

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

João Miguel Maraschin Santos

**ESTUDO DE PROVENIÊNCIA DA FORMAÇÃO PIAUÍ
(PENNSILVANIANO) NA REGIÃO DE FLORIANO (PI), SUL DA BACIA DO
PARNAÍBA**

Porto Alegre
1. Semestre
2023

João Miguel Maraschin Santos

**ESTUDO DE PROVENIÊNCIA DA FORMAÇÃO PIAUÍ
(PENNSILVANIANO) EM UMA ÁREA PRÓXIMO A FLORIANO (PI), SUL DA
BACIA DO PARNAÍBA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Geologia do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do Título de Geólogo.

Orientador(a): Prof.^a Dr.^a Juliana Charão Marques
Supervisor: Dr. Gabriel Bertolini

Porto Alegre
1. Semestre
2023

João Miguel Maraschin Santos

**ESTUDO DE PROVENIÊNCIA DA FORMAÇÃO PIAUÍ
(PENNSILVANIANO) EM UMA ÁREA PRÓXIMO A FLORIANO (PI), SUL DA
BACIA DO PARNAÍBA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Geólogo e aprovado em sua forma final pelo Curso de Geologia, obtendo conceito _____.

Porto Alegre, 17 de março de 2023.

Prof^a. Dra. Lauren da Cunha Duarte
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a, Dra. Ana Karina Scomazzon
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dra. Thisiane Santos
Universidade Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – IPR/PUC-RS

Prof^a, Msc. Camile Urban
Universidade Federal de Pelotas

CIP - Catalogação na Publicação

Maraschin Santos, João Miguel
ESTUDO DE PROVENIÊNCIA DA FORMAÇÃO PIAUÍ
(PENNSILVANIANO) NA REGIÃO DE FLORIANO (PI), SUL DA
BACIA DO PARNAÍBA / João Miguel Maraschin Santos. --
2023.

77 f.

Orientadora: Juliana Charão Marques.

Coorientadora: Gabriel Bertolini.

Trabalho de conclusão de curso (Especialização) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Geociências, Geologia, Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Estratigrafia. 2. Sedimentologia. 3.
Proveniência sedimentar. 4. Aprendizado de máquina .
5. Química mineral . I. Charão Marques, Juliana,
orient. II. Bertolini, Gabriel, coorient. III.
Título.

Este trabalho é dedicado ao herói legalista Roni Borges dos Santos.

AGRADECIMENTOS

Ao eterno “Vô Roni” que, enquanto esteve aqui, aguardava ansioso minhas voltas a Caxias para entender o que eu tanto fazia em Caçapava do Sul. À “Vó Dete”, “Vô Marasca” e “Vó Rita”, espero ter muito tempo pra ainda poder explicar isso. Muito obrigado.

Aos meus pais e à minha irmã, que sempre me apoiaram, me deram força, amor e tudo o que eu sempre precisei. Eternamente grato. Amo vocês.

E à instituição que, ano após ano, sempre uniu a nossa família, de geração para geração: o Esporte Clube Juventude.

A tudo e todos que a geologia me permitiu conhecer: em especial minha namorada Isabelle. Serei eternamente grato por tua companhia, parceria, sorrisos, abraços e crescimento compartilhado. Tu me ilumina, me alegra e me faz amar. Eu amo te amar. Aos meus orientadores. Professora Dra. Juliana que me abriu as portas e que sempre foi grande fonte de inspiração. Dr. Gabriel, que além de um grande pesquisador, se tornou um grande amigo.

Àquele que me apresentou a geologia: “Tio Ande”. Uma grande referência pessoal e profissional.

Às amizades feitas: GBBKs e Faixa 6, grato pelo convívio diário; aos amigos do Geoquantificação, em Campinas; aos amigos da UFPA, grandes parceiros de campo; todos as demais amizades que a companhia valeu e vale muito mais que uma breve citação.

Aos grandes irmãos que a vida me reservou: Pérola, Pelágio, GSE, GCE, GE, ADAE. Agradeço ao Instituto de Geociências, Laboratório de Geologia Isotópica e Laboratório de Modelagem de Recursos Naturais da UFRGS e à UFPA, em nome do Prof. Dr. Afonso Nogueira, que facilitou o trabalho de campo. Ao Projeto BIOCRONORTE (UFRGS/PETROBRAS/ANP) por ceder amostras e informações, Às agências de fomento e financiamento da ciência brasileira, em especial à FINEP-ANP e seu Programa de Recursos Humanos do curso de Geologia da UFRGS (PRH 14).

E por fim, aos meus demônios: eu venci vocês!

“Stratigraphy is just a set of frozen accidents”

Andrew D. Miall

RESUMO

A Bacia do Parnaíba é uma grande bacia intracratônica (60000 km²) localizada no Norte e Nordeste do Brasil e que registra sedimentação durante as Eras Paleozóica e Mesozóica. A Formação Piauí (Pennsylvaniano), foco do estudo, apresenta predominantemente depósitos fluvio-eólicos de dunas crescentes com interduna úmido e rios perenes e fluviais que cortam essas dunas e subordinadamente depósitos de plataforma carbonática em porções acometidas pelo avanço do Mar de Itaituba-Piauí sobre a Bacia no Pennsylvaniano. Com objetivo de aprimorar a interpretação das condições paleogeográficas no período de deposição da Formação Piauí, foram realizados estudos de proveniência sedimentar a partir da análise de minerais pesados em uma área selecionada da porção sul da Bacia, nas proximidades do município de Floriano (PI). Esse trabalho buscou quantificar, avaliar e comparar a assembleia de minerais pesados de estratos eólicos e fluviais para compreender os efeitos do retrabalhamento e seleção hidrodinâmica na formação de arenitos e conglomerados. Para compreender a configuração geológica local, foram feitos levantamentos de seções colunares e coleta de amostras de afloramentos da Formação Piauí na área de estudo. Posteriormente, com o processamento das amostras, foram geradas lâminas delgadas para a petrografia quantitativa e concentrados de minerais pesados para avaliação das porcentagens granulométricas e de espécies minerais, bem como análise varietal de granadas por meio de MEV/EDS. A utilização de aprendizado de máquina e programação funcional aplicada à geologia auxiliou no tratamento de dados e se mostrou uma ferramenta útil na análise de grandes volumes de dados composicionais. A realização de estudos composicionais de granadas foi inovadora na região e mostrou-se capaz de contribuir para a compreensão da relação entre processos de retrabalhamento e seleção hidráulica de grãos e fontes de sedimentação. O retrabalhamento e a seleção hidrodinâmica atuaram efetivamente na formação da composição da assembleia de minerais pesados, alterando a granulometria e concentração de fases minerais de *up-* para *downstream*.

Palavras-Chave: Carbonífero, proveniência sedimentar, granada, *big data*, *machine learning*

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1: Mapa de localização das bacias intracratônicas paleozóicas brasileiras (A). Localização da Bacia do Parnaíba (B) e localização da área de estudo (C). CPRM, modificado pelo autor.	18
Fig. 2: Carta cronoestratigráfica de VAZ et al., (2007) proposta e publicada no Boletim de Geociências da Petrobás.	21
Fig. 3: propostas de KIFUMBI et al., (2022) a esquerda e de MEDEIROS (2020) a direita.	26
Fig. 4: (A) Escala do tempo geológico da <i>International Commission on Stratigraphy</i> (ICS), com ênfase no Pennsylvaniano; e paleomapas do (B) Pennsylvaniano, (C) Mississipiano (KOC SIS et al. 2020).	28
Fig. 5: divisão dos segmentos e processos que atuam durante o SRS (traduzido de CARACCILO (2020), adaptado de ALLEN E HELLER (2012)).	29
Fig.: 6: catálogo traduzido e modificado de (ANDÒ et al., 2012) destacando os efeitos da corrosão sobre alguns dos principais minerais pesados.....	33
Fig. 7: diagramas composicionais de granadas (esquerda) e turmalinas (direita).....	34
Fig. 8: relação de tamanho de grão com formas de leito em (A) comparação ao comprimento de onda das formas (WILSON, 1972) e (B) em relação à velocidade de transporte dos sedimentos (DALRYMPLE et al., 2010).	36
Fig. 9: classificação morfológica das dunas com direção preferencial dos ventos indicado pelas setas (MICHEL, 2021; MOUNTNEY, 2006).	37
Fig. 10: relação entre tamanho e quantidade de sedimentos com a morfologia dos rios. Adaptado de (ORTON & READING, 1993).....	38
Fig. 11: (A) região norte da Namíbia, próximo à localidade de Sesfontein; (B) região de encontro do rio com o campo de dunas, represando a água e impedindo seu deságue no Oceano Atlântico e (C) calha seca do rio. Fonte: Google Earth.	40
Fig. 12: Modelo de alocação de corpos fluviais e lacustres nos espaços interdunas. Adaptado e traduzido de (STANISTREET et al., 2002).	41
Fig. 13: Fluxograma de trabalho pautado na compilação das principais técnicas para estudo e interpretação da proveniência sedimentar.....	41
Fig. 14: classificação de arenitos de GARZANTI, (2019). Os vértices representam quartzo (Q), feldspato (F) e líticos (L).....	44
Fig. 15: Diagrama de Venn destacando como a petrografia, a estratigrafia e a química mineral se interligam e se completam no estudo de proveniência sedimentar.	48
Fig. 16: metodologia proposta partindo da (A) aquisição dos dados por MEV/EDS, (B) análise de componentes principais (PCA), (C) simulação da <i>clusterização</i> pelo algoritmo <i>k-means</i> e (D) validação dos resultados pelo <i>elbow method</i>	49
Fig. 17: Mapa de localização dos pontos onde foram coletadas amostras para o trabalho.	50
Fig. 18: (a) Vista do corte sudeste do afloramento. É possível se observar o contato erosivo entre os dois pacotes marcado pelo tracejado branco. (b) Foto em destaque mostrando os dois pacotes.....	52
Fig. 19: (A) foto com vista geral do afloramento e (B) desenho sobreposto contendo as principais estruturas visualizadas e identificadas.....	53

Fig. 20: (A) visão geral do afloramento com destaque da área da foto (B), destacando o conglomerado com intraclasto lamoso na base, lobo de estratificação cruzada sigmoidal e camadas conglomeráticas na porção superior. A foto (C) mostra uma fina camada de clastos orientados paralelos ao plano horizontal.	54
Fig. 21: perfis colunares levantados em campo.	55
Fig. 22: classificação petrográfica das amostras segundo GARZANTI et al., (2019). Os vértices representam feldspato (F), quartzo (Q), líticos totais (L); a subdivisão lateral representa litoclastos metamórficos (Lm) e litoclastos vulcânicos (Lv).	56
Fig. 23: fotomicrografia das lâminas delgadas. A destaca a seleção e arredondamento da amostra PR-01 (eólica); B destaca a má seleção da amostra PR-05; C destaca os sobrecrescimentos de quartzo sintaxial na amostra PR-09; D mostra a laminação marcada pela variação de granulometria da esquerda para a direita da lâmina; E destaca a morfologia e tamanho do zircão na amostra; F destaca a infiltração de argilas. A barra azul indica o comprimento de 100 μm	58
Fig. 24: (E) distribuição entre as frações fina (<100 μm), média (180-100 μm) e grossa (>180 μm) dentro de cada amostra; e (D) distribuição dos minerais pesados para cada fração da amostra.	60
Fig. 25: distribuição dos grupos de minerais pesados presentes por fração de cada amostra.	61
Fig. 26: diagramas ternários de composição de granadas (n=90) em relação aos seus membros extremos ricos em MgO, FeO _{total} + MnO e CaO.	62
Fig. 27: modelo evolutivo da Bacia do Parnaíba durante o Pennsylvaniano. O avanço do Mar Itaituba-Piauí chega a José de Freitas, mas não alcança a cidade de Floriano. Adaptado de (PADILHA et al., 2022), retirado de (MEDEIROS, 2020).	65
Fig. 28: representação da distribuição das amostragens nos perfis e a proporção das frações granulométricas e concentração dos minerais pesados	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: tabela de fácies descritas no trabalho de campo	51
---	----

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS E METAS	15
1.2	JUSTIFICATIVA.....	16
2	ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO	17
2.1	BACIA DO PARNAÍBA	17
2.2	FORMAÇÃO PIAUÍ.....	22
2.3	CONDIÇÕES GEOLÓGICAS E PALEOAMBIENTAIS	27
3	REFERENCIAL TEÓRICO	28
3.1	SISTEMA DE ROTA DE SEDIMENTAÇÃO (SRS).....	28
3.2	ESTUDO DE PROVENIÊNCIA DE MINERAIS PESADOS	30
3.3	ESTRATIGRAFIA DE DEPÓSITOS FLUVIAIS E EÓLICOS	34
3.3.1	SISTEMA EÓLICO	35
3.3.2	SISTEMA FLUVIAL	37
3.3.3	INTERAÇÕES FLUVIO-EÓLICAS	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	42
4.2	TRABALHO DE CAMPO	42
4.3	ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO PRIMÁRIA.....	43
4.4	ESTUDO DE MINERAIS PESADOS	44
4.4.1	PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS	45
4.4.2	MIROSÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	46
4.4.3	ANÁLISE TRATAMENTO E INTEGRAÇÃO DE DADOS	47
5	RESULTADOS	49
5.1	GEOLOGIA DA ÁREA	49
5.2	PETROGRAFIA	56
5.3	PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR E MINERAIS PESADOS	59

5.3.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS MINERAIS PESADOS.....	59
5.3.2	DADOS COMPOSICIONAIS.....	60
5.3.3	ANÁLISE VARIETAL DE MINERAIS PESADOS	62
6	DISCUSSÕES.....	63
7	CONCLUSÃO.....	66
	REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

Diferentes processos são responsáveis pela composição detrítica de rochas sedimentares, como: (a) a variação de proveniência oriunda de rochas fontes distintas; (b) processos de seleção hidráulica dependentes da densidade e velocidade de fluxo; (c) processos diagenéticos pós-deposicionais, capazes de dissolver grãos e precipitar novas composições (WELTJE 2004; BASU, 2017; BERTOLINI et al., 2023). Comumente esses processos se sobrepõem e modificam substancialmente a assembleia mineral, dificultando a compreensão do controle deposicional em função de determinada assinatura química e/ou mineralógica. Portanto, cada vez mais, técnicas de petrologia sedimentar se atentam em compreender a influência destes processos a fim de quantificar e a avaliar a contribuição de cada etapa.

Em específico, sucessões fluvio-eólicas registram relações complexas de retrabalhamento mútuo, alterações de áreas fontes de geração de sedimentos e variações cíclicas e episódicas na intensidade dos processos de erosão, transporte e deposição. Estas nuances são evidenciadas nos arenitos da Formação Piauí (Pennsylvaniano), que aflora com maior abundância na porção sudeste da Bacia do Parnaíba, entre os estados do Piauí e Maranhão. São observados pacotes fluviais efêmeros e perenes que gradam para dunas e lençóis eólicos a partir da aridização e carência de aporte sedimentar na bacia ao final do Carbonífero.

A partir dessa compreensão, o trabalho se propõe a avaliar e quantificar a composição de granadas, a assembleia de minerais pesados e sua distribuição granulométrica associada aos diferentes processos sedimentares dos arenitos da Formação Piauí na região de Floriano (PI). Por fim, dados composicionais de granadas buscam avaliar a relação entre novas áreas fontes de proveniência e a seleção hidrodinâmica nos controles de tamanho de grão.

1.1 OBJETIVOS E METAS

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a relação entre áreas fontes de proveniência e a seleção hidrodinâmica nos controles de tamanho de grão através do estudo da assembleia de minerais pesados visando aprimorar a interpretação das

condições paleogeográficas no período de deposição da Formação Piauí. A pesquisa proposta buscou, por meio do estudo de amostras da Formação Piauí na região do município de Floriano (PI) alcançar as seguintes metas:

- (1) Realizar levantamento estratigráfico em campo;
- (2) caracterizar e quantificar os componentes principais e granulometria das rochas sedimentares estudadas por meio de técnicas de petrologia sedimentar;
- (3) caracterizar e quantificar os minerais pesados, com detalhamento na composição de granadas;
- (4) comparar os dados obtidos com dados da literatura de outras porções da Formação Piauí e de formações correlacionadas, buscando estabelecer relações entre elas;
- (5) integrar os dados de proveniência com levantamento estratigráfico, sedimentar e contexto paleoambiental.

1.2 JUSTIFICATIVA

O período que envolve o Carbonífero nas bacias sedimentares intracratônicas do Norte e Nordeste brasileiro está diretamente associado à formação de sistemas petrolíferos. A inundação de Gondwana e a ocorrência de mares epicontinentais favoreceram a ocorrência de rochas geradoras (e.g. folhelhos da Formação Longá, Bacia do Parnaíba). Estas sequências foram sucedidas por sedimentação de ambientes fluvio-eólicos que se traduzem como potenciais rochas reservatório.

Mesmo não constando como um reservatório explorável, a Formação Piauí apresenta um potencial interessante para tal finalidade. Sistemas petrolíferos fluvio-eólicos, como a Formação Sergi, Jurássico da Bacia do Recôncavo (SCHERER e DE ROS, 2009), podem ser considerados análogos ao ambiente descrito na Formação Piauí. A reativação de estruturas derivadas de orógenos Transamazônicos e Brasileiros, em virtude da Orogenia Herciniana/Alleghaniana, atuam condicionando e compartimentando unidades, sendo determinante na distribuição da sedimentação e formação de condições para acúmulo e migração de hidrocarbonetos. A melhor compreensão paleogeográfica da Formação Piauí, por meio da análise de

proveniência sedimentar por meio de minerais pesados, permitirá aprimorar o entendimento da sua potencialidade como reservatório.

2 ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO

De um modo geral, a Plataforma Sul-americana representa uma junção de diversos terrenos Arqueanos e Proterozóicos, cuja colisão remete à formação do supercontinente Gondwana. Resumidamente, pode-se dividir sua evolução em três eventos principais: (a) o Ciclo Transamazônico (2,2-1,8 Ga); (b) Ciclo Mesoproterozóico (1,3-0,95 Ga); e (c) Ciclo Brasileiro/Pan-africano (0,9-0,5 Ga) (ALMEIDA et al., 2000). Os eventos colisionais culminaram na consolidação de crátons e faixas móveis por todo continente que posteriormente viriam a ser superpostos por uma intensa sedimentação Paleozóica. Envoltos nesse contexto acidentado, encontra-se a Bacia Parnaíba, especialmente localizada entre a Província Tocantins, a oeste, e a Província Borborema, a leste.

2.1 BACIA DO PARNAÍBA

Localizada majoritariamente no nordeste do Brasil, conforme mapa de localização da figura 1, a Bacia do Parnaíba compreende uma área pertencente aos estados do Pará, Maranhão, Piauí, Ceará, Tocantins e Bahia somando aproximadamente 600 000 km² (HOLLANDA et al., 2018; VAZ et al., 2007; Lima Filho, 1991). Sua formação está associada a um contexto geotectônico de caráter intracratônico desenvolvida na porção ocidental de Gondwana com idades que vão desde o Telychiano (GRAHN et al., 2005) até o Albiano (CORRÊA-MARTINS et al., 2019). Sua divisão permite identificar 5 supersequências (VAZ et al., 2007):

1) *Grupo Serra Grande* (Supersequência Siluriana), contendo as formações Ipu, Tianguá e Jaicós;

2) *Grupo Canindé* (Supersequência Mesodevoniana-Eocarbonífera), contendo as formações Itaim, Pimenteira, Cabeças, Longá e Poti;

3) *Grupo Balsas* (Supersequência Neocarbonífera-Eotriássica) contendo as formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba;

4) Sequência Jurássica, representado pela Formação Pastos Bons; e

5) Sequência Cretácea, contendo as formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru.

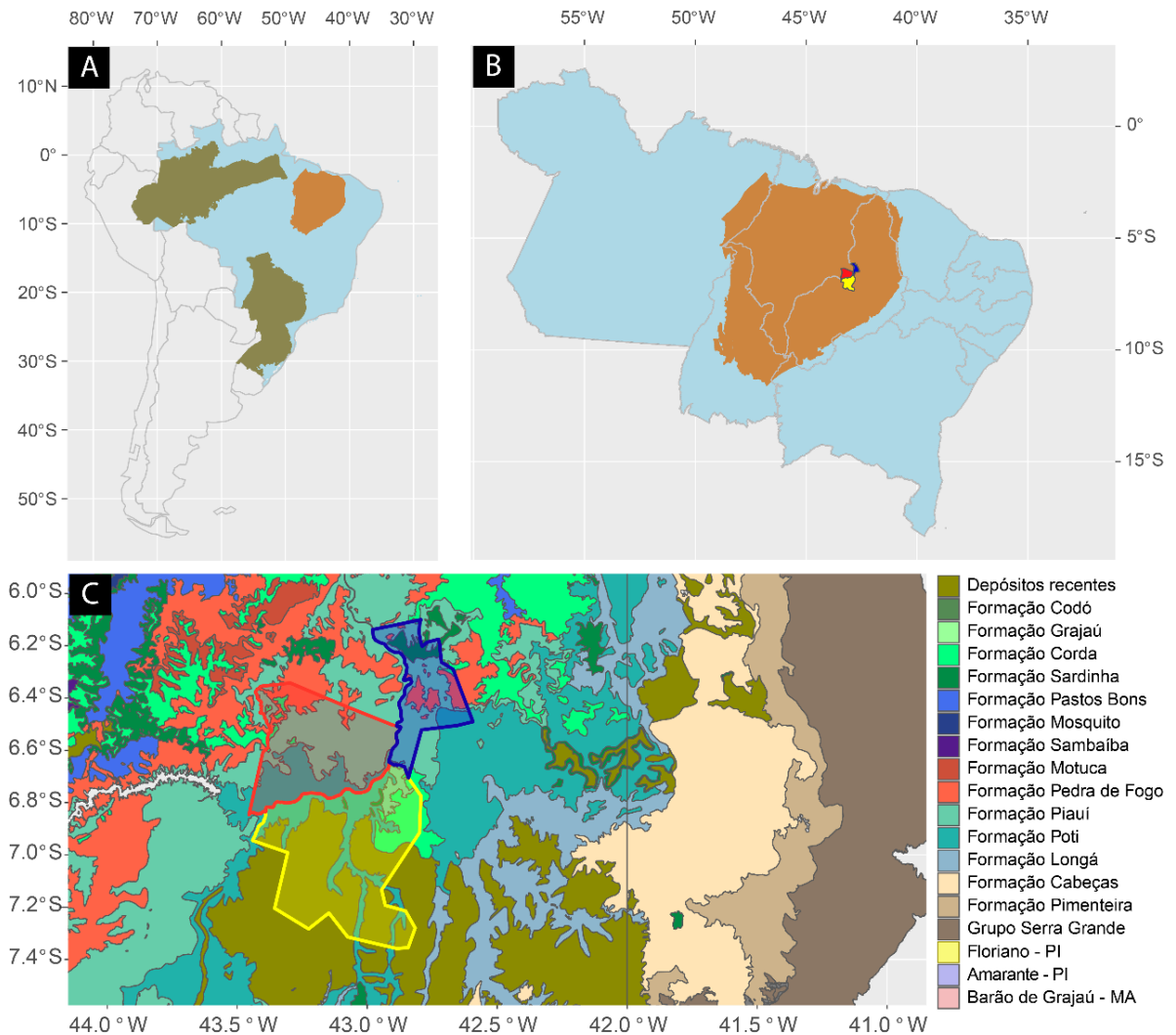


Fig. 1: Mapa de localização das bacias intracratônicas paleozóicas brasileiras (A). Localização da Bacia do Parnaíba (B) e localização da área de estudo (C). CPRM, modificado pelo autor.

O *Grupo Serra Grande*, datado do Llandoveryano (Siluriano Inferior) ao Pragianos (Devoniano Inferior) (GRAHN *et al.*, 2005), corresponde a arenitos, conglomerados e folhelhos com forte influência glacial, evoluindo de *outwash* glacial a tilitos na Formação Ipu (GRAHN *et al.*, 1992), passando por ambientes marinhos

rasos na Formação Tianguá (HÉRISSÉ et al., 2001), culminando em depósitos fluviais-aluviais entrelaçados na Formação Jaicós (MILANI et al., 1999).

O *Grupo Canindé*, datado do Eifeliano, Devoniano Médio ao Viseiano, Mississippiano (GRAHN et al., 2008; DI PASQUO et al., 2015) associa arenitos de plataforma continental na Formação Itaim (MILANI et al., 1999) a lamitos e arenitos com estratificação *hummocky* de transição offshore para fácies marinho raso na Formação Pimenteiras (PONCIANO et al., 2012), evoluindo para um sistema fluvio-deltáico na Formação Cabeças (CORRAL et al., 2009), plataformar na Formação Longá (LOBOZIAK, 1992) e *shoreface* superior a lagunar na Formação Poti (LOBOZIAK, 1992).

O *Grupo Balsas* datado do Baschkiriana (DIAS et al., 2022) ao Triássico Superior, (SOUZA et al., 2010), mescla arenitos eólicos com fácies fluviais e lacustres na Formação Piauí (VIEIRA E SCHERER, 2017), sistemas lacustres e fluviais efêmeros na Formação Pedra de Fogo (ARAÚJO et al., 2016) e Motuca (ABRANTES et al., 2016) findando em um deserto interno na Formação Sambaíba (ABRANTES et al., 2013).

A organização estratigráfica das seqüências mesozóicas apresenta divergência entre propostas por conta da possível coexistência das formações Corda, Grajaú e Codó durante o Cretáceo descrita por VAZ et al., (2007), diferentemente de FEIJÓ E GÓES (1994) que alocam a Formação Corda ainda no Jurássico. Por não abordar diretamente o Mesozóico da bacia, o trabalho utilizou a carta de VAZ et al., (2007) considerando ser o mais atual e acurado trabalho cronoestratigráfico local (figura 2).

Quatro padrões de desconformidades podem ser observados na Bacia do Parnaíba: o primeiro marca a sobreposição da Formação Pimenteiras imediatamente acima do embasamento Pré-Cambriano, ultrapassando o Grupo Serra Grande; o segundo marca desconformidades locais pertencentes ao Grupo Canindé; o terceiro, também no Grupo Canindé, afeta as formações Poti e Longá, depositando a Formação Piauí diretamente sobre as formações Cabeças e Pimenteiras; e por fim o quarto padrão afeta as formações superficiais do Grupo Balsas, sobrepondo a

Formação Sambaíba à Formação Motuca, não afetando as formações Pedra de Fogo e Piauí (MENZIES et al., 2018).

Estudos estruturais indicam que a Bacia do Parnaíba apresenta um forte controle NE-SW decorrente de uma herança advinda do Lineamento Transbrasiliano marcada no embasamento cristalino em função da Orogênese Brasileira de idade Ediacarano-Cambriano (de Lima, 2017), delimitando a estruturação dos *grabens* no substrato da bacia (CACAMA et al., 2015). Além das estruturas NE-SW anteriormente citadas, na porção SE da bacia também é observado um segundo *trend* de orientação WNW-ESE decorrente da influência da Zona de Cisalhamento Pernambuco (DE LIMA, 2017). Conseqüentemente, DE LIMA (2017) repartiu e propôs três eventos deformacionais atuantes sobre a bacia: o primeiro referente a um estágio tardi-Brasiliano associado à geração de zonas de cisalhamento destrais de direção NE-SW nas rochas do embasamento; o segundo interpretado como uma reativação das estruturas do embasamento, ocasionando estruturas transcorrentes destrais com orientação semelhante ao primeiro evento; e um terceiro que acomete tanto o embasamento, quando às sequências sedimentares sobrepostas ocasionando um enxame de diques (Suíte Sardinha, VAZ et al., 2007) Eocretáceos relacionados ao rifteamento que ocasionou a abertura do Atlântico Sul.

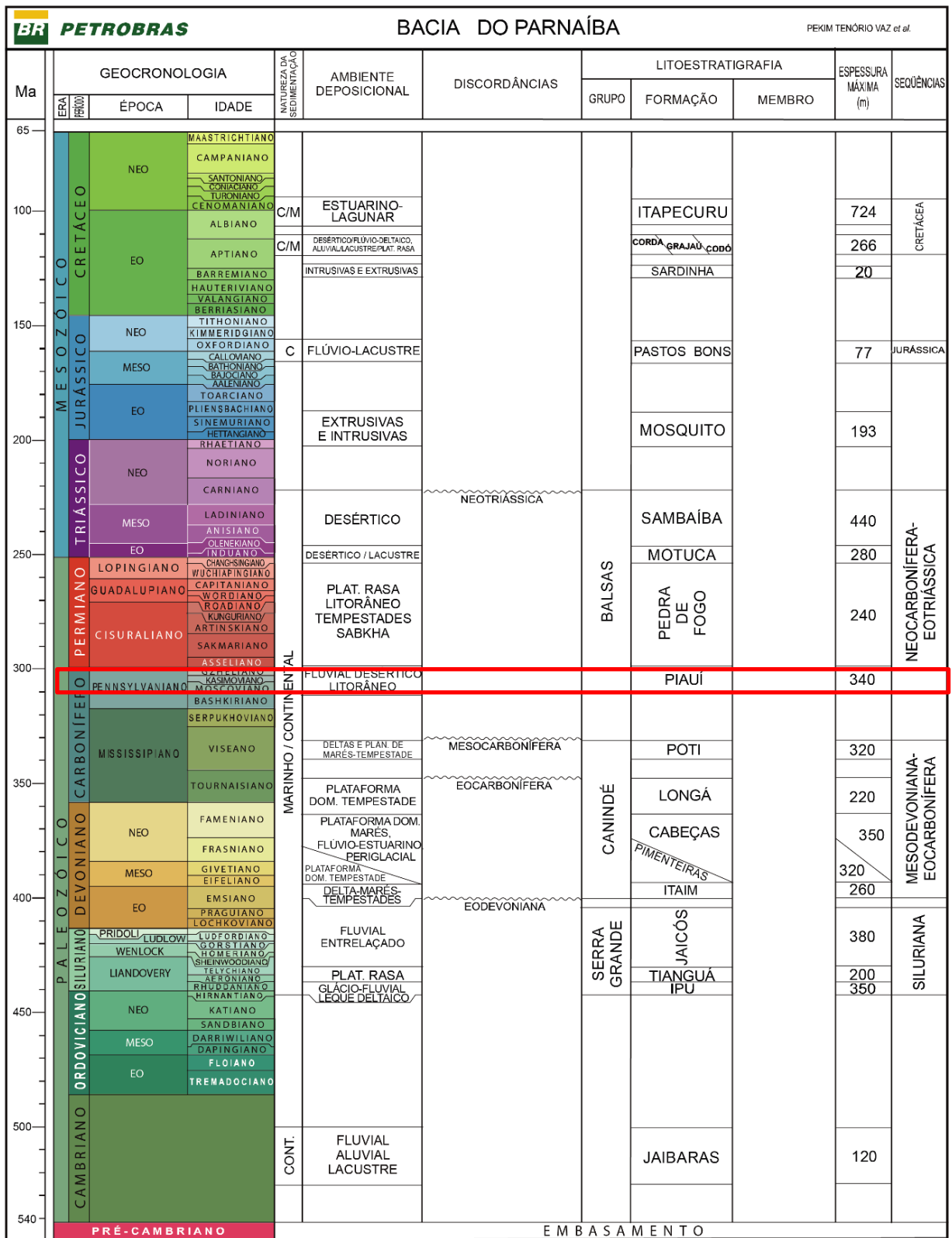


Fig. 2: Carta cronoestratigráfica de VAZ et al., (2007) proposta e publicada no Boletim de Geociências da Petrobás.

2.2 FORMAÇÃO PIAUÍ

A Formação Piauí (SMALL, 1914) consiste em uma unidade de idade Pennsylvaniana delimitada acima pela Formação Pedra de Fogo e abaixo pela Formação Poti. Seu limite inferior é marcado por uma discordância erosiva associada à Orogênese Herciniana/Allegheniana presente em escala global (CAPUTO et al., 1984). Por outro lado, seu limite superior assinala uma transição gradacional relacionada a um pulso transgressivo ocasionando a sobreposição por depósitos marinhos e costeiros em clima árido e semiárido (BARBOSA et al., 2016; MICHEL, 2021). As incursões marinhas e formação de mares epicontinentais podem ser explicados em decorrência das flutuações glacioeustáticas desenvolvidas em centros glaciais dispersos associados a geleiras de altitude (ISBELL et al., 2012), mesmo sob um longo evento glacial durante o Pennsylvaniano, e pelo rebaixamento da borda oeste de Gondwana (ALMEIDA et al., 2020).

É composta predominantemente por arenitos e conglomerados, com folhelhos e eventuais carbonatos. Com relação à porção basal da Formação Piauí, existem atualmente duas propostas distintas: uma que considera a presença de contribuição oceânica (VIEIRA E SCHERER, 2017); e outra que entende que o mar apenas inunda a bacia nas sequências de topo, considerando que a porção basal incluída na Formação Piauí por VIEIRA E SCHERER (2017) seria pertencente, na verdade, à Formação Poti (MEDEIROS, 2020). Esta revisão descreve a estratigrafia e descrição de fácies de todas as propostas.

(VIEIRA E SCHERER, 2017), nas proximidades de Amarante (PI), norte da área de estudo descrevem seis associações de fácies conforme nomenclatura proposta por MIALL (1977):

a) *Dunas eólicas e interdunas*: corpos tabulares com boa continuidade lateral e espessura de 1m a 16,5m de areia fina a média e bem selecionados apresentando estratificação cruzada (St(e)) e cruzada planar (Sp(e)) com padrão unidirecional com azimute de 102,4°. Também ocorrem lentes centimétricas e com pequena extensão lateral de laminações paralelas horizontais a sub-horizontais, laminação ondulada e *ripples* (Sh(e), Sa(e) e Sr, respectivamente), indicando um ambiente interduna úmido em função do elevado nível do lençol freático.

b) *Lençóis eólicos*: arenitos finos a médios bem selecionados com sets de espessura entre 1,35m a 4,2m exibindo *ripples* de baixo ângulo (Sl(e)) ou horizontais (Sh(e)) e estruturas de adesão como laminações onduladas (Sa(e)), eventualmente apresentando estratificações cruzadas (St(e)). São representantes de depósitos residuais de dunas ou marcam a migração de *ripples* eólicas.

c) *Canais fluviais*: arenitos médios mal selecionados contendo cascalho e frações lamosas dispostas em corpos de 1m a mais de 6m. Apresentam estratificações cruzadas (St), planar (Sp) e *ripples* unidirecionais (Sr), ocasionalmente com arenitos conglomeráticos (Gt). São interpretados como dunas ou *ripples* 2D e 3D subaquosas com feições conglomeráticas representando fluxo de alta energia ou *lag deposits*.

d) *Canais fluviais com influência de maré*: arenitos médios mal selecionados de sets de 10cm a 1,7m de espessura com estratificação cruzada (St) e cruzada sigmoidal (Ss) intercalados com lamas (F) importantes para a interpretação do sentido imposto pela maré, contrário aos canais fluviais, determinante para a compreensão da associação como canais fluviais com influência de maré.

e) *Shoreface*: arenitos muito finos a finos bem selecionados eventualmente contendo clastos lamosos, podendo atingir de 10cm a 50cm de espessura por sets. Apresenta estratificação cruzada (St), sigmoidal (Ss), baixo ângulo (Sl), *swaley* (Sscs) e *wave ripples* (Swr), apresentando entre si contatos erosivos e abruptos. Essa associação indica uma migração unidirecional de dunas 3D com episódios oscilatórios ocasionando as estratificações cruzadas de baixo ângulo, *swaley* e *wavy ripples*, dependendo da energia aplicada. St e Ss representam *shoreface* superior, enquanto as demais são associadas a *shoreface* inferior.

f) *Shoreface e transição para plataforma*: arenitos muito finos a finos, bem selecionados dispostos em corpos de 0,5m a 2,5m pouco extensos. Presença marcante de lamitos avermelhados. São identificados *hummockys* (Shcs), *wave ripples* (Swr), heterolitos (H) e lamitos laminados (Fl) com bioturbações. *Hummockys* são interpretados como eventos oscilatórios associados a tempestades, enquanto os heterolitos representam intercalações entre a atividade das ondas e períodos de decantação.

A porção superior da Formação Piauí (figura 3) é descrita por KIFUMBI et al., (2022) om uma associação de sete fácies, descritas em função da nomenclatura proposta por MIALL (1977):

a) *Preenchimento de canal*: arenitos muito finos a grossos, mal selecionados dispostos em corpos lenticulares de até 2,6m de espessura. Em sua base conta com conglomerados maciços (Gm) e arenitos conglomeráticos com estratificação cruzada (Gt). *Lags* lenticulares são sobrepostos por arenitos com estratificação cruzada planar (Sp), tangencial (St) e sigmoidal (Ss), subordinadamente com ripples (Sr). São interpretados como rios perenes com fluxos hiperconcentrados de paleocorrente NW.

b) *Canais fluviais mal canalizados*: arenitos muito finos a grossos, mal selecionados dispostos em corpos tabulares de até 4m de espessura. Estruturas trativas sem feições de erosão na base dos *sets* sugere a ocorrência de regimes de fluxo superior não canalizados representados por arenitos com estratificação cruzada baixo ângulo (Sl) e maciços (Sm).

c) *Lobos terminais*: arenitos finos a médios, moderadamente selecionados dispostos em corpos lenticulares de até 5m de espessura. Apresentam gradação vertical e lateral com pelitos maciços (Fm) e laminados (Fl) sobrepostos por arenitos com *ripples* (Sr), laminação horizontal (Sh), maciços (Sm) ou deformados (Sd). A tendência granocrescente ascendente indica uma progrdaação dos lobos terminais.

d) *Planícies de inundação*: intercalação centimétrica a decimétrica de pelitos laminados (Fl) e maciços (Fm) e arenitos muito finos com laminação horizontal (Sh) e *ripples* (Sr). São interpretados como sucessão episódica de inundações e deposição subaquosa em regime de fluxo superior.

e) *Lençóis arenosos*: arenitos finos a médios, bem selecionados, caracterizados por uma distribuição bimodal dispostos em corpos tabulares de até 4,8m de espessura. Caracterizados por gradação inversa, *ripples* eólicas transladantes (Sr(e)), estratificação cruzada tangencial (St(e)) com eventuais estruturas de adesão (Sa(e)) e deformação, tornando os arenitos maciços (Sm(e)).

f) *Dunas eólicas*: arenitos finos a médios, bem selecionados com *sets* de até 19m de espessura contendo estratificações cruzadas planares (Sp(e)) e tangenciais (St(e)) de médio a grande porte. Eventualmente interagem com depósitos de

interdunas formando laminações convolutas. A continuidade lateral indica um padrão de dunas crescentes com migração oblíqua de paleocorrente predominante NW.

g) Interdunas: arenitos finos, bem selecionados com estruturas de adesão (Sa(e)) e *ripples* eólicas de baixo ângulo (Sl(e)) intercalados com *sets* de dunas e *draas*. Interdigitações e deformações conferem uma característica de interdunas úmidas relacionadas ao elevado nível do lençol freático.

h) Margem lacustre: estromatólitos, oóides e brechas centimétricas associadas a lagos com progressivo aprofundamento da lâmina d'água.

À norte da área de estudo, nas proximidades de José de Freitas (PI), cerca de 300 km de Floriano, (MEDEIROS, 2020) propõe uma interpretação paleoambiental com uma incursão marinha e estabelecimento de fácies costeiras no topo da sequência. Nesta tese, ele apresenta quatro associações de fácies, nomeadas com base na proposta de DUNHAM (1962) e MIALL (1977):

a) Depósitos marinhos rasos: composto por precipitados dolomíticos e calcíticos com eventuais gretas de contração que marcam exposição subaérea. São observados dolomicroesparititos com braquiópodes e corais (Dbc), dolomicroesparititos com gretas de contração (Dc), dolograinstones pelletoidais com bivalves e gastrópodes (Pdbg), dolograinstone pelletoidal com gretas de contração (Pdc) e folhelhos orgânicos (Os).

b) Campo de dunas costeiro e interdunas: arenitos finos a médios dispostos em corpos centimétricos com paleocorrente indicando migração para NW. Apresentam estratificação cruzada planar (Sp), plano paralela (Sh) e com laminação cruzada transladante (Scl).

c) Prodelta lacustre: arenitos finos a médios, eventualmente carbonáticos, frequentemente bioturbados, e eventualmente com estruturas de sobrecarga do tipo *ball and pillow* e *flame*. Apresentam arenitos maciços (Sm), laminações plano-paralelas (Sh) e estratificação cruzada de baixo ângulo (Sl). Subordinadamente também ocorrem pelitos com laminação plano paralela (Fl) e arenitos com estratificação cruzada cavalgante.

d) Lobos de suspensão/barra de desembocadura: arenitos finos a médios, dispostos em pacotes decimétricos com estratificação cruzada sigmoidal (Ss),

cruzada planar (Sp), pelitos com laminação plano-paralela (FI) e ripples cavalgantes (Sr).

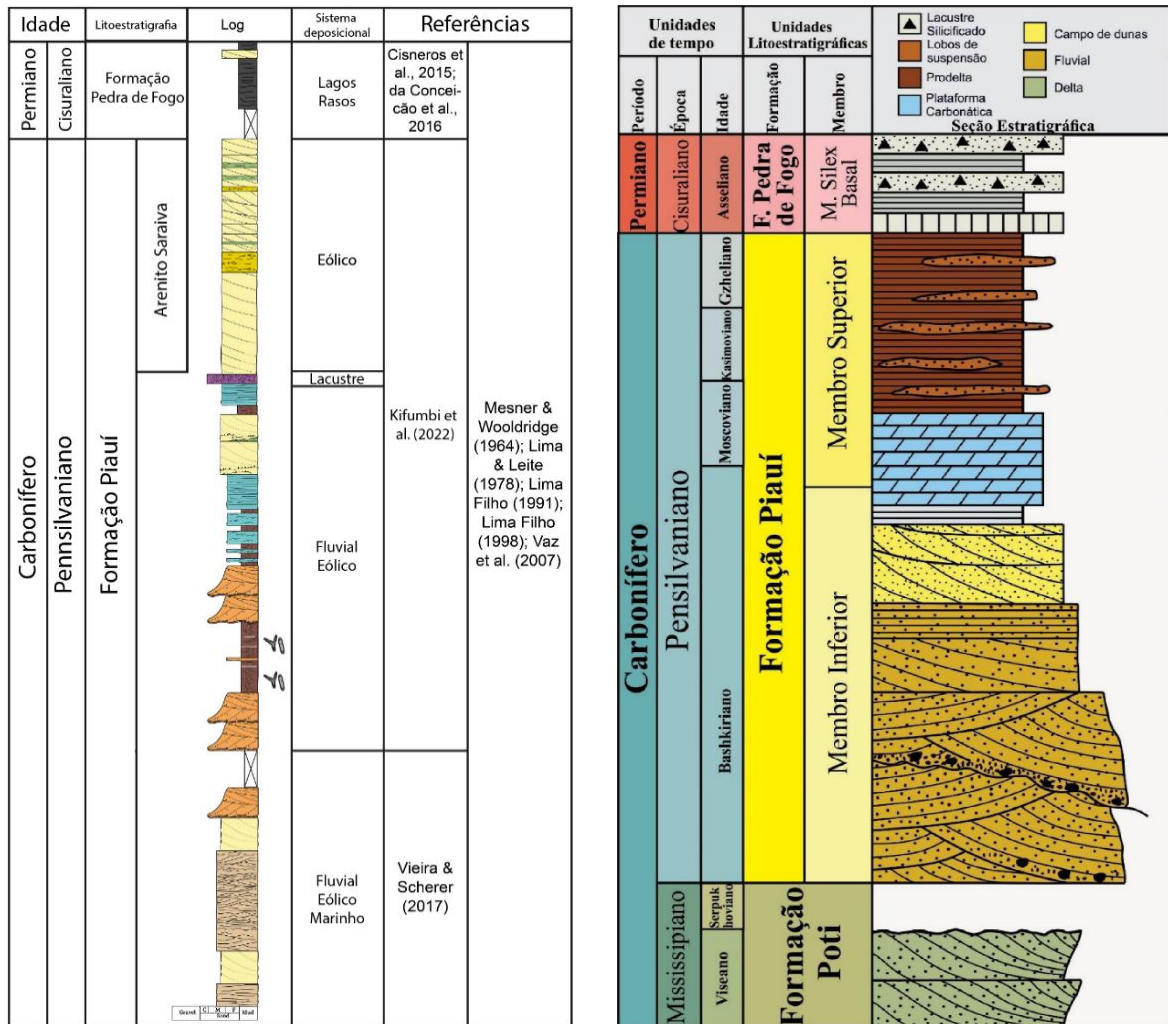


Fig. 3: propostas de KIFUMBI et al., (2022) a esquerda e de MEDEIROS (2020) a direita.

Assim como MEDEIROS (2020) propõe, há um avanço do Oceano Panthalassa, recobrimo as bacias do Amazonas e Solimões e chegando até a Bacia do Parnaíba na porção norte/noroeste. O oceano chegaria até as proximidades de José de Freitas e Teresina (PI), recobrimo as fácies siliciclásticas costeiras e precipitando as fácies carbonáticas (Membro Mocambo) junto de conodontes e foraminíferos bentônicos de origem marinha (NASCIMENTO et al., 2022). Por outro

lado, a região de Floriano não seria inundada, preservando o campo de dunas costeiras com sistema fluvial drenando para NW em direção ao mar.

O modelo evolutivo da Formação Piauí, conforme MEDEIROS (2020) pode ser sintetizado em três sequências: a primeira é composta por sedimentação fluvio-eólicas; seguido pela segunda, dominada por depósitos marinhos e lacustres, formadas pelo avanço do Oceano Panthalassa; e a terceira por ciclos de expansão e contração de campos de dunas em porções de *upstream* e formação de depósitos fluvio-deltaicos sobre a plataforma carbonática em *downstream*. Ambos os casos indicam uma aridização crescente ao topo da sequência até a transição com a Formação Pedra de Fogo marcada pela intensa silicificação na base.

2.3 CONDIÇÕES GEOLÓGICAS E PALEOAMBIENTAIS

O Carbonífero é marcado por uma intensa remobilização das massas continentais. No Pennsylvaniano, a orogenia Herciniana/Allegheniana formada a partir da colisão de Gondwana com a Laurússia desenvolve extensas porções de terras que modificaram a dinâmica de circulação atmosférica e dos oceanos. O domínio terrestre de vegetais superiores e a consequente captura de CO₂ no processo de fotossíntese culminaram na desaceleração do efeito estufa (BERNER et al., 2001).

Por consequência, o período foi marcado por uma diminuição da média de temperatura global, favorecendo a expansão das calotas polares que se retroalimentam a partir do efeito albedo. As idades do gelo do Paleozóico superior (*Late Paleozoic ice age – LPIA*) foram caracterizadas pelo desenvolvimento de centros polares associados a altas altitudes dispersas em latitudes medianas e altas (Isbell et al., 2012). Como consequência, ocorre a expansão de células atmosféricas polares, modificando o padrão dos ventos e levando zonas tropicais para latitudes mais baixas, concentrando zonas úmidas mais próximas ao Equador.

Durante o Pennsylvaniano (em destaque na coluna do tempo geológico da figura 4), a bacia esteve em paleolatitudes entre 30° e 60° sul (MEDEIROS, 2020), sob a influência de ventos predominantemente NW associados a circulação de células polares. A concentração da água em geleiras do tipo alpinas em áreas mais elevadas

em relação à bacia ocasionou o processo de aridização da Formação Piauí evidenciado pelo progressivo desaparecimento de fácies fluviais e domínio de fácies eólicas (KIFUMBI et al., 2022).

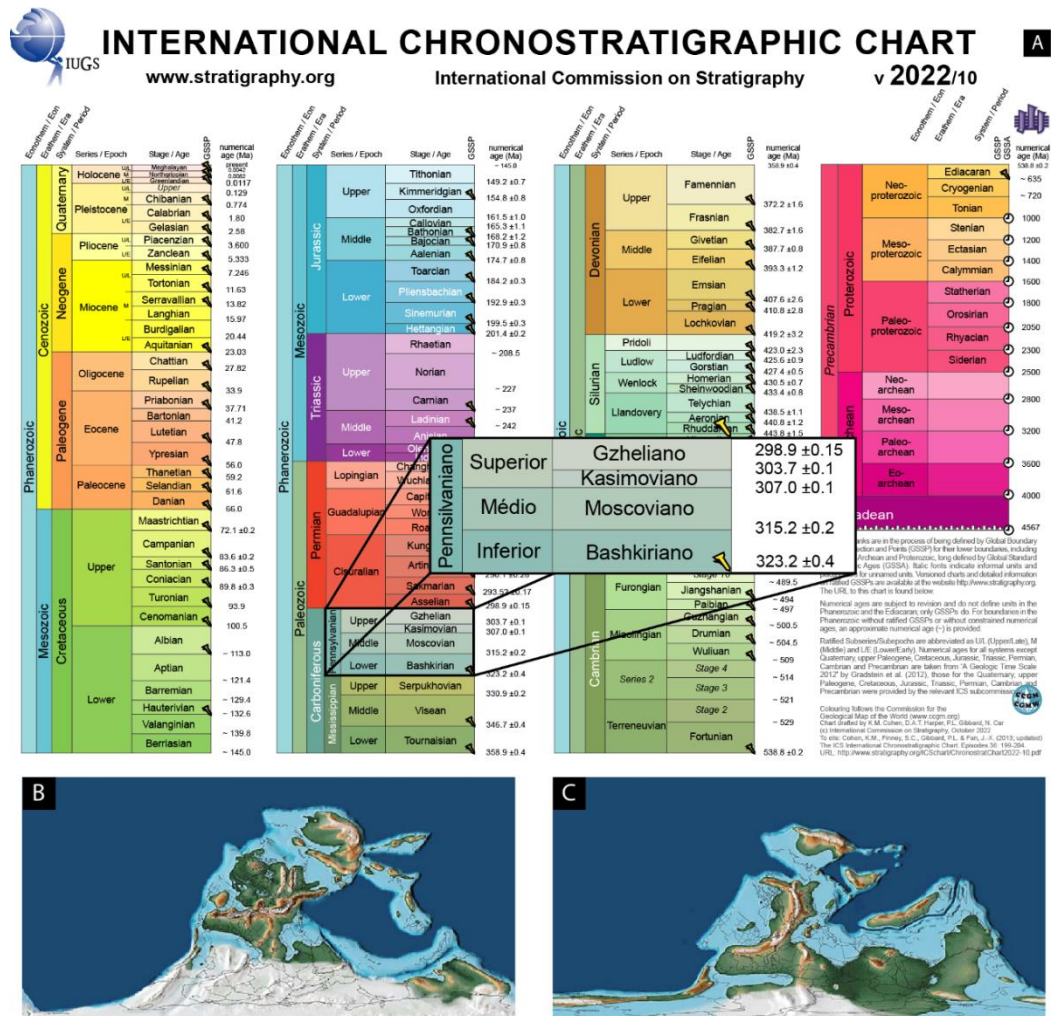


Fig. 4: (A) Escala do tempo geológico da *International Commission on Stratigraphy* (ICS), com ênfase no Pennsylvânico; e paleomapas do (B) Pennsylvânico, (C) Mississippiano (KOC SIS et al. 2020).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 SISTEMA DE ROTA DE SEDIMENTAÇÃO (SRS)

A integração da sedimentologia, geomorfologia, estratigrafia e estudos de proveniência com fatores de controle global como clima e processos tectônicos e sua relação com a origem e destino dos sedimentos define o sistema de rota de

sedimentação (*Sediment Routing System*) (ALLEN, 2008). O SRS se divide em três etapas dentro do ciclo sedimentar, conforme ilustração da figura 5 (ALLEN, 2017):

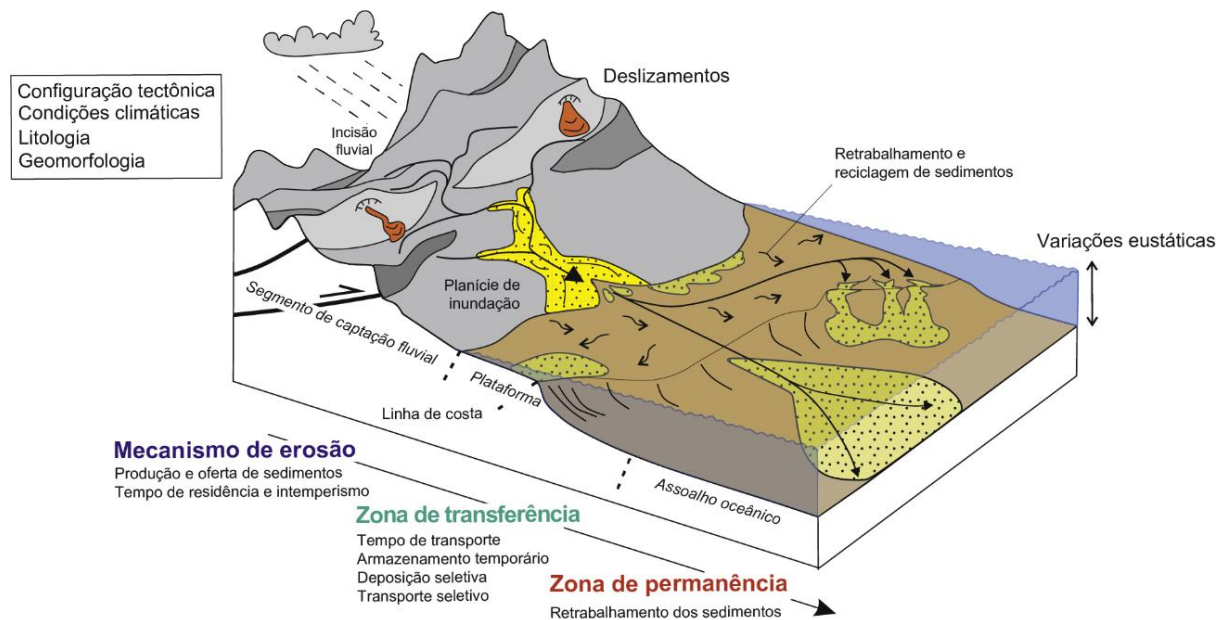


Fig. 5: divisão dos segmentos e processos que atuam durante o SRS (traduzido de CARACCILO (2020), adaptado de ALLEN E HELLER (2012)).

- Mecanismo de erosão: produção de sedimentos definida pela relação entre a configuração tectônica e as condições climáticas;
- Zona de transferência: transporte ativo dos sedimentos e seleção hidráulica das frações;
- Zonas de permanência: aprisionamento das partículas e retrabalhamento sem transporte efetivo.

Os mecanismos de transporte e capacidade de carga são critérios fundamentais e efetivos na seleção de grãos e conseqüentemente na geração de estruturas deposicionais. A seleção hidráulica é controlada pela lei da gravidade e pelas leis da física de mobilização e capacidade de carga dos fluidos, dependentes diretamente da competência e velocidade do fluxo, podendo uma mesma fonte gerar depósitos de composição diferentes. (CARACCILO, 2020). Em função dessa seleção, sedimentos desprendidos da fonte em um tempo T_0 podem ficar aprisionados em barras fluviais

em função da redução da energia, incapaz de o mobilizar. Por outro lado, sedimentos desprendidos no tempo T_1 com maior facilidade de mobilização podem chegar antes.

3.2 ESTUDO DE PROVENIÊNCIA DE MINERAIS PESADOS

A proveniência sedimentar é uma abordagem multidisciplinar com base na estratigrafia, petrografia que tem como objetivo o estudo de rochas siliciclásticas a partir da análise isotópica, geoquímica e varietal de fragmentos líticos e grãos individuais, com ênfase nos minerais pesados. Como resultado, são gerados dados sobre taxas de subsidência e soerguimento de bacias sedimentares (traços de fissão em apatitas e zircões), identificação de terrenos fontes de sedimentação (composição de granadas e turmalinas), datação de eventos vulcânicos que podem servir como *datum* da bacia (U-Pb em zircões detríticos) e/ou quantificação de processos sedimentares como seleção hidráulica e distribuição de tamanho de grão (Caracciolo, 2020).

A composição de arenitos e conglomerados depende intrinsecamente da composição da – ou das – rocha(s) fonte(s), sendo decisiva para o acúmulo de minerais pesados e distribuição de tamanho de grão. Embora granitóides sejam menos abundantes em relação à assembleia de minerais pesados que rochas metamórficas de baixo grau e rochas vulcânicas, sua resistência aos processos intempéricos favorece a formação de sedimentos do tamanho areia (GARZANTI E ANDÒ, 2019). Todavia, a composição primária é facilmente alterada localmente em função da seleção hidráulica e da relação do fluído com a densidade, formato e tamanho de grão. Outros fatores externos também interferem diretamente na abundância de espécies minerais: a tectônica trabalha com a subsidência e soerguimento de bacias, além de determinar a configuração litotectônica e gradiente topográfico; e o clima (indiretamente afetado pela tectônica) controla a cinética das reações químicas de alteração intempérica dos minerais, solubilizando componentes menos resistentes (CARACCILO, 2020).

Embora driblar os empecilhos da segregação hidrodinâmica e propor uma análise regional com base na composição detrítica seja ambicioso e utópico, os

minerais pesados apresentam boa aplicabilidade para compreensão dos processos de sedimentação localmente. Uma vez que o ciclo sedimentar tende a preservar muito mais quartzo e feldspatos, presentes na grande maioria das rochas, a utilização dos minerais pesados possibilita identificar paragêneses menos amplas, com maiores indícios conclusivos de áreas fontes, bem como dos processos de mobilização e transporte em função do comportamento hidrodinâmico e das suas respectivas concentrações no substrato. GARZANTI E ANDÒ (2019) propõem uma classificação genética dos arenitos com base na assembleia de minerais pesados, definindo:

1. Proveniência anorogênica: sendo representados por riftes continentais, margens passivas ou interiores continentais, estão associados com arcos continentais dissecados ou não dissecados, ou então a vulcões anorogênicos. Encontra-se baixos índices de zircão, turmalina e rutilo (ZTR), prevalecendo assembleias de anfibólios e epidotos, piroxênios e olivinas e subordinadamente granada, estauroлита, cianita, andalusita e silimanita.

2. Arcos magmáticos: podendo apresentar diferentes composições – desde séries cálcio-alcálicas a toleíticas, ou até mesmo originária de batólitos graníticos, apresenta uma assembleia rica a muito rica em minerais pesados pautada em piroxênios, olivinas e titanomagnetita, com baixos índices de granada e Cr-espinélio se associada com sedimentos vulcanoclásticos, ou então hornblenda e epidotos com contribuição de titanita, zircão e monazita se associada com granitóides.

3. Cinturões e ofiolitos obductados: oriundos de zonas de subducção continentais fossilizadas apresentam uma assembleia de minerais pesados extremamente rica dominada por granada, epidoto e anfibólio com menor participação de glaucofano, cloritóide e aluminossilicatos. No caso de ofiolitos, é comum a dominância de enstatita com menor participação de olivina, diopsídio, hiperstênio, hornblenda, Cr-espinélio e zircão.

4. Proveniência orogênica mista: representam situações tectônicas diversas associadas a orogenias – tipo Himalaiana, tipo Andeana, tipo Omã, tipo Burman ou tipo Barbados. Suas características são relacionadas à prevalência de minerais metamórficos em sua assembleia.

Os minerais pesados ainda são divididos em transparentes (tHM) e opacos (HM), podendo ser quantificados em função de sua concentração dado o volume de sedimento (tHMC e HMC), classificando: suítes extremamente pobres ($0,1 < \text{tHMC}$), muito pobres ($0,1 \leq \text{tHMC} < 0,5$), pobres ($0,5 \leq \text{tHMC} < 1$), moderadamente pobres ($1 \leq \text{tHMC} < 2$), moderadamente ricas ($2 \leq \text{tHMC} < 5$), ricas ($5 \leq \text{tHMC} < 10$), muito ricas ($10 \leq \text{tHMC} < 20$) e extremamente ricas (≥ 20). Valores de HMC superiores a 50 definem os depósitos como *placers* (GARZANTI E ANDÒ, 2019). Para avaliar o grau de retrabalhamento dos sedimentos é utilizado o índice ZTR ($100 \times (\text{Zircão} + \text{Turmalina} + \text{Rutilo}/\text{total tHM})$) (MANGE E MAURER, 1992).

Fatores tardios e posteriores podem afetar a concentração de minerais pesados nos sedimentos. A seleção hidráulica gerada pelo SRS pode compor assembleias que relatam muito melhor as condições de transporte frente à proveniência por si só. Em estudos de minerais isolados relações granulométricas de tamanho de grão e arredondamento contribuem com maior intensidade para a compreensão da proveniência e do ciclo sedimentar do que a química mineral (CARACCIOLO, 2020). Outro fator que pode afetar a composição detrítica e a assembleia de minerais pesados é a diagênese e a alteração intempérica. A figura 6 destaca a influência da corrosão na morfologia dos grãos, interferindo diretamente na interpretação de morfologia e estrutura dos cristais.

Por outro lado, a análise de química mineral permite a identificação da assinatura geoquímica dos grãos e a correlação com terrenos adjacentes. Essa técnica está diretamente ligada à microscopia eletrônica de varredura e microsonda eletrônica. Granadas e turmalinas (figura 7) são amplamente utilizadas para a análise de química mineral em função de: (a) ampla gama composicional ocasionando uma grande variação de espécies dentro de um mesmo grupo; e (b) paragêneses restritas associadas a contextos geotectônicos específicos.

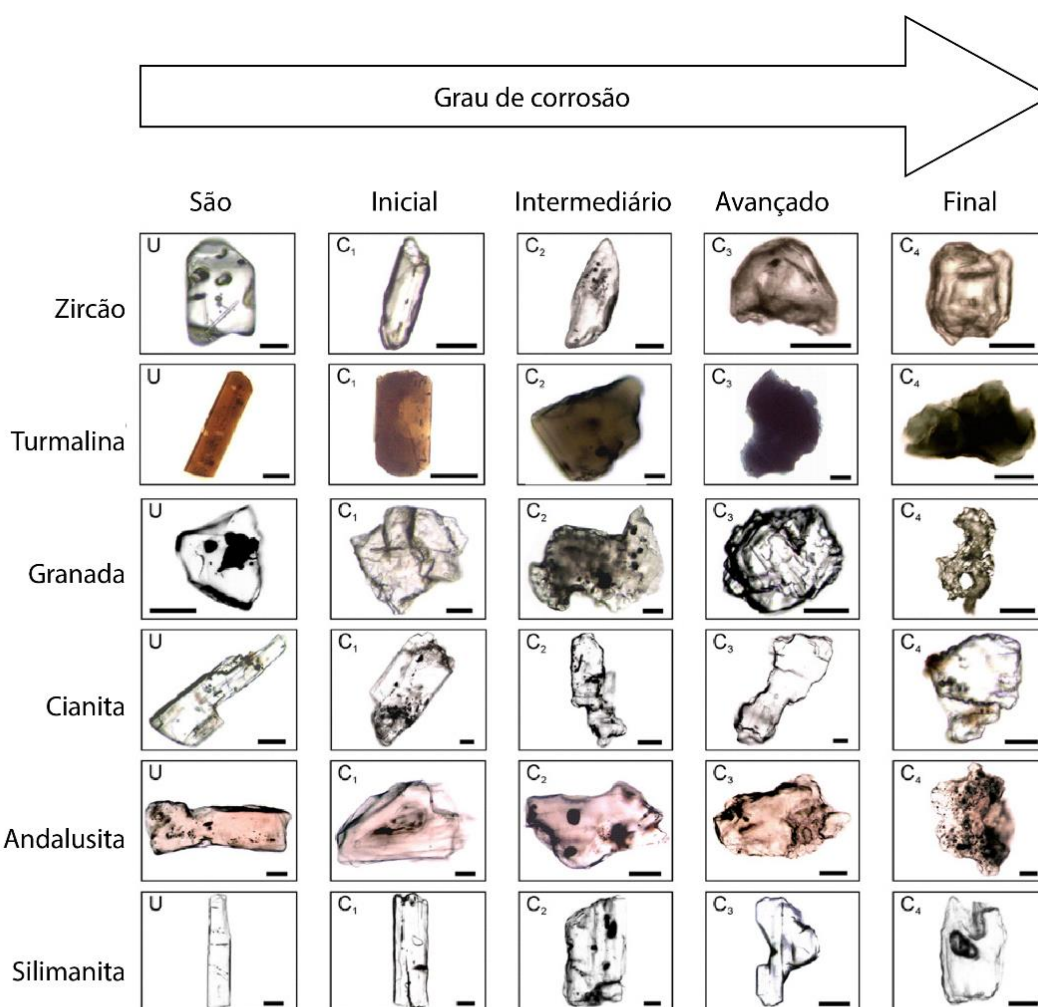


Fig.: 6: catálogo traduzido e modificado de (ANDÒ et al., 2012) destacando os efeitos da corrosão sobre alguns dos principais minerais pesados.

A química de granadas permite identificar seis tipos de proveniência diferente em função de um diagrama ternário com os extremos composicionais X_{Mg} , X_{Fe+Mn} e X_{Ca} . São definidas: (A) granadas metamórficas de alto grau, (BI) granadas de pegmatitos e/ou aplitos graníticos, (BII) granadas de metassedimentares de baixo grau, (CI) granadas de metabasitos, (CII) granadas de rochas ultramáficas e (D) granadas de metacarbonatos e/ou com influência metassomática (MANGE E MORTON, 2007).

Com a mesma lógica, a composição de turmalinas em função dos íons de substituição mais comum em seus sítios octaédricos também permite a identificação de : (1) pegmatitos e aplitos graníticos ricos em Li; (2) pegmatitos e aplitos graníticos pobres em Li; (3) rochas graníticas com alteração hidrotermal; (4) metapelitos e metapsamitos aluminosos; (5) metapelitos e metapsamitos pobres em Al; (6) rochas quartzo-turmaliníferas ricas em Fe^{+3} , metapelitos e cálcico-silicáticas; (7) ultramáficas pobres em Ca; e (8) meta-carbonáticas e meta-piroxenitos (HENRY E GUIDOTTI, 1985; MANGE E MORTON, 2007).

Demais minerais, com menor frequência ou em contextos mais específicos e regionalmente mais restritos podem ser utilizados, como piroxênios e anfibólios (CARACCIOLO, 2020) para diferenciar proveniências de rochas plutônicas e vulcânicas.

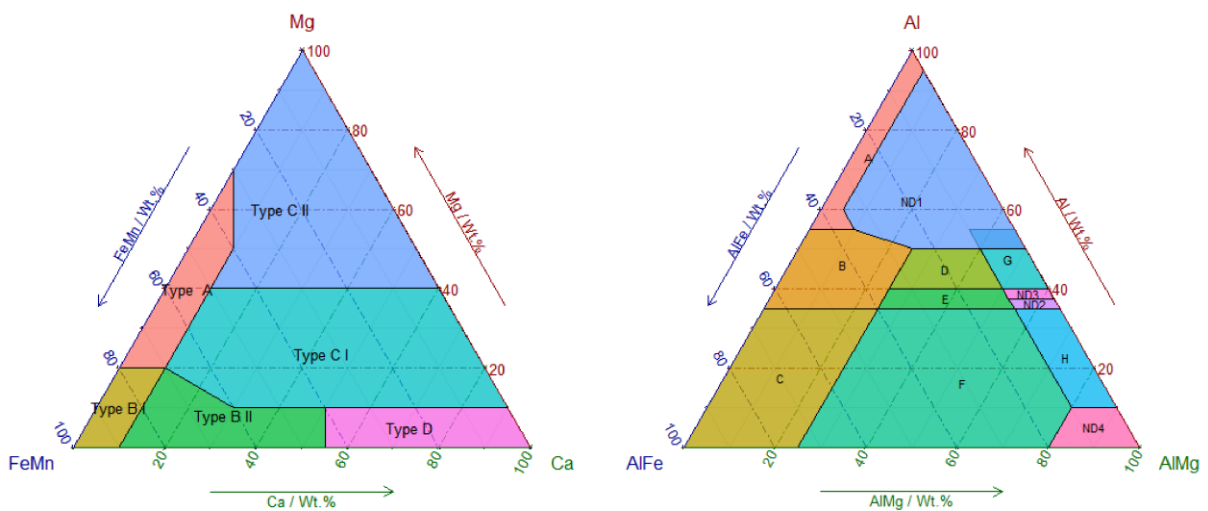


Fig. 7: diagramas composicionais de granadas (esquerda) e turmalinas (direita)

3.3 ESTRATIGRAFIA DE DEPÓSITOS FLUVIAIS E EÓLICOS

Sistemas fluvio-eólicos estão diretamente associados a um intenso retrabalhamento e mistura de sedimentos. Depósitos eólicos tendem a formar areias quartzosas pobres em feldspato e líticos com alto índice ZTR. Sistemas fluviais comumente ocupam os espaços interdunas, ocasionando uma intensa mistura de sedimentos. Além do retrabalhamento dos sedimentos eólicos, a carga oriunda das

descargas fluviais altera a composição das areias, e conseqüentemente a assembleia dos minerais pesados, trazendo sedimentos de diferentes proveniências a montante.

3.3.1 SISTEMA EÓLICO

Sistemas eólicos são contextos deposicionais de condições amplas, podendo se desenvolver em contextos áridos ou úmidos, com abundância ou escassez de sedimentos, tendo como principal agente de transporte a saltação, suspensão por ação dos ventos e subordinadamente rastejamento e queda de grãos. Os sistemas eólicos dividem-se em três ambientes deposicionais principais: dunas, interdunas e lençóis (DALRYMPLE et al., 2010).

a) Campo de dunas: são as principais formas de leito preservadas no registro. Sua formação está associada a ambientes com abundante oferta de sedimentos e sua preservação a agentes externos como orientação e intensidade do vento, profundidade do lençol freático, vegetação e/ou derrames de lavas, dentre outros fatores. As dunas podem ser classificadas quanto ao seu tamanho em (I) ripples, (II) dunas ou (III) draas (figura 8). Sua morfologia também permite a diferenciação em oito tipos: (I) linear, (II) barcana, (III) barcanóide, (IV) transversa, (V) oblíqua, (VI) parabólica, (VII) estrela ou (VIII) domo. A relação oferta de areia e variabilidade de ventos controla diretamente a morfologia das dunas (figura 9).

b) Interduna: porção intersticial entre dunas, que pode ser excluído do registro em caso de superimposição de dunas. Pode apresentar características variadas ao depender do aporte sedimentar, podendo gerar extensos *lags* eólicos de deflação na defasagem de sedimentação ou *sabkhas* relacionados a enchentes episódicas; ou ao depender da profundidade do lençol freático, podendo aflorar e gerar depósitos pelíticos com feições de adesão ou *soft deformation*.

c) Lençóis de areia: zonas transicionais compostas por camadas planares e subordinadamente dunas de areia grossa localizadas nas bordas dos campos de dunas. A diminuição do aporte sedimentar ocasiona extensas planícies de *lags* de deflação. Embora frequentemente representem regiões

pouco extensas, localmente podem se estender por centenas de milhares de quilômetros (lençóis de Selima, Egito) em função do padrão de ventos favorável à redução do aporte sedimentar.

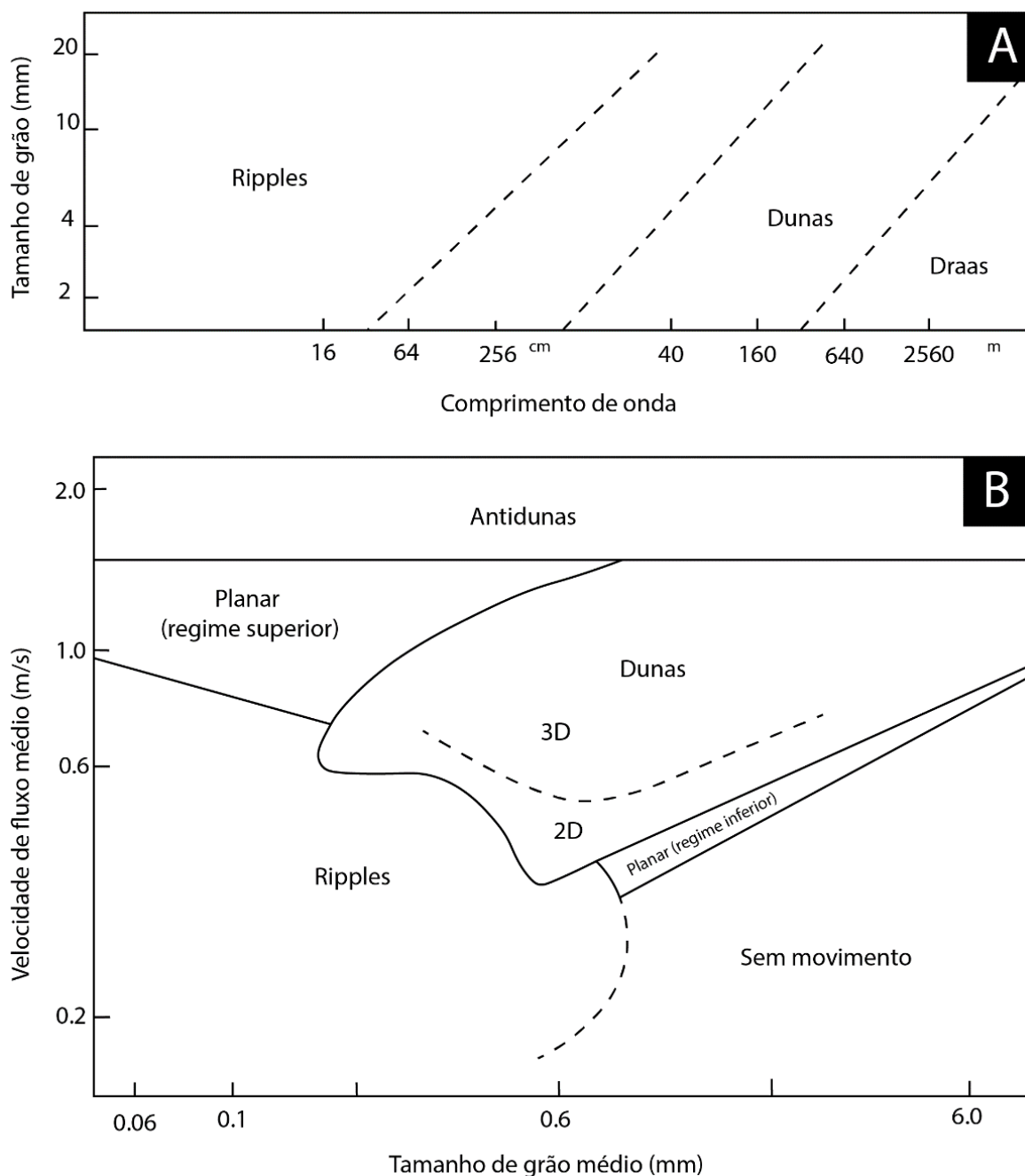


Fig. 8: relação de tamanho de grão com formas de leito em (A) comparação ao comprimento de onda das formas (WILSON, 1972) e (B) em relação à velocidade de transporte dos sedimentos (DALRYMPLE et al., 2010).

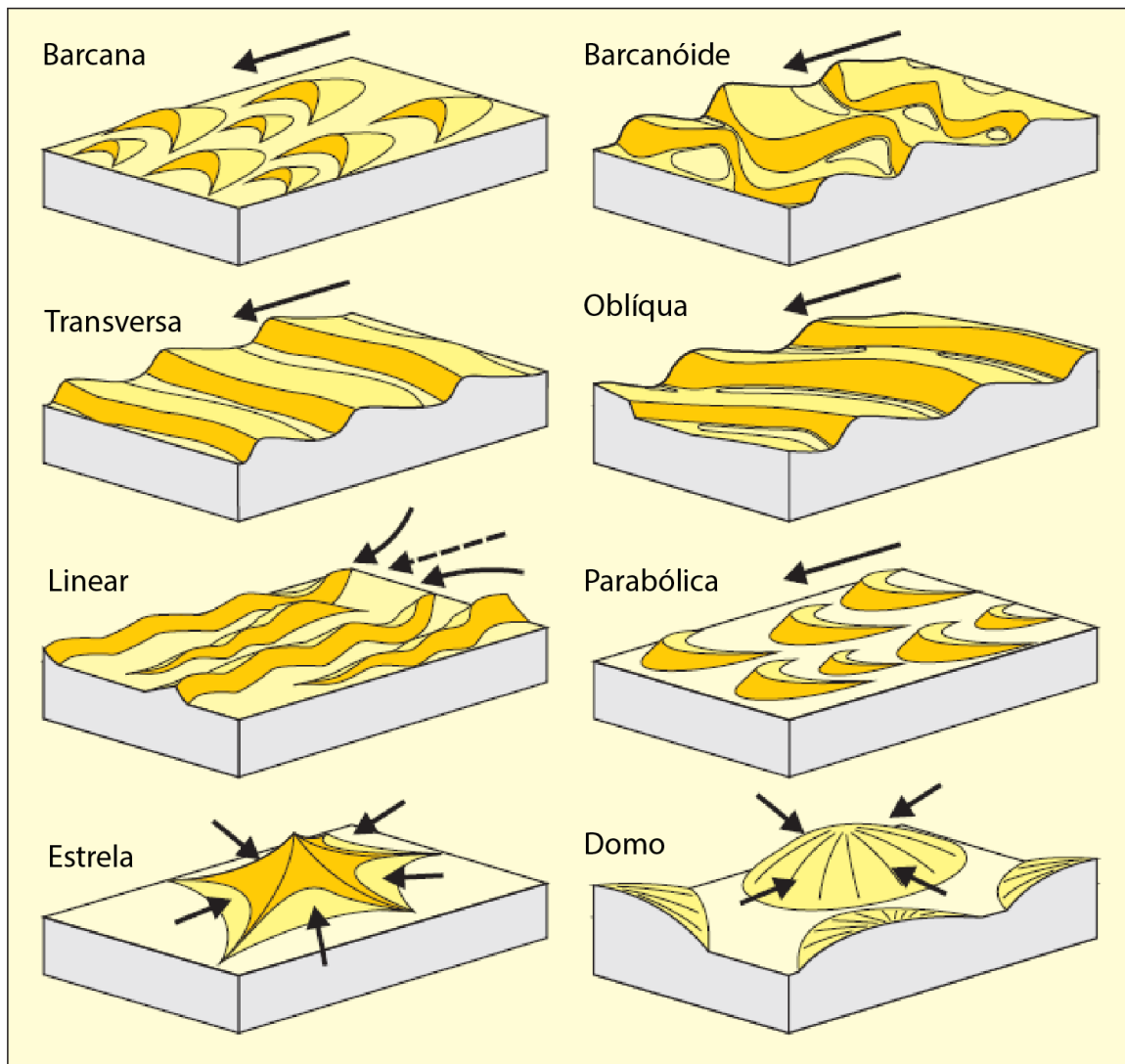


Fig. 9: classificação morfológica das dunas com direção preferencial dos ventos indicado pelas setas (MICHEL, 2021; MOUNTNEY, 2006).

3.3.2 SISTEMA FLUVIAL

Sistemas fluviais apresentam condições muito diversificadas e uma sucessão vertical de fácies muito mais complexa quanto aos seus elementos arquiteturais em relação aos sistemas eólicos. Apresentam como principais agentes de transporte a suspensão, a saltação e a tração de grãos em fluxo subaquoso unidirecional. Podem ser classificados quanto a sua morfologia em meandranes, entrelaçados, anastomosados ou retos (MIALL, 1977, 1985, 1988).

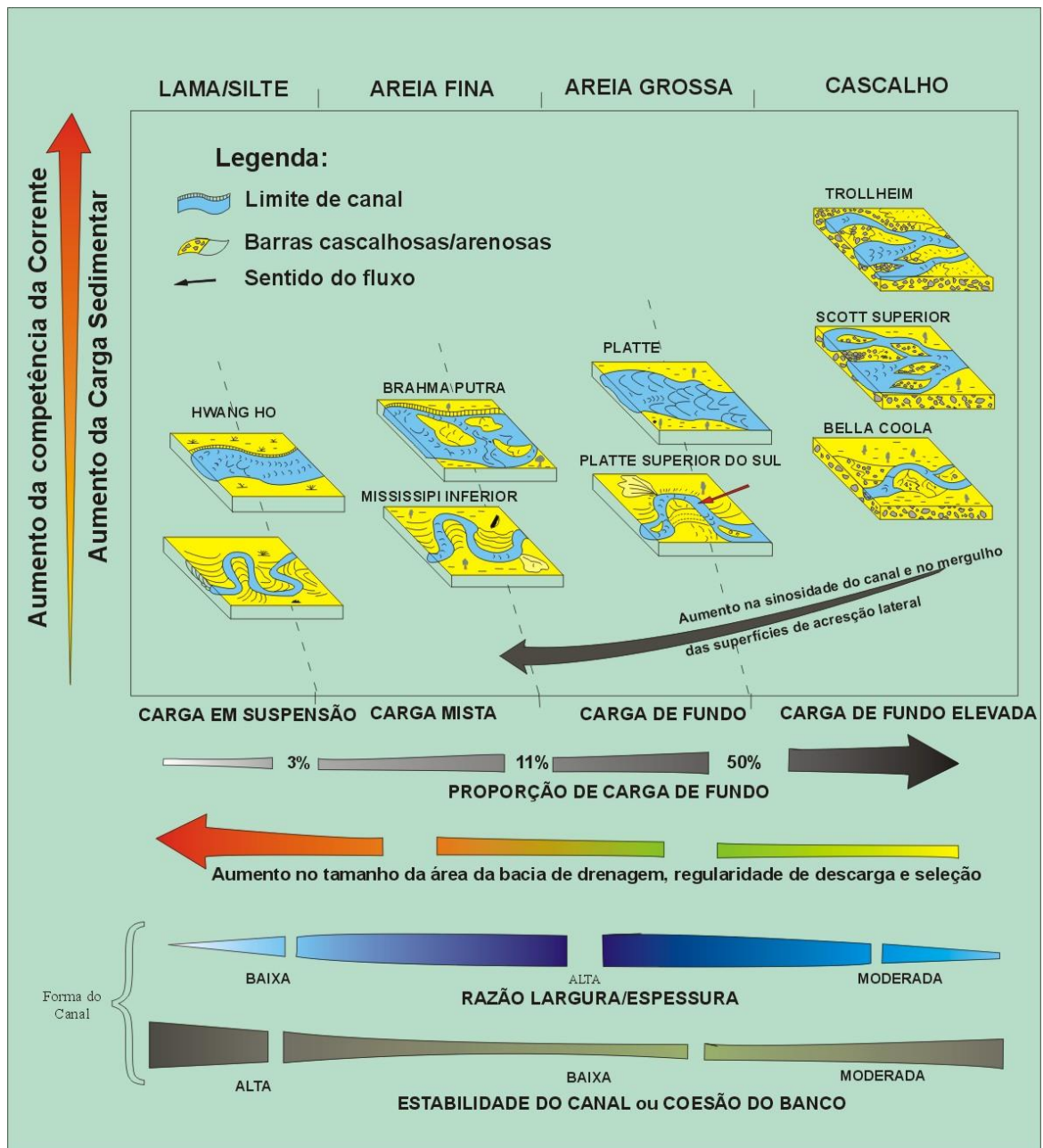


Fig. 10: relação entre tamanho e quantidade de sedimentos com a morfologia dos rios. Adaptado de (ORTON & READING, 1993).

- a) Rios meandrantés: se desenvolvem em contextos de baixa declividade e fluxos constantes e uniformizados. São caracterizados por canais de alta sinuosidade, abundância de barras arenosas em pontal, canais abandonados e depósitos de finos externos aos canais ocasionados por

descargas episódicas que ultrapassam os diques marginais. É um exemplo de rios meandantes o Rio Mississipi (EUA).

- b) Rios entrelaçados: se desenvolvem em contextos de grandes taxas de sedimentação e descargas variáveis, comumente associados a drenagens de sistemas de montanhas. São caracterizados por uma grande quantidade de barras cascalhosas ou arenosas separando os canais. É um exemplo de rios entrelaçados o Rio Brahmaputra (Índia e Paquistão).
- c) Rios anastomosados: se desenvolvem em contextos de baixa a moderada sinosidade, quando há a formação de redes de canais interconectados separados por amplas áreas de planícies de inundação vegetadas. São caracterizados por uma agração vertical maior que a migração lateral. É um exemplo de rios anastomosados o rio Columbia (Canadá).
- d) Rios retos: comumente constituem porções limitadas de rios que se encaixam em estruturas geológicas pré-existentes. É um exemplo de rios retos o encaixe de porções do Rio das Antas em falhas das rochas da Formação Serra Geral (Bacia do Paraná).

3.3.3 INTERAÇÕES FLUVIO-EÓLICAS

Interações entre sistemas fluviais e eólicos podem ser observados em sistemas sedimentares modernos e passados. Um exemplo atual é o Rio Hoanib (figura 11), que durante eventos episódicos desenvolve corpos efêmeros na Costa do Esqueleto, Deserto da Namíbia, onde um extenso campo de dunas com cerca de 34000 km² se desenvolve com condições hiperáridas de precipitações máximas de 50 mm/ano (GARZANTI et al., 2012). Nos meses da temporada de chuvas (de novembro a março), o rio percorre cerca de 80 km em regiões de lençóis eólicos até que atinge o campo de dunas. O rio, orientado NE-SW encontra as interdunas paralelas, criando condições para que a água fique represada e, eventualmente, ultrapasse as dunas de margem do canal (figura 12).



Fig. 11: (A) região norte da Namíbia, próximo à localidade de Sesfontein; (B) região de encontro do rio com o campo de dunas, represando a água e impedindo seu deságue no Oceano Atlântico e (C) calha seca do rio. Fonte: Google Earth.

No registro geológico, a Formação Sergi (Jurássico pré-rift da Depressão Afro-Brasileira) guarda uma sedimentação flúvio-eólica e importante reservatório de óleo e gás *onshore* no nordeste brasileiro. Tal qual a Formação Piauí, são intercalados arenitos eólicos, bem selecionados e arenitos e conglomerados intraformacionais de origem fluvial delimitados por pelitos oriundos da decantação dos sedimentos em suspensão quando represados. A relação entre a alta porosidade e permeabilidade de arenitos eólicos delimitada pelos impermeáveis camadas de argilas autigênicas e mecanicamente infiltradas favorece a formação de reservatórios de recursos naturais (SCHERER E DE ROS, 2009).

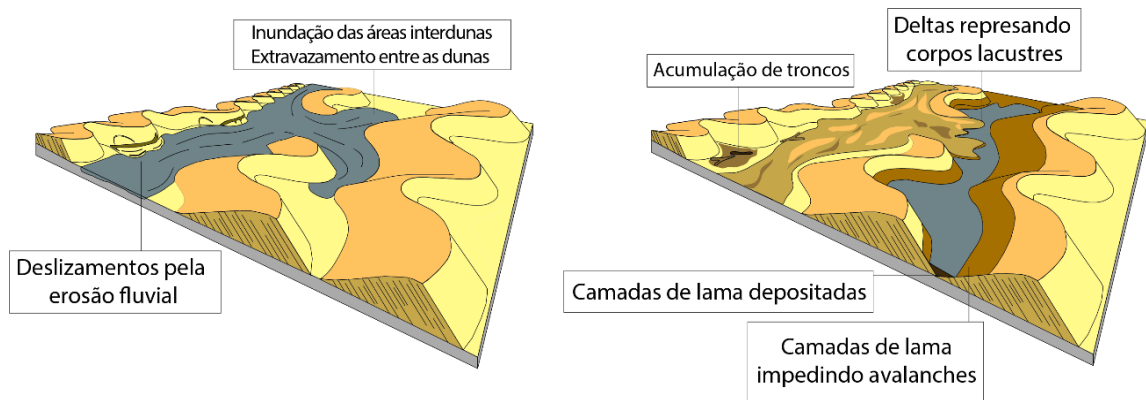


Fig. 12: Modelo de alocação de corpos fluviais e lacustres nos espaços interdunas. Adaptado e traduzido de (STANISTREET et al., 2002).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como meio inicial de planejamento, foi estabelecido um fluxograma de trabalho (figura 13) com as seguintes etapas:

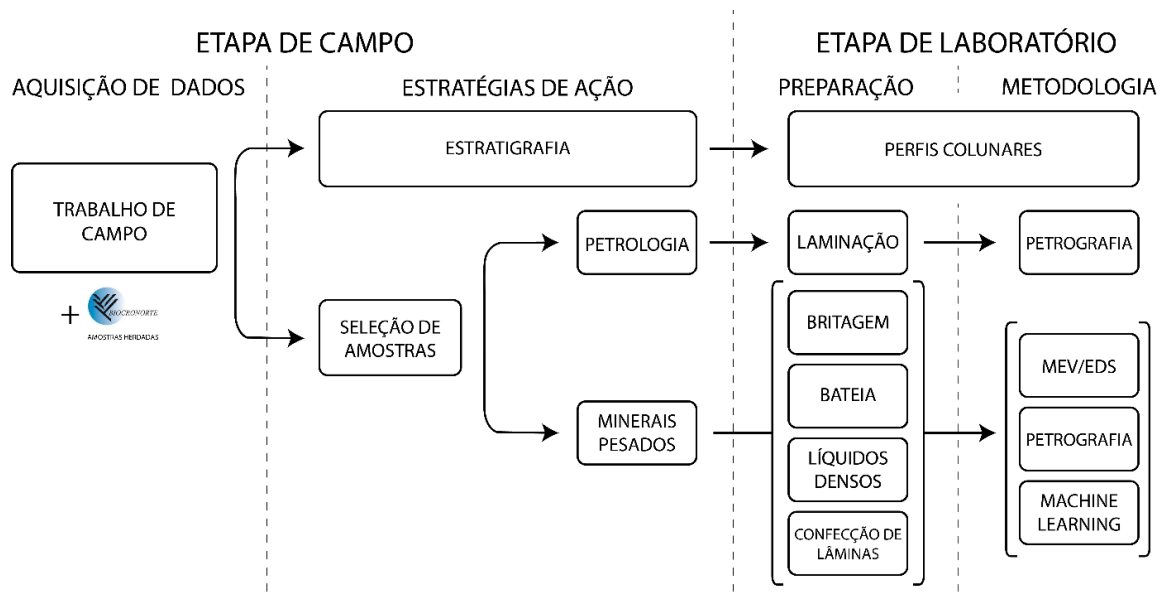


Fig. 13: Fluxograma de trabalho pautado na compilação das principais técnicas para estudo e interpretação da proveniência sedimentar.

(a) trabalho de campo na região de Floriano (PI) e seleção de amostras e dados cedidos pelo projeto BIOCORNORTE;

(b) definição de estratégias de ação para a análise da proveniência sedimentar incluindo estratigrafia, análise de composição primária e análise de minerais pesados;

(c) preparação de amostras: processamento do material selecionado para análise para atendimento das necessidades específicas de cada metodologia;

(d) microscopia de luz transmitida e refletida para a quantificação dos componentes principais;

(e) microscopia eletrônica de varredura com espectroscopia de raios X por dispersão de energia (MEV/EDS);

(f) processamento dos dados a partir de softwares gráficos para digitalização de colunas estratigráficas e utilização de linguagens de programação para tratamento de *big data* por aprendizado de máquina.

4.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Anterior ao trabalho *stricto sensu*, uma ampla revisão bibliográfica quanto à geologia regional da Bacia do Parnaíba e seus terrenos adjacentes, bem como de técnicas recentes e clássicas do estudo dos minerais pesados e da proveniência sedimentar foi realizada. Para compilar os dados, foi utilizado o software de gerenciamento de referências, atuando como uma biblioteca pessoal de artigos cujo acesso se deu, em boa parte dos casos, em função do vínculo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com periódicos de acesso restrito.

4.2 TRABALHO DE CAMPO

O trabalho de campo foi realizado nos municípios de Floriano (PI), Amarante (PI) e Barão de Grajaú (MA) ao longo de sete dias em agosto de 2022, sob supervisão da Profa. Dra. Juliana Charão Marques e do Prof. Dr. Afonso Nogueira (UFPA).

Foram realizados cinco caminhamentos e levantados duas seções colunares com o objetivo de interpretar a estratigrafia das unidades descritas. De tal modo, foram identificados lobos deltaicos da Formação Poti, depósitos de lago proximal e distal da Formação Pastos Bons, depósitos fluviais da Formação Grajaú e, como foco do trabalho, arenitos e arenitos conglomeráticos fluviais entrelaçados e arenitos eólicos da Formação Piauí.

Dois afloramentos foram utilizados para o estudo da Formação Piauí, onde, além da amostragem, foram levantadas seções colunares para aprimorar a compreensão sedimentológica e estratigráfica do ambiente. A nomenclatura dos pontos traz a sigla “BP”, de Bacia do Parnaíba seguida do número, em ordem crescente, dos pontos visitados. O levantamento de perfis colunares seguiu a nomenclatura proposta por MIALL (1977) que enfatiza a granulometria, com uma letra maiúscula, seguida por uma letra minúscula de descreve a estrutura.

4.3 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO PRIMÁRIA

A classificação petrográfica de arenitos consiste na contagem de 300 grãos por lâmina quantificando, como componentes principais, quartzo (Q), feldspatos (F) e líticos (L). A avaliação se dá por meio do método de GARZANTI (2019) conforme descreve a figura 14 com as bases do método Gazzi e Dickinson (INGERSOLL E DICKINSON, 1981) considerando a contagem individual de cristais em fragmentos de rocha quando superiores a 30 µm devem ser contados como grãos individuais. Para esta análise, foram confeccionadas lâminas petrográficas e realizada petrografia usual por meio de microscopia óptica.

Ao fim, as 15 subclasses são denominadas com os componentes principais em ordem crescentes, sendo abreviadas da mesma forma. Os três vértices representam assembleias as quais dois dos três componentes principais não excedem 10%, definindo as subclasses feldspática (F), lítica (L) e quartzosa (Q). As subclasses que tangenciam as arestas apresentam um dos componentes que não excede 10%, definindo as classes lito-feldspática (LF), feldspato-lítica (FL), quartzo-lítica (QL), lito-quartzosa (LQ), feldspato-quartzosa (FQ) e quartzo-feldspática (QF). Por fim, as áreas centrais do diagrama representam assembleias as quais ambos os três componentes excedem 10% da composição total, classificando arenitos quartzo-lito-feldspáticos (qLF), quartzo-feldspato-lítico (qFL), feldspato-quartzo-lítico (fQL), feldspato-lito-quartzoso (fLQ), lito-feldspato-quartzoso (fLQ), ou lito-quartzo-feldspático (IQF).

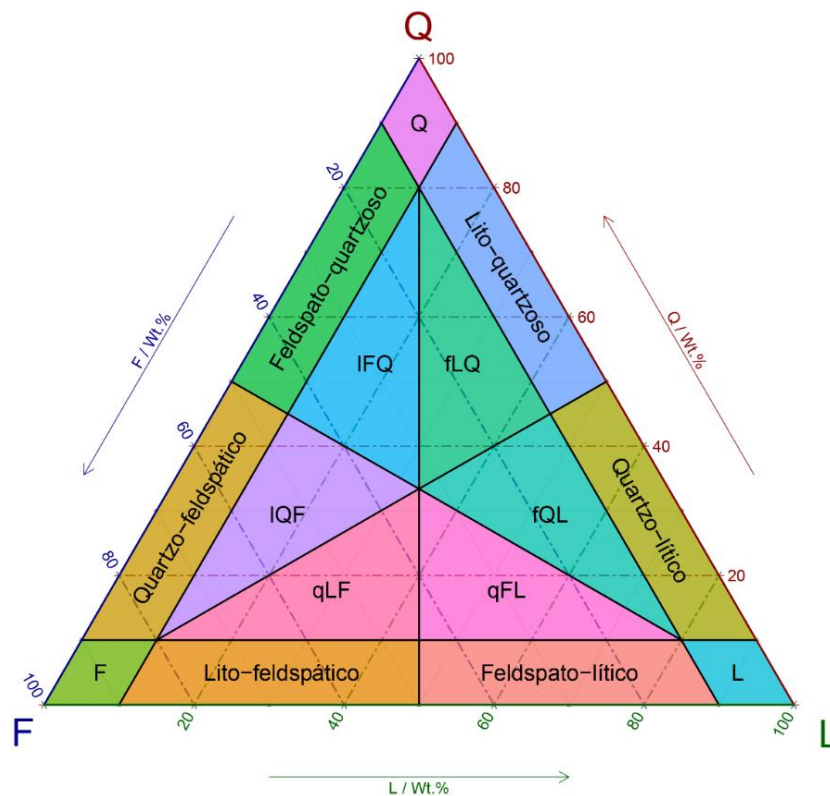


Fig. 14: classificação de arenitos de GARZANTI, (2019). Os vértices representam quartzo (Q), feldspato (F) e líticos (L).

4.4 ESTUDO DE MINERAIS PESADOS

O estudo de proveniência sedimentar, há tempos, representa um importante método de investigação paleoambiental. Métodos clássicos buscaram quantificar os componentes principais do arcabouço sedimentar e o associar diretamente com a configuração tectônica (DICKINSON et al., 1979). A consolidação da utilização de minerais pesados se deu a partir dos anos de 1980, por grande influência dos trabalhos de MORTON et al. (1985,1994). Recentemente, novos métodos vêm sendo postulados, a fim de aprimorar as técnicas, driblar dificuldades e valores não condizentes, além de otimizar tempo de análise e processamento de dados. Considera-se que a proveniência entrou na era do “*Big Data*” (VERMEESCH et al., 2016) exigindo técnicas de aprendizado de máquina sejam aplicados para lidar com grandes bancos de dados de MEV/EDS.

4.4.1 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Para a interpretação petrográfica, foram confeccionadas 5 lâminas delgadas que foram analisadas no microscópio óptico. As amostras foram serradas, coladas em lâminas de vidro e desbastadas até que atingissem uma espessura média de 30 μm . Por outro lado, a análise de minerais pesados demanda o estudo individual dos grãos, sendo necessário desagregar a rocha e selecionar a fração desejada (MANGE e MORTON, 2007).

A primeira etapa, pós coleta das amostras, consistiu na cominuição das amostras através de moagem com martelo e moinho de bolas. Logo após, as amostras foram passadas em peneiras acopladas de 180 μm e 100 μm , para a seleção de três frações: maior que 180 μm , entre 180 e 100 μm e menor que 100 μm . Com isso, foram geradas 15 amostras ao todo – três frações para cada amostra original. A nomeação das amostras se deu a partir do codinome original e o intervalo granulométrico utilizado (como exemplo a amostra BP-18, que foi repartida em BP-18 >180, BP-180 180-100 e BP-18 < 100). A etapa seguinte consistiu na lavagem, para remoção de argilominerais presentes e bateamento de cada fração.

Posteriormente, os minerais restantes da bateia foram deixados na estufa por uma noite com temperatura de 50° C antes de passarem pela separação por bromofórmio (CHBr_3), um líquido com densidade de 2,9 g/cm^3 , capaz de decantar os minerais pesados e flutuar os minerais que não eram de interesse. As amostras foram então despejadas em um funil de separação e um funil de vidro com filtro de papel contendo o material escoado. Após alguns segundos de agitação os minerais pesados decantavam e, ao abrir a torneira do funil, eram escoados para o filtro. O processo é repetido até todos os minerais pesados decantarem, o filtro de papel era trocado e a torneira novamente aberta para escoar os demais minerais que flutuaram. Ao final do processo os minerais eram novamente lavados, desta vez com álcool etílico, e levados à estufa novamente por mais uma noite.

Com a assembleia de minerais pesados separada e seca, eles foram levados para confeccionar lâminas para análise de microscopia eletrônica de varredura. As lâminas de vidro, idênticas às utilizadas para a preparação de lâminas delgadas para petrografia, foram cobertas com uma mistura de resina epóxi de baixa viscosidade e

um catalisador para endurecimento na proporção de 5:1. Os minerais pesados foram jogados sobre a resina e levados para a estufa por mais 4 horas, sendo logo após cobertos com mais uma camada de resina e novamente postos na estufa por outras 4 horas. Com a resina seca, as lâminas foram desbastadas e polidas com abrasivo de 320 μm e 1000 μm e pasta de alumina. A última etapa consistiu na metalização das amostras com filetes de carbono para que a superfície da lâmina possa conduzir o feixe de elétrons emitido pelo microscópio eletrônico de varredura.

4.4.2 MIROSÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA

A avaliação e quantificação dos minerais pesados a partir de microscopia eletrônica de varredura (MEV) permite identificar a composição química de grãos individuais e segregar os grupos em espécies individuais, o que confere informações associadas à assinatura geoquímica das rochas fontes por meio da análise do espectrômetro de dispersão de raios X (EDS). Para o estudo foi utilizado o MEV-EDS localizado no Laboratório de Geologia Isotópica (LGI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, modelo JSM-6610LV.

Para as análises, foram utilizados 100 pontos por lâmina, totalizando 1500 análises de composição de grãos individuais. As lâminas foram inseridas por pares no equipamento que dispara um feixe de elétrons responsável por ionizar uma porção superficial e subsuperficial da amostra. Conforme a energia se propaga e dispersa, diferentes respostas são geradas, dentre elas: os elétrons secundários (SE), elétrons retro-espalhados (*backscatter*, ou BSE), raios X característicos, raios X de frenagem e raios X fluorescentes.

Aplicado aos minerais pesados, são utilizados os SE e BSE: SE são originados da região de impacto, lentos e de baixa energia ($< 20 \text{ eV}$), se comparados aos BSE, em função das sucessivas colisões dos elétrons primários no interior da amostra e da menor quantidade expelida em relação à absorvida. De tal modo, um detector lateral é capaz de captura-los, identificando sua quantidade, refletindo na topografia do material e levemente no contraste composicional – em decorrência da pequena quantidade de BSE identificados. Por outro lado, BSE correspondem a elétrons originados da pera de ionização, de maior velocidade e que passam, em sua maioria,

batidos pelo detector lateral, sendo identificados apenas pelo detector anular. O coeficiente de retro-espalhamento depende diretamente do número atômico dos elementos, sendo sinais mais fortes, atribuídos a elementos pesados, acarretando em tons mais claros, e sinais mais fracos, atribuídos a elementos leves, acarretando em tons mais escuros. Uma vez que os feixes foram incididos e os raios X característicos foram expelidos de cada elemento da amostra, o EDS (espectrômetro de energia dispersiva) identifica os picos de energia $K\alpha$ e $K\beta$, um fóton de raio X liberado pelo salto quântico de um elétron entre as camadas L e M, e M e K, respectivamente.

4.4.3 ANÁLISE TRATAMENTO E INTEGRAÇÃO DE DADOS

O trabalho essencialmente tratou com três vieses: a análise estratigráfica dos afloramentos visitados; a quantificação da composição primária e diagenética em lâmina delgada das amostras; e avaliação sedimentológica e de química mineral dos minerais pesados. O diagrama da figura 15 exemplifica como as diferentes áreas se interligam no estudo de proveniência sedimentar.

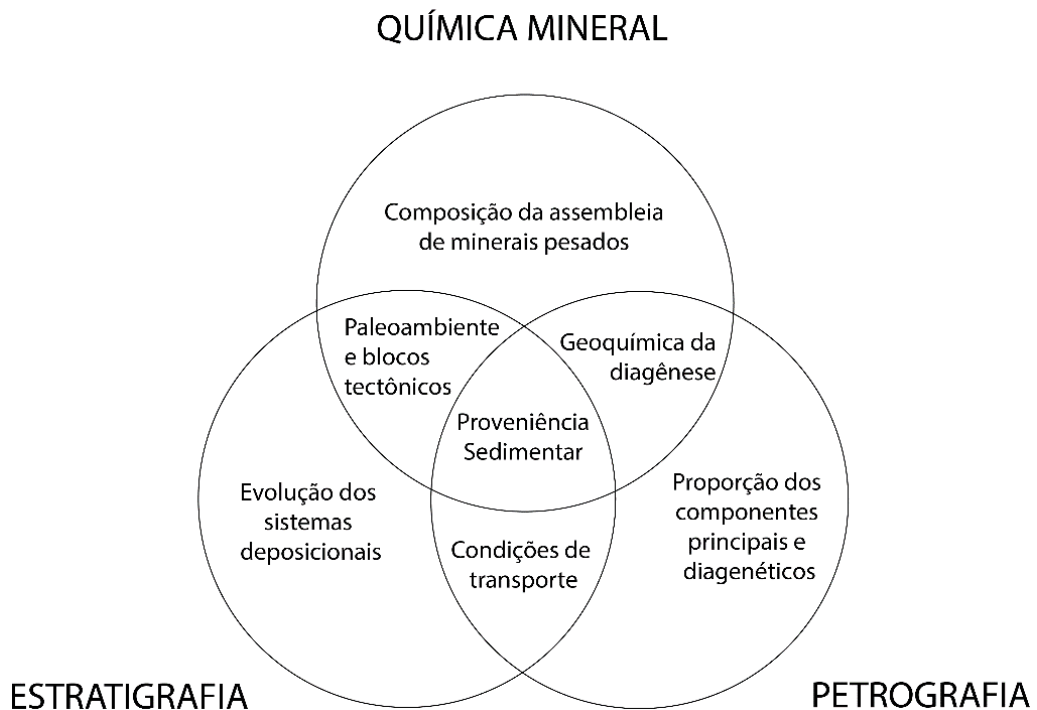


Fig. 15: Diagrama de Venn destacando como a petrografia, a estratigrafia e a química mineral se interligam e se completam no estudo de proveniência sedimentar.

A grande quantidade de dados composicionais dificulta a análise individual da composição de cada grão. Para tratar os dados, foram utilizados conceitos de aprendizado de máquina associados à linguagem de programação R e o *software* RStudio (figura 16). A primeira etapa consistiu na importação, correção de valores zerados, atribuindo-os valores mínimos, evitando problemas matemáticos, e imputação dos dados. Subsequentemente, foi feita uma análise de componentes principais (PCA) pautada no conceito de *log ratio* (AITCHINSON et al., 2000) para quantificar a similaridade química e agrupar as amostras com base nas suas diferenças em um gráfico multidimensional. A partir de então, o algoritmo *k-means* simulou 32 possíveis agrupamentos dos *clusters* extraídos do PCA, com base nos 32 elementos químicos quantificados em MEV-EDS (C, O, SiO₂, Al₂O₃, SO₃, FeO, TiO₂, MgO, MnO, CaO, K₂O, Na₂O, P₂O₅, ZrO₂, ThO₂, BaO, SrO, Mo, Cr₂O₃, V, ZnO, Pb, Nd₂O₃, La₂O₃, Ce₂O₃, Y₂O₃, EuO, Gd₂O₃, Sc, Cd, Tc e Te). O valor ideal é observado no ponto de inflexão do gráfico do *elbow method*. Posteriormente, os *clusters* foram qualificados manualmente a partir de 40 composições e a máquina rodou as demais análises com base no que foi inserido. O método de utilização de aprendizado de máquina para tratar, imputar e simular dados de MEV-EDS demonstra um avanço significativo no que tange à capacidade de lidar com grandes bancos de dados em um curto período de tempo.

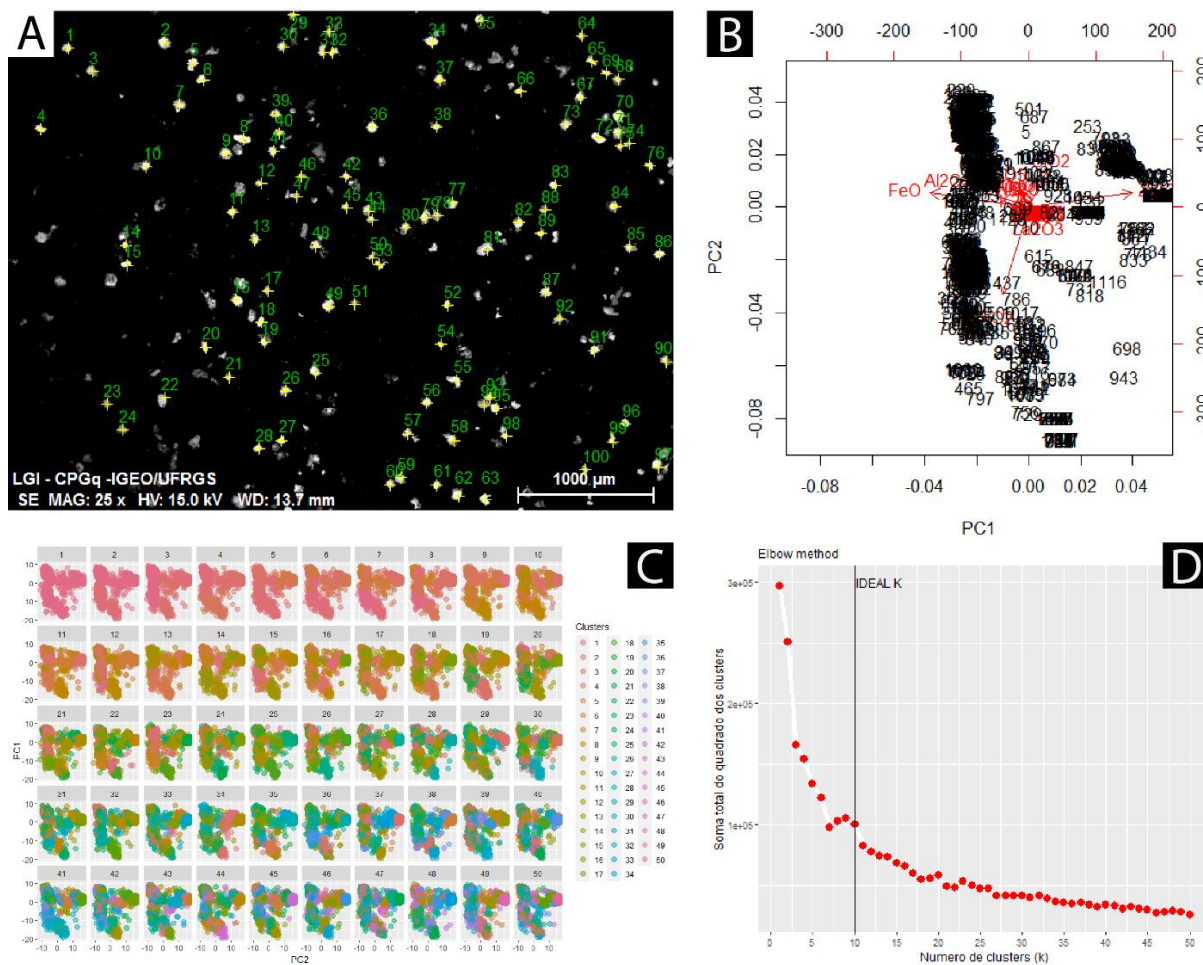


Fig. 16: metodologia proposta partindo da (A) aquisição dos dados por MEV/EDS, (B) análise de componentes principais (PCA), (C) simulação da *clusterização* pelo algoritmo *k-means* e (D) validação dos resultados pelo *elbow method*.

5 RESULTADOS

5.1 GEOLOGIA DA ÁREA

A Formação Piauí aflora com maior expressão na porção norte do município de Floriano, próximo ao limite com Amarante, estando sobreposta à Formação Poti. O contato de base não foi observado, por outro lado, o topo da Formação Piauí é recoberto pela Formação Pedra de Fogo em uma transição abrupta. Ocasionalmente, ocorre sotoposto à Formação Pastos Bons, em função da formação de um paleorelevo no hiato entre as unidades Paleozóicas e Mesozóicas e a subsequente deposição de sedimentos nas áreas baixas.

A figura 17 ilustra a área estudada e posição dos afloramentos e de amostragem. Dois afloramentos foram detalhados neste trabalho: BP-12 (amostra nomeada PR-05) e BP-18. Os demais pontos não foram visitados, todavia, dados de perfis colunares e correlações estratigráficas foram cedidos pelo projeto BIOCRO-NORTE, e reinterpretadas para o estudo.

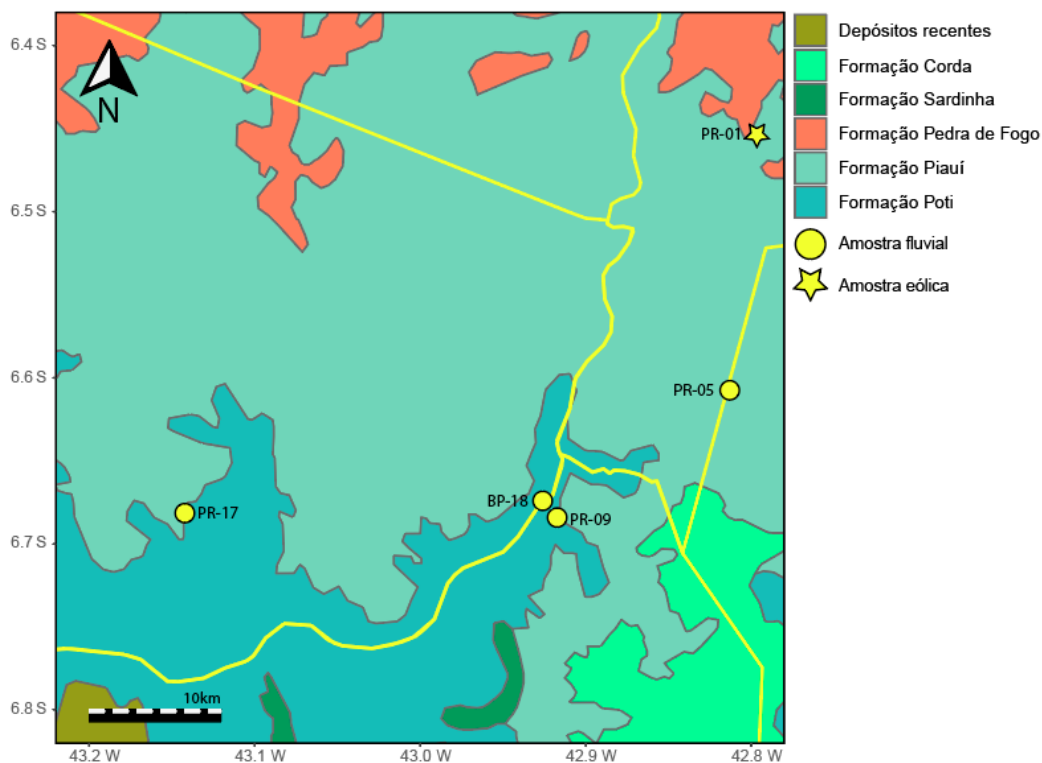


Fig. 17: Mapa de localização dos pontos onde foram coletadas amostras para o trabalho.

A Formação Piauí aflora na região como arenitos médios a grossos, moderadamente selecionados contendo seis fácies, com estratificações cruzadas tangencial (St), planar (Sp), sigmoidal (Ss) e eventualmente arenitos maciços (Sm). Também são observados conglomerados e arenitos conglomeráticos maciços (Sm) e com estratificação cruzada tangencial. Os pacotes se apresentavam majoritariamente com geometria tabular com 1-3m de espessura. Eventuais pacotes lenticulares eram observados associados aos arenitos com estratificação cruzada sigmoidal. O quadro 1 apresenta as fácies observadas e descritas. A associação de fácies foi interpretada como preenchimentos de canais fluviais com grande variação de energia de descarga.

Podem ser observados tanto estratificações cruzadas de regime de fluxo inferior (Sp, St, Ss), quanto de regime de fluxo superior (Sm), associado a canais efêmeros.

FÁCIES	ABREV.	DESCRIÇÃO	INTERPRETAÇÃO
Conglomerado maciço 	Gm	Conglomerado clasto suportado, maciço, com intraclastos lamosos angulares de tamanho grânulo a seixo e estruturas deformativas tipo ball and pillow	Sedimentação de fluxo hiper concentrado com arranque de clastos lamosos da base e fluidização dos estratos de base
Conglomerado com estratificação cruzada tangencial 	Gt	Conglomerado clasto suportado com estratificação cruzada tangencial, intraclastos lamosos e graníticos de tamanho grânulo a bloco. Grada progressivamente para fácies areníticas	Migração de formas de leito cascalhosas
Arenito maciço 	Sm	Arenito grosso a médio, com poucos grânulos, bem selecionado, maciço	Rápida e intensa deposição de fluxo hiper concentrado
Arenito com estratificação cruzada planar 	Sp	Arenito grosso a médio, com grânulos e seixos na base dos sets, moderadamente selecionado com estratificação cruzada planar	Migração de dunas subaquosas sob regime unidirecional
Arenito com estratificação cruzada tangencial 	St	Arenito grosso a médio, eventualmente cortados por finas camadas horizontais de conglomerado, bem selecionado, com estratificação cruzada tangencial	Migração de dunas subaquosas sob regime unidirecional
Arenito com estratificação cruzada sigmoidal 	Ss	Arenito grosso a fino, bem selecionado, disposto em corpos lobados com estratificação cruzada sigmoidal	Migração de dunas subaquosas na interfície entre regime inferior e superior gradando de suspensão para tração de sedimentos

Quadro 1: tabela de fácies descritas no trabalho de campo

No ponto BP-12 (figura 18), localizado às margens da BR-343, no km 562, entre os municípios de Floriano e Amarante, um corte de estrada aflorante na margem sudeste e noroeste se dispunha em aproximadamente 3 metros de altura distribuídos por mais de 20 metros de extensão lateral. Dois pacotes distintos são observados com um contato erosivo bem marcado entre eles: (a) um pacote inferior, com cerca de 2 m de altura apresenta arenitos médios, mal selecionados, com forte cimentação por calcita, identificado a partir da efervescência ao reagir com HCl, dispostos em corpos lenticulares que por vezes se truncam e em seu interior apresentam estratificações cruzadas tangenciais e subordinadamente estratificações cruzadas planares; e (b) um pacote superior composto por um arenito friável, maciço moderadamente selecionado. Em função da presença de clastos imbricado na base dos estratos e das formas de

leito lobadas e truncadas, o pacote inferior foi interpretado como um arenito fluvial de preenchimento de canal. O arenito maciço foi interpretado como a deposição de fluxo hiperconcentrado de regime superior.



Fig. 18: (a) Vista do corte sudeste do afloramento. É possível se observar o contato erosivo entre os dois pacotes marcado pelo tracejado branco. (b) Foto em destaque mostrando os dois pacotes.

O ponto BP-18 (figuras 19 e 20), localizado no município de Barão de Grajaú (MA), apresenta, às margens do Rio Parnaíba, um afloramento de 15m de altura por 50m de extensão lateral contendo estratos cruzados empilhados em sucessões granodecrescentes ascendentes. São cerca de 15 metros dispostos em quatro sets composto majoritariamente por pacotes de arenitos médios com aproximadamente 1m de altura delimitados por conglomerados suportados por matriz de grânulo a seixos principalmente de granitos arredondados. Na base do afloramento é possível identificar um conglomerado de intraclastos lamosos com estruturas *ball and pillow*. Também são destacadas camadas de clastos subarredondados, paralelos à horizontal interpretados como *lags* associados a depósitos de fluxo hiperconcentrado. Por vezes, a dominância de estratificação cruzada tangencial é cortada por corpos lobulares de espessura decimétrica e com poucos metros de extensão de arenitos

com estratificação cruzada sigmoidal ou estratificação cruzada planar – eventualmente com clastos marcando uma laminação granulométrica.

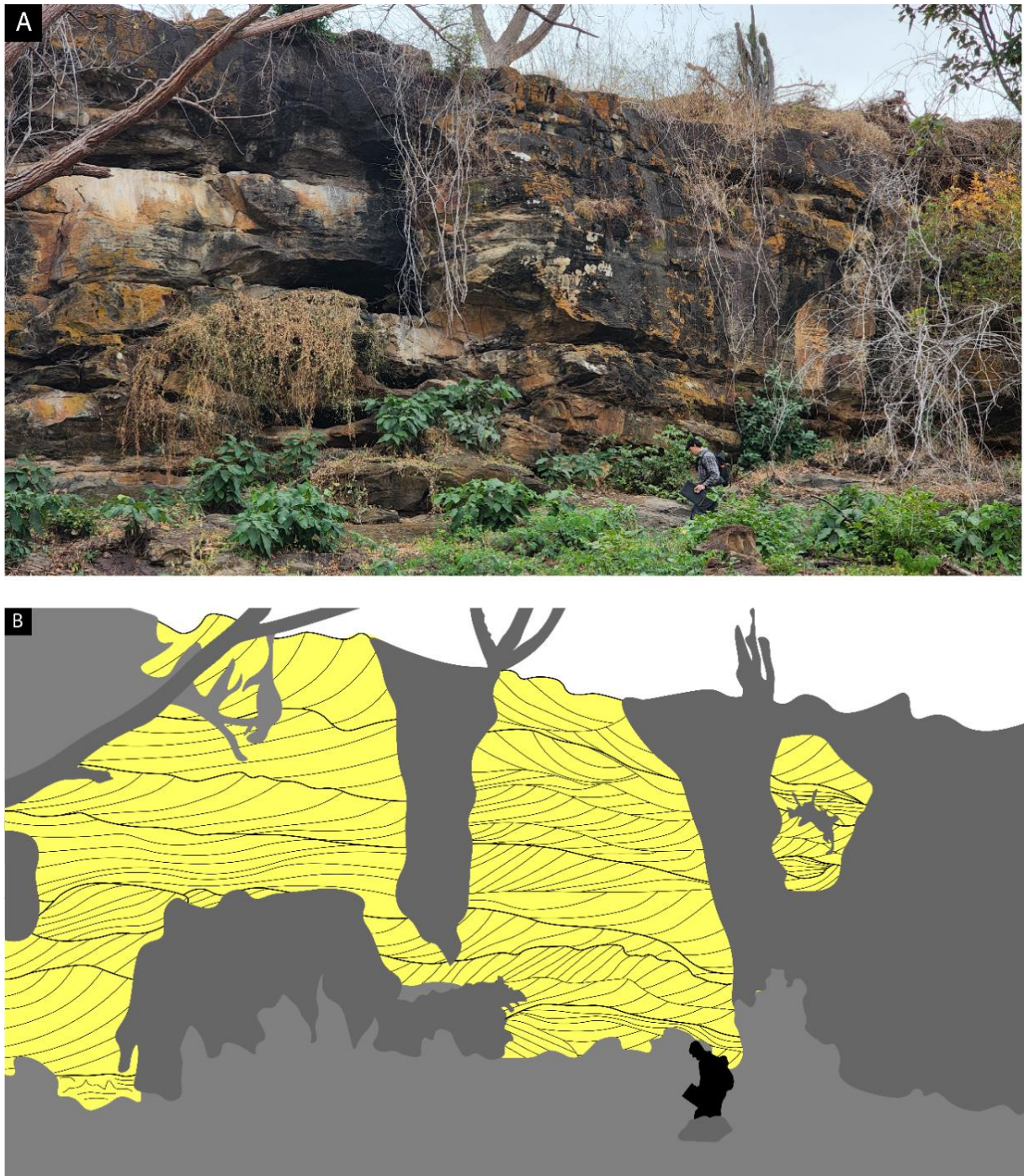


Fig. 19: (A) foto com vista geral do afloramento e (B) desenho sobreposto contendo as principais estruturas visualizadas e identificadas.



Fig. 20: (A) visão geral do afloramento com destaque da área da foto (B), destacando o conglomerado com intraclasto lamoso na base, lobo de estratificação cruzada sigmoidal e camadas conglomeráticas na porção superior. A foto (C) mostra uma fina camada de clastos orientados paralelos ao plano horizontal.

Destaca-se no ponto a presença de estruturas indicadoras de variação da intensidade do fluxo e do aporte hídrico no sistema. A presença de intraclastos lamosos com laminação convoluta e deformação *ball and pillow* indica uma súbita enxurrada seguida do arranque de porções semi-consolidadas do leito de um rio (KARIM, 2005). A presença de *lags* também indica períodos de hiperfluxo intercalados com relativa diminuição na energia de fluxo (MIALL, 1977).

Os perfis colunares da figura 21 foram esquematizados com base na nomenclatura de MIALL, (1977) e representam, respectivamente, os pontos BP-12 e BP-18 segundo a tabela de fácies do quadro 1.

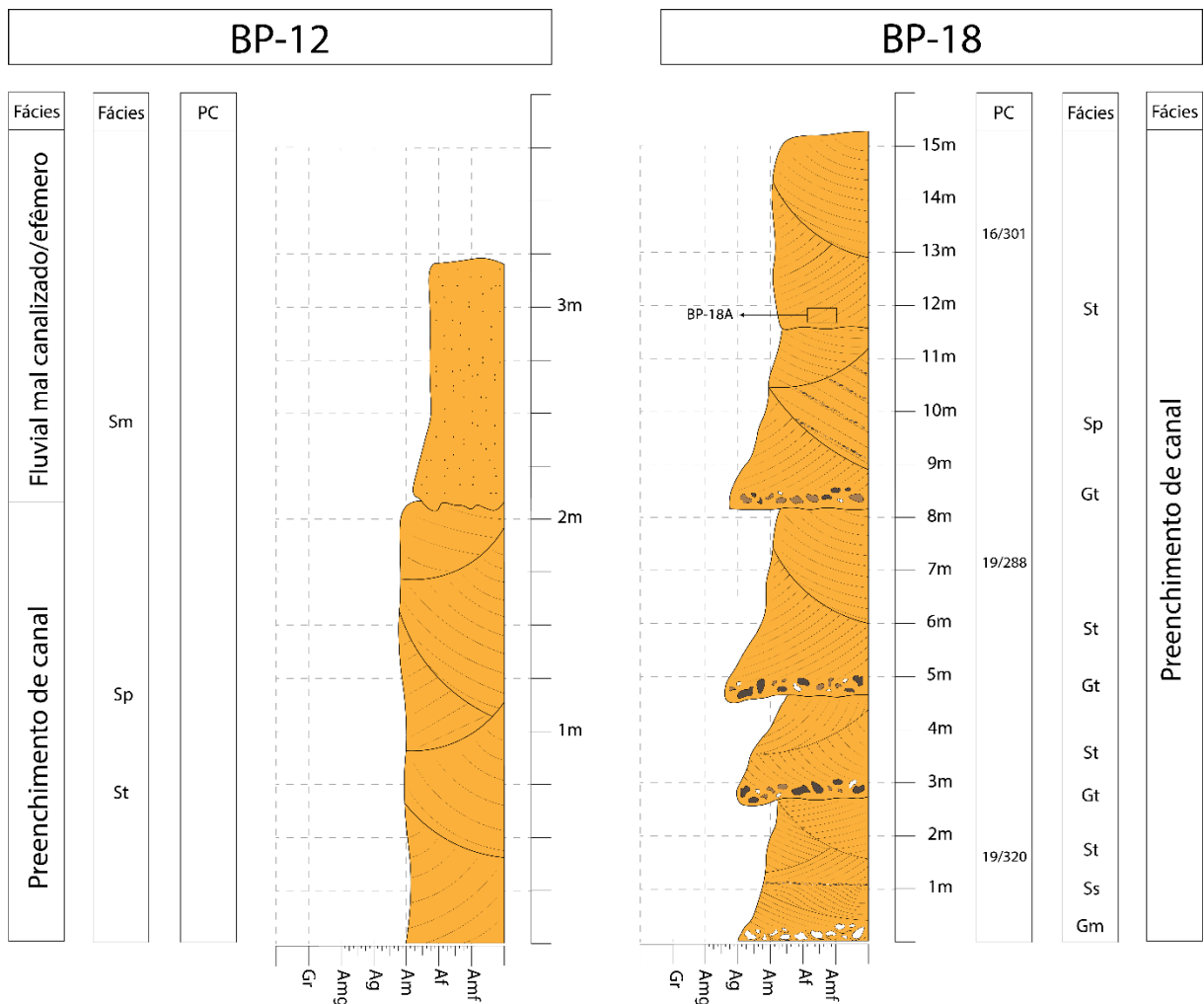


Fig. 21: perfis colunares levantados em campo.

5.2 PETROGRAFIA

Os resultados de petrografia demonstraram ampla predominância de arenitos finos a médios, quartzosos, contendo subordinadamente litoclastos vulcânicos e metamórficos e plagioclásio. Raramente são observados microclínio e muscovita. A presença de minerais pesados em lâmina delgada se resume à zircão, em frações de areia fina a muito fina, turmalina, monazita e granada nas frações areia fina e areia média. O diagrama dos arenitos (GARZANTI, 2019) (figura 22) classifica os arenitos como quartzosos (*pure-quartz*). Mais de 90% da composição clástica das amostras avaliadas são de quartzo monocristalino, com raros grãos policristalinos, seguidos de litoclastos predominantemente vulcânicos e subordinadamente litoclastos metamórficos de baixo grau. As amostras também apresentam uma laminação marcada pela alternância entre frações granulométricas de areia média a fina.

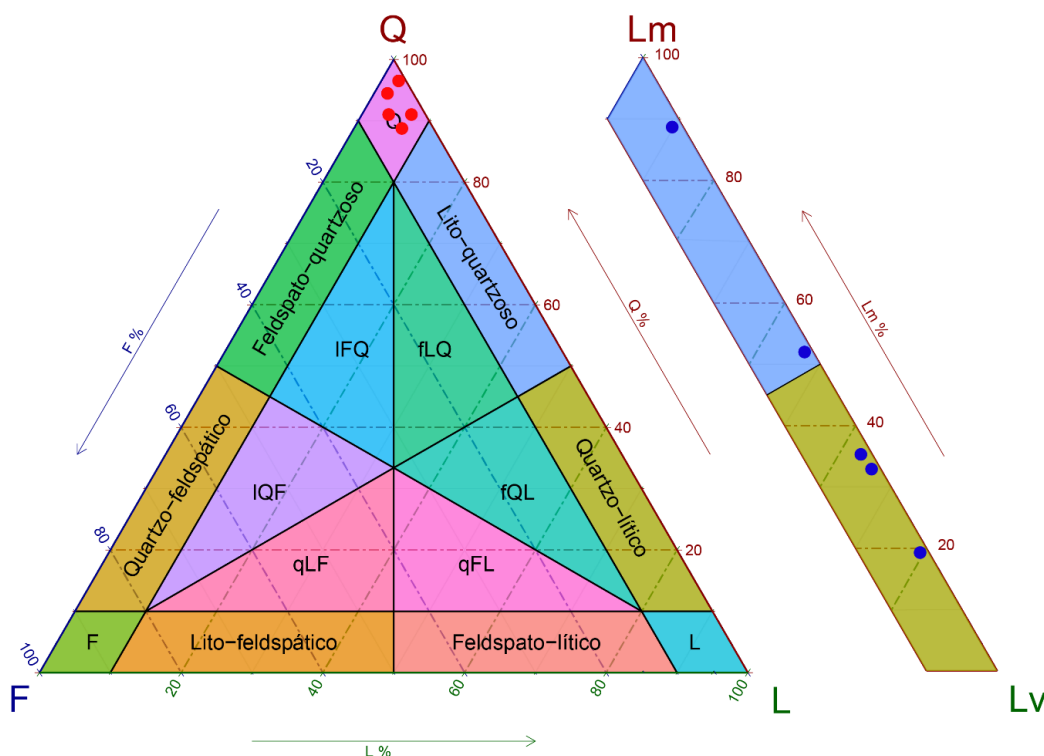


Fig. 22: classificação petrográfica das amostras segundo GARZANTI et al., (2019). Os vértices representam feldspato (F), quartzo (Q), líticos totais (L); a subdivisão lateral representa litoclastos metamórficos (Lm) e litoclastos vulcânicos (Lv).

O arenito eólico PR-01 apresenta valores de porosidade elevados se comparados aos fluviais, associado à dissolução parcial de grãos. E principalmente à manutenção do empacotamento frouxo, sem sobrecrescimentos ou cimentação de poros. A forma geral dos grãos é bem arredondada com esfericidade mediana a alta, com eventuais grãos alongados suborientados com contatos predominantemente longos e pontuais. Os processos diagenéticos que se destacam são sobrecrescimentos pontuais e pouco extensos de quartzo sintaxial, crescimento de cutículas de hematita recobrando grãos, oxidação e dissolução parcial de litoclastos vulcânicos.

Os arenitos fluviais são texturalmente e composicionalmente similares, O sobrecrescimento sintaxial de quartzo e a menor seleção dos grãos faz com que os espaços intergranulares sejam ocupados por grãos de areia fina a muito fina, reduzindo os valores de porosidade. A amostra PR-05 destaca-se pela má seleção, presença de cutículas de esmectita e hematita pré-compactação, sobrecrescimentos de quartzo, dissolução parcial de feldspatos e litoclastos. Eventualmente os contatos retos aparecem milimetricamente separados, indicando a lixiviação das argilas autigênicas alocadas entre os grãos. A amostra PR-09 destaca-se pelo amplo sobrecrescimento de quartzo sintaxial e cutículas de hematita tardias. A amostra PR-17 se destaca pela laminação marcada pela variação de granulometria, e a presença de esmectita autigênica e infiltrada em meniscos. Fica evidente nesta amostra a tendência da concentração dos minerais pesados, em especial do zircão, nas lâminas de areia fina. E por fim, a amostra BP-18 apresenta como destaque uma forte laminação marcada pela variação de granulometria e sobrecrescimentos de quartzo. A figura 23 apresenta a petrografia das amostras.

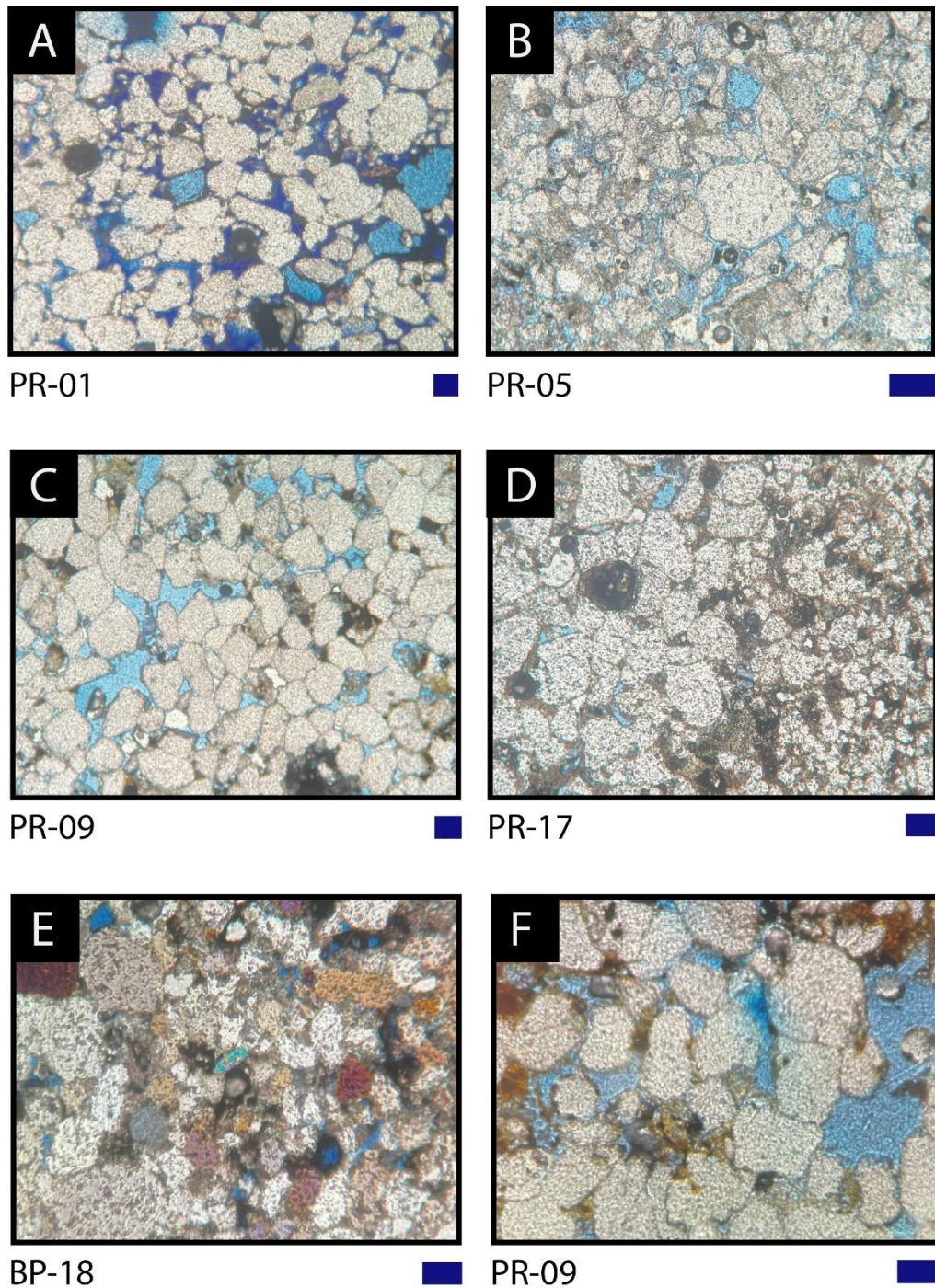


Fig. 23: fotomicrografia das lâminas delgadas. A destaca a seleção e arredondamento da amostra PR-01 (eólica); B destaca a má seleção da amostra PR-05; C destaca os sobrecrecimentos de quartzo sintaxial na amostra PR-09; D mostra a laminação marcada pela variação de granulometria da esquerda para a direita da lâmina; E destaca a morfologia e tamanho do zircão na amostra; F destaca a infiltração de argilas. A barra azul indica o comprimento de 100 μm .

5.3 PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR E MINERAIS PESADOS

O estudo dos minerais pesados da Formação Piauí se deu por duas vias: uma análise granulométrica; e uma análise de composição mineral. Os ensaios granulométricos realizados buscaram quantificar a assembleia de minerais pesados nas três frações selecionadas ($>180 \mu\text{m}$, $180 > \mu\text{m} > 100$ e $< 100 \mu\text{m}$). A avaliação por parte da concentração da fração de minerais pesados nos três intervalos selecionados permite a quantificação da assembleia de minerais pesados nas diferentes frações, permitindo observar os efeitos da seleção hidrodinâmica. A análise de composição química dos minerais busca obter a proporção de minerais pesados para cada amostra e fazer uma avaliação varietal com o objetivo de classificar minerais – neste caso a granada.

5.3.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS MINERAIS PESADOS

Os processos de transporte e deposição atuam diretamente na concentração de minerais pesados nas zonas de transferência e permanência de sedimentos. Para quantificar essa relação, os ensaios granulométricos, feitos pela pesagem das três diferentes frações de cada uma das cinco amostras após cada etapa da preparação, demonstrou dois padrões diferentes na distribuição granulométrica dos minerais pesados, observados na figura 24.

O primeiro padrão está presente na distribuição dos minerais pesados das amostras PR-01, PR-05 e PR-09 e é associado à seleção eólica e retrabalhamento fluvial, ocasionando a drenagem e escoamento dos minerais pesados presentes nas frações intermediária e fina, concentrando-se na fração grossa. Já o segundo padrão, que justamente se concentra na fração intermediária, está associado à captura dos minerais pesados drenados de montante. Especialmente se observa que as amostras PR-01, PR-05 e PR-09, relacionadas ao primeiro padrão, estão dispostas na porção leste da área de estudo, enquanto as estruturas do segundo padrão estão dispostas à oeste. Correlacionando-se as paleocorrentes WNW com as distribuições de minerais pesados das amostras PR-17 e BP-18, infere-se que estas se localizam à jusante, se comparadas com as demais. A concentração de minerais pesados na fração

depletada nas outras amostras demonstra que as condições hidrodinâmicas atuaram na seleção da fração granulométrica das amostras de *up-* para *downstream*.

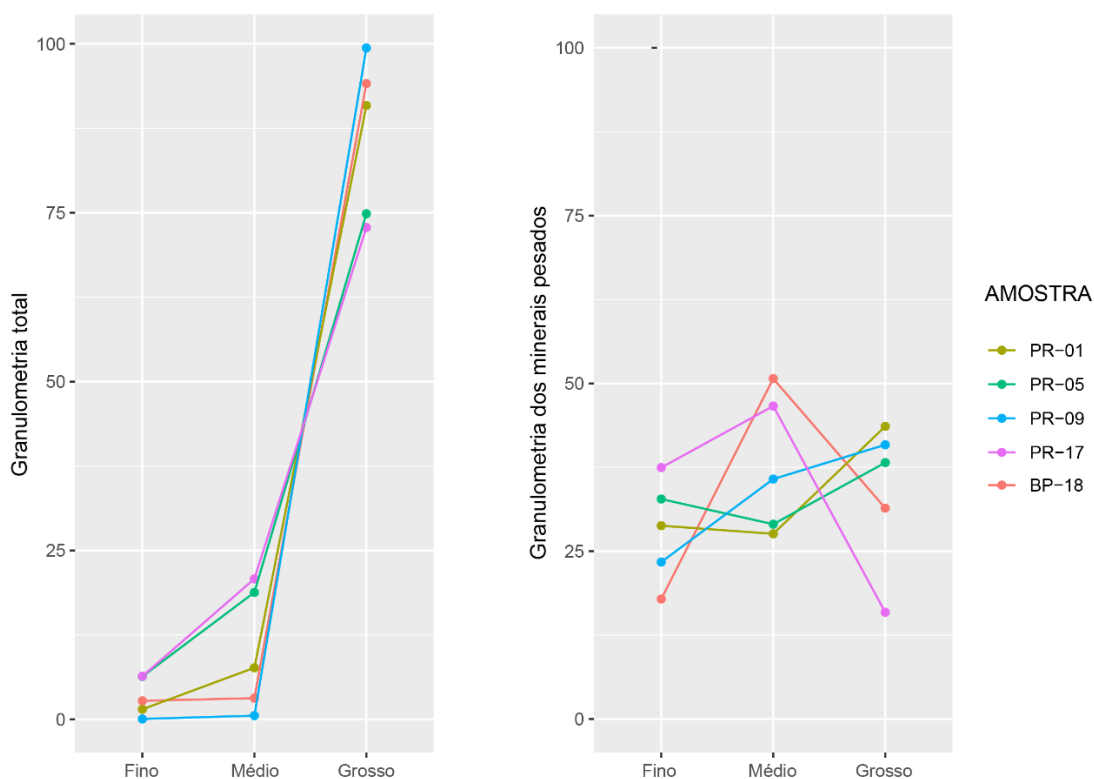


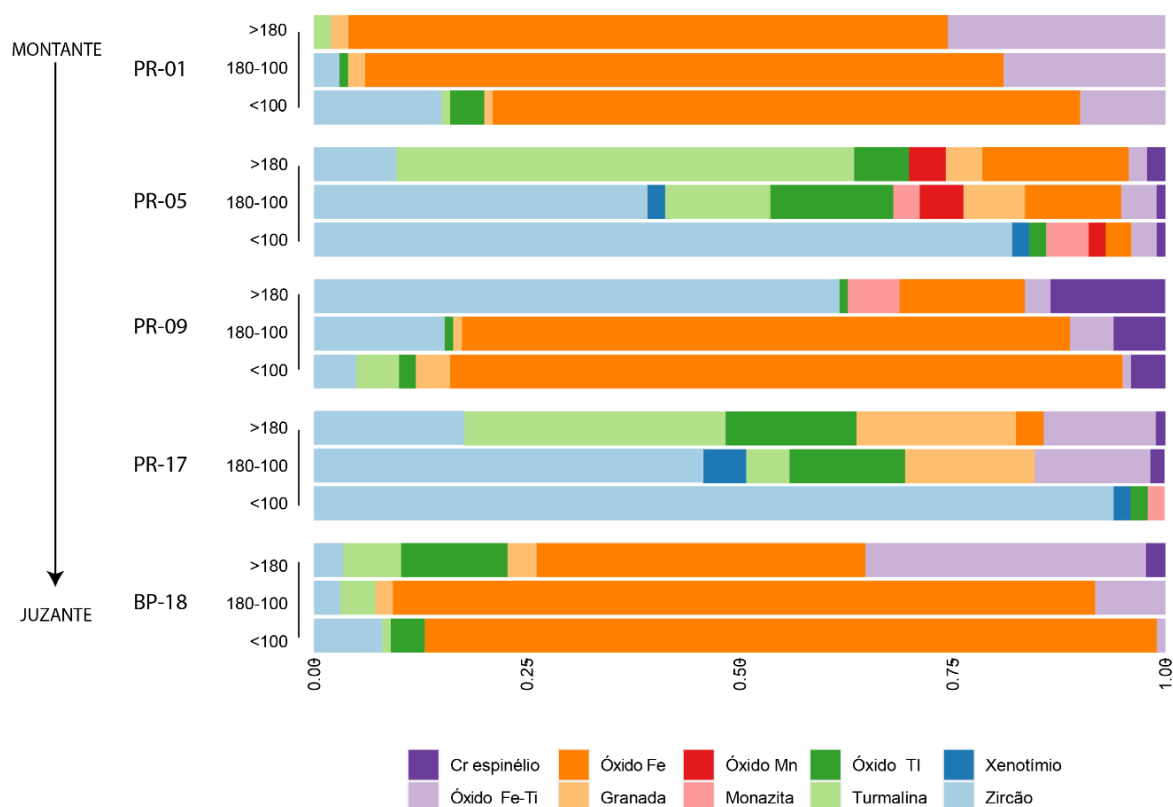
Fig. 24: (E) distribuição entre as frações fina (<100 μm), média (180-100 μm) e grossa (>180 μm) dentro de cada amostra; e (D) distribuição dos minerais pesados para cada fração da amostra.

5.3.2 DADOS COMPOSICIONAIS

A partir da análise de composição mineral por MEV/EDS de 1500 grãos dispostos em 15 lâminas e 40 *clusters* (agrupamentos por similaridade química), foram definidas 10 composições representativas: zircão, turmalina, granada, monazita, xenotímio, Cr espinélio e óxidos de Ti, Ti-Fe, Fe e Mn. As distribuições das populações podem ser vistas no gráfico da figura 25. Em geral, foi visto um predomínio de zircão e óxidos de Fe e Ti com valores crescentes da fração mais grossa para a fração mais fina.

Destaca-se que a assembleia de minerais pesados da amostra PR-01, e suas respectivas granulometrias, apresentam grande quantidade de óxidos em sua composição. Também se observa uma concentração semelhante de óxidos na

amostra BP-18 que, embora descrita e interpretada como fluvial com descargas de fluxo hiperconcentrado, representam uma porção mais distal, estando mais efetivamente suscetível à seleção hidráulica e transporte dos minerais ultradenso. Em regime de fluxo de maior energia, minerais pesados de maior densidade e resistência hidráulica que, com a queda da energia de fluxo, ficam aprisionados em barras de canal. O comportamento das diferentes frações é muito similar, alterando apenas a composição dos óxidos.



As amostras PR-05 e PR-17 também muito se assemelham, tanto pela concentração e distribuição de zircão na fração fina (< 100 μm), quanto pela maior concentração de turmalinas em relação às demais. Por fim, a amostra PR-09 apresenta uma concentração de zircão na fração mais grossa contrário ao padrão observado nas demais, e a presença marcante de Cr espinélio e monazita, presentes de maneira discreta nas demais amostras.

5.3.3 ANÁLISE VARIETAL DE MINERAIS PESADOS

A análise varietal de minerais pesados se atenta na quantificação da composição de diferentes espécies de um mesmo grupo mineral para estabelecer correlações com áreas fontes de assinaturas específicas. Para compreender o controle no tamanho de grão e diferenciar fontes distintas de sedimentação do retrabalhamento local, foram comparadas a composição das granadas (figura 26). Utilizando os diagramas de MANGE E MORTON (2007), classificaram-se as granadas majoritariamente provindas de granitóides e rochas sedimentares de baixo grau (Bi e Bii, respectivamente) com uma menor contribuição de rochas metamórficas de alto grau (A) e metaultramáficas (Ci). Nota-se que a diferença de composição não varia junto à diferença de tamanho de grão. Não havendo uma diferença composicional substancial para a diferenciação, conclui-se que o que o principal controle do tamanho de grão das amostras é a própria seleção hidráulica, e não fontes diferentes de sedimentação com tamanhos de grão distintos.

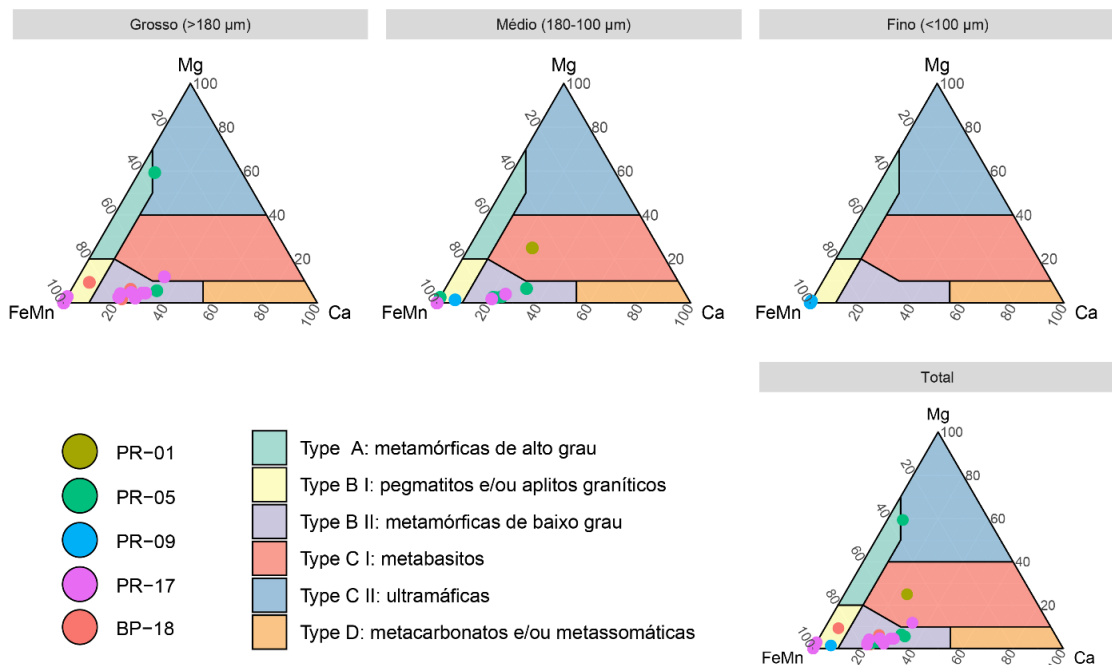


Fig. 26: diagramas ternários de composição de granadas (n=90) em relação aos seus membros extremos ricos em MgO, FeO_{total} + MnO e CaO.

6 DISCUSSÕES

O principal sistema petrolífero na Bacia do Parnaíba está associado ao sistema Pimenteiras-Cabeças, com produção secundária das formações Tianguá e Longá. Porém, as propriedades de reservatório da Formação Piauí podem constituir um reservatório hipotético (.) (ALMEIDA, 2013) através do armazenando recursos nos depósitos de dunas do topo. As condições para isso se dão pelo balizamento entre as camadas de silicretes associados aos processos eodiagenéticos dos arenitos fluviais na base, e acima pelos evaporitos silicificados da Formação Pedra de Fogo. Rotas de migração geradas pela reativação de falhas associadas ao lineamento Transbrasiliano poderiam atuar como rotas de migração, conduzindo, principalmente gás, da Formação Pimenteiras.

As relações de campo observadas denotam que a Formação Piauí na região de Floriano (PI) mostra que dominavam processos de transporte e deposição fluviais de fluxo variável com descargas hiperconcentradas. As paleocorrentes observadas (NW) coincidem com as paleocorrentes eólicas descritas por KIFUMBI et al. (2022), indicando que os rios cortavam as dunas e drenavam em direção ao oceano Panthalassa, que avançava sobre as bacias do Amazonas e Solimões. A orientação da vazão dos rios pode ser explicada pela migração do depocentro da Bacia para oeste (VAZ et al., 2007), forçando o escoamento na região de Floriano (SE da Bacia) para NW. A paleocorrente eólica é controlada pelo padrão de ventos globais dos *easterlies* ocasionados pela expansão de células atmosféricas polares em um período de expansão das calotas polares (KIFUMBI et al., 2022).

As condições diagenéticas indicam um ambiente de eodiagênese continental sobre clima seco, assinalado pelos sobrecrescimentos de quartzo precoce (THIRY E MILLOT, 1987), formação de cutículas de hematita e a presença de esmectita autigênica e infiltrada (WALKER, 1978). Também é evidenciada a oxidação de litoclastos vulcânicos, cedendo íons para a precipitação de óxidos de ferro como cutículas de hematita. Sobrecrescimentos mesodiagenéticos de quartzo sintaxial também são observados, ultrapassando as cutículas de hematita. No processo de telodiagênese telodiagênese, é observada uma intensa dissolução de feldspatos detríticos e a remoção de cutículas de esmectita. Nas amostras fluviais, as condições

de diagênese interferem na preservação da porosidade e permeabilidade. O abundante sobrecrescimento precoce de quartzo acaba por obstruir os espaços vazios. Por outro lado, a extensa formação de cutículas de hematita precoce, somada à menor influência de processos diagenéticos, acaba por preservar a porosidade primária encontrada na rocha.

Por meio da análise granulométrica, ficou constatado que as amostras extraídas da Formação Piauí são classificadas como arenitos finos a grossos, com uma maior contribuição da classe $> 180 \mu\text{m}$ seguidos pela classe entre 180 e $100 \mu\text{m}$ e a classe de $100 \mu\text{m}$, respectivamente. Esse comportamento dificilmente se reflete na assembleia de minerais pesados. As amostras mais proximais PR-01 (eólica) e PR-05 (fluvial) demonstraram uma concentração de minerais pesados na fração grossa e na fração fina com escassez na fração intermediária. A amostra intermediária gerada por descargas episódicas de alta energia PR-09 apresenta uma maior concentração de minerais pesados na fração mais grossa, muito similar ao comportamento do total dos grãos. Por fim, as amostras mais distais apresentam uma maior concentração na fração intermediária como produto final da seleção hidráulica causada pela drenagem de *up* para *downstream*.

Os dados de química mineral permitiram quantificar e definir 10 espécies de minerais pesados presentes nas amostras utilizadas no trabalho. Ao avaliar a similaridade na composição química de granadas e comparar as diferentes granulometrias nas cinco amostras, percebeu-se que a fonte de geração de sedimentos se mantém com a mesma assinatura, indicando que processos de transporte, seleção e retrabalhamento atuam com maior vigor sob a Formação Piauí na seleção da assembleia de minerais pesados do que a proveniência de diferentes fontes. A partir de granadas, foi constatado que a principal fonte de sedimentação da Bacia do Parnaíba durante o Pennsylvânico foram de granitóides e rochas metamórficas de baixo grau, com menor contribuição de rochas metamórficas de alto grau e metaultramáficas – fato reforçado pela presença de Cr espinélio em poucas amostras.

Adicionando-se os dados coletados em campo: paleocorrentes predominantemente apontando para NW, compreende-se que os processos de

transportes de sedimentos eram movidos por dois motores principais: os ventos gerados pela expansão das células convectivas atmosféricas polares em função de um período de *icehouse* com calotas de gelo dispersas em regiões de altas altitudes em latitudes de até 30° S; e drenagens que escoavam para NW e cortavam os campos de dunas, trazendo sedimentos de altos topográficos a E-SE e retrabalhando os sedimentos locais. O início da formação do Gondwana durante o Pennsylvaniano acabou alterando a configuração da Bacia do Parnaíba. A formação da Orogenia Herciniana/Alleghaniana e o consequente soerguimento de porções a NW onde hoje se localizam a Província da Borborema e do Cráton São Francisco qualifica os dois blocos como possíveis fontes de sedimentação, além do retabalhamento intrabacinal, para a porção sudoeste da bacia, próximo à Floriano. (figura 27).

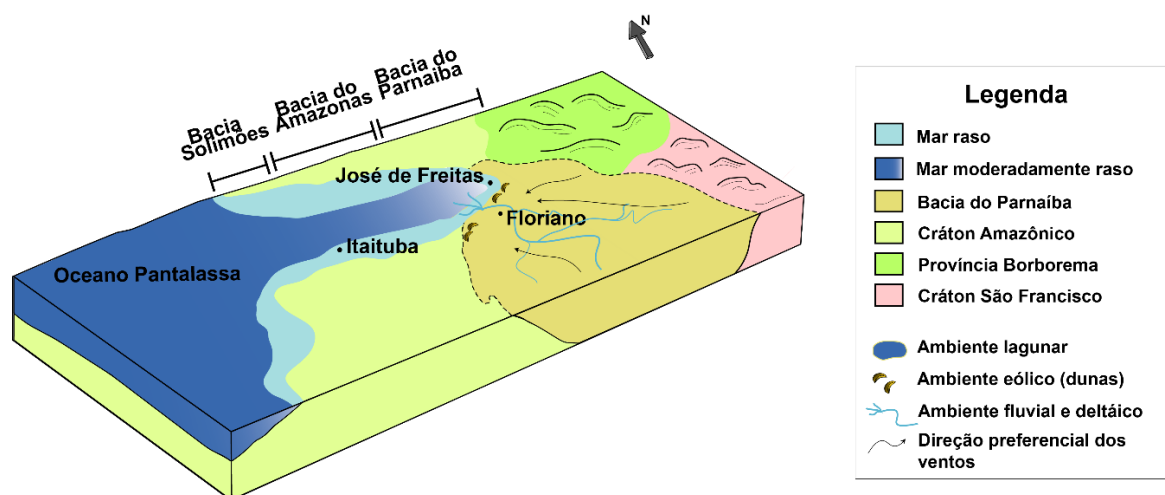


Fig. 27: modelo evolutivo da Bacia do Parnaíba durante o Pennsylvaniano. O avanço do Mar Itaituba-Piauí chega a José de Freitas, mas não alcança a cidade de Floriano. Adaptado de (PADILHA et al., 2022), retirado de (MEDEIROS, 2020).

Os estudos de proveniência estão sujeitos a muitas interpretações deturpadas. Os controles de sedimentação apresentam caráter fortemente local, tendo notável mudança lateral e vertical, o que impede a interpretação e geração de um modelo deposicional para toda a bacia com base no banco de dados do presente trabalho. Todavia, unindo os dados de petrografia, estratigrafia e química mineral, pode-se compreender a região como um campo de dunas com constante diminuição na oferta sedimentar da base para o topo. Amostras de base (PR-05) apresentam

características de granulometria grossa, concentração de zircão na fração fina e grande variedade mineral nas frações intermediárias e grossas, com crescente aumento na quantidade de óxidos ao se deslocar à jusante (PR-09). Amostras intermediárias apresentam uma redução constante na variedade de grupos minerais concentrando em zircão fortemente retrabalhando (PR-17) e óxidos (BP-18). No topo da sequência, com aridização avançada, diminuição dos processos de erosão e transporte fluviais, o sistema passa a perder sedimentos, não sendo capaz de repor na mesma velocidade, em função da baixa capacidade de geração e mobilização de sedimentos do vento (PR-01). Muitos dos minerais pesados já foram remobilizados e a diagênese continental de clima seco favorece a formação de cutículas de óxidos de Fe, Ti. A figura 28 sintetiza o trabalho e apresenta os resultados final.

7 CONCLUSÃO

Por meio de estudos sedimentológicos, diagenéticos e granulométricos, fica constatado que a Formação Piauí na região de Floriano (PI) se trata de uma sucessão flúvio-eólica composta por arenitos quartzosos com diagênese continental rasa de clima seco. A proveniência da unidade baseada na geoquímica de granadas indica que terrenos metamórficos atuaram como principal fonte de sedimentos, com menor contribuição de rochas ultramáficas e graníticas. Os dados coletados se alinham com propostas de outros trabalhos realizados na formação e na região, tanto em relação à associação de fácies, dados de paleocorrente e petrografia quanto à assembleia de minerais pesados da Formação Piauí. Dados de MEV/EDS de granadas são inovadores para a região e mostraram ser uma ferramenta capaz de contribuir para a compreensão da relação entre processos de retrabalhamento e seleção hidráulica de grãos e novas fontes de sedimentação.

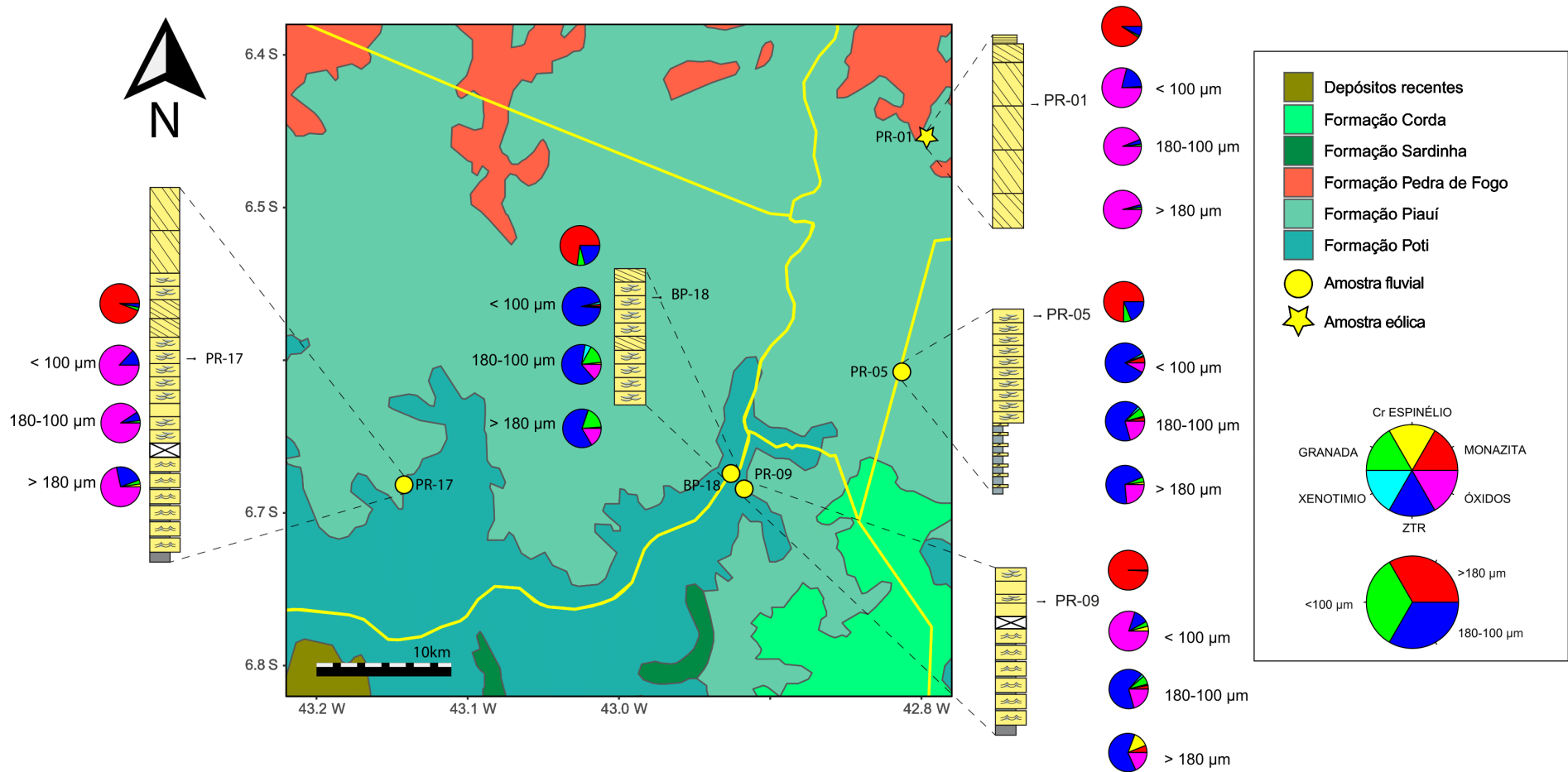


Fig. 28: representação da distribuição das amostragens nos perfis e a proporção das frações granulométricas e concentração dos minerais pesados

REFERÊNCIAS

- Abrantes, F. R., Nogueira, A. C. R., & Soares, J. L. (2016). Permian paleogeography of west-central Pangea: Reconstruction using sabkha-type gypsum-bearing deposits of Parnaíba Basin, Northern Brazil. *Sedimentary Geology*, *341*, 175–188. <https://doi.org/10.1016/J.SEDGEO.2016.06.004>
- Aitchison, J., Barceló-Vidal, C., Martín-Fernández, J. A., & Pawlowsky-Glahn, V. (2000). Logratio Analysis and Compositional Distance 1. *Mathematical Geology*, *32*(3).
- Allen, P. A. (2008). Time scales of tectonic landscapes and their sediment routing systems. *Geological Society Special Publication*, *296*, 7–28. <https://doi.org/10.1144/SP296.2>
- Allen, P. A. (2017). *Sediment Routing Systems: The Fate of Sediment from Source to Sink - Philip A. Allen - Google Livros*. https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=8h0xDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR9&dq=allan+2017+sediment+routing+system&ots=A6m_V-RazG&sig=FMOGK26x8z_e3aNmnkjP4rBRtPA#v=onepage&q=allan%202017%20sediment%20routing%20system&f=false
- Almeida, C. H. O. de. (2013). Interpretação de dados de poço e linha sísmica 2D na Bacia do Parnaíba, região de Floriano - oeste do Estado do Piauí. *Universidade Federal Do Rio de Janeiro*, *7*(1), 343–354. <https://doi.org/10.2/JQUERY.MIN.JS>
- Alves De Souza, P., & Borghi, L. (2010). *PALINOLOGIA DA FORMAÇÃO PIAUÍ, PENSILVANIANO DA BACIA DOPARNAÍBA: BIOCRONOESTRATIGRAFIA DE INTERVALO SELECIONADO DO DOPOÇO 1-UN-09-PI (CAXIAS, MA, BRASIL)*. <https://doi.org/10.4072/rbp.2010.1.07>
- Andò, S., Garzanti, E., Padoan, M., & Limonta, M. (2012). Corrosion of heavy minerals during weathering and diagenesis: A catalog for optical analysis. *Sedimentary Geology*, *280*, 165–178. <https://doi.org/10.1016/J.SEDGEO.2012.03.023>

- Araújo, R. N., Nogueira, A. C. R., Bandeira, J., & Angélica, R. S. (2016). Shallow lacustrine system of the Permian Pedra de Fogo Formation, Western Gondwana, Parnaíba Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 67, 57–70. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMMES.2016.01.009>
- Basu, A. (2017). Evolution of Siliciclastic Provenance Inquiries: A Critical Appraisal. *Sediment Provenance: Influences on Compositional Change from Source to Sink*, 5–23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803386-9.00002-2>
- Berner, R. A., & Kothavala, Z. (2001). Geocarb III: A Revised Model of Atmospheric CO₂ over Phanerozoic Time. *American Journal of Science*, 301(2), 182–204. <https://doi.org/10.2475/AJS.301.2.182>
- Bertolini, G., Hartley, A. J., Marques, J. C., & Paim, J. C. (2023). Controls on grain-size distribution in an ancient sand sea. *Sedimentology*. <https://doi.org/10.1111/SED.13077>
- Cacama, M., Sá, E., USP, F. L.-G., & 2015, undefined. (2015). Assinatura estrutural e geofísica da porção norte (fronteira Ceará-Piauí) do Lineamento Transbrasiliiano: reativação na Bacia do Parnaíba. *Revistas.Usp.Br*. <https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/download/110248/108810/198037>
- CANT, D. J., & WALKER, R. G. (1978). Fluvial processes and facies sequences in the sandy braided South Saskatchewan River, Canada. *Sedimentology*, 25(5), 625–648. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3091.1978.TB00323.X>
- Caracciolo, L. (2020). Sediment generation and sediment routing systems from a quantitative provenance analysis perspective: Review, application and future development. *Earth-Science Reviews*, 209. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2020.103226>
- Corral, L., Ponciano, M. O., & Fávera, J. C. della. (2009). *Flood-dominated fluvio-deltaic system: a new depositional model for the Devonian Cabeças Formation, Parnaíba Basin, Piauí, Brazil*. 81(4), 769–780. www.scielo.br/aabc
- Corrêa-Martins, F. J., Mendes, J. C., Bertolino, L. C., & Mendonça, J. de O. (2019). PETROGRAFIA, DIAGÊNESE E CONSIDERAÇÕES SOBRE PROVENIÊNCIA DA FORMAÇÃO ITAPECURU NO NORTE DO MARANHÃO (CRETÁCIO

- INFERIOR, BACIA DO PARNAÍBA, NE BRASIL). *Anuário Do Instituto de Geociências*, 41(3), 514–530. https://doi.org/10.11137/2018_3_514_530
- Dalrymple, R. W. (Robert W., James, N. P., & Geological Association of Canada. (2010). *Facies models 4*. Geological Association of Canada.
- de Almeida Santos, F. L., Nascimento, F. R. Do, & Claudino-Sales, V. de. (2020). Ciclo dos supercontinentes e reflexos morfoestruturais no Noroeste do Ceará/Brasil. *Ateliê Geográfico*, 14(2), 67–90. <https://doi.org/10.5216/AG.V14I3.63793>
- de Lima, F. G. F. (2017). *Vista do Controle estrutural da borda sudeste da Bacia do Parnaíba, Nordeste do Brasil: relação com eventos geodinâmicos no Gondwana*. <https://www.revistas.usp.br/guspsc/article/view/139608/134909>
- di Pasquo, M., & Ianuzzi, R. (2015). *Paleobotanical studies in late Palaeozoic deposits from South America View project Heterogeneidades na qualidade do registro fóssil e aplicações para a geologia View project*. <https://www.researchgate.net/publication/272487347>
- Dias, S.K.R., Soares, J.L., Scmazzon, A.K., Medeiros, R.S.P. de, Nascimento, S. *Taxonomic revision of conodonts of Piauí Formation, Parnaíba Basin, updating to late Bashkirian age and biostratigraphic – paleoecologic correlation with the Itaituba Formation, Amazonas Basin*. *Journal of South American Earth Sciences*, 2022, 103750, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103750>.
- Dickinson, W. R., & Suczek, C. (1979). Plate Tectonics and Sandstone Compositions. *AAPG Bulletin*, 63(12), 2164–2182. <https://doi.org/10.1306/2F9188FB-16CE-11D7-8645000102C1865D>
- Dunham, R. J. (1962). *Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures*. 38, 108–121. <http://archives.datapages.com/data/specpubs/carbona2/data/a038/a038/0001/0100/0108.htm>
- Flavio, F., de Almeida, M., Bley De Brito Neves, B., Dal, C., & Carneiro, R. (2000). The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*, 50, 77–111. www.elsevier.com/locate/earscirev
- Garzanti, E. (2019). Petrographic classification of sand and sandstone. *Earth-Science Reviews*, 192, 545–563. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2018.12.014>

- Garzanti, E., & Andò, S. (2019). *Heavy Minerals for Junior Woodchucks*.
<https://doi.org/10.3390/min9030148>
- Garzanti, E., Andò, S., Vezzoli, G., Lustrino, M., Boni, M., & Vermeesch, P. (2012). Petrology of the Namib Sand Sea: Long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta. *Earth-Science Reviews*, 112(3–4), 173–189. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2012.02.008>
- Grahn, Y., & Caputo, M. v. (1992). Early Silurian glaciations in Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 99(1–2), 9–15. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90003-N](https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90003-N)
- Henry, D. J., & Guidotti, C. v. (1985). Tourmaline as a petrogenetic indicator mineral: an example from the staurolite-grade metapelites of NW Maine. In *American Mineralogist* (Vol. 70). http://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-pdf/70/1-2/1/4217229/am70_1.pdf
- Hérissé, L., & Hérissé, L. A. (2001). *PALYNOLOGICAL CHARACTERIZATION AND DATING OF THE TIANGUÁ FORMATION, SERRA GRANDE GROUP, NORTHERN BRAZIL*.
- Hollanda, M. H. B. M., Góes, A. M., & Negri, F. A. (2018). *Provenance of sandstones in the Parnaíba Basin through detrital zircon geochronology*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.c.4129214>
- Ingersoll, R. v., & Dickinson, W. R. (1981). *Great Valley Group (Sequence), Sacramento Valley, California*. 1–33.
- Isbell, J. L., Henry, L. C., Gulbranson, E. L., Limarino, C. O., Fraiser, M. L., Koch, Z. J., Ciccio, P. L., & Dineen, A. A. (2012). Glacial paradoxes during the late Paleozoic ice age: Evaluating the equilibrium line altitude as a control on glaciation. *Gondwana Research*, 22(1), 1–19. <https://doi.org/10.1016/J.GR.2011.11.005>
- Júnior, F. R. A., & Nogueira, A. C. R. (2013). Reconstituição paleoambiental das formações Motuca e Sambaíba, Permo-Triássico da Bacia do Parnaíba no sudoeste do Estado do Maranhão, Brasil. *Geologia USP - Serie Científica*, 13(3), 65–82. <https://doi.org/10.5327/Z1519-874X201300030007>

- Karim, K. H. (2005). *Origin of Ball and Pillow-like Structures in Tanjero and Kolosh Formations in Sulaimaniya area, NE-Iraq Changing of the Sanandij-Sirjan Zone from continental block or Island Arc to deep depositional basin View project*. <https://www.researchgate.net/publication/271845536>
- Kifumbi, C., Marlon dos Santos Scherer, C., Galvão de Souza, E., Domingos dos Reis, A., Formolo Ferronato, J. P., & Dalla Lana Michel, R. (2022). Late Pennsylvanian aridification in Gondwana mid-latitudes contemporaneous to high-latitudes ice cap expansion, upper Piauí Formation, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 117. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2022.103840>
- Lima Filho, F. P. (1991). *Fácies e ambientes deposicionais da Formação Piauí (Pensilvaniano), Bacia do Parnaíba*. <https://doi.org/10.11606/D.44.1991.TDE-25092015-155651>
- LOBOZIAK, S. (1992). *Middle Devonian to lower Carboniferous miospore stratigraphy in the central Parnaíba Basin (Brazil)*. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/142088/1/Loboziak%20etal%201992%20Ann%20SGB%2020111108125348425.pdf>
- Lopes Padilha, N., Bertolini, G., Marques, J. C., Góes, A. M., César, A., Nogueira, R., Paiva De Medeiros, R. S., Saturnino De Andrade, L., De Assis, A., Sodré, N., Canarim, D. M., Souza, P. A., Scomazzon, A. K., Oliveira, J., Miguel, J., & Santos, M. (2022). ZIRCÃO, O GUARDIÃO DO TEMPO: DATAÇÃO U-PB APLICADA À PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR-REVISÃO METODOLÓGICA E UTILIDADE NO PROJETO BIOCRONORTE. *Revista Da Academia de Ciências Do Piauí*, 3(3), 157–176.
- Mange, M. A., & Maurer, H. F. W. (1992). *Heavy Minerals in Colour*. 160.
- Mange, M. A., & Morton, A. C. (2007). Chapter 13 Geochemistry of Heavy Minerals. *Developments in Sedimentology*, 58, 345–391. [https://doi.org/10.1016/S0070-4571\(07\)58013-1](https://doi.org/10.1016/S0070-4571(07)58013-1)
- Miall, A. D. (1977). A review of the braided-river depositional environment. *Earth Science Reviews*, 13(1), 1–62. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(77\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0012-8252(77)90055-1)

- Miall, A. D. (1985). Architectural-element analysis: A new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth Science Reviews*, 22(4), 261–308. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(85\)90001-7](https://doi.org/10.1016/0012-8252(85)90001-7)
- Miall, A. D. (1988). *Facies Architecture in Clastic Sedimentary Basins* (pp. 67–81). Springer, New York, NY. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3788-4_4
- Michel, R. D. L. (2021). *ARQUITETURA DE FÁCIES E EVOLUÇÃO ESTRATIGRÁFICA DE SISTEMA EÓLICO ÚMIDO – FORMAÇÃO PIAUÍ, PENNSILVANIANO DA BACIA DO PARNAÍBA*.
- Milani, E. J., & Zalán, P. V. (1999). An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. *Episodes*, 22(3), 199–205. <https://doi.org/10.18814/EPIIUGS/1999/V22I3/007>
- Morton, A. C. (1985). Heavy minerals in provenance studies. *Provenance of Arenites. Proc. Cetraro, Cosenza, 1984*, 249–277. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2809-6_12/COVER
- Morton, A. C., & Hallsworth, C. (1994). Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones. *Sedimentary Geology*, 90(3–4), 241–256. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90041-8)
- Mountney, N. P. (2006). Eolian Facies Models. *Facies Models Revisited*, 19–83. <https://doi.org/10.2110/PEC.06.84.0019>
- Nascimento, S., Karolyne, S., Dias, R., Moutinho, L. P., & Scomazzon, A. K. (2022). OCORRÊNCIA DE CONODONTES E FORAMINÍFEROS BENTÔNICOS NO BASHKIRIANO DA FORMAÇÃO PIAUÍ, GRUPO BALSAS, BACIA DO PARNAÍBA. *Revista Da Academia de Ciências Do Piauí*, 3(3). <https://doi.org/10.29327/261865.3.3-15>
- ORTON, G. J., & READING, H. G. (1993). Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. *Sedimentology*, 40(3), 475–512. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3091.1993.TB01347.X>
- Ponciano, L. C. M. de O., de Castro, A. R. de S. F., da Fonseca, V. M. M., & Machado, D. M. da C. (2012). Tafocenoses da Formação Pimenteira, devoniano da Bacia do Parnaíba, Piauí: mapeamento, inventário e relevância patrimonial. *Anuário Do Instituto de Geociências*, 35(1), 5–27. https://doi.org/10.11137/2012_1_05_27

- Scherer, C. dos S., & Ros, L. de. (n.d.). Heterogeneidades dos reservatórios flúvio-eólicos da Formação Sergi na Bacia do Recôncavo. *Researchgate.Net*. Retrieved February 21, 2023, from https://www.researchgate.net/profile/Luiz-De-Ros/publication/288138486_Heterogeneities_of_the_fluvial-eolian_reservoirs_of_the_Sergi_Formation_Reconcavo_Basin/links/56c628cb08ae0d3b1b60386b/Heterogeneities-of-the-fluvial-eolian-reservoirs-of-the-Sergi-Formation-Reconcavo-Basin.pdf
- Sol, R., & De Medeiros, P. (2020). *O PENNSILVANIANO DA BACIA DO PARNAÍBA, NORTE DO BRASIL: IMPLICAÇÕES PALEOAMBIENTAIS, PALEOGEOGRÁFICAS E EVOLUTIVAS PARA O GONDWANA OCIDENTAL*.
- Stanistreet, I. G., & Stollhofen, H. (2002). Hoanib River flood deposits of Namib Desert interdunes as analogues for thin permeability barrier mudstone layers in aeolianite reservoirs. *Sedimentology*, 49(4), 719–736. <https://doi.org/10.1046/J.1365-3091.2002.00458.X>
- Tenório Vaz, P., das Graças de Andrade da Mata Rezende, N., Ribeiro Wanderley Filho, J., & Antônio Silva Travassos, W. (2007). *Bacia do Parnaíba* (Issue 2).
- Thiry, M., & Millot, G. (1987). *MINERALOGICAL FORMS OF SILICA AND THEIR SEQUENCE OF FORMATION IN SILCRETES*.
- Vermeesch, P., Resentini, A., & Garzanti, E. (2016). An R package for statistical provenance analysis. *Sedimentary Geology*, 336, 14–25. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.01.009>
- Vieira, L. V., & Scherer, C. M. dos S. (2017). Facies architecture and high resolution sequence stratigraphy of an aeolian, fluvial and shallow marine system in the Pennsylvanian Piauí Formation, Parnaíba Basin, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 76, 238–256. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.03.009>
- Weltje, G. J., & von Eynatten, H. (2004). Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. *Sedimentary Geology*, 171(1–4), 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.SEDGEO.2004.05.007>

- WILSON, I. G. (1972). *AEOLIAN BEDFORMS-THEIR DEVELOPMENT AND ORIGINS*. SEDIMENTOLOGY. <https://sci-hub.ru/10.1111/j.1365-3091.1972.tb00020.x>
- Y. Grahn, J. H. G. De Melo, & P. Seemans. (2005). *Integrated Chitinozoan and Miospore Zonation of the Serra Grande Group (Silurian-Lower Devonian), Parnaíba Basin, Northeast Brazil*.

