-NETO, M. A. 2001. A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço estrutural e cenários evolutivos. In: Martins-Neto, M.A., Pinto, C.P. (eds.). Bacia do São Francisco. Geologia e Recursos Minerais, Belo Horizonte, SBG/MG, p. 9-30.
- ALKMIM, F. F., MARTINS-NETO, M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1):127-139. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2011.08.011>
- ALVARENGA, C. J., GIUSTINA, M. E., SILVA, N. G., SANTOS, R. V., GIOIA, S. M., GUIMARÃES, E. M., FERREIRA, V. P. 2007. Variações dos isótopos de C e Sr em carbonatos pré e pós-glaciação Jequitai (Esturtiano) na região de Bezerra-Formosa, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4):147-155.
- ALVARENGA, C. J., SANTOS, R. V., VIEIRA, L. C., LIMA, B. A., & MANCINI, L. H. 2014. Meso-Neoproterozoic isotope stratigraphy on carbonates platforms in the Brasília Belt of Brazil. *Precambrian Research*, 251:164-180.
- AMTHOR, J. E., GROTZINGER, J. P., SCHRÖDER, S., BOWRING, S. A., RAMEZANI, J., MARTIN, M. W., MATTER, A. 2003. Extinction of *Cloudina* and *Namacalathus* at the Precambrian-Cambrian boundary in Oman: *Geology*, v. 31, p. 431-434, doi:10.1130/0091-7613(2003)031<0431:EOCANA>2.0.CO;2
- BABINSKI, M., VIEIRA, L. C., TRINDADE, R. I. F. 2007. Direct dating of the Sete Lagoas cap carbonate (Bambuí Group, Brazil) and implications for the Neoproterozoic glacial events. *Terra Nova*, 19:401-406. <https://10.1111/j.1365-3121.2007.00764.x>
- BARBOSA, O. 1965. Série Bambuí. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 19, Rio de Janeiro, 15p.
- BONHOMME, M. G. 1976. Mineralogie des fractions fines et datations rubidium-strontium dans le Group Bambuí, MG, Brésil. *Revista Brasileira de Geociências*, 6, 4, 211-222.
- BRAUN, O. P. G. 1968. Contribuição a estratigrafia do Bambuí. In: Congresso Brasileiro De Geologia, 22, Belo Horizonte. Anais, 154-166.
- CAMPOS, J. E., DARDENNE, M. A. 1997. Estratigrafia E Sedimentação Da Bacia Sanfranciscana: Uma Revisão. *Revista Brasileira de Geociências*, 27(3):269-282.
- CASTRO, P. T. A., DARDENNE, M. A. 2000. The sedimentology, stratigraphy and tectonic context of the São Francisco Supergroup at the southern boundary of the São Francisco craton, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 30: 345-437.
- CATUNEANU, O., GALLOWAY, W. E., KENDALL, C. G. St. C., MIALL, A. D., POSAMENTIER, H. W., STRASSER, A., TUCKER, M. E., 2011. Sequence stratigraphy: methodology and nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy* 44 (3), 173-245.
- CAXITO, F. A., HALVERSON, G. P., UHLEIN, A., STEVENSON, R., DIAS, T. G., UHLEIN, G. J., 2012a. Marinoan glaciation in east central Brazil. *Precambrian Research*, 200-203: 38-58. <https://10.1016/j.precamres.2012.01.005>

- CAXITO, F. A., LANA, C., FREI, R., UHLEIN, G. J., SIAL, A. N., DANTAS, E. L., PINTO, A. G., CAMPOS, F. C., GALVÃO, P., WARREN, L. V., OKUBO, J., GANADE, C. E. 2021. Goldilocks at the dawn of complex life: mountains might have damaged Ediacaran–Cambrian ecosystems and prompted an early Cambrian greenhouse world. *Scientific Reports*, 11: 20010. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99526-z>
- CHIAVEGATTO, J. R. S. 1992. Análise estratigráfica das sequencias tempestíticas da Formação Três Marias (Proterozóico Superior), na porção meridional da Bacia do São Francisco. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).
- CORKERON M. 1998. Neoproterozoic glaciation in Kimberley region, Australia: sedimentology and depositional environments. In: International Sedimentological Congress, 15, Alicante, Abstracts, p. 272.
- CUI, H., WARREN, L. V., UHLEIN, G. J., OKUBO, J., LIU, X., PLUMMER, R. E., BAELE, J., GODERIS, S., CLAEYS, P., Li, F. 2020. Global or local? Constraining the origins of the middle Bambuí carbon cycle anomaly in Brazil. *Precambrian Research*. 348, 105861. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105861>
- CUNHA, R. B. 2015. Químioestratigrafia $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ das rochas carbonática do Grupo Bambuí. Monografia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 79 p.
- DANTAS, M. V. S., UHLEIN, A., UHLEIN, G. J., FREITAS, A. R., MENDONÇA, T. K., SANTOS, J. A.O., SILVA, S. A. M. 2022. Carbonate storm deposits and C, O isotopes of the Lagoa do Jacaré Formation (Ediacaran) in the Paraopeba area, Bambuí Group, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52 (01): 1-18. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200135>
- DARDENNE, M. A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. *Anais do XXX Congresso Brasileiro de Geologia*. Recife.
- DARDENNE, M. A. 1981. Os Grupos Paranoá e Bambuí na faixa dobrada Brasília. IN: Simp. Cráton do São Francisco e suas faixas marginais, 1, Salvador, 1981. Anais, 140-157.
- DASILVA, L. G., PUF AHL, P. K., JAMES, N. P., GUIMARÃES, E. M., REIS, C. 2022. Sequence stratigraphy and paleoenvironmental significance of the Neoproterozoic Bambuí Group, Central Brazil. *Precambrian Research*, 379, 1-32.
- ELLIS, D. V., SINGER, J. M. 2008. Well logging for Earth scientists. 2^a ed. Berlin, Springer.
- EMBRY, A. F., JOHANNESSEN, E. P. 1992. T-R sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost Triassic Lower Jurassic succession, western Sverdrup Basin, Arctic. *Arctic Geology and Petroleum Potential*. NPF Special Publication, 2:121–146.
- EMERY, D., MYERS, K. J. (1996). Sequence Stratigraphy. Oxford, U. K., Blackwell, p. 297.
- FRAGOSO, D. G., UHLEIN, A., SANGLARD, J. C., SUCKAU, G. L., GUERZONI, H. T., & FARIA, P. H. 2011. Geologia dos Grupos Bambuí, Areado e Mata da Corda na folha de Presidente Olegário (1:100000), MG: registro deposicional do Neoproterozoico ao Neocretáceo da Bacia do São Francisco. *Geonomos*, 19(1):28-38.

- FREITAS, A. R., REIS JÚNIOR, W. 2013. Mapeamento geológico na escala 1:100.000 da região de Ubaí, Norte de Minas Gerais. Trabalho de graduação. Universidade Federal de Minas Gerais. 68p.
- FREITAS, A. R., UHLEIN, A., DANTAS, M. V. S., MENDONÇA, T. K. 2021. Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG. *Geologia USP. Série Científica*, 21(1):103-120. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-163573>.
- GERMS, G. J. B. 1972. New shelly fossils from Nama Group, south west Africa: *American Journal of Science*, v. 272, p. 752–761, doi:10.2475/ajs.272.8.752.
- GROTZINGER, J. P., KNOLL, A. H. 1995. Anomalous carbonate precipitates: Is the Precambrian the key to the Permian? *Palaios*, 10:578–96. <https://doi.org/10.2307/3515096>
- HALVERSON, G. P., HOFFMAN, P. F. SCHRAG, D. P., MALOOF, A. C., RICE, A. H. N. 2005. Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. *GSA Bulletin*, 117, 1181-1207.
- HOFFMAN, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., & Schrag, D. P. 1998. A Neoproterozoic snowball Earth. *Science*, 281:1342-1346.
- HOFFMAN, P. F., SCHRAG, D. P. 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova* 14: 129–155
- IGLESIAS, M., UHLEIN, A. 2009. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozoicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências* 39(2): 256–266.
- ISOTTA, C. A. L., ROCHA-CAMPOS, A. C., YOSHIDA, R. 1969. Striated pavement of the upper Precambrian glaciation in Brazil. *Nature* 222, 466e468.
- IYER, S. S., BABINSKI, M., KROUSE, H. L., CHEMALE, F. 1995. Highly ¹³C enriched carbonate and organic matter in the Neoproterozoic sediments of the Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, 73, 271–282. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(94\)00082-3](https://doi.org/10.1016/0301-9268(94)00082-3)
- JONCEW, H. C., VASCONCELOS, R. A. C. 2013. Mapeamento geológico em escala 1:100.000 da metade oeste da folha São João da Ponte-MG. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Minas Gerais. 53p.
- KARFUNKEL, J., HOPPE, A. 1988. Late Precambrian glaciation in central-eastern Brazil: synthesis and model. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 65, 1-21.
- KAUFMAN, A. J., KNOLL, A. H., NARBONNE, G. M. 1997. Isotopes, ice ages, and terminal Proterozoic Earth history. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. USA. 94, 6600-6605.
- KAWASHITA, K. 1996. Rochas carbonáticas neoproterozoicas da América do Sul: idades e inferências quimioestratigráficas. Tese de livre docência, Universidade de São Paulo.
- KENNEDY, M. J., RUNNEGAR, B., PRAVE, A. R., HOFFMANN, K. H., ARTHUR, M. A. 1998. Two or four Neoproterozoic glaciations? *Geology*, 26, 1059–1063. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<1059:TOFNG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<1059:TOFNG>2.3.CO;2)

- KNAUER, L. G. 2007. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. *Geonomos*, v.15 n. 1, 81-90.
- KUCHENBECKER, M. 2011. Químioestratigrafia e proveniência sedimentar da porção basal do Grupo Bambuí em Arcos (MG). Dissertação de Mestrado, UFMG-IGC, 91 p.
- LIMA, O. N. B. 2005. Grupo Bambuí: Estratigrafia regional no Alto São Francisco e geologia dos depósitos fosfáticos da Serra da Saudade. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 142 p.
- LIMA, O. N. B. 2011. Estratigrafia isotópica e evolução sedimentar do Grupo Bambuí na borda ocidental do Cráton do São Francisco: implicação tectônica e paleo-ambiental. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Belo Horizonte, 114 p.
- MARTÍNEZ, M. I. 2007. Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no Norte do Estado de Minas Gerais. MS Dissertation. Instituto de geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 122p.
- MARTINS, M., LEMOS, V. B. (2007). Análise estratigráfica das sequências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4):156-167.
- MOREIRA, D. S., UHLEIN, A., DUSSIN, I. A., UHLEIN, G. J., MISUZAKI, A. M. P. 2020. A Cambrian age for the upper Bambuí Group, Brazil, supported by the first U-Pb dating of volcanoclastic bed. *Journal of South American Earth Sciences*. 102503. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102503>
- MOURA, S. A., UHLEIN, A., UHLEIN, G. J., DANTAS, M. V. S. 2022. High-resolution stratigraphy of peritidal microbial carbonates from the Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, north of Minas Gerais state, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 52 (02): e20210040. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120210040>
- NEVES, P. V. F. 2020. A plataforma carbonática de alta energia da Formação Lagoa Do Jacaré (Grupo Bambuí) na região de Brasília de Minas, MG: arquitetura sedimentar, feições pós-deposicionais e potencial relação com sistemas petrolífero e cárstico locais. Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto. 72p.
- OLIVEIRA, D. M., BARROSO, M. F., SERRANO, P. M. 2013. Mapeamento geológico da Serra da Onça, Várzea da Palma-MG. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. 70p.
- OLIVEIRA, M. A. M. 1967. Contribuição à geologia da parte sul da Bacia do São Francisco e áreas adjacentes. Petrobras, Série Ciência Técnica – Petróleo, 3, 71-105.
- PACHECO, F. E. R. C., MAGALHÃES, M. G. 2013. Mapeamento geológico em escala 1:100.000 da região de Mirabela – MG. Monografia. Universidade Federal de Minas Gerais. 49p.
- PARENTI COUTO, J. G., CORDANI, U. G., KAWASHITA, K., IYERS, S. S., MORAES, N. M. P. 1981. Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e Pb. *Revista Brasileira de Geociências*, 11, 1, 5-16.
- PAULA-SANTOS, G. M., BABINSKI, M. 2018. Sedimentary provenance in the southern sector of the São Francisco Basin, SE Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 48(1): 51-74. <https://10.1590/2317-4889201820170061>

- PAULA-SANTOS, G. M., CAETANO-FILHO, S., BABINSKI, M., TRINDADE, R. I., GUACANEME, C. 2017. Tracking connection and restriction of West Gondwana São Francisco Basin through isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 42:280–305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.012>
- PAULA-SANTOS, G. V., BABINSKI, M., KUCHENBECKER, M., CAETANO-FILHO, S., TRINDADE, R. I., PEDROSA-SOARES, A. C. 2015. New evidence of an Ediacaran age for the Bambuí Group in southern São Francisco craton (eastern Brazil) from zircon U–Pb data and isotope chemostratigraphy. *Gondwana Research*, 28:702–720. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2014.07.012>
- PEREIRA, A. S., BATISTA, G. A. P. 2013. Mapeamento geológico 1:100000 na porção oeste da folha Brasília de Minas, norte de Minas Gerais.
- PERRELLA, P., UHLEIN, A., UHLEIN, G. J., SIAL, A. N., PEDROSA-SOARES, A. C., LIMA, O. N. B. 2017. Facies analysis, sequence stratigraphy and chemostratigraphy of the Sete Lagoas Formation (Bambuí Group), northern Minas Gerais State, Brazil: evidence of a cap carbonate deposited on the Januária basement high. *Brazilian Journal of Geology*. 47 (1), 59–77. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201720160112>
- PIMENTEL, M. M., RODRIGUES, J. B., DELLA GIUSTINA, M. E. S., JUNGES, S., MATTEINI, M., ARMSTRONG, R. 2011. The tectonic evolution of the Neoproterozoic Brasília Belt, central Brazil, based on SHRIMP and LA-ICPMS U e Pb sedimentary provenance data: a review. *Journal of South American Earth Sciences*, 31: 345–357. <https://10.1016/j.jsames.2011.02.011>
- REIS, C. 2013. Geologia, Sistemas Depositionais e Estratigrafia Isotópica do Grupo Bambuí na região de Santa Maria da Vitória, BA. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Distrito Federal, 96p.
- REIS, H. L. S., SUSS, J. F. 2016. Mixed carbonate–siliciclastic sedimentation in forebulge grabens: An example from the Ediacaran Bambuí Group, São Francisco Basin, Brazil. *Sedimentary Geology*. 339, 83–103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.04.004>.
- REIS, H. L. S.; ALKMIM, F. F., FONSECA, R. C. S., NASCIMENTO, T. C., SUSS, J., PREVATTI, L. D. 2017. The São Francisco Basin. In: Monica Heilbron; Umberto Cordani; Fernando Flecha Alkmim. (Org.). São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic genealogy of a miniature continent. 1ed.Switzerland: Springer International Publishing, v. 1, p. 117–143.
- REIS, H.L.S., ALKMIM, F.F. 2015. Anatomy of a basin-controlled foreland fold-thrust belt curve: The Três Marias salient, São Francisco basin, Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 66:711–731. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.013>
- RIMANN, E. 1917. A kimberlita no Brasil. *Anuário da Escola de Minas*, 15, 27–32, Ouro Preto.
- RODRIGUES, J. B. 2008. Proveniência de sedimentos dos Grupos Canastra, Ibiá, Vazante e Bambuí – Um estudo de zircões detríticos e Idades Modelo Sm-Nd. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, 128 p.
- ROSSI, A. V. A., DANDERFER FILHO, A., BERSAN, S. M., KELMER, L. R., TAVARES, T. D., LANA, C. C., 2020. Stratigraphic, isotopic, and geochronological record of a superposed proforeland basin in the eastern São Francisco craton during west Gondwana

- amalgamation. *Journal of South American Earth Sciences*. 97, 102406. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102406>
- SANCHEZ, E. A., UHLEIN, A., FAIRCHILD, T. R. 2021. Treptichnus pedum in the Três Marias Formation, south-central Brazil, and its implications for the Ediacaran-Cambrian transition in South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 105:102983. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102983>
- SANTOS, D. M., SANCHEZ E. A., SANTUCCI R. M. 2018. Morphological and petrographic analysis of identified stromatolitic occurrences in Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, state of Minas Gerais, Brazil. *A Journal of the Brazilian Society of Paleontology*, 21(3):195-207. <https://doi.org/10.4072/rbp.2018.3.01>
- SANTOS, R. V., ALVARENGA, C. J. S., BABINSKI, M., RAMOS, M. L. S., CUKROV, N., FONSECA, M. A., SIAL, A. N., DARDENNE, M. A., NOCE, C. M. 2004. Carbon isotopes of Mesoproterozoic–Neoproterozoic sequences from Southern São Francisco craton and Araçuaí Belt, Brazil: Paleographic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 18, 27-39.
- SANTOS, R. V., ALVARENGA, C. J. S., DARDENNE, M. A., SIAL, A. N., FERREIRA, V. P. 2000. Carbon and oxygen isotope profiles across Meso-Neoproterozoic limestones from central Brazil: Bambuí and Paranoá Groups. *Precambrian Research*, 104, 107-122.
- SCHOLL, W. U. 1973. Sedimentologie und Geochemie der Bambui Gruppe am SE-Rand des São Francisco Beckens, Minas Gerais, Brasilien. Universidade Heidelberg, RFA, Heidelberg, Tese de Doutorado, 90p.
- SGARBI, G. N. C., SGARBI, P. B. A., CAMPOS, J. E. G., DARDENNE, M. A., PENHA, U. C. 2001. Bacia Sanfranciscana: O registro Fanerozóico da Bacia do São Francisco. In: Pinto, C. P., Martins-Neto, M. A. (eds.) *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais*, Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo de Minas Gerais, Belo Horizonte, 93-138.
- SHIELDS, G. A. 2005. Neoproterozoic cap carbonates: a critical appraisal of existing models and the plume world hypothesis. *Terra Nova*, 17, 299-310.
- TAVARES, T. D., MARTINS, M. S., ALKMIM, F. F., LANA, C. 2020. Detrital zircons from the Upper Três Marias Formation, São Francisco basin, SE Brazil: Record of foreland deposition during the Cambrian? *Journal of South American Earth Sciences*. 97. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102395>
- THOMAZ-FILHO, A., BONHOMME, M. G. 1979. Datations isotopiques Rb-Sr et K-Ar dans le groupe Bambuí, São Francisco (MG), au Brésil. Phase métamorphique brésilienne synchrone de la première phase panafricaine. *C. R. Acad. Sci. Ser. D*, 289, 1221-1224.
- TITO, P. O. 2020. Análise de microfácies da Formação Lagoa Do Jacaré, Serra Do Iuiú – Bahia. Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto.
- UHLEIN, A. 2012. Coberturas cratônicas proterozóicas do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras* (Impresso), v. 21, p. 9-38.
- UHLEIN, A., ALVARENGA, C. J. S., DARDENNE, M. A., TROMPETTE, R. R. 2011a. The glaciogenic Jequitaí Formation, southeastern Brazil. In: Arnaud, E., Halverson, G.P.,

- Shields- Zhou, G. (Eds.) The Geological Record of Neoproterozoic Glaciations, vol. 36. Geological Society of London, London, Memoir, pp. 51–66.
- UHLEIN, A., Lima, O. N. B., Fantinel, L. M., Baptista, M. C. 2004. Estratigrafia e evolução geológica do Grupo Bambuí, Minas Gerais (Roteiro Geológico). In: 42º Congresso Brasileiro de Geologia.
- UHLEIN, G. J., UHLEIN A., HALVERSON G.P., STEVENSON R., CAXITO F.A., COX G.M., CARVALHO J.F.M.G. 2016. The Carrancas Formation, Bambuí Group: A record of pre-Marinoan sedimentation on the southern São Francisco craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 71:1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2016.06.009>
- UHLEIN, G. J., UHLEIN A., STEVENSON R., HALVERSON G.P., CAXITO F.A., COX G.M. 2017. Early to Late Ediacaran conglomeratic wedges from a complete foreland basin cycle in the southwest São Francisco Craton, Bambuí Group, Brazil. *Precambrian Research*, 299:101-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2017.07.020>
- UHLEIN, G. J., UHLEIN, A., EGBERTO, P., CAXITO, F. A., OKUBO, J., WARREN, L. V., SIAL, A. N. 2019. Ediacaran paleoenvironmental changes recorded in the mixed carbonate siliciclastic Bambuí Basin, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 517:39-51. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2018.12.022>
- VIEIRA, L. C., TRINDADE, R. I. F, NOGUEIRA A.C.R., ADER M. 2007. Identification of a Sturtian cap carbonate in the Neoproterozoic Sete Lagoas carbonate platform, Bambuí Group, Brazil. *Comptes Rendus Geoscience*, 339:240-258. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2007.02.003>
- WARREN, L. V., QUAGLIO, F., RICCOMINI, C., SIMÕES, M. G., POIRÉ, D. G., STRIKIS, N. M., STRIKIS, P. C. 2014. The puzzle assembled: Ediacaran guide fossil *Cloudina* reveals an old proto-Gondwana seaway. *Geology*, 42(5): 391-394. <http://dx.doi.org/10.1130/G35304.1>
- ZALÁN, P. V., ROMEIRO-SILVA, P. C. 2007. Bacia do São Francisco. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, 15(2):561-571.