

Caracterização em multiescala de carbonatos neoproterozóicos da Pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, Paraopeba-MG

Multiscale characterization of neoproterozoic carbonatic rocks in GMD quarry, Lagoa do Jacaré Formation, Bambuí Group, Paraopeba City, Minas Gerais State

Alex Rodrigues de Freitas¹ , Alexandre Uhlein¹ , Márcio Vinícius Santana Dantas¹ , Thaís Keuffer Mendonça¹ 

¹Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Avenida Presidente Antônio Carlos, 6.627, Campus Pampulha, CEP: 31270-901, Belo Horizonte, MG, BR (lecaorf@yahoo.com.br; auhlein@gmail.com; márcio_ufs08@hotmail.com; thaïskmendonca@gmail.com)

Recebido em 27 de outubro de 2019; aceito em 4 de fevereiro de 2021

Resumo

O método Caracterização Multiescalar de Reservatórios (Camures) vem se consolidando como uma importante ferramenta e que tem auxiliado na caracterização dos mais diferentes tipos de afloramentos e seções de rochas sedimentares. O objetivo deste trabalho compreende a aplicação desse método em um afloramento da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, representado por uma pedreira desativada na região de Paraopeba, centro-norte de Minas Gerais. Para tanto, utilizaram-se diferentes ferramentas investigativas em macro, meso e microescalas de análise para caracterização dessa unidade nesse afloramento. A caracterização litofaciológica de detalhe na pedreira revelou cinco litofácies carbonáticas principais. Dados geofísicos de Ground Penetrating Radar (GPR) e raios gama foram levantados para auxiliar no reconhecimento das principais geometrias e litologias presentes na área, bem como na correlação lateral dos perfis levantados na pedreira. A análise petrográfica microscópica mostra a ocorrência de seis fácies. A análise das litofácies e estruturas sedimentares presentes apontam para deposição sob influência de ondas de tempestade em diversos ciclos tempestíticos em plataforma carbonática rasa. Essa sequência é definida na base por brechas intraclásticas, representando momentos de alta energia, passando a momentos de menor energia que favorecem a deposição carbonática fina com estratificações *hummocky* e plano-paralelas, marcas onduladas associadas, até raros momentos de calmaria com deposição de sedimentos carbonáticos finos na transição antepraia-plataforma (*shoreface-offshore*).

Palavras-chave: Rochas carbonáticas; Tempestitos; Afloramentos análogos; Bacia do São Francisco; Reservatórios de hidrocarbonetos.

Abstract

The Multiscale Reservoir Characterization (*Caracterização Multiescalar de Reservatórios - CAMURES*) method has been proving itself an important tool of geological investigation and helping in characterizing many types of outcrops and sedimentary successions. The objective of the present article is to apply this method in a limestone outcrop of *Lagoa do Jacaré* Formation, *Bambuí* Group, in a disabled quarry, in Paraopeba region, Minas Gerais State. For this purpose, different investigative tools were used, with different scales of observation, to best describe this geological unit. A detailed lithofaciological analysis was made, and five individual lithofacies were defined. Ground Penetrating Radar and gamma-ray data were acquired to complement the knowledge about geometry and lithotypes in the study area, and reveal information concerning the lateral correlation between the geological profiles described. Microscopic petrography revealed the presence of six microfacies associations. Analysis of lithofacies and structures points to deposition under the influence of storm waves in several storm cycles on shallow-marine carbonate platform. This sequence is defined by intraclastic breccias on the bottom, that represent high energy moments, passing to lower wave-influenced energy moments, which favour deposition of fine carbonates with *hummocky* and planar stratification, and also ripple marks, until rare moments of calm sea with deposition of fine carbonate in the *shoreface-offshore* transition.

Keywords: Carbonatic rocks; Tempestites; Reservoirs analogues outcrops; São Francisco Basin; Hydrocarbon reservoirs.

INTRODUÇÃO

Em bacias sedimentares produtoras de hidrocarbonetos, o estudo dos reservatórios é de fundamental importância, pois permite entender não só o sistema petrolífero, como também permite planejar a melhor estratégia exploratória. Porém, como os reservatórios geralmente estão em grandes profundidades e seus estudos envolvem apenas abordagens indiretas (e.g. métodos geofísicos) e restritas (e.g. sondagem), o estabelecimento de modelos análogos se faz necessário (Paim et al., 2003; Tatum e Francke, 2012; Rodrigues, 2018). Ante isso, estudos sobre afloramentos análogos vêm sendo amplamente utilizados para melhor entendimento, caracterização e avaliação de reservatórios e consequente minimização de riscos e problemas durante a produção de hidrocarbonetos.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos em afloramentos análogos no sentido de mapear as heterogeneidades e diversos elementos arquiteturais e diagenéticos que permitam compreender os atributos permoporosos e assim promover um melhor entendimento acerca dos reservatórios em subsuperfície (Paim et al., 2003; Lira, 2004; Menezes, 2004; Koehrer et al., 2010; Forte e Pipan, 2011; Forte et al., 2012; Tatum e Francke, 2012; Garcia et al., 2015; Melani, 2015; Hilbert, 2016; Basso et al., 2017; Rodrigues, 2018).

O presente trabalho representa a aplicação da técnica de Caracterização Multiescalar de Reservatórios (Camures) (Garcia et al., 2015), aplicada às rochas carbonáticas da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí. O método Camures utiliza dados levantados em afloramentos análogos de reservatórios de hidrocarbonetos em macro, meso e microescalas e foca no mapeamento de elementos arquiteturais e de variações de heterogeneidades verticais e laterais de forma que permita a definição de modelos geológicos e preditivos.

Pretende-se apresentar neste artigo os resultados obtidos em levantamentos de perfis litofaciológicos, análise de texturas microscópicas presentes na unidade por meio de petrografia microscópica e análise de microscópio eletrônico de varredura (MEV), bem como dados de Ground Penetrating Radar (GPR) e raios gama, além de análise de tectônica rúptil, visando caracterizar o potencial dessas rochas como reservatórios de hidrocarbonetos gasosos. Os trabalhos foram desenvolvidos em uma pedreira desativada no município de Paraopeba, chamada aqui de pedreira GMD, e que está localizada a cerca de 90 km a norte de Belo Horizonte.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A área do estudo insere-se no contexto do Cráton do São Francisco, mais precisamente em sua porção meridional, zona central do estado de Minas Gerais, no município de

Paraopeba (Figura 1). As rochas aflorantes na pedreira GMD, principal alvo do estudo, são pertencentes à Formação Lagoa do Jacaré, do Grupo Bambuí.

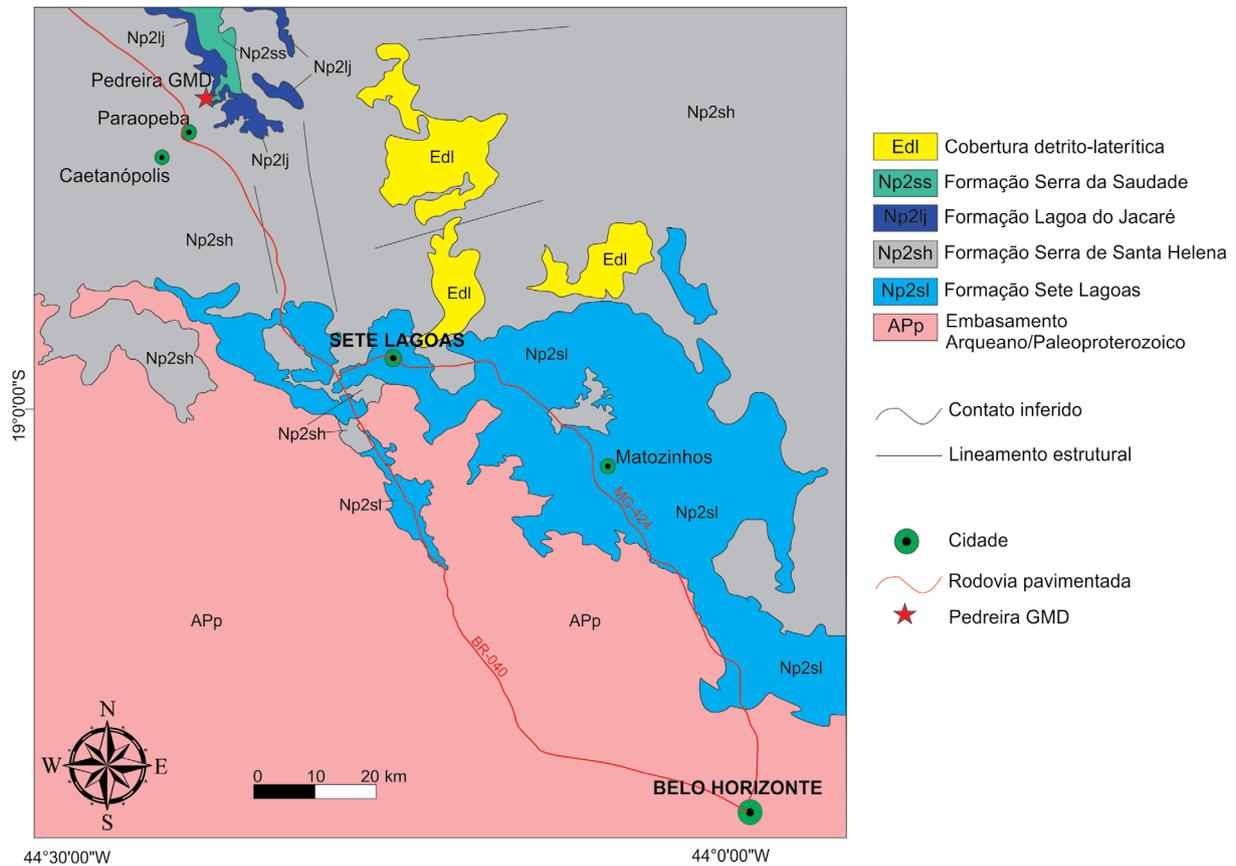
O Grupo Bambuí representa uma extensa cobertura cratônica em contato erosivo com as rochas paleoproterozoicas e arqueanas do embasamento do Cráton do São Francisco (Dardenne, 1978; Martins e Lemos, 2007) e está também em contato tectônico com as rochas neoproterozoicas das Faixas Brasília e Araçuaí (Zalán e Romeiro-Silva, 2007). Constitui, segundo Alkmim et al. (1993), a principal unidade neoproterozoica de cobertura do Cráton do São Francisco. As rochas do Grupo Bambuí representam ciclos transgressivo-regressivos em uma bacia *foreland*, na transição entre o cráton e a faixa móvel Brasília, em decorrência da sobrecarga gerada pela edificação de tal orógeno (Alkmim e Martins-Neto, 2001, 2012; Uhlein et al., 2017b).

Alkmim e Martins-Neto (2001) subdividem a Bacia Bambuí em três compartimentos estruturais: oeste, cujas rochas apresentam influência tectônica da Faixa Brasília, leste, com influência tectônica da Faixa Araçuaí, e zona central, com camadas sub-horizontais que apresentam pouca influência das faixas móveis.

A primeira litoestratigrafia global para as rochas do Grupo Bambuí foi proposta por Costa e Branco (1961), que analisaram as rochas aflorantes às margens da BR-040 no trecho entre Belo Horizonte (MG) e Brasília (DF). Os autores propuseram a divisão do Grupo Bambuí em três formações: Carrancas (basal), Sete Lagoas (intermediária) e Rio Paraopeba (topo). Posteriormente, Dardenne (1978) definiu seis formações para o Grupo Bambuí, da base para o topo: Formação Jequitaiá, formada predominantemente por diamictitos, raros arenitos e ritmitos; Formação Sete Lagoas, composta de uma sucessão de dolomitos e calcários; Formação Serra de Santa Helena, que apresenta folhelhos e siltitos com lentes de calcários; Formação Lagoa do Jacaré, com alternância entre calcários escuros, por vezes oolíticos, e siltitos e margas; Formação Serra da Saudade, que compreende folhelhos, arenitos e argilitos esverdeados; e finalmente a Formação Três Marias, de topo, que apresenta arenitos arcoseanos e siltitos (Figura 2).

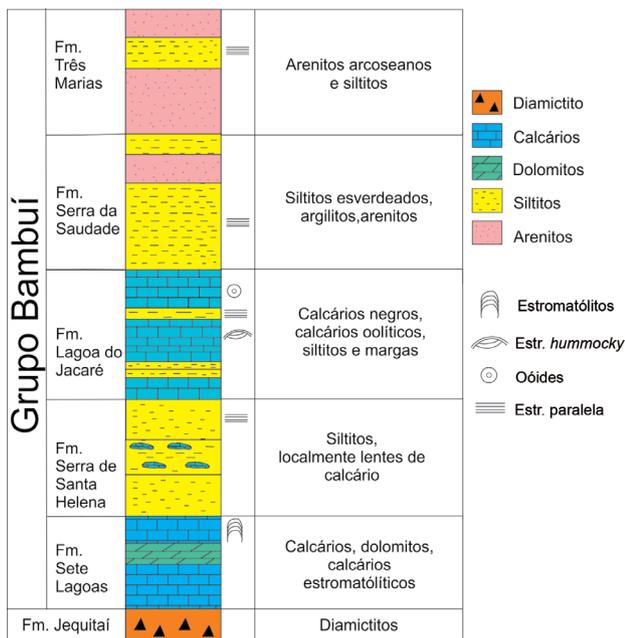
Baseando-se em estratigrafia de sequências, Uhlein et al. (2017b) reconhecem cinco sequências transgressivo-regressivas de segunda ordem para o Grupo Bambuí, e os autores observam que a Formação Lagoa do Jacaré teria sido depositada durante ciclo regressivo, em uma rampa carbonática, com depósitos tempestíticos e calcários oolíticos associados.

A Formação Jequitaiá apresenta sedimentos glaciogênicos, registro de evento glacial global (Hoffman et al., 1998) e está sotoposta aos carbonatos de capa da base do Grupo Bambuí (Vieira et al., 2007; Caxito et al., 2012). A idade desse evento glacial, que marca o início da sedimentação do Grupo Bambuí, vem sendo discutida, sendo considerada Sturtiana, em torno de 730 Ma (Babinski et al., 2007, 2012;



Fonte: modificado de Feboli (2008), Tuller (2009), Pinto e Silva (2014) e Uhlein et al. (2017a).

Figura 1. Mapa geológico simplificado da região sudeste da Bacia do São Francisco, com a localização da Pedreira GMD.



Fm.: formação; estr.: estratificação.

Figura 2. Litoestratigrafia regional do Grupo Bambuí (Dardenne, 1978) na porção sudeste do Cráton do São Francisco.

Vieira et al., 2007), e Marinoana, em torno de 630 Ma (Caxito et al., 2012; Alvarenga et al., 2014). Contudo estudos mais recentes têm mostrado idades mais jovens para o Grupo Bambuí. Warren et al. (2014) descreveram, na sequência basal da Formação Sete Lagoas, a ocorrência do fóssil *Cloudina sp.*, que representa idades em torno de 550 – 542 Ma. Paula-Santos et al. (2015) realizaram datações U-Pb em zircões detríticos na mesma unidade e apresentaram uma idade máxima de deposição de cerca de 560 Ma.

Em relação às fácies da Formação Lagoa do Jacaré, o trabalho de Martinez (2007) definiu três litofácies para a unidade na região de Lontra, norte do estado de Minas Gerais:

- calcarenitos e calcissiltitos neomorfizados;
- calcários impuros;
- siltitos e calcissiltitos.

Reis (2013) define e caracteriza ainda sete litofácies para a unidade na região de Santa Maria da Vitória (BA):

- calcarenitos pretos grossos;
- calcários pretos finos;
- calcarenitos muito finos e siltosos;
- calcarenitos finos a muito finos maciços;

- calcarenitos grossos, tabulares;
- calciruditos pretos com estratificações cruzadas;
- calcisiltitos.

Ocorrências de hidrocarbonetos gasosos têm sido descritas na Bacia Intracratônica do São Francisco, principalmente no norte/noroeste de Minas Gerais (Fugita e Clark-Filho, 2001; Pinto et al., 2001; Martins-Neto, 2009; Reis, 2018), e esse acervo de ocorrências está associado exclusivamente a coberturas sedimentares proterozoicas (Reis, 2018). Reis e Alkmim (2015) relatam que, na Sequência Bambuí, o potencial gerador encontra-se principalmente nos lamitos carbonáticos da Formação Sete Lagoas. Os principais reservatórios na Sequência Bambuí encontram-se nos carbonatos ediacaranos (Fm. Sete Lagoas e Fm. Lagoa do Jacaré) e nos metapelitos fraturados (Fugita e Clark-Filho, 2001; Tonietto, 2010). Reis (2018) afirma ainda que o sistema petrolífero representa um sistema não convencional, levando-se em consideração a natureza pouco porosa dos reservatórios, bem como o estágio supermaturo das rochas geradoras.

MÉTODOS

O método Camures, utilizado neste trabalho, envolve aplicação de métodos indiretos e diretos de investigação e descrição do afloramento, em diferentes escalas, para mapeamento de atributos permoporosos, elementos arquiteturais e heterogeneidades da Formação Lagoa do Jacaré, aflorante na pedreira.

Entre os métodos investigativos aplicados, são citados:

- o mapeamento sistemático do afloramento alvo, utilizando-se das técnicas de análise estratigráfica e litofaciológica que envolveu levantamento de quatro perfis colunares de detalhe, bem como subdivisão e sucessões de fácies. Para descrever e amostrar diretamente o afloramento, empregaram-se técnicas de rapel para acesso às rochas. Quatro perfis colunares foram levantados, distribuídos lateralmente na pedreira. O paredão descrito tem cerca de 12 m de altura e aproximadamente 150 m de extensão. Acima desse paredão ocorre um platô com cerca de 9 m de largura;
- aplicação de GPR no afloramento para imageamento raso, com objetivo de auxiliar na interpretação da geometria e arquitetura deposicionais. Levantaram-se três linhas tanto no chão da pedreira quanto na porção superior dos paredões utilizando-se antenas com 160 Mhz de frequência modelo SIR-2000 Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI), em modo *common-offset*. A etapa de processamento das linhas brutas obtidas em campo foi realizada com o *software* ReflexW versão 5.0. Essa etapa é realizada em escritório e

objetiva a redução de sinais indesejados ou ruídos, além de realçar as principais feições observadas nos radargramas. Os procedimentos adotados nessa etapa envolvem aplicação de ganho inicial para realce de todas as linhas dos radargramas, seguido de remoção de ganho durante a aquisição (*header gain removal*), ajuste de tempo zero, remoção de *background*, aplicação de filtro passa-banda e conversão de tempo em profundidade (*time-depth conversion*) que converte os tempos duplos em profundidade;

- gamaespectrometria para correlação dos perfis colunares confeccionados e identificação de possíveis frações argilosas associadas. A gamaespectrometria mede as contagens/concentrações de CT, K, eU e eTh em rochas, sedimentos e solos por meio da detecção dos raios gama emitidos durante o decaimento radioativo natural desses elementos (Ferreira et al., 2010). Ulbrich et al. (2009) apresentam uma visão geral das características e do comportamento geoquímico desses elementos. Segundo os autores, o K presente em rochas carbonáticas é relativamente baixo se comparado a rochas graníticas félsicas, porém pode ocorrer concentração por processo de ilitização em bacias sedimentares marinhas e continentais, além de minerais secundários como micas e argilas. Ainda segundo os autores, as principais concentrações dos elementos Th e U em calcários advêm de minerais secundários como apatitas. Durante o levantamento, utilizou-se aparelho gamaespectrômetro portátil RS-230 da marca Radiation Solutions, e os dados de contagem total foram expressos em graus do American Petroleum Institute (°API);
- descrições petrográficas em macro e microescalas para definição das características da rocha em estudo, análise das relações matriz/cimento e granulometria. Coletaram-se 51 amostras de rochas da pedreira, e foram confeccionadas 35 lâminas petrográficas com base nessas amostras. As descrições macroscópicas utilizaram como referência a classificação proposta por Grabau (1904). Na petrografia microscópica, utilizou-se a classificação proposta por Dunham (1962). Os trabalhos envolveram descrição de amostras, confecção de lâminas petrográficas e preparação (polimento e metalização) de lâminas e pequenos fragmentos de amostras para análises em MEV. O funcionamento do MEV consiste essencialmente em um fino feixe de elétrons que bombardeia a amostra e captura a resposta (radiação) emitida por ela (elétrons secundários, raios X, elétrons retroespalhados, catodoluminescência) (Reed, 2005). O feixe corre por toda a lâmina ou amostra devidamente preparada (polida e metalizada) e capta as respostas emitidas que marcarão principalmente as variações composicionais e de relevo da rocha. Pode-se ainda acoplar o espectrômetro por energia dispersiva (EDS) ao MEV, o que

permite realizar um mapeamento e análise dos principais elementos químicos que compõem a rocha estudada. A integração desses dados petrográficos auxiliou na interpretação dos parâmetros petrofísicos (porosidade e permeabilidade) da rocha.

RESULTADOS

Associação de fácies

A Formação Lagoa do Jacaré é descrita na pedreira GMD como uma sucessão de rochas carbonáticas com presença de raras camadas siltíticas intercaladas, sendo descritas para a unidade cinco litofácies (Tabela 1, Figuras 3 e 4). No afloramento, estão presentes calcarenitos finos a médios, cinza-escuros, por vezes maciços, ou apresentando estruturas sedimentares como estratificações plano-paralelas centimétricas a decimétricas, estratificação ondulada, estratificação do tipo *hummocky*, camadas lenticulares amalgamadas, brechas com presença de intraclastos calcilutíticos, subarredondados a angulosos, cinza-claros, calcarenitos finos com marcas onduladas assimétricas com comprimentos de onda centimétricos e estratificações onduladas, fora de fase, com truncamentos de baixo ângulo.

As litofácies mais grossas (brechas) são representativas de momentos de maior energia de tempestades, nos quais

ocorre erosão do substrato com formação de marcas de solas e suspensão de material mais fino e posterior deposição de intraclastos (Figura 3E) em matriz calcarenítica. Em seguida, a redução da energia da tempestade gera correntes de menor intensidade que favorecem a formação de estratificações paralelas (Figura 3A), *ripples* simétricas e assimétricas (Figura 3D) e *hummockys* (Figura 3C). No estágio final do evento tempestítico, quando já não existe influência de tempestades na deposição dos sedimentos, uma camada de material fino (pelitos e sedimento calcilutítico) decanta (Figura 3B), encerrando a sequência, até que um novo ciclo tempestítico se inicie.

Dados de paleocorrentes foram levantados na pedreira pela exposição de estruturas de marcas onduladas pouco assimétricas e mostraram uma direção predominante NW-SE (entre 290 e 320° e entre 110 e 140°). Ressalta-se que as medidas foram tomadas a partir da orientação das cristas das marcas onduladas e que a pequena assimetria dificultou a definição precisa do sentido da paleocorrente.

Petrografia

Observaram-se predominantemente rochas calcárias, como calcarenitos finos a médios, por vezes com presença de micas e quartzo associados, intercalações de calcilutitos, em laminações ou em intraclastos calcilutíticos ou pelíticos associados, além de calcitas espáticas recristalizadas.

Tabela 1. Tabela das litofácies descritas na pedreira GMD, Formação Lagoa do Jacaré.

Fácies	Descrição	Interpretação
Calcarenitos médios a finos maciços (Cmm)	Calcarenitos cinza-escuros, reagem ao HCl, maciços e localmente com calcitas recristalizadas pretas e estratificação gradacional.	Deposição por processos trativos, com fluxo unidirecional.
Brecha intraclástica (Bi)	Rocha com presença de intraclastos calcilutíticos alongados, matriz calcarenítica fina, com clastos subarredondados a angulosos, com dimensões que variam de centímetros a poucos decímetros, predominantemente orientados, de coloração cinza-claro. Brechas lenticulares que gradam a calcarenitos.	Início (base) do ciclo tempestítico com alta energia de tempestade. Ambiente de rampa carbonática de <i>shoreface</i> . Representa a base do ciclo tempestítico.
Calcarenitos finos com marcas onduladas assimétricas (Cfo)	Calcarenitos finos, cinza-escuros, com laminação plano-paralela milimétrica a centimétrica, apresentando variação na coloração das lâminas, reagente à solução diluída de HCl, por vezes marcada no topo por <i>ripple marks</i> assimétricas com comprimentos de onda da ordem de 2 cm, com inferência de paleocorrentes de direção NW-SE.	Deposição de material por correntes induzidas à medida que a energia de tempestade diminui, favorecendo a deposição de laminação plano-paralela e marcas onduladas. Transição <i>shoreface-offshore</i> .
Calcarenitos médios com estratificação <i>hummocky</i> (Cmh)	Calcarenito médio, cinza-escuro, com presença de estratificação cruzada do tipo <i>hummocky</i> e presença constante de marcas onduladas simétricas e assimétricas com comprimentos de onda centimétrico.	Fácies tempestítica típica, depositada em <i>shoreface</i> .
Calcilutitos e siltitos (Clu)	Calcilutitos, cinza-claros, geralmente com aspecto maciço, eventualmente laminados; siltitos laminados.	Momento de calmaria com decantação carbonática/siliciclástica fina. Representa o topo da sequência tempestítica.

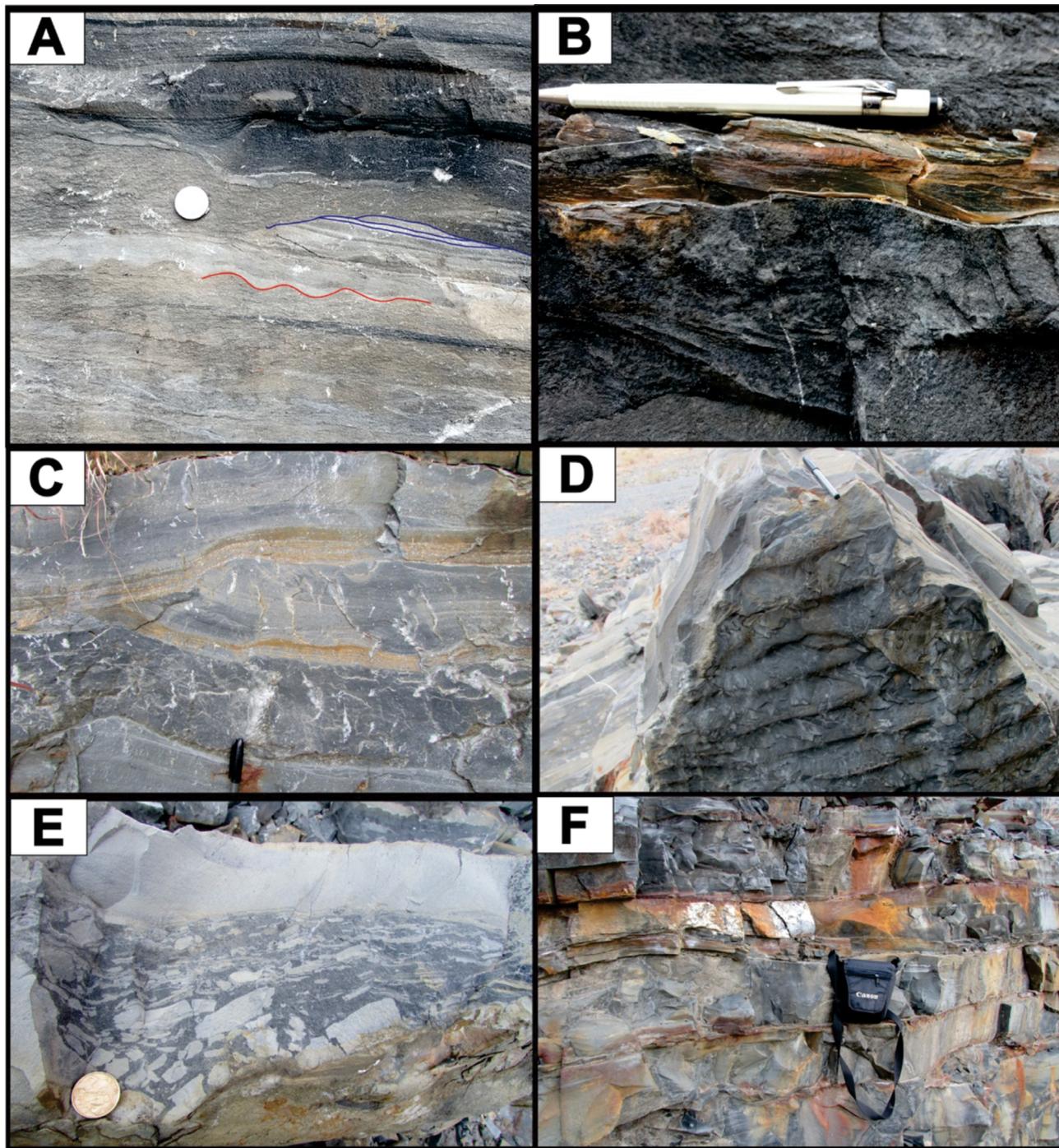


Figura 3. Principais litofácies e estruturas presentes na pedra GMD: (A) calcarenito laminado com presença de marcas onduladas, laminações truncadas e plano-paralelas; (B) detalhe de camada centimétrica de siltito entre calcarenitos; (C) parte de uma estratificação cruzada por influência de ondas (*hummocky*), com truncamentos; (D) detalhe de marcas onduladas assimétricas em calcarenito; (E) brecha intraclástica maciça, com geometria lenticular, gradando a calcarenito com intraclastos; (F) disposição de camadas onduladas e amalgamadas.

Ocorrem ainda oóides dispersos em matriz fina. São presentes pequenas venulações, cortando, geralmente, calcilutitos com matriz fina, além de porções com minerais opacos orientados

em finas laminações. Aparecem, também, alinhamentos irregulares de minerais opacos, geralmente formados pela dissolução sob pressão, formando microestilólitos.

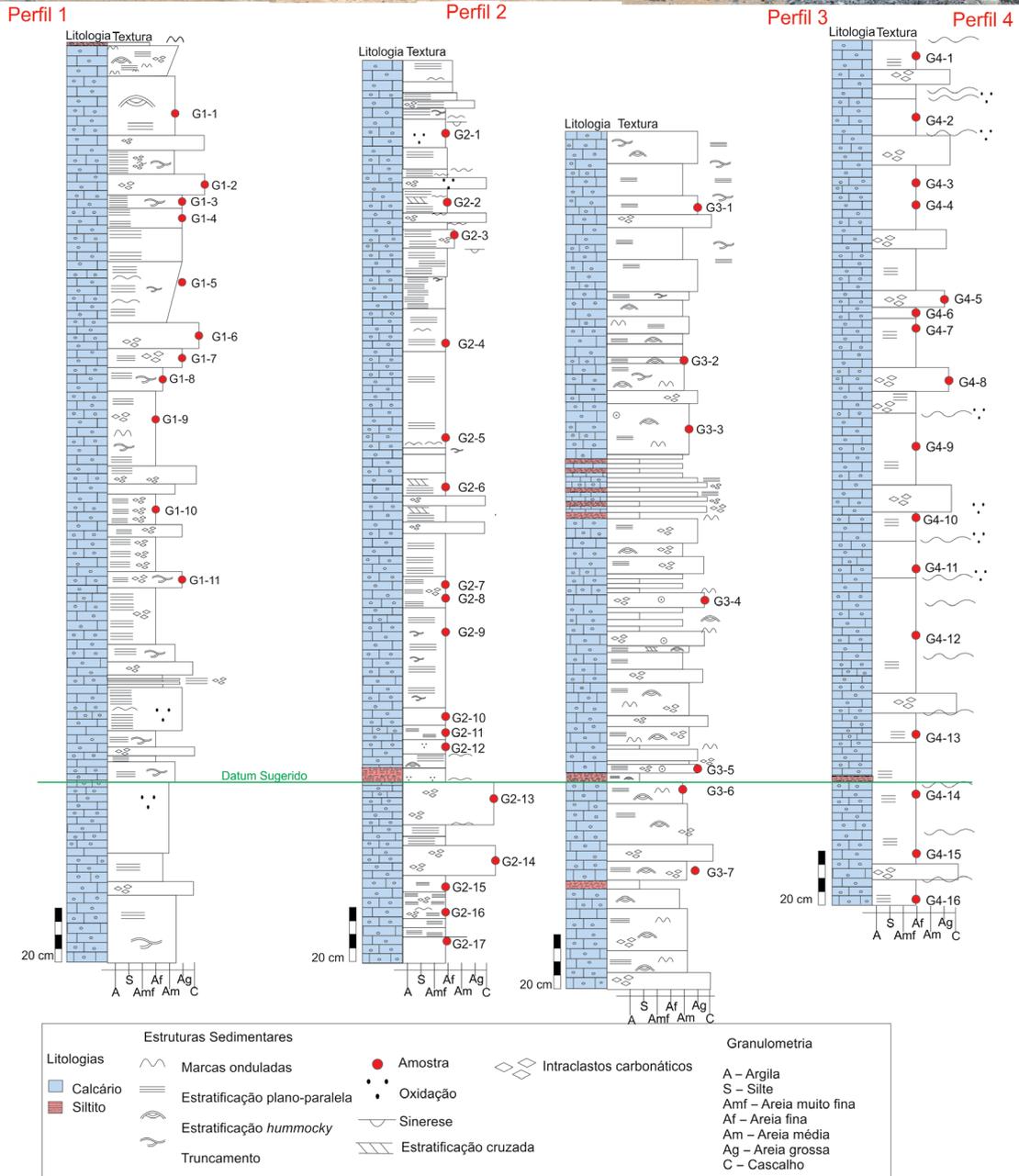
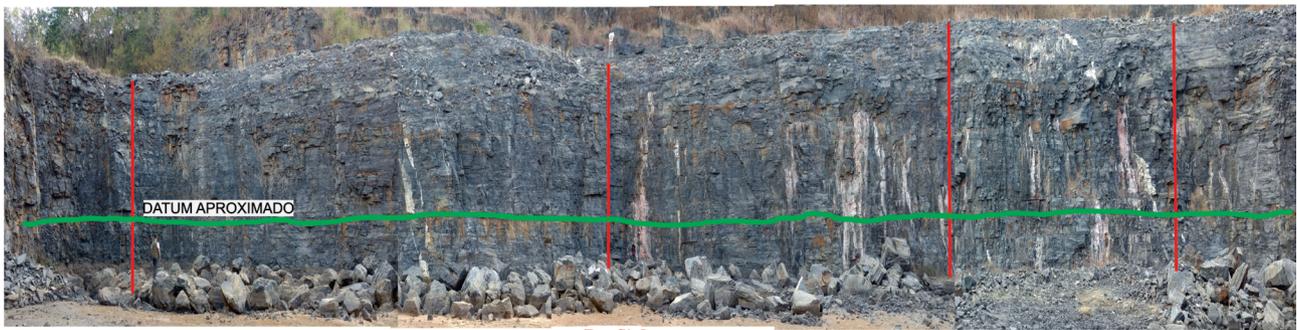


Figura 4. Fotomosaico representativo da pedraira GMD (contém exagero vertical de 4x) com a representação dos perfis sedimentares levantados. O datum é representado por uma camada de siltito bem identificada em todos os perfis laterais.

Com base nas descrições petrográficas, caracterizaram-se seis diferentes litotipos para as amostras coletadas, baseando-se nas texturas descritas:

- *grainstones* oolíticos intraclásticos, geralmente laminados. Essa representa a fácies micropetrográfica mais observada nas lâminas. Os oóides são partículas esferoidais, de tamanho areia média-grossa. Por vezes, observa-se a estrutura interna concêntrica característica desses grãos carbonáticos, contudo o intenso processo de recristalização dessas rochas pode mascarar essas estruturas internas dos oóides (Figura 5A). Os núcleos são formados por calcita espática em geral. Os intraclastos são subarredondados a angulosos, geralmente são formados por material calcilutítico ou pelítico, podendo apresentar pirritas disseminadas (Figura 5A). Observou-se ainda, em algumas lâminas, a ocorrência de calcita grossa em forma de veios. Podem ocorrer microestilólitos dispersos pelas lâminas (Figura 5B). O cimento (Figura 5A) geralmente apresenta cristais calcíticos bem formados e padrão blocoso. Ocorrem ainda porcentagens variáveis de minerais silicáticos (5 a 10%), especialmente quartzo e micas brancas, além de considerável frequência (até 10%) de minerais opacos dispersos por todas as lâminas. Foram descritas 12 lâminas desse litotipo;
- *grainstones* intraclásticos, geralmente laminados. Os intraclastos apresentam-se subarredondados (Figuras 5C e 5D) a subangulosos, compostos principalmente de material pelítico, podendo ocorrer pirritas disseminadas. A proporção de cimento fica entre 50 e 70% e a de intraclastos pelíticos entre 20 e 30%, podendo ocorrer ainda grãos de quartzo dispersos (entre 5 e 15%), micas brancas (5 a 10%) e opacos (5 a 10%). Ocorrem ainda microestilólitos dispersos pelas lâminas, além de veios com calcita espática recristalizada. O cimento apresenta padrão blocoso de disposição dos minerais. Foram descritas nove lâminas com essas características;
- calcários neomorfizados, formados por cristais de calcita recristalizada (60 a 75%), possivelmente antigos *grainstones* recristalizados, mas sem aloquímicos visíveis. Localmente, relictos de oóides são identificados apesar da recristalização diagenética intensa. Pode ocorrer material siliciclástico, principalmente quartzo (até 15%) e micas (até 10%), além de minerais opacos (até 10%) dispersos ou em microestilólitos nas lâminas. Foram descritas três lâminas com essas características;
- *wackestones* intraclásticos, geralmente laminados. Apresentam frequências consideráveis de material silicoso, além de intraclastos calcilutíticos. Essas rochas são compostas principalmente de matriz micrítica (entre 50 e 70%), grãos de quartzo subangulosos (10 a 20%) e opacos (5 a 10%), podendo ocorrer ainda intraclastos pelíticos piritizados associados (até 10%), além de micas (até 5%). Foram descritas três lâminas desse litotipo;

- *lime-mudstone* laminado, com predomínio de lama carbonática e matriz micrítica (75 a 85%), com ocorrência ainda de grãos de quartzo (silte), micas e opacos (15 a 25%). Podem ocorrer, em algumas porções, lentes ou veios de calcita grossa cortando as laminações presentes (Figura 5E). Foram descritas duas lâminas com essas características;
- siltito laminado, de granulometria silte médio a grosso, geralmente contendo altos teores de quartzo subanguloso (60 a 85%). Ocorre ainda, entre as laminações, matriz carbonática fina (10 a 15%), sericitas e argilas (até 5%), além de minerais opacos dispersos ou aglomerados em laminações por toda a rocha (5 a 10%). As micas observadas podem aparecer dispersas ou orientadas. Em algumas amostras, há alternância entre lâminas carbonáticas finas e lâminas silicosas, sendo essas amostras denominadas siltitos carbonáticos. Foram descritas seis lâminas pertencentes a esse litotipo (Figura 5F).

Os trabalhos de petrografia envolveram ainda análises por MEV para verificação de existência de microporosidade na rocha, bem como análise das relações entre matriz/cimento e grãos carbonáticos. Uma lâmina e uma amostra foram investigadas para melhor entender as relações entre grãos carbonáticos e cimento, assim como para caracterizar microporosidade.

A lâmina polida e metalizada revelou a existência de microporosidade na rocha, formada principalmente por microfaturas (Figuras 6A e 6B), que ocorrem por vezes alinhadas, porém sem interconectividade entre as elas. A amostra evidenciou a presença maciça de cristais calcíticos, envolvendo grãos carbonáticos aloquímicos, provavelmente oóides (Figura 6C), e presença de porosidade intergranular (Figura 6D). A porosidade está relacionada também a possíveis arrancamentos de grãos do arcabouço cristalino ou ainda à dissolução de porções do arcabouço (Figura 6B), nesses casos também sem apresentar interconectividade entre os poros.

Radar de penetração no solo (*ground penetrating radar*)

A análise dos radargramas processados revelou as feições arquiteturais e deposicionais da Formação Lagoa do Jacaré na pedreira. A linha 1 foi levantada no chão da pedreira e a linha 2 na bancada superior (Figura 7). As antenas utilizadas permitiram investigar cerca de 17 metros de profundidade, e as principais estruturas marcadas nos radargramas aparecem com boa resolução até cerca de 10 metros de profundidade.

As principais geometrias deposicionais observadas nos radargramas são subparalela, sigmoidal, *hummocky*, lenticular e divergente (Figura 8). O padrão subparalelo representa aporte estável e taxa de subsidência uniforme, podendo ser

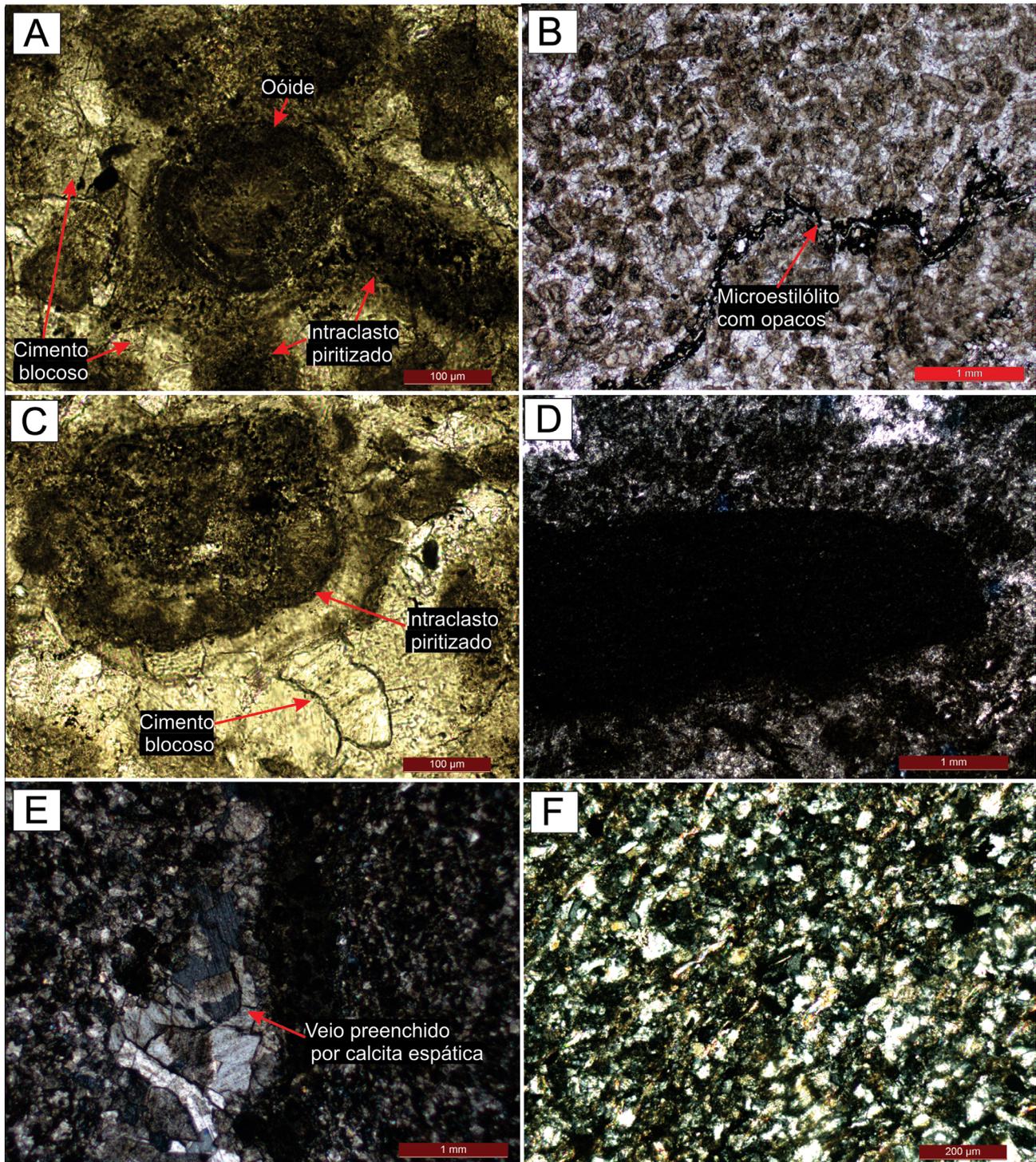


Figura 5. Fotos dos principais litotipos e microtexturas. (A) Detalhes de cimento blocoso, oóides concêntricos bem preservados e intraclastos subarredondados (polarizadores paralelos); (B) *grainstone* oolítico intraclástico (polarizadores paralelos) com detalhe para microestilólito; (C) *grainstone* intraclástico com intraclastos subarredondados piritizados, detalhe de cimento blocoso (polarizadores paralelos); (D) *grainstone* intraclástico, com detalhe de intraclasto piritizado (polarizadores cruzados); (E) *lime-mudstone* com detalhe para veio preenchido por calcita grossa (polarizadores cruzados); (F) siltito com matriz carbonática (polarizadores cruzados).

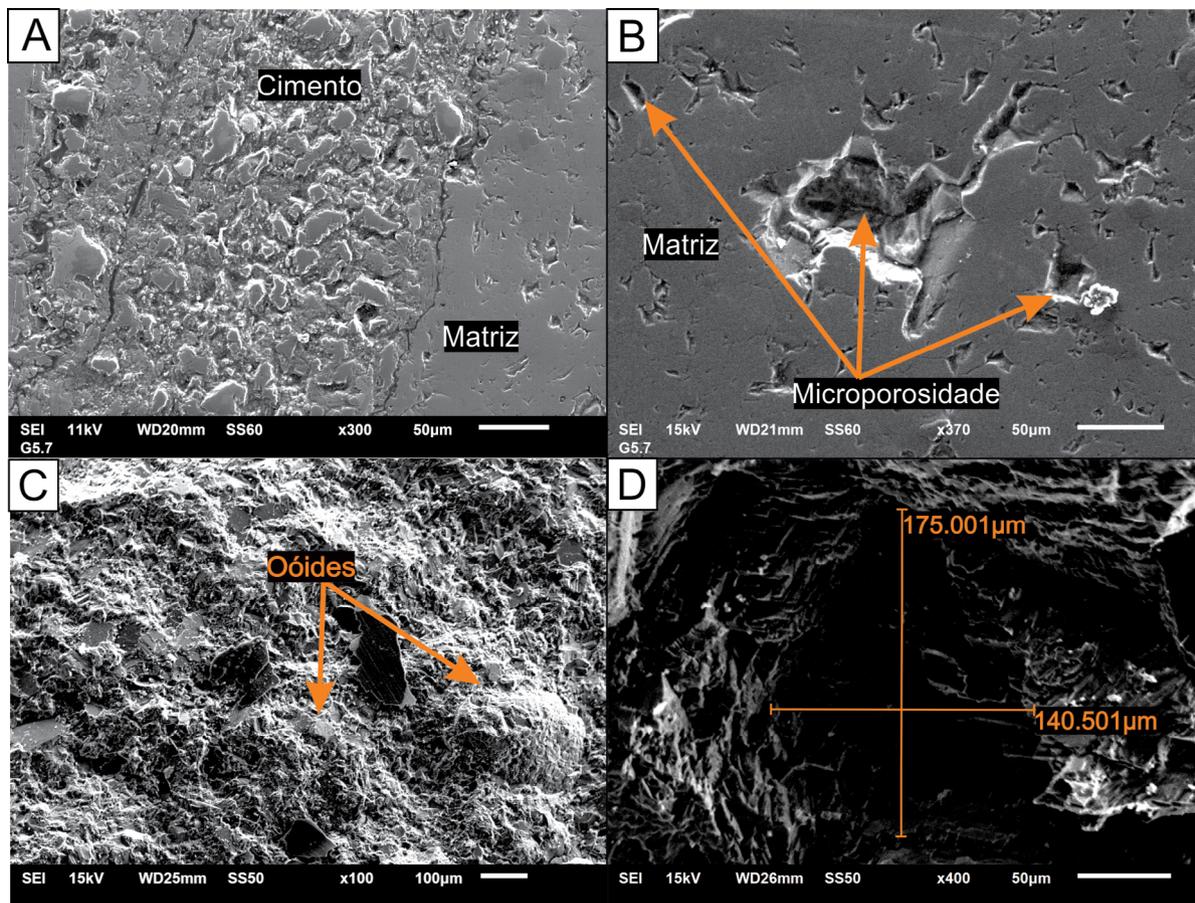


Figura 6. Imageamento por meio de microscópio eletrônico de varredura (MEV). (A) Microfraturamento marcado em porção com matriz micrítica com pequenos poros dispersos pela lâmina e presença de cimento espático recristalizado; (B) microporosidade representada por fraturamentos na matriz e possíveis arrancamentos de grãos do substrato ou possível dissolução do arcabouço cristalino; (C) amostra com cristais bem formados de calcita, envolvendo aloquímicos (oóides); (D) detalhe de poro intergranular.



Fonte: Google Earth.

Figura 7. Imagem aérea de localização das linhas de Ground Penetrating Radar (GPR) levantadas na pedreira.

representativo de momentos agradacionais, com aumento de espaço de acomodação por conta da inclinação suave da rampa (*shoreface*) e aporte estável. O padrão divergente pode representar uma variação lateral da taxa de sedimentação. As feições sigmoidais indicam deposição em superfície inclinada (*shoreface*) e sugerem nos radargramas levantados uma direção de progradação para SE. A configuração *hummocky* apresenta refletores descontínuos com padrão segmentado e indica que durante deposição ocorreu influência de ondas de tempestades.

Perfilagem de raios gama

O levantamento dos dados gamaespectrométricos tem por objetivo melhor caracterizar a continuidade lateral das camadas aflorantes na pedreira, de modo que auxilie na correlação dos perfis estratigráficos levantados.

De maneira geral, as camadas têm continuidade lateral visível, podendo conter importantes variações granulométricas,

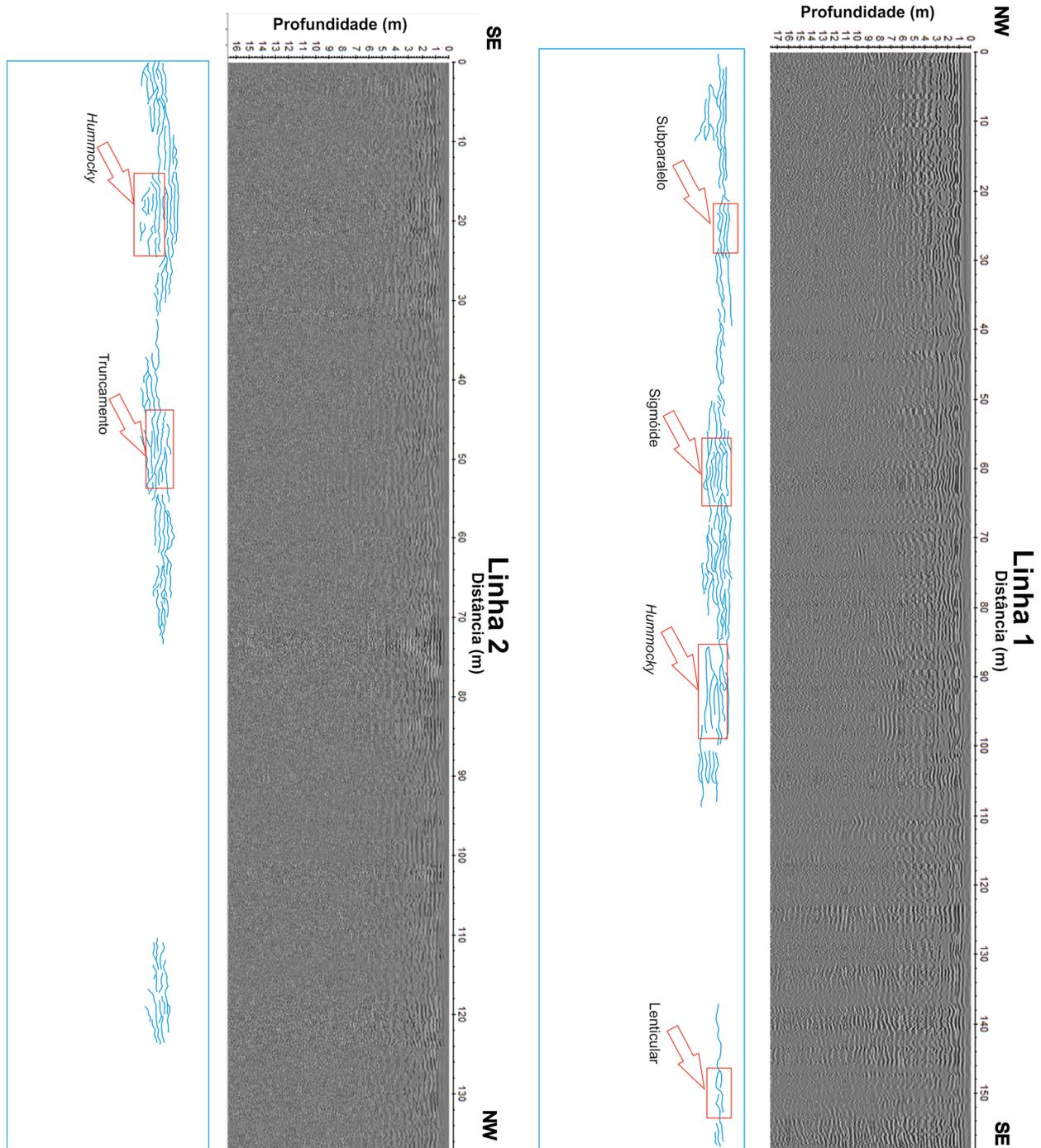


Figura 8. Linhas 1 e 2 processadas e interpretadas. Entre as geometrias internas marcadas pelos estratos, destacam-se os padrões subparalelos, sigmoidais, estruturas de *hummocky* e truncamentos.

além de maior ou menor fração argilosa. Nos quatro perfis levantados na pedreira GMD, os valores de contagem total (CT) de raios gama apresentaram anomalias positivas nas porções superiores e anomalias negativas nas porções inferiores (primeiros 4 m a partir do chão da pedreira), nesse

caso, relacionadas à granulometria areia, conforme a dissertação de Freitas (2020) (Figura 9).

Os valores observados de contagem total variaram de 40 a 150 °API. Em relação à concentração de K, observaram-se valores baixos (entre 0,5 a 3,0%), associados em geral às

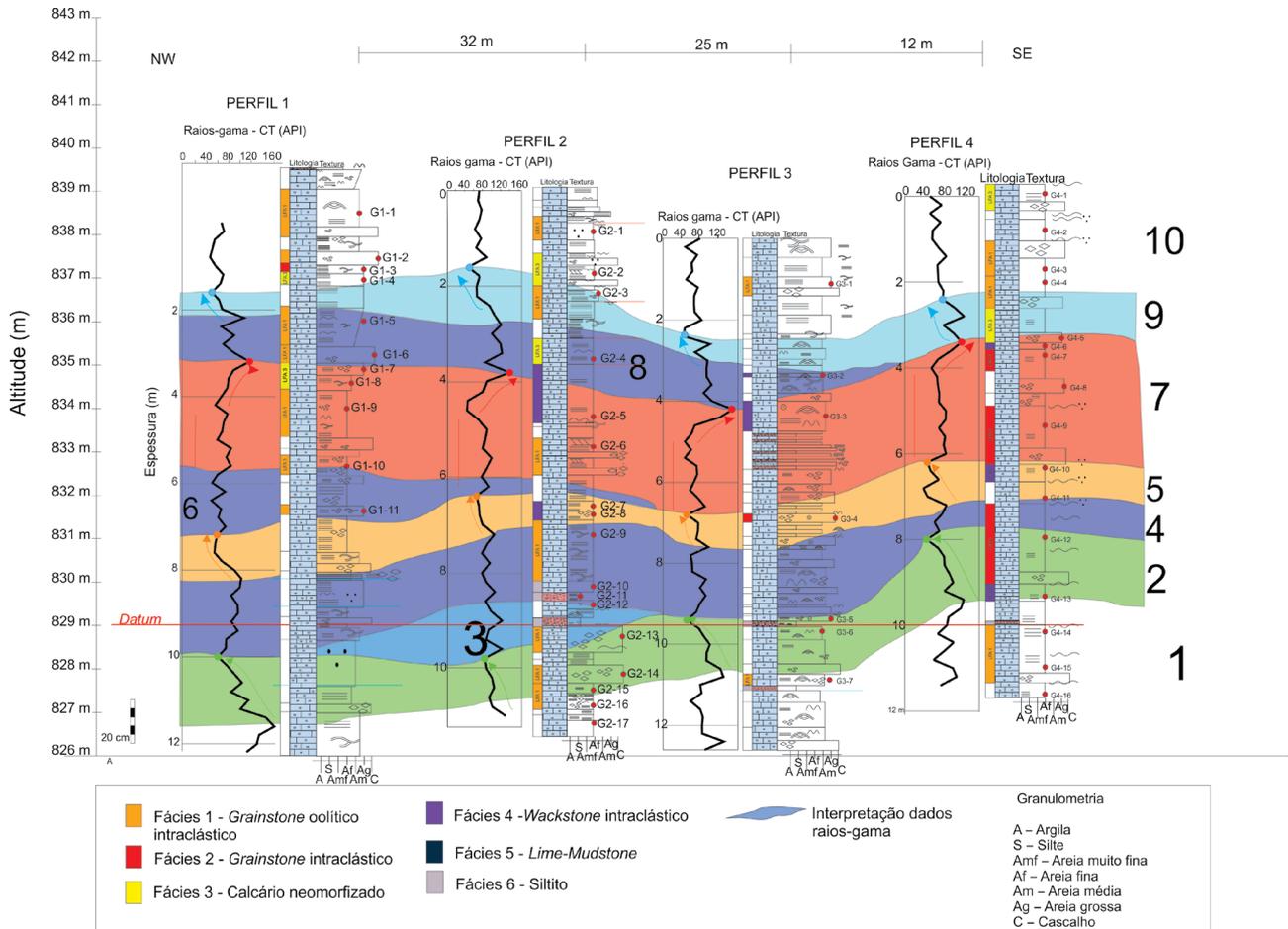


Figura 9. Perfis levantados na bancada inferior da pedreira, com indicação das principais características microscópicas definidas, e correlação lateral desses perfis pelos resultados de raios gama. Assinaturas gamaespectrométricas similares foram agrupadas em dez zonas, e as principais anomalias foram marcadas com setas coloridas (azul, verde, vermelho e laranja) nos perfis.

ocorrências terrígenas finas e à presença de minerais secundários como micas. As concentrações de eU e eTh também foram relativamente baixas, variando de 0 a 20 ppm, estando os maiores teores desses elementos geralmente relacionados à ocorrência de siltitos nos perfis levantados.

Após o levantamento e o tratamento dos dados de raios gama, traçaram-se superfícies de domínios de assinaturas similares, correlacionando os quatro perfis levantados na pedreira. Então, propuseram-se dez zonas com padrões de respostas similares, de acordo com os valores medidos em contagem total, marcadas por setas coloridas (verdes, laranjas, vermelhas e azuis), conforme Figura 9.

As setas vermelhas marcam maior radiação emitida, por aumento de aporte de material de granulometria fina (micrítico ou siliciclástico fino) e podem refletir eventos ou pulsos transgressivos. Da mesma forma, as setas azuis, verdes e laranjas indicam valores menores de radiação, que ocorrem em camadas com granulometria mais grossa (areia

carbonática), representando possíveis eventos regressivos ou progredientes.

Geologia estrutural

A pedreira GMD apresenta camadas sub-horizontais e ainda fraturas que ocorrem como planos subverticalizados nas frentes de lavra onde foram levantados os perfis verticais ou como linhas de intersecção dos planos de fratura com o chão da cava. As fraturas separaram-se em três famílias principais, classificadas com base em suas atitudes. Realizaram-se, com o *software* Stereonet (Figura 10), estereogramas e diagramas de setores para melhor entendimento, visualização das famílias e obtenção de dados estatísticos.

A família 1, que apresenta direção N-S e forte tendência de mergulho vertical, tem média dos planos N2E/90,0° (31 medidas) e média de linhas de intersecção (chão da pedreira) N5E (70 medidas). Esse conjunto de fraturas se

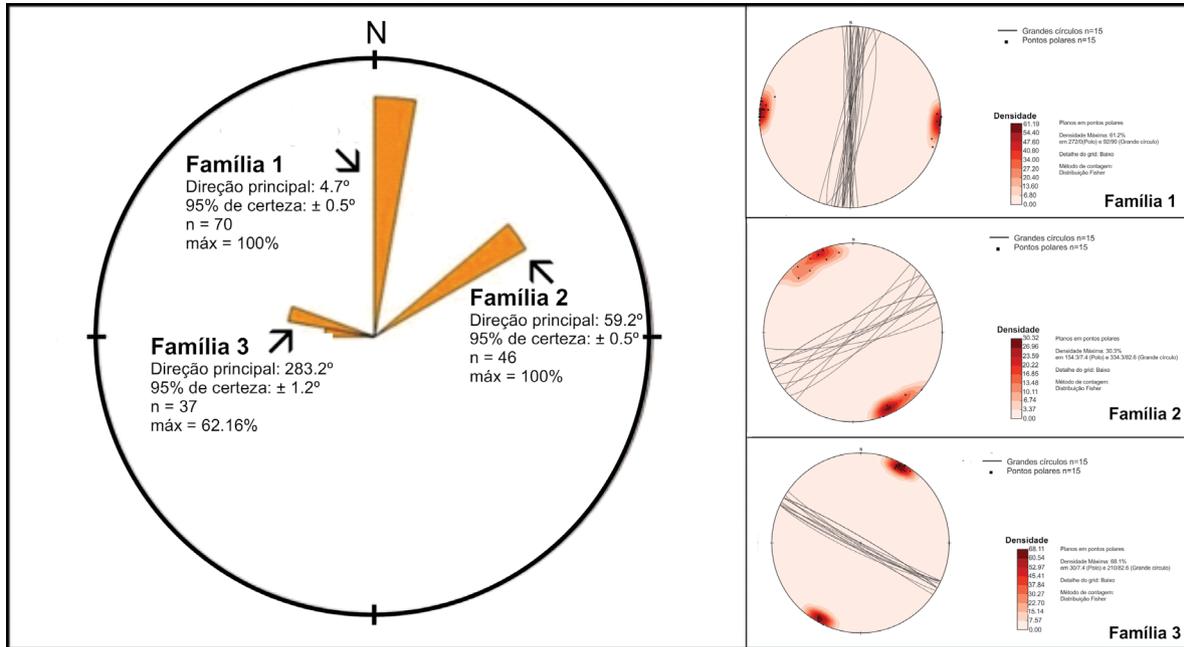


Figura 10. Diagrama de rosetas das principais fraturas observadas na pedreira GMD.

destaca por suas estruturas estarem frequentemente preenchidas por veios de calcita, com espessuras desde milimétricas a centimétricas.

A família 2, de direção NE-SW e mergulho subvertical, para NW, tem média planar de N64E/82,6° NW (13 medidas) e linear de N52E (46 medidas). As fraturas desse conjunto se encontram pouco expressivas, ocorrendo em pequenas dimensões. Veios de calcita preenchendo as fraturas dessa família são pouco frequentes.

A família 3 tem valor médio de N60W/82,6°SW (15 medidas) para seus planos e N77W (37 medidas) para as linhas de intersecção (chão da pedreira). Esse conjunto de fraturas subverticalizadas tem uma direção NW-SE, com tendências E-W, e mergulho para sul-sudoeste (Figura 11).

DISCUSSÃO

Os dados de litofácies apresentados e descritos sugerem que a sedimentação da Formação Lagoa do Jacaré na pedreira GMD envolveu diversos eventos/ciclos tempestíticos, em ambiente marinho raso, na transição *shoreface/offshore*, em rampa carbonática homoclinal rasa (Figuras 12 e 13).

Della Fávera (2001) e Plint (2010) definem tempestito como fácies depositadas sob influência de ondas de tempestade. A formação das fácies envolve, na base, materiais de fluxos de detritos grossos, seguido de horizonte com estratificação plano-paralela, seguido por horizonte com presença de estratificação cruzada *hummocky* e, no topo, por sedimentos finos depositados na base do *shoreface*. Os autores definem ainda que a estrutura *hummocky* é formada

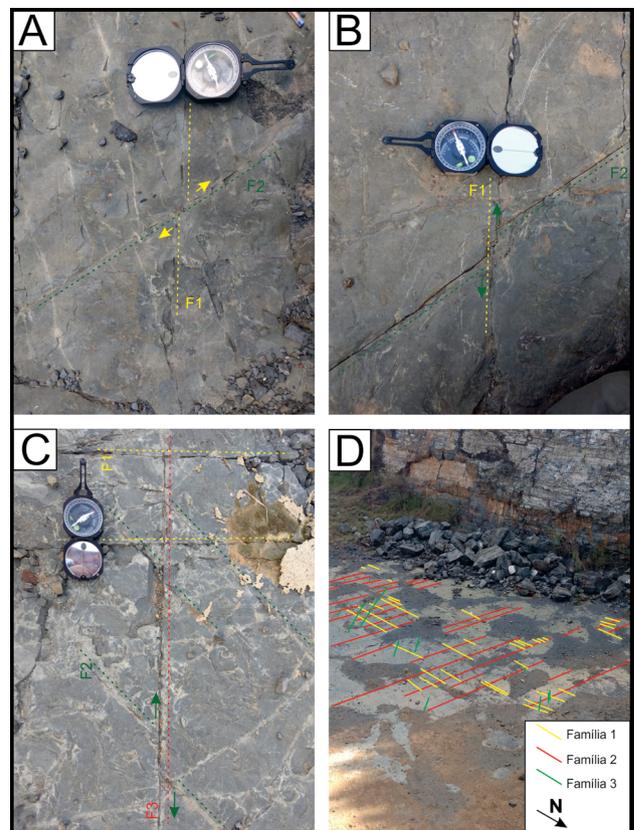
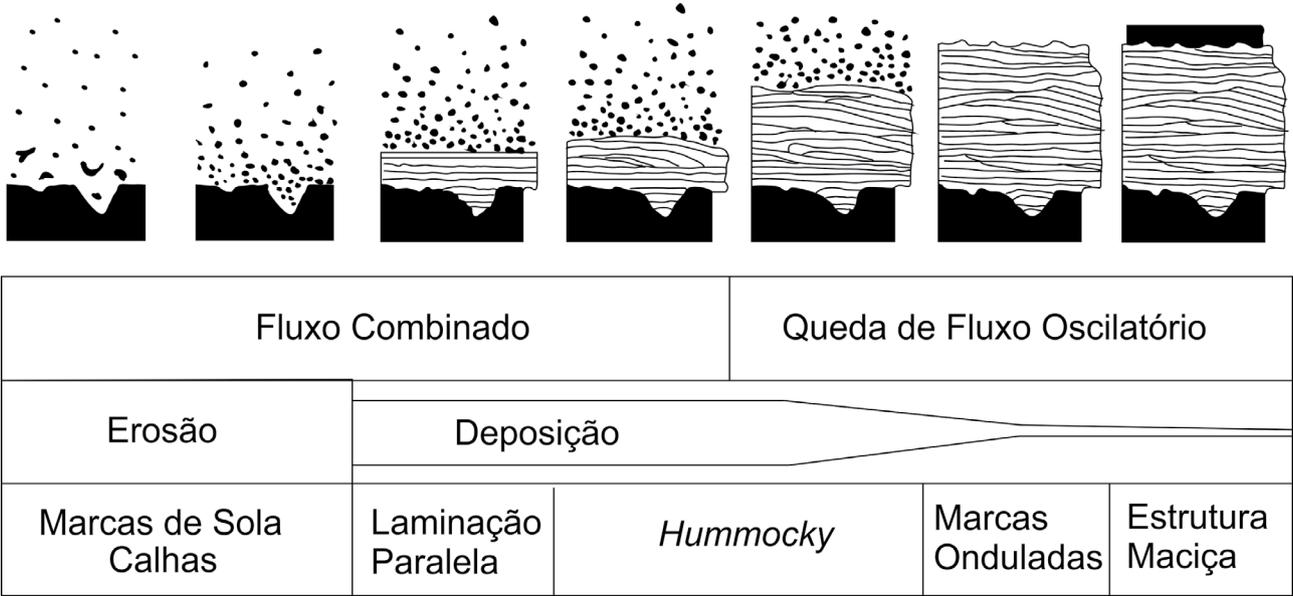
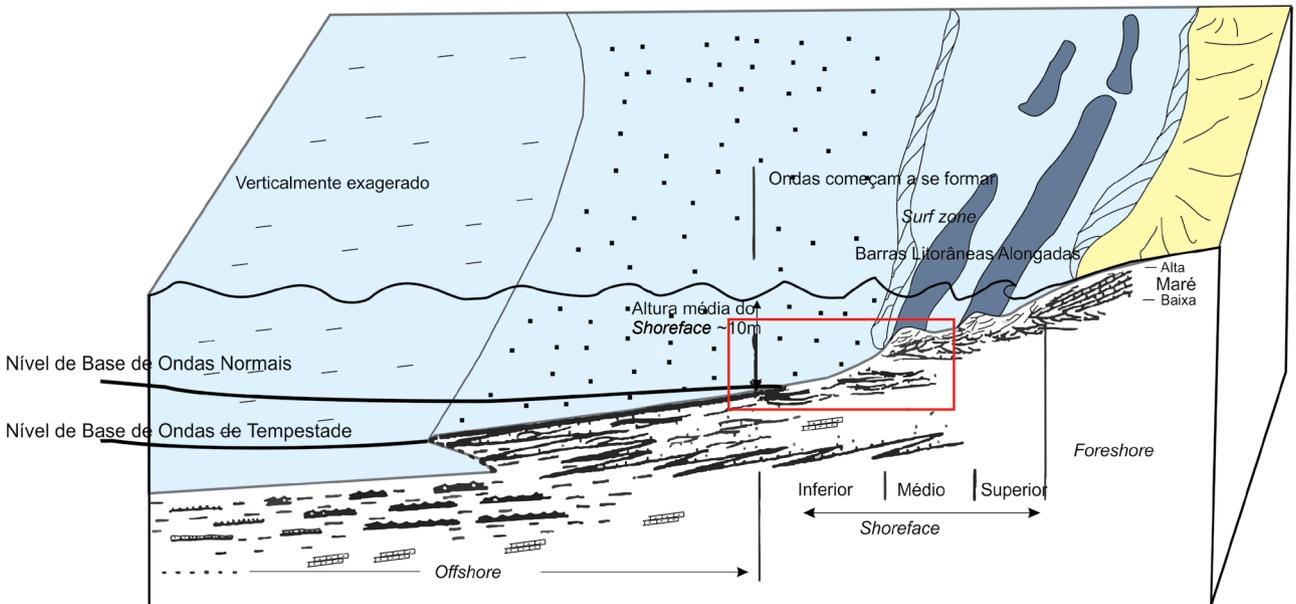


Figura 11. Relação das fraturas presentes na pedreira GMD: (A) família 1 sendo cortada por fraturas da família de 2; (B) família 2 sendo cortada por fraturas da família 1; (C) família 3 cortando as famílias 1 e 2; (D) disposição das fraturas 1, 2 e 3 no chão da pedreira GMD.



Fonte: modificado de Plint (2010).

Figura 12. Formação de uma fácies tempestítica idealizada, com as fases erosionais e deposicionais.



Fonte: modificado de Plint (2010).

Figura 13. Bloco diagrama representativo da sedimentação por ciclos de tempestade. Local provável da sedimentação da Formação Lagoa do Jacaré na transição *shoreface/offshore* em vermelho.

por movimento de fluxo combinado unidirecional e oscilatório e que os *hardgrounds* representam equivalentes do hemipelágicos dos turbiditos, porém bastante cimentados, e que seriam representativos de momentos de calmaria que separariam pulsos contíguos de tempestade com alta energia. Plint (2010) define ainda que a sequência influenciada por tempestades se inicia com estágios erosivos na base pelítica do *shoreface* e formação de marcas de sola, deposição

de cascalho e, em seguida, de suspensão de material fino. Posteriormente, com a diminuição da tempestade, ocorrem estágios deposicionais, momento de queda do fluxo oscilatório e favorecimento de deposição do material em suspensão (Figura 12).

A correlação das definições anteriores com a descrição de litofácies aflorantes na pedra sugere que o marcador de início de eventos de tempestades seria a fácies de

brecha intraclástica (Bi), em função dos intraclastos associados, que seriam representativos de momentos erosivos dada a grande energia da tempestade atuante que remobiliza o fundo do *shoreface* arrancando e depositando esses clastos. Posteriormente, à medida que se reduz a energia e a tempestade diminui, ocorre a deposição das fácies de calcarenitos finos com marcas onduladas (Cfo) com laminação plano-paralela associada e de calcarenitos com *hummocky* (Cmh), com *hummocky* associada e *ripples* no topo. A fácies de calcilitos e pelitos (Clu) seria representativa de momentos em que não ocorreria a ação de tempestades, o que favoreceria a decantação de sedimento carbonático/pelítico fino na base do *shoreface*.

A análise petrográfica microscópica revelou a existência de seis fácies, sendo cinco delas rochas carbonáticas e uma siliciclástica. Entre as fácies carbonáticas, observaram-se *grainstones* intraclásticos e oolíticos, além de calcários neomorforizados. Verificaram-se ainda *wackestones* intraclásticos e *lime-mudstones*. A fácies siliciclástica é representada por um siltito. A presença de porções siliciclásticas é indicativo de aumento de aporte terrígeno, gerado, possivelmente, pelo retrabalhamento promovido pelo evento tempestítico, que aumenta o material em suspensão e posteriormente decanta esse material nos intervalos de quiescência. Ocorrência de fácies oolítica/peloidal indica deposição em barras arenosas alongadas — *shoal* (Figura 13), típicas de rampas proximais a médias (Martins e Lemos, 2007; Plint, 2010).

A utilização de resina azul para evidenciar a porosidade primária nas lâminas revelou baixa porosidade nessas rochas, sendo ela associada a fraturas, dissolução ou arranamentos de grãos no arcabouço cristalino. A análise por MEV indicou presença de microporosidade por poros ou fraturas nas rochas, mas sem interconectividade entre elas, o que, do ponto de vista dessas rochas como reservatórios de hidrocarbonetos, não seria promissor. A análise evidenciou ainda a presença de grande quantidade de cristais calcíticos envolvendo grãos ooidais e peloidais, além de intraclastos, que pode ser indicativo de que uma única fase de cimento calcítico blocoso (Tonietto, 2010) está presente na rocha, possivelmente formado pela recristalização mesodiagenética tardia por soterramento químico.

Os dados de GPR corroboram a tese de que a sucessão de fácies seria representativa de eventos tempestíticos, uma vez que os radargramas apresentam diversas geometrias de truncamentos e estratificação *hummocky*, típicas de registros tempestíticos. A ocorrência de geometrias sigmoidais sugere deposição em plataforma carbonática inclinada, e sua análise indica que pode estar ocorrendo progradação para SE. Os dados de paleocorrentes medidos em *ripple marks* assimétricas, com direção NW-SE, sugerem possível progradação na direção SE.

As curvas de raios gama levantadas permitiram melhor entendimento das correlações faciológicas entre os perfis estudados

na pedreira, e sua interpretação levou à definição de dez zonas com assinaturas similares. Essas assinaturas definem intervalos granulométricos (predominância de frações finas ou grossas) e auxiliam na correlação lateral dos perfis. A integração desses dados com as descrições petrográficas permitiu delimitar possíveis pulsos transgressivos, de menor ordem, em um contexto geral regressivo e progradante, em que ocorre maior emissão de radiação, com presença de fácies pelíticas.

A análise de superposição das fraturas presentes na pedreira revelou que ora a família 1 aparece cortando a 2 e ora ocorre o contrário (Figuras 11A e 11B). Por esse motivo, essas famílias podem ser consideradas aproximadamente contemporâneas, tendo sido geradas por um mesmo evento ou eventos simultâneos. Já em relação à família 3, é notório seu contexto de formação tardia, pelo fato de essas estruturas se superporem às outras preexistentes (Figura 11C).

CONCLUSÕES

Neste trabalho, aplicou-se o método Camures em um afloramento da Formação Lagoa do Jacaré em Paraopeba. O afloramento representa uma antiga pedreira desativada com cerca de 120 m de extensão e 30 m de espessura da unidade. A aplicação dos diferentes métodos investigativos, e em diferentes escalas, permitiu avaliar variações faciológicas e sucessão de fácies deposicionais carbonáticas, definir texturas carbonáticas, caracterizar arquiteturas deposicionais e reconhecer, em caráter preliminar, características permporosas das rochas na pedreira GMD.

As litofácies identificadas na pedreira GMD são: brechas intraclásticas, calcarenitos maciços a gradados, com estratificação plana, estratificação por ondas (*hummockys*) e marcas onduladas. Localmente ocorrem intercalações siliciclásticas (siltitos). A deposição ocorreu sob influência de ondas normais e de tempestades, em ambiente marinho raso, alternando fases erosivas (formação de brechas) e fases deposicionais (presença de calcarenitos predominantes). As análises petrográficas microscópicas permitiram o reconhecimento de seis fácies diferenciadas por suas texturas:

- *grainstone* oolítico intraclástico;
- *grainstone* intraclástico;
- calcário neomorforizado;
- *wackestones* intraclásticos;
- *lime-mudstones*;
- siltitos.

Os resultados do MEV mostram microporosidade por fraturas não interconectadas.

As arquiteturas deposicionais sigmoidais exibidas pelas linhas de GPR levantadas indicaram deposição em rampa carbonática rasa — *shoreface* —, podendo ser proximal (presença de fácies oolíticas) ou distal (fácies siltíticas

e calcilitíficas). As principais geometrias deposicionais observadas foram sigmoidais, lenticulares, plano-paralelas e truncadas. Os dados de raios gama permitiram melhor correlacionar os perfis levantados e apresentaram alternância entre anomalias positivas, em que ocorre predomínio de sedimentos mais finos, indicando evento transgressivo de menor ordem, e anomalias negativas, em que predominam sedimentos areno-carbonáticos, mais grossos, indicando evento predominante regressivo e progradante.

A compilação dos dados levantados e interpretados mostrou que os carbonatos da Formação Lagoa do Jacaré apresentam baixa porosidade primária, mas têm potencial como reservatório do tipo fraturado. Reconheceram-se três importantes famílias de fraturas no afloramento, além de microfraturas nas análises por MEV.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa (Fundep) e à Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras) pelos apoios financeiro e logístico que permitiram a execução da pesquisa aqui apresentada. Agradecem ainda ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFMG e ao Centro de Pesquisa Manoel Teixeira da Costa (CPMTC) pela disponibilização dos laboratórios de microscopia e laminação. Por fim, os autores agradecem aos dois revisores do trabalho, que contribuíram significativamente para o aprimoramento deste artigo.

REFERÊNCIAS

- Alkmim, F. F., Brito-Neves, B. B., Castro Alves, J. A. (1993). Arcabouço tectônico do Craton do São Francisco; uma revisão. In: J. M. L. Domingues, A. Misi (Eds.), *O Craton do São Francisco* (p. 45-62). Salvador: SBG/SGM/CNPq.
- Alkmim, F. F., Martins-Neto, M. A. (2001). A Bacia Intracratônica do São Francisco: Arcabouço Estrutural e Cenários Evolutivos. In: C. P. Pinto, M. A. Martins-Neto (Eds), *Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais* (p. 9-30). Belo Horizonte: SBG.
- 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., Santos, R. V., Vieira, L. C., Lima, B. A. F., Mancini, L. H. (2014). Meso-Neoproterozoic isotope stratigraphy on carbonates platforms in the Brasília Belt of Brazil. *Precambrian Research*, 251, 164-180. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2014.06.011>
- Babinski, M., Pedrosa-Soares, A. C., Trindade, R. I. F., Martins, M., Noce, C. M., Liu, D. (2012). Neoproterozoic glacial deposits from the Araçuaí orogen, Brazil: age, provenance and correlations with the São Francisco craton and West Congo belt. *Gondwana Research*, 21(2-3), 451-465. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.04.008>
- 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(6), 401-406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2007.00764.x>
- Basso, M., Kuroda, M. C., Vidal, A. C. (2017). Análise geológica e petrofísica de um bloco de travertino como análogo de reservatório de hidrocarbonetos. *Geologia USP. Série Científica*, 17(2), 211-221. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-337>
- 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>
- Costa, M. T., Branco, J. J. R. (1961). Roteiro para a excursão Belo Horizonte – Brasília. *XIV Congresso Brasileiro de Geologia*, 15-25. Belo Horizonte: SBG.
- Dardenne, M. A. (1978). Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. *XXX Congresso Brasileiro de Geologia*, 2, 597-610. Recife: SBG.
- Della Fávera, J. C. (2001). *Fundamentos de estratigrafia moderna*. 4ª ed. Rio de Janeiro: Ed. UERJ.
- Dunham, R. J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *American Association of Petroleum Geologists*, 1, 108-121. <https://doi.org/10.1306/M1357>
- Feboli, W. L. (2008). *Folha Pompeu*. Escala 1:100.000. Brasília: Ministério de Minas e Energia/CPRM.
- Ferreira, J. F. F., Candido, A. G., Rostirolla, S. P. (2010). Correlação gamaespectrométrica de afloramentos e poços: estudo de caso na Formação Ponta Grossa (Bacia do Paraná, Brasil). *Revista Brasileira de Geofísica*, 28(3), 371-396. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2010000300005>
- Forte, E., Pipan, M. (2011). Reservoir analogues characterization by means of GPR. *EAGE/SEG Summer Research Workshop*. Trieste: SEG. <http://doi.org/10.3997/2214-4609.201402465>

- Forte, E., Pipan, M., Casabianca, D., Di Cuia, R., Riva, A. (2012). Imaging and characterization of a carbonate hydrocarbon reservoir analogue using GPR attributes. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 76-87. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.009>
- Freitas, A. R. (2020). *Caracterização multiescalar e modelagem geológica de carbonatos neoproterozoicos da Formação Lagoa do Jacaré, Grupo Bambuí, na Pedreira GMD – Paraopeba-MG: uma contribuição à geologia de reservatório*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências - UFMG.
- Fugita, A. M., Clark-Filho, J. G. (2001). Recursos energéticos da Bacia do São Francisco: hidrocarbonetos líquidos e gasosos. In: C. P. Pinto, M. A. Martins-Neto (Eds.). *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais* (p. 265-284). Belo Horizonte: SBG.
- Garcia, A. J. V., Ribeiro, D. M., Figueiredo, S. A. S., Dantas, M. V. S., Oliveira, I., Leite, K. A. S., Garcia, G. G. (2015). 3D Modeling of Carbonate Reservoir Analogue Outcrops Using CAMURES Methodology, Sergipe/Alagoas Basin (SEAL), Northeastern Brazil. *AAPG Annual Convention and Exhibition*. Denver: AAPG.
- Grabau, A. W. (1904). On the classification of sedimentary rocks. *American Geologist*, 33, 228-247.
- Hilbert, N. N. (2016). *Heterogeneidades em multiescala da Formação Marizal (Aptiano, Bacia do Tucano, BA) como análogo de reservatórios fluviais em bacias distensionais*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências - USP. <https://doi.org/10.11606/D.44.2017.tde-27032017-113243>
- Hoffman, P. F., Kaufman, A. J., Halverson, G. P., Schrag, D. P. (1998). A Neoproterozoic snowball earth. *Science*, 281(5381), 1342-1346. <http://doi.org/10.1126/science.281.5381.1342>
- Koehrer, B., Zeller, M., Aigner, T., Poepfelreiter, M., Milroy, P., Forke, H., Al-Kindi, S. (2010). Facies and stratigraphic framework of a Khuff outcrop equivalent: Saiq and Mahil formations, Al Jabal al-Akhdar, Sultanate of Oman. *GeoArabia*, 15(2), 91-156.
- Lira, A. R. A. (2004). *Caracterização em multiescala de análogos de reservatórios da formação Maceió (aptiano da Bacia de Alagoas), nas regiões de Japaratinga e Morros de Camaragibe-AL*. Tese (Doutorado). Recife: Centro de Tecnologia e Geociências - UFPE. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6522>. Acesso em: 6 fev. 2021.
- Martinez, M. I. (2007). *Estratigrafia e tectônica do Grupo Bambuí no norte do estado de Minas Gerais*. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: Instituto de Geociências - UFMG. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-76LHRV>. Acesso em: 6 fev. 2021.
- Martins, M., Lemos, V. B. (2007). Análise estratigráfica das sequências neoproterozoicas da Bacia do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(4 Supl.), 156-167. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.200737S4156167>
- Martins-Neto, M. A. (2009). Sequence Stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 26(2), 163-176. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.10.001>
- Melani, L. H. (2015). *Caracterização petrofísica de reservatório carbonático*. Dissertação (Mestrado). Campinas: Instituto de Geociências - UNICAMP. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/265810>. Acesso em: 4 fev. 2021.
- Menezes, L. (2004). *Mapeamento digital de análogos a reservatórios petrolíferos: exemplos para depósitos fluviais da Unidade Açú-3-Bacia Potiguar*. Dissertação (Mestrado). Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra - UFRN. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18764>. Acesso em: 6 fev. 2021.
- Paim, P. S. G., Garcia, A. J. V., Faccini, U. F., Lavina, E. L. C. (2003). Geoarq, uma abordagem integrada e aplicada da Geologia Sedimentar. In: P. S. G. Paim, U. F. Faccini, R. G. Netto (Eds.), *Geometria, arquitetura e heterogeneidades de corpos sedimentares: estudo de casos* (p. 16-24). São Leopoldo: Editora Unisinos.
- Paula-Santos, G. M., Babinski, M., Kuchenbecker, M., Caetano-Filho, S., Trindade, R. I. F., 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.gr.2014.07.012>
- Pinto, C. P., Pinho, J. M. M., Sousa, H. A. (2001). Recursos minerais e energéticos da Bacia do São Francisco em Minas Gerais: uma abordagem regional. In: C. P. Pinto, M. A. Martins-Neto (Eds.), *Bacia do São Francisco: geologia e recursos naturais* (p. 139-160). Belo Horizonte: SBG.
- Pinto, C. P., Silva, M. A. (2014). *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais*. Escala 1:1.000.000. Belo Horizonte: CPRM-CODEMIG.

- Plint, A. G. (2010). Wave-and storm-dominated shoreline and shallow-marine systems. In: N. P. James, R. W. Dalrymple (Eds.), *Facies Models 4* (p. 167-200). Kingston: Geological Association of Canada.
- Reed, S. J. B. (2005). *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. 2ª ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Reis, C. S. (2013). *Geologia, sistemas deposicionais e estratigrafia isotópica do Grupo Bambuí na região de Santa Maria da Vitória, BA*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências - UnB. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/14539>. Acesso em: 4 fev. 2021.
- Reis, H. L. S. (2018). Gás Natural. In: A. C. Pedrosa-Soares, E. Voll, E. C. Cunha (Eds.), *Recursos minerais de Minas Gerais on line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, história geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais*. Belo Horizonte: CODEMGE. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/gas-natural/>. Acesso em: 4 fev. 2021.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2015.07.013>
- Rodrigues, Y. C. (2018). *Inunditos como análogos de reservatórios: um exemplo nos depósitos gondwânicos triássicos do Gráben Arroio Moirão, RS*. Dissertação (Mestrado). Porto Alegre: Instituto de Geociências - UFRGS. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/173563>. Acesso em: 6 fev. 2021.
- Tatum, D. I., Francke, J. (2012). Constructing hydrocarbon reservoir analogues of aeolian systems using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2011.09.014>
- Tonietto, S. N. (2010). *Diagênese e hidrotermalismo em rochas carbonáticas proterozoicas: Grupos Bambuí e Vazante, Bacia do São Francisco*. Dissertação (Mestrado). Brasília: Instituto de Geociências - UnB. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/9739>. Acesso em: 6 fev. 2021.
- Tuller, M. P. (2009). *Folha Sete Lagoas*. Escala 1:100.000. Brasília: Ministério de Minas e Energia/CPRM. (Projeto Sete Lagoas – Abaeté).
- Uhlein, A., Ersinzon, F., Uhlein, G. J., Alcântara, D. G. (2017a). Estratigrafia e sistemas deposicionais do Supergrupo Espinhaço e grupos Bambuí e Macaúbas: roteiro de campo na Serra do Espinhaço Meridional (MG). *Terrae Didactica*, 13(3), 244-257. <https://doi.org/10.20396/td.v13i3.8650963>
- Uhlein, G. J., Uhlein, A., Stevenson, R., Halverson, G. P., Caxito, F. A., Cox, G. M. (2017b). 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>
- Ulbrich, H. H. G. J., Ulbrich, M. N. C., Ferreira, F. J. F., Alves, L. S., Guimarães, G. B., Fruchting, A. (2009). Levantamentos Gamaespectrométricos em Granitos Diferenciados. I: Revisão da Metodologia e do Comportamento Geoquímico dos Elementos K, Th e U. *Geologia USP. Serie Científica*, 9(1), 33-53. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X2009000100003>
- 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 Geosciences*, 339(3-4), 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., 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.