



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

**EVIDÊNCIAS PETROGRÁFICAS DAS CONDIÇÕES
PALEOAMBIENTAIS E PALEOCLIMÁTICAS DE
DEPOSIÇÃO DAS FORMAÇÕES CODÓ E ITAPECURU
(APTIANO-ALBIANO) DA BACIA DO PARNAÍBA**

GUSTAVO KENJI LACERDA ORITA

ORIENTADORES - Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros

Prof. Dra. Amanda Goulart Rodrigues

Porto Alegre, Maio de 2022

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

**EVIDÊNCIAS PETROGRÁFICAS DAS CONDIÇÕES
PALEOAMBIENTAIS E PALEOCLIMÁTICAS DE
DEPOSIÇÃO DAS FORMAÇÕES CODÓ E ITAPECURU
(APTIANO-ALBIANO) DA BACIA DO PARNAÍBA**

GUSTAVO KENJI LACERDA ORITA

**ORIENTADORES - Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros
Prof. Dra. Amanda Goulart Rodrigues**

BANCA EXAMINADORA

**Dr. Anderson José Maraschin - Instituto do Petróleo e dos Recursos Minerais,
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul**

**Profa. Dra. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin - Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

**-Dr. Garibaldi Armelenti (UFRGS) - - Instituto de Geociências, Universidade Federal
do Rio Grande do Sul**

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

Porto Alegre, Maio de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos André Bulhões Mendes

Vice Reitora: Patricia Pranke

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Vice-Diretora: Tatiana Silva da Silva

CIP - Catalogação na Publicação

Lacerda Orita, Gustavo Kenji
EVIDÊNCIAS PETROGRÁFICAS DAS CONDIÇÕES
PALEOAMBIENTAIS E PALEOCLIMÁTICAS DE DEPOSIÇÃO DAS
FORMAÇÕES CODÓ E ITAPECURU (APTIANO-ALBIANO) DA BACIA
DO PARNAÍBA / Gustavo Kenji Lacerda Orita. -- 2022.
97 f.
Orientador: Luiz Fernando De Ros.

Coorientadora: Amanda Goulart Rodrigues.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,
2022.

1. Diagênese. 2. Paleoambiente. 3. Paleoclima. 4.
Bacia do Parnaíba. 5. Cretáceo. I. De Ros, Luiz
Fernando, orient. II. Rodrigues, Amanda Goulart,
coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Campus do Vale - Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia
Porto Alegre - RS - Brasil.
CEP: 91501-970 / Caixa Postal: 15001
Telefone: +55 51 33086329; Fax: +55 51 33086337
Email: bibgeo@ufrgs.br

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros, por aceitar me orientar novamente e por estar sempre disponível e atento para me auxiliar no desenvolvimento dessa importante etapa.

À também minha orientadora, Profa. Dra. Amanda Goulart Rodrigues, por me aceitar como orientando na "metade do caminho", por toda a ajuda, ensino e troca durante os "tempos estranhos" nos quais este trabalho foi realizado.

À toda a equipe do *Projeto Alagoas*, pela oportunidade de participar de sua excelente pesquisa, em especial à MSc. Fabia Rafaloski, pela notável atenção para com meu trabalho e em atender-me. Também agradeço ao Prof. Dr. Leonardo Borghi por sua atenção, seu interesse e suas contribuições com o desenvolvimento deste estudo.

A todo o grupo do PRH-14 da UFRGS, por financiarem este trabalho e pelo excelente trabalho de formação que realizam. À Dra. Renata Alvarenga, em especial, pela admirável atenção e dedicação com que lidou comigo e com os demais discentes.

RESUMO

O intervalo Aptiano-Albiano é considerado um período de grandes mudanças no clima da Terra. A deposição da seção cretácea da Bacia do Parnaíba está relacionada à abertura do Oceano Atlântico Equatorial, um evento crucial para a evolução do clima do Cretáceo. Uma caracterização petrográfica de rochas da seção superior da Formação Codó (Aptiano) e da Formação Itapecuru (Aptiano-Albiano) foi executada com o objetivo de ampliar a compreensão das condições paleoclimáticas e paleoambientais durante a deposição desse intervalo-chave. Diversos estudos sedimentológicos e paleontológicos interpretaram a predominância de um clima semiárido a árido para essas formações, concordando com consolidados modelos paleoclimáticos globais. Entretanto, neste estudo foi observada a ocorrência de constituintes diagenéticos típicos de ambientes úmidos, alternados com constituintes característicos de condições áridas. Condições climáticas úmidas são indicadas pela ocorrência de caulinita em arenitos e folhelhos e pela extensa dissolução de feldspatos nos arenitos. Condições climáticas áridas foram indicadas pela ocorrência de esmectita e interestratificados clorita-esmectita em arenitos e heterolitos, e de gipsita fibrosa, dolomita e esferulitos de calcita em folhelhos e ruditos híbridos. A ocorrência de pelóides e oóides de bertierina indica uma influência marinha intermitente durante a deposição de todo o intervalo. A ocorrência de pirita framboidal sugere condições eodiagenéticas redutoras. Bioclastos de foraminíferos, associados a dolomita ferrosa, pirita e gipsita indicam influência marinha na gênese da Formação Codó. Esferulitos de calcita associados a gipsita indicam precipitação sob condições evaporativas. Óxidos de ferro, frequentemente associados com feições de pedogênese incipiente, ocorrem em depósitos de baías interdistributários da Formação Itapecuru. A ocorrência alternada de climas úmidos e áridos pode estar relacionada ao início do Cinturão Equatorial Úmido do Albiano, promovido pela progressiva abertura do Atlântico Equatorial.

Palavras-chave: Diagênese; Paleoambiente; Paleoclima; Bacia do Parnaíba; Cretáceo; Petrologia sedimentar.

ABSTRACT

The Aptian-Albian interval is considered a period of profound shifts in Earth climate. The deposition of the Cretaceous section of the Parnaíba Basin is related to the opening of the Equatorial Atlantic Ocean, a pivotal event for the evolution of the Cretaceous climate. A petrographic characterization of rocks from the upper section of the Codó Formation (Aptian) and from the Itapecuru Formation (Aptian-Albian) was developed with the aim to contribute to the understanding of the paleoenvironmental and paleoclimatic conditions during the deposition of this key interval. Several sedimentological and paleontological studies interpreted a dominantly semi-arid to arid climate during the deposition of these units, agreeing with consolidated global paleoclimatic models. However, the occurrence of eogenetic constituents typical of humid climate conditions alternated with constituents characteristic of arid conditions was observed in this study. Humid conditions are mainly indicated by the occurrence of kaolinite in sandstones and shales and by significant feldspars dissolution in the sandstones. Dry climate conditions are indicated by the occurrence of smectite and interstratified C/S in the sandstones and heterolites, and of fibrous gypsum, early ferroan dolomite and calcite spherulites in the shales and hybrid rudites. The occurrence of berthierine peloids and ooids suggests an intermittent marine contribution during the deposition of the whole interval. Framboidal pyrite suggests reducing eogenetic conditions. Foraminifera bioclasts, associated with ferroan dolomite, pyrite and gypsum suggests a marine influence during the genesis of the Codó Formation. Calcite spherulites, in association with gypsum, indicate precipitation under evaporative conditions. Iron oxides, often associated with early pedogenetic processes of interdistributary bay Itapecuru deposits. The occurrence of alternating humid and arid climate conditions in the interval may be related to the early establishment of the Albian Equatorial Humid Belt, caused by the progressive opening of the Equatorial Atlantic Ocean.

Key-Words: Diagenesis; Paleoenvironment; Paleoclimate; Parnaíba Basin; Cretaceous; Sedimentary petrology

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Parnaíba, mostrando suas principais feições estruturais e a posição dos poços analisados (modificado de Araújo, 2017)..... **11**
- Figura 2 - Perfis colunares dos poços PN-1 e PN-2, indicando as profundidades das amostras analisadas..... **12**
- Figura 3 - Carta estratigráfica da seção Cretácea da Bacia do Parnaíba (modificado de Vaz *et al.*, 2007)..... **14**
- Figura 4 - Zonas climáticas do Aptiano, de acordo com Chumakov *et al* (1995). Extraído de Hay & Flogel (2012). Legendas: TEH: Cinturão árido tropical e equatorial, SMW: Cinturão quente e úmido de média latitude sul, NMW: Cinturão quente e úmido de média latitude norte, NHT: Cinturão úmido temperado de alta latitude norte, SHT: Cinturão úmido temperado de alta latitude sul..... **20**

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	11
3. ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO	11
3.1 Localização da bacia e área de estudo	11
3.2 Características gerais da Bacia do Parnaíba	14
3.2.1 Formação Codó	15
3.2.2 Formação Itapecuru	16
3.3 Geologia do Petróleo da Bacia do Parnaíba	17
4. ESTADO DA ARTE	18
4.1 Paleoambientes e Paleoclima do Aptiano: Contexto global e das bacias do nordeste brasileiro	18
4.1.1 Contexto paleoclimático global durante o Aptiano	18
4.1.2 Evidências paleoambientais e paleoclimáticas da seção cretácea da Bacia do Parnaíba	20
4.1.3 Paleogeografia das Bacias do Nordeste e da Margem Continental: Influência do Oceano Tethys	22
4.2 Ambientes Eodiagenéticos Continental Árido, Úmido e Marinho	23
4.2.1 Ambientes eodiagenéticos continentais quentes e úmidos	24
4.2.2 Ambientes eodiagenéticos continentais áridos	25
4.2.3 Ambientes eodiagenéticos marinhos e mistos	26
5. MATERIAIS E MÉTODOS	28
5.1 Levantamento bibliográfico	28
5.2 Petrografia quantitativa sistemática	28
5.3 Documentação fotomicrográfica	29
5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	29
5.5 Difração de Raios-X	30
6. SÍNTESE DOS RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES	30
7. CONCLUSÕES	33
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34
9. ARTIGO SUBMETIDO	44
10. ANEXOS	97

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação de mestrado estrutura-se em torno do artigo "Evolution of Aptian-Albian deposits from the Parnaíba Basin, N-NE Brazil, and the early opening of Equatorial Atlantic Ocean - Paleoenvironmental and paleoclimate evidences from petrologic characterization", submetido ao periódico *Journal of South American Earth Sciences*. A estrutura está dividida em:

- a) Introdução sobre o tema estudado, objetivos do trabalho, descrição da área de estudo e sua geologia, estado da arte sobre o tema de pesquisa e métodos aplicados.
- b) Síntese dos resultados obtidos, interpretações e conclusões fundamentais geradas a partir da análise dos dados produzidos.
- c) Manuscrito intitulado "Evolution of Aptian-Albian deposits from the Parnaíba Basin, N-NE Brazil, and the early opening of Equatorial Atlantic Ocean - Paleoenvironmental and paleoclimate evidences from petrologic characterization", submetido ao periódico *Journal of South American Earth Sciences* (Qualis A3 Capes).
- d) Anexos, compreendendo:
 1. Planilhas em formato *Excel* exportadas do programa *Petroledge*, contendo os resultados das descrições petrográficas das lâminas sistematicamente quantificadas.
 2. Fotomicrografias mostrando as principais feições das lâminas analisadas.
 3. Resultados obtidos pelas análises de EDS e imagens adquiridas em MEV.
 4. Difratogramas de DRX das frações finas (<20 μm).

1. INTRODUÇÃO

Os depósitos Aptianos-Albianos da gigantesca Bacia Intracratônica do Parnaíba, localizada no nordeste do Brasil, têm sua gênese relacionada aos estágios finais de abertura do Oceano Atlântico Equatorial (Rossetti *et al.*, 2001a; Rossetti *et al.*, 2004; Coura & Borghi, 2014) e ruptura do supercontinente Gondwana (Austin & Uchupi, 1982; Nürnberg & Müller, 1991; Chaboureau *et al.*, 2012). Essas mudanças tiveram enormes efeitos no clima do Cretáceo (Poulsen *et al.*, 2003; Granot & Dymant, 2015) e nos ambientes deposicionais da região. O intervalo Aptiano-Albiano também foi um período de profundas alterações na salinidade dos oceanos (Hay *et al.*, 2006), de eventos globais de anoxia (Föllmi, 2012) e da ocorrência de condições climáticas extremas no planeta (Kidder & Worsley, 2010).

O paleoclima atuante durante a deposição das Formações Codó (Aptiano) e Itapecuru (Aptiano-Albiano) da Bacia do Parnaíba, foi interpretado como sendo predominantemente semiárido a árido por inúmeros trabalhos (Lima & Leite, 1978; Paz & Rossetti, 2001; 2005; Rossetti *et al.*, 2001b; Rossetti *et al.*, 2004; Mendes & Borghi, 2005; Mendes, 2007), concordando com modelos paleoclimáticos clássicos para o intervalo Aptiano-Albiano da região norte do Gondwana (Chumakov *et al.*, 1995; 2004; Hay & Floegel, 2012). Entretanto, estudos paleoambientais recentes apontaram evidências de condições climáticas úmidas em unidades do Aptiano/Albiano da Bacia do Parnaíba (Ferreira *et al.*, 2016; Corrêa-Martins, 2019; Menezes *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020; Duarte *et al.*, 2021; Guerra-Sommer *et al.*, 2021), assim como nas bacias adjacentes de Sergipe (Carvalho *et al.*, 2017; 2019) e do Araripe (Heimhofer & Hochuli, 2010; Varejão *et al.*, 2021), desafiando interpretações paleoclimáticas consolidadas para esse período da região nordeste do Brasil.

A maioria dos estudos paleoambientais das Formações Codó e Itapecuru foram desenvolvidos a partir de investigações paleontológicas e sedimentológicas, (Pinto & Ornellas, 1974; Antonioli *et al.*, 1999; Lima *et al.*, 1980, 1982; Batista, 1992; Rodrigues, 1995; Lindoso *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2016; Lindoso *et al.*, 2016, Carvalho *et al.*, 2017; Lindoso *et al.*, 2018; Menezes *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020; Duarte *et al.*, 2021; Guerra-Sommer *et al.*, 2021; De Lima Barros *et al.*, 2022).

Apenas dois estudos de análise petrográfica destes depósitos são conhecidos (Corrêa-Martins *et al.*, 2018; Corrêa-Martins, 2019).

A caracterização petrográfica sistemática é uma ferramenta fundamental para obter informações detalhadas sobre a história deposicional e diagenética dos sedimentos (Tucker, 1991), sendo indispensável para a interpretação correta e construção de modelos paleoambientais confiáveis. A análise dos produtos e processos eodiagenéticos é essencial para a compreensão da composição original da água dos poros, fornecendo informações fundamentais para a determinação das condições climáticas atuantes na formação de depósitos continentais. Além disso, constituem-se como excelentes meios para o reconhecimento de superfícies e sequências estratigráficas (Morad *et al.*, 2012).

2. OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo interpretar as condições paleoambientais predominantes durante a formação dos depósitos das Formações Codó e Itapecuru da Bacia do Parnaíba, através da integração de dados geoquímicos e petrográficos da composição e textura, e suas inferências sobre os processos deposicionais e diagenéticos atuantes nessas unidades. Espera-se, dessa forma, contribuir para a compreensão das condições atuantes durante um período chave de mudanças ambientais na Bacia do Parnaíba e no planeta.

3. ÁREA DE ESTUDO E CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Localização da bacia e área de estudo

A Bacia do Parnaíba é localizada no nordeste do Brasil, ocupando uma área de aproximadamente 665.888 km² (Campbell *et al.*, 1949, Mesner & Wooldridge, 1962, 1964, Goés & Feijó, 1994). A bacia está posicionada aproximadamente entre os paralelos 15 ° e 0 ° S e entre os meridianos 50 ° e 40 °, com limites com o Alto Ferrer-Urbano Santos, ao norte, com a Província Borborema, ao leste, com o Alto

de São Francisco, ao sul e com a Província Tocantins ao Oeste e com o Alto de Tocantins à noroeste (Fig. 1).

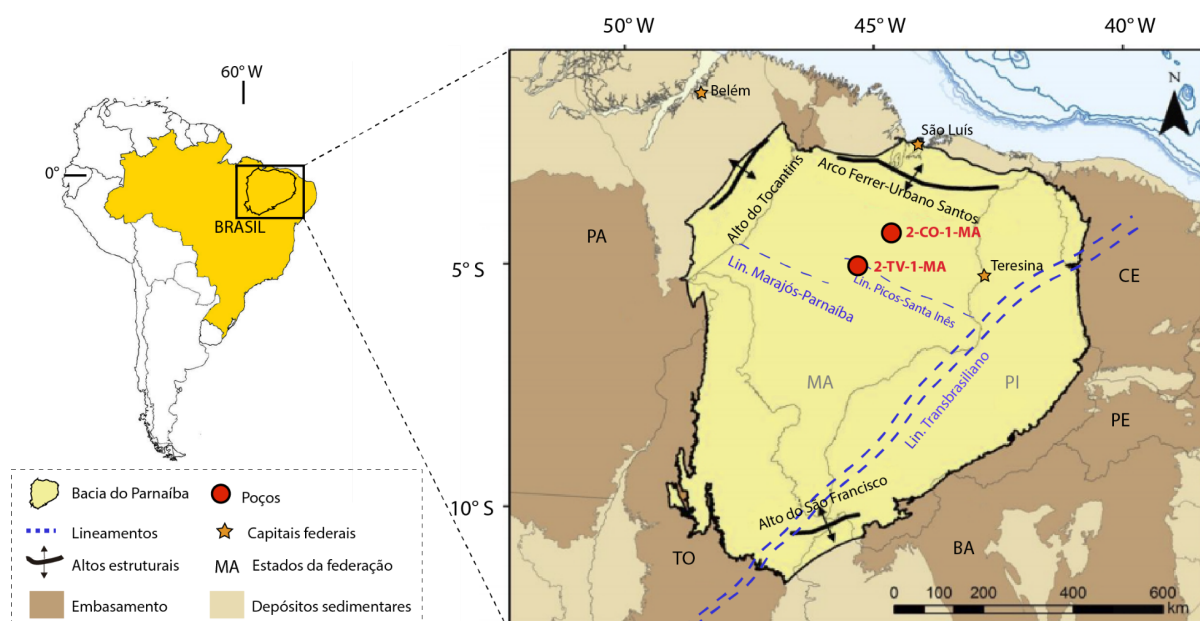


Figura 1 - Mapa de localização da Bacia do Parnaíba, mostrando suas principais feições estruturais e a posição dos poços analisados (modificado de Araújo, 2017).

O poço PN-1 foi perfurado na localidade de Coroatá (04 14' 50,83"S e 44 14' 26,24"W), localizada a cerca de 400 km a sudoeste da cidade de São Luís, capital do estado do Maranhão. Em termos de espessura, atingiu 251 m de rochas sedimentares das Formações Itapecuru e Codó, apresentando uma boa taxa de recuperação (97%), compreendendo desde arenitos aptianos da Formação Itapecuru (no topo), até folhelhos fossilíferos da unidade superior da Formação Codó. A seção analisada para o presente estudo compreende o intervalo de 0 a 190 m de profundidade, sendo que o intervalo 0-146 m consiste na Formação Itapecuru, e o intervalo 146-190 m na Formação Codó.

O poço PN-2 foi perfurado na municipalidade de Trizidela do Vale (04 29' 25,44"S e 44 40' 02,95"W), localizada aproximadamente 450 km a sudoeste de São Luís do Maranhão, com 273 m de rochas sedimentares das mesmas formações identificadas no poço PN-1, apresentando também uma boa taxa de recuperação dos testemunhos (96%). A seção estudada compreende o intervalo entre 0 e 160 m de profundidade, sendo o intervalo de 0 a 115 m identificado como depósitos da

Formação Itapecuru, e entre 115 e 160 m como da Formação Codó. A Figura 2 ilustra a distribuição e posição das lâminas analisadas em relação à coluna sedimentar amostrada nos poços.

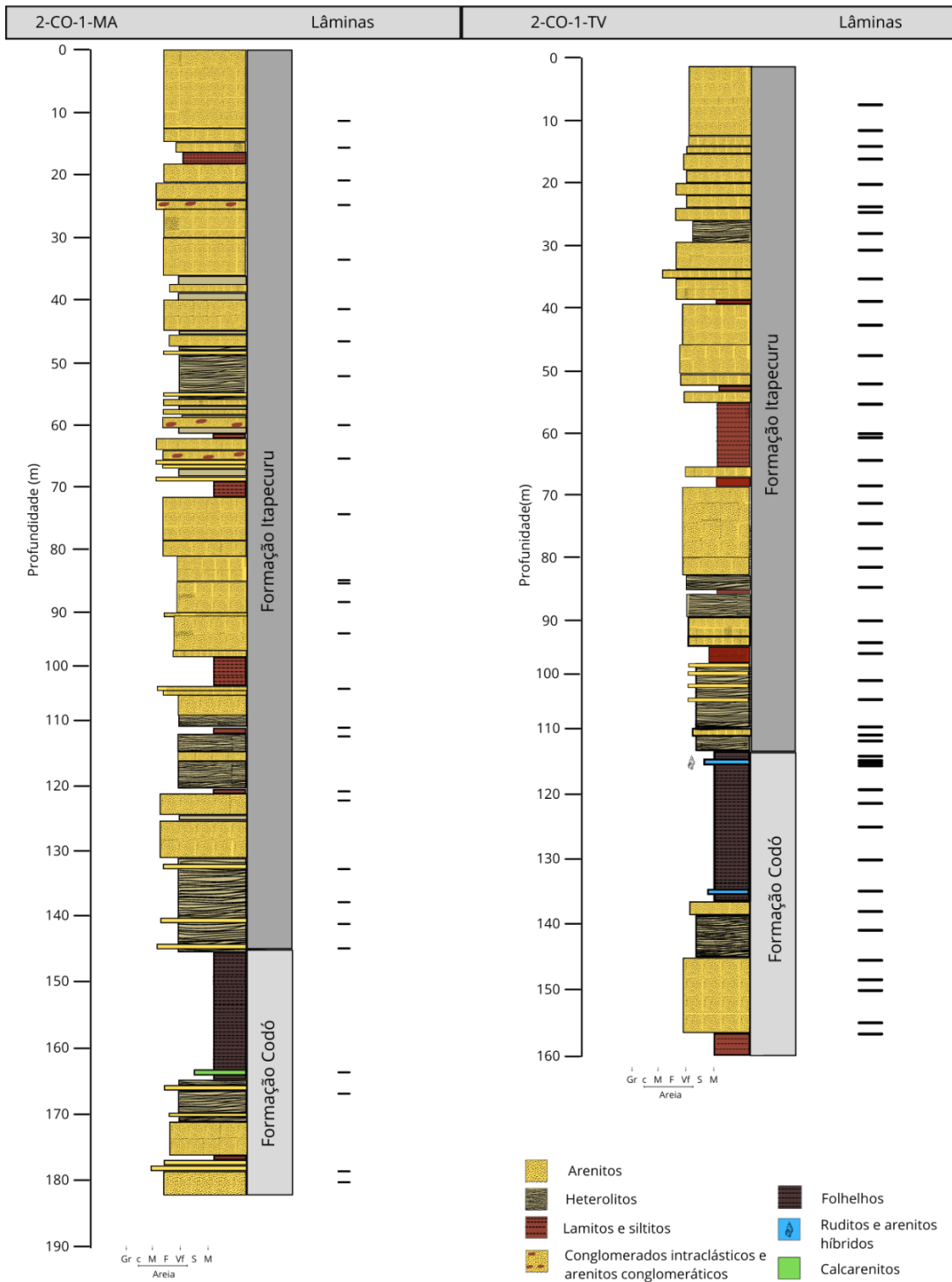


Figura 2 - Perfis colunares dos poços PN-1 e PN-2, indicando as profundidades das amostras analisadas.

3.2 Características gerais da Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba representa uma das maiores bacias intracratônicas do Brasil, possuindo até 3500 m de preenchimento em seu depocentro (Vaz *et al.*, 2007). Também já foi denominada, em trabalhos geológicos mais antigos, como Bacia do Maranhão ou do Piauí-Maranhão. As feições morfoestruturais mais importantes da bacia são os Lineamentos Picos-Santa Inês, Marajó-Parnaíba e a Zona de Falha Transbrasileira, de maior extensão, que atravessa toda a bacia no sentido NE-SW (Vaz *et al.*, 2007). O estudo tectônico de Daly *et al.* (2014), baseado em dados sísmicos de alta definição, mostrou que a Bacia do Parnaíba forma um extenso pacote sedimentar sub-horizontal sobreposto a um embasamento compartimentado e composto por três blocos crustais dominantes: o Cráton amazônico e Província Tocantins ao oeste, o Bloco Parnaíba na porção central e a Província Borborema ao leste. Tal embasamento é representado por rochas metamórficas, ígneas e sedimentares com idades que variam do Arqueano ao Ordoviciano (Vaz *et al.*, 2007), com destaque para a Formação Riachão e o Grupo Jaibaras. A Formação Riachão é composta por arenitos líticos, arcósios, siltitos, folhelhos vermelhos e ignimbritos (Kegel, 1956; Goés & Feijó, 1994), de idade proterozóica média ou superior (Vaz *et al.*, 2007). Já o Grupo Jaibaras, aflorante na porção leste-nordeste da bacia, foi localizado em subsuperfície a partir de investigações geofísicas, preenchendo calhas de grábens ligados à gênese da Bacia do Parnaíba (Vaz *et al.*, 2007). Esses grábens foram formados pela reativação de zonas de falha estimulado pelo processo de rifteamento Neoproterozóico, relacionado à separação entre o Cráton Norte-americano e o Gondwana ocidental (Bond *et al.*, 1984). Foram preenchidos por depósitos clásticos imaturos, rochas vulcânicas bimodais e posteriormente intrudidas por granitos (de Castro *et al.*, 2014). Os dados sísmicos e de testemunhos de Brito-Neves *et al.* (1984), bem como dados gravimétricos e magnéticos de Nunes (1993) indicam a ocorrência de várias áreas na bacia onde esses grábens ocorrem.

O preenchimento da Bacia do Parnaíba, constituído por rochas sedimentares e magmáticas, foi dividido em cinco grandes supersequências: Siluriana, Mesodevoniana-Eocarbonífera, Neocarbonífera-Eotriássica, Jurássica e Cretácea (Goés & Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007). A seção cretácea, intervalo analisado neste

estudo, é constituída pelas formações Codó, Corda, Grajaú e Itapecuru (Fig. 3; Goés & Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007), e sua gênese estaria relacionada ao estágio final de abertura do Oceano Atlântico (Coura & Borghi, 2014). A Formação Codó encontra-se estratigraficamente sobreposta e interdigitada com as formações Corda e Grajaú, ou em contato discordante sobre rochas paleozóicas e triássicas da bacia. A Formação Itapecuru encontra-se sobreposta e em contato concordante com a Formação Codó (Vaz *et al.*, 2007).

A seção cretácea da Bacia do Parnaíba também foi interpretada por alguns autores, como Goés & Rossetti (2001), como uma bacia à parte, por elas definida como Bacia de São Luís-Grajaú. Entretanto, tal subdivisão não foi amplamente aceita (Klein & Sousa, 2012) e por isso o presente estudo considerou a Formação Itapecuru como pertencente à seção cretácea da Bacia do Parnaíba, seguindo os trabalhos de Ferreira *et al.* (2016, 2020), Corrêa-Martins *et al.* 2018, Corrêa-Martins (2019), Menezes *et al.*, (2019); Guerra-Sommer *et al.*, (2021) e outros.

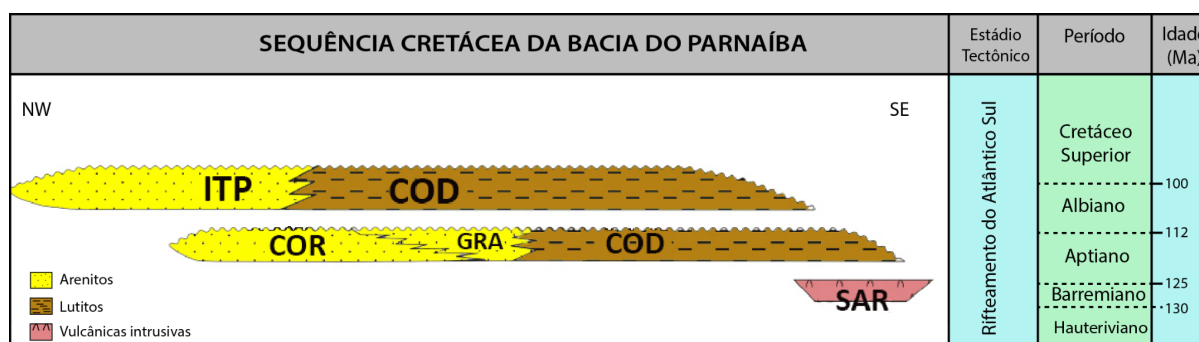


Figura 3 - Carta estratigráfica da seção Cretácea da Bacia do Parnaíba (modificado de Vaz *et al.*, 2007).

3.2.1 Formação Codó

O clássico estudo de Mesner e Wooldridge (1964) subdividiu a Formação Codó em três unidades litológicas distintas: (1) unidade inferior composta por folhelhos betuminosos e escuros, intercalados com carbonatos fossilíferos e evaporitos; (2) unidade intermediária representada por arenitos micáceos e porosos; e (3) unidade superior representada por folhelhos marinhos fossilíferos, de cor cinza e ricos em bioclastos de gastrópodes. Esses autores também definiram os ambientes e condições deposicionais de cada unidade: A unidade inferior foi

interpretada como depositada em um ambiente lacustre alimentado por incursões marinhas, gerando ciclos evaporíticos. As unidades intermediária e superior foram formadas por incursões marinhas a partir de um evento transgressivo, depositando primeiro os arenitos micáceos e posteriormente os folhelhos fossilíferos sobrepostos. Em um trabalho subsequente, Lima & Leite (1978) também sugeriram que a Formação Codó teria sido depositada sob condições marinhas e lacustres.

Estudos posteriores detalhados das fácies deposicionais da Formação Codó sugeriram um paleoambiente deposicional predominantemente lacustre, dominado por águas de salinidade variada e sob a atuação de um clima predominantemente árido. (Paz & Rossetti, 2001; Rossetti *et al.*, 2001a; Rossetti *et al.*, 2004; Paz & Rossetti, 2005; Mendes & Borghi, 2005; Mendes, 2007). Entretanto, outros estudos sugeriram uma sedimentação marinha para parte da Formação Codó, como resultado de incursões oceânicas em um lago (Antonioli, 2001; Neves, 2007; Mendes, 2007), ou até mesmo determinaram a predominância de um ambiente marinho raso ou restrito (Arai, 2011; 2014). Vários estudos de sedimentologia, estratigrafia e paleontologia indicaram um intervalo deposicional entre o final do Aptiano e o início do Albiano para a unidade (Antonioli, 2001; Lima, 1982; Mendes, 2007; Rossetti *et al.*, 2001a, Guerra-Sommer *et al.*, 2021).

3.2.2 Formação Itapecuru

A Formação Itapecuru foi primeiramente descrita e caracterizada por Campbell (1949), que a subdividiu entre os membros Serra Negra, Indiferenciado e Boa Vista, e a interpretou como depositada em um paleoambiente predominantemente continental. Mesner e Wooldridge (1962, 1964) determinaram que a Formação Itapecuru consistia predominantemente por arenitos e lutitos depositados em um sistema predominantemente fluvial, hipótese reforçada em vários estudos posteriores (Aguilar, 1969, 1971; Carneiro, 1974; Aranha *et al.*, 1988, 1990; Cunha & Del'Arco, 1988; Santos & Mamede, 1990; Góes & Feijó, 1994; Gonçalves & Carvalho, 1996). O estudo de Lima e Leite (1978) caracterizou a Formação Itapecuru como depositada em um paleoambiente deposicional fluvial, com planícies de inundação e lagos associados, sob influência de um clima semi-árido. Posteriormente, outros estudos descreveram a ocorrência de arenitos finos a grossos, eventualmente conglomerados, carbonatos e lutitos, interpretados como

depositados em um ambiente flúvio-deltáico que desembocava em uma baía protegida ou golfo (Rossetti *et al.* 2000, 2001a; Rossetti & Góes, 2003; Miranda & Rossetti 2006; Nascimento & Góes, 2007; Nascimento *et al.* 2007). Oliveira-Pessoa & Borghi (2004), em um estudo de análise de fácies a partir de testemunhos de sondagem, observaram a ocorrência de fácies de planície de inundação e barras de acreção lateral, formando uma associação de fácies típica de canais meandrantess. Ferreira *et al.* (2016), em um estudo palinológico, também sugeriram a ocorrência de planícies de inundação no ambiente deposicional da Formação Itapecuru. A Formação Itapecuru também é caracterizada pela presença de perfis de paleossolos intercalados aos depósitos sedimentares (Menezes *et al.* 2019).

O estudo petrológico de Correa-Martins *et al.* (2018) identificou quatro petrofácies distintas, conforme os autores: argilito siltoso, siltito argiloso, *wacke* feldspática muito fina e arenito quartzoso muito fino a fino. Tais petrofácies indicaram uma predominância de sedimentos de granulometria fina na unidade. Em termos de composição primária, também foi observado a comum ocorrência de fragmentos carbonosos (fitoclastos), interpretado pelos autores como uma evidência da presença de vegetação por um longo período no ambiente de sedimentação da Formação Itapecuru. Em termos de composição diagenética, Correa-Martins *et al.* (2018) identificaram a ocorrência de cutículas de hematita como o principal produto diagenético, seguidas por calcita. Tais processos diagenéticos foram interpretados pelos autores como produtos eodiagenéticos. A idade de deposição da Formação Itapecuru ainda é discutida, tendo sido definida por Ferreira *et al.* (2020, 2021) como formada estritamente durante o final do Aptiano, enquanto o estudo de Pedrão (1995) atribuiu o intervalo Aptiano-Cenomaniano para a unidade.

3.3 Geologia do Petróleo da Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba possui um longo histórico de exploração de hidrocarbonetos, com sua primeira fase tendo início em 1950 a partir de trabalhos realizados pelo Conselho Nacional do Petróleo (CNP) (Araújo, 2017). Até o presente momento, foram perfurados 93 poços exploratórios e levantados 4.226 km lineares de dados sísmicos de reflexão com gravimetria e magnetometria terrestres, além de dados magnetométricos e gravimétricos em toda sua extensão (Araújo, 2017). A

bacia apresenta uma reserva de 15,3 bilhões de m³ de gás natural, sendo atualmente a 2^a maior produtora de gás em terra do Brasil, o que corresponde a cerca de 7% da produção de gás natural do país (Araújo, 2017).

O principal sistema petrolífero da Bacia do Parnaíba é o sistema Pimenteiras-Cabeças, constituído por folhelhos marinhos da Formação Pimenteiras, como rochas geradoras, e arenitos deltáicos da Formação Cabeças, como rochas reservatório. A deposição da Formação Pimenteiras, que apresenta espessura superior a 500 m, ocorreu no Devoniano. Já os arenitos da Formação Cabeças, também de idade devoniana, encontram-se em contato direto com a Fm. Pimenteiras, apresentando uma alta permeabilidade e porosidade de até 26%, com espessura de 250 m. Potenciais geradoras secundárias são os depósitos das Formações Tinguá (Siluriano) e Longá (Devoniano-Fameniano) e outros candidatos a rochas reservatório na bacia são os arenitos da Fm. Itaim (Devoniano) e Ipu (Siluriano) (Araújo, 2017).

4. ESTADO DA ARTE

4.1 Paleoambientes e Paleoclima do Aptiano: Contexto global e das bacias do nordeste brasileiro

4.1.1 Contexto paleoclimático global durante o Aptiano

O Aptiano (125-113 Ma), andar do Cretáceo inferior, é definido como uma idade onde teriam ocorrido importantes mudanças climáticas globais, como na circulação dos oceanos, elevação do nível do mar, eventos de anoxia, e condições climáticas globais marcadas por temperaturas altíssimas (*Hothouse state*, Kidder & Worsley, 2010). Nesta seção serão apresentados estudos selecionados de paleoclimatologia do Cretáceo de caráter global, com um enfoque na região paleogeográfica de formação dos ambientes deposicionais da Bacia do Parnaíba.

Chumakov *et al.* (1995) mostraram que as zonas climáticas da Terra durante a maior parte do período seriam muito similares às zonas climáticas do presente: tal distribuição envolveria zonas úmidas em regiões de alta latitude e zonas úmidas em

regiões de alta para média latitude, gradando para cinturões áridos em zonas de média para baixa latitude (atuais desertos) e, por fim, um cinturão equatorial úmido. Entretanto, os andares Barremiano e Aptiano representariam exceções a esse modelo, com a zona equatorial caracterizada por uma proeminente aridez, levando até mesmo à formação de ambientes evaporíticos (Fig 4). Hay & Flogel (2012) propuseram dois mecanismos para explicar a ausência de um cinturão úmido na região equatorial durante o Aptiano: O Efeito Supercontinente (*Supercontinent Effect*) e O Efeito Zona Morta (*Dead Zone Effect*).

O *Supercontinent Effect* compreende um conjunto de eventos climáticos e geológicos causados pela existência de supercontinentes em determinados períodos do tempo geológico, um tema bastante discutido sobretudo em estudos de paleoclima dos supercontinentes Pangea e Gondwana. (Crowley *et al.*, 1987, 1989; Otto-Bliesner, 1999; Fluteau *et al.*, 2001). Uma das principais consequências do *Supercontinent Effect* é a aridez promovida nas regiões centrais dos continentes devido à enorme distância entre o centro e as zonas costeiras, que dificulta o abastecimento de umidade por células atmosféricas vindas dos oceanos. Esse efeito também pode ser observado no presente, evidenciado pela ocorrência de gigantescas regiões desérticas nas zonas centrais dos maiores continentes como a Ásia. Hay & Flogel (2012) observaram que, no Cretáceo Inferior, o supercontinente Gondwana encontrava-se praticamente intacto, apresentando distâncias entre 11.000 km e 12.000km entre as costas nas zonas equatoriais, o equivalente a cerca de quatro vezes a porção mais larga da América do Norte atual. Sellwood & Valdes (2008) também sugeriram que durante o Jurássico superior, chuvas ocorreriam apenas em períodos sazonais na região equatorial do Gondwana, restringindo as regiões mais úmidas à margem oeste do continente.

O *Dead Zone Effect* é caracterizado como um mecanismo regional que limita a sobrevivência e manutenção de diversas formas de vida. É reconhecido que determinadas condições climáticas extremas têm a capacidade de inibir a proliferação da vida animal e vegetal nos ecossistemas, e alguns estudos mostram que temperaturas muito elevadas geram um impacto inibidor da atividade fotossintética das plantas (Hay & Vogel, 2006). Contribuindo com essa discussão, o trabalho de Crafts-Brandner & Salvucci (2000) sugere que plantas podem não ser capazes de sobreviver em regiões onde as temperaturas médias diárias são superiores a 42 °C, gradiente termal estimado para as regiões tropicais e equatoriais

do supercontinente Gondwana durante a metade do Cretáceo. Segundo Hay & Flogel (2012) portanto, o Efeito Zona Morta teria sido um dos mecanismos responsáveis pela ausência de vegetação e consequente manutenção de condições áridas nas regiões equatoriais do planeta durante o Aptiano.

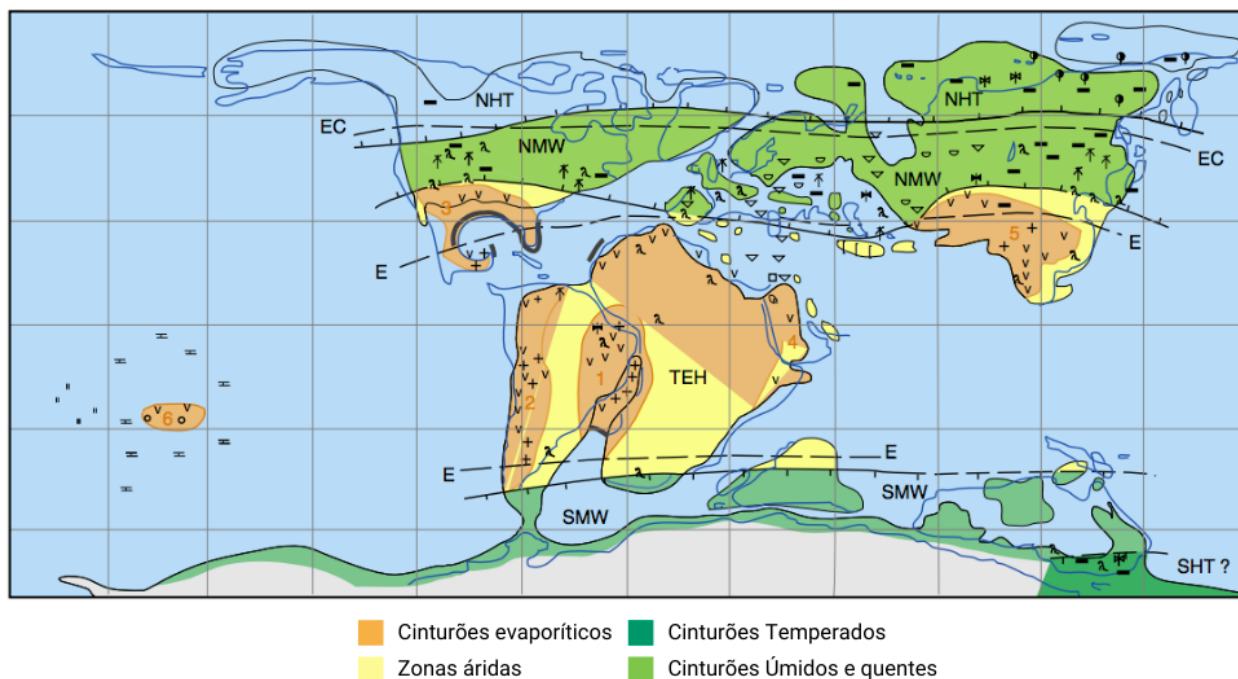


Figura 4 - Zonas climáticas do Aptiano, de acordo com Chumakov *et al* (1995). Extraído de Hay & Flogel (2012). Legendas: TEH: Cinturão árido tropical equatorial, SMW: Cinturão quente e úmido de média latitude sul, NMW: Cinturão quente e úmido de média latitude norte, NHT: Cinturão úmido temperado de alta latitude norte, SHT: Cinturão úmido temperado de alta latitude sul.

4.1.2 Evidências paleoambientais e paleoclimáticas da seção cretácea da Bacia do Parnaíba

Nas bacias do nordeste brasileiro, o período Cretáceo é interpretado como sendo marcado por elevadas temperaturas e por paleoambientes deposicionais áridos. Em um estudo paleoclimático/ambiental da seção cretácea da Bacia do Parnaíba (ou Bacia de São Luis-Grajaú, conforme os autores), Rossetti *et al.* (2001b) interpretaram que a ocorrência limitada de caulinita e ilita, junto da abundância de esmectita nos depósitos aptianos superiores da Formação Codó

seriam uma evidência de baixas taxas de intemperismo, causadas pelas baixas taxas de precipitação na região.

Estudos paleontológicos da Formação Codó indicaram que a sua paleobiodiversidade, incluindo evidências palinológicas de flora e descrição de insetos, é típica de paleoambientes quentes e áridos (Pinto & Ornellas, 1974; Lima *et al.*, 1980, 1982; Batista, 1992; Rodrigues, 1995; Antonioli *et al.*, 1999). O estudo palinológico de Lindoso *et al.* (2018) mostrou que a flora descrita na Formação Codó era resistente a condições de secas e a ambientes hipersalinos. A *Cheirolepidiaceae*, uma família de gimnosperma que prosperou no paleoambiente Codó, é considerada pelos autores como um indicador de condições áridas sazonais.

Guerra-Sommer *et al.* (2021) com base em dados palinológicos, paleobotânicos e de argilominerais determinou que condições úmidas também ocorreram nos ambientes deposicionais da Formação Codó. No intervalo analisado, foi observado o aumento da ocorrência do pólen de *Araucariaceae* sobre o de *Cheirolepidiaceae*, indicando uma transição de condições paleoambientais tipicamente áridas para um paleoambiente úmido. Os autores sugerem que a mudança de condições áridas para úmidas poderia ser associada aos estágios iniciais de formação do Cinturão Equatorial Úmido, relacionados à abertura do Atlântico equatorial no limite do Aptiano-Albiano (Chumakov *et al.*, 1995; Hay & Floegel, 2012), ou a ocorrência de condições climáticas distintas em diferentes áreas de um grande sistema deposicional. Da mesma forma, alternância de condições climáticas úmidas e áridas também foi observada por Duarte *et al.* (2021), que descreveu a ocorrência de esporos de *psilate trilete*, típicos de ambientes úmidos e de polens de *Classopollis*, característicos de ambientes áridos.

A Formação Itapecuru é predominantemente interpretada como sistemas continentais sob um clima predominantemente árido (Wooldridge, 1962; 1964; Aguiar, 1969; 1971; Carneiro, 1974; Lima & Leite, 1978; Cunha & Del'Arco, 1988; Aranha, *et al.* 1988; 1990; Santos & Mamede, 1990; Góes & Feijó, 1994; Gonçalves & Carvalho, 1996). O estudo de Pedrão *et al.* (1993) determinou, a partir de dados palinológicos, que o clima predominante durante a deposição da unidade era tropical árido. Posteriormente, Pedrão (1995) e Ferreira *et al.* (2016) apontaram a existência de um clima tropical/subtropical, devido a uma assembleia de palinomorfos típica de climas tropicais úmidos. Ferreira *et al.* (2020) atribuiu a

ocorrência comum de palinomorfos de *Araucariacites* a condições úmidas na região, enquanto a presença abundante de esporos de pteridófitas aquáticas sugeriria ambientes estuarinos e de planície de inundação.

Já a partir de uma minuciosa análise de perfis de paleossolos, Menezes *et al.* (2019), determinaram que o paleoclima atuante nos ambientes de sedimentação da Formação Itapecuru era marcado por uma sazonalidade bem definida. A ocorrência de feições redoxomórficas e nódulos e concreções de Fe são evidências de percolação de água no solo durante as fases de clima úmido, com posterior ressecamento durante épocas de clima árido. A ocorrência de traços fósseis de invertebrados terráfilicos e hidrofílicos (como *Taenidium*, *Beaconites* e *Palaeophycus*), além de feições geradas pela ação de raízes (rizohalos), também indicariam a existência de altos níveis de umidade controlados pelo clima nestes paleossolos (Menezes *et al.*, 2019). Os autores ainda concluem que a frequência e densidade de ocorrência dos icnotáxons observados, bem como a sua diversidade, estão relacionadas ao grau de umidade dos diferentes estratos dos paleossolos.

O estudo paleontológico de Batista (2009) determinou a existência de duas espécies de quelônios na Formação Itapecuru, o que ampliou o conhecimento a respeito dos paleoambientes da unidade. Tais espécies são a *Araripemys barretoii*, que habitavam corpos d'água não muito rasos e possuíam hábitos de nadador ativo e o uma nova espécie pertencente aos Pleurodira, um tipo de tartaruga semi-aquática que habitava as margens de pântanos, rios e lagos. Evidências de dinossauros de grande porte também foram descritas nos depósitos da Formação Itapecuru (Medeiros & Schultz, 2001; Vicalvi *et al.* 1993; Menezes *et al.*, 2019). Medeiros & Schultz (2001) sugeriram que a existência de saurópodes tetrápodes, crocodilos e peixes de grande envergadura seria incompatível com um clima árido estrito no paleoambiente Itapecuru.

4.1.3 Paleogeografia das Bacias do Nordeste e da Margem Continental: Influência do Oceano Tethys

Em um interessante estudo paleontológico, Arai (2014) sugere que durante o intervalo Aptiano-Albiano, a sedimentação marinha das bacias do nordeste e da margem continental brasileira teria sido fortemente influenciada por águas vindas paleooceno Tethys, localizado ao norte do Gondwana. Naquele trabalho foi

realizada uma compilação de diversos estudos que apontaram a ocorrência de dinoflagelados, foraminíferos, crustáceos, peixes e répteis de origem thetiana em diversas bacias do Nordeste/leste do Brasil. Outros estudos sugerem que até o final do Albiano, a influência das águas do Tethys teria atingido todas as bacias marginais brasileiras, com exceção da Bacia de Pelotas, (Azevedo, 2001, 2004).

Arai (2014) sugere que as incursões do Tethys teriam começado pelo norte, através de rotas que passavam pelas Bacias de São Luís, Parnaíba, Araripe, Tucano e Sergipe. Numerosas evidências de fósseis marinhos encontrados na Formação Santana, na Bacia do Araripe (Martill, 1988; Arai & Coimbra, 1990; Silva-Santos, 1991; Saraiva, 2008) e Formação Codó, na Bacia do Parnaíba (Antonioli, 2001; Lindoso *et al.*, 2013) atestam essa hipótese. Na Formação Codó (Bacia do Parnaíba), foi descrita a ocorrência da espécie de crustáceo *Codoisopus brejensis*, pertencente à família *Archaeoniscidae*, cuja origem é vinculada exclusivamente ao Tethys, sendo, portanto, uma evidência da influência de águas deste oceano no Aptiano da Bacia do Parnaíba (Lindoso *et al.*, 2013).

No entanto, apesar da influência marinha do Oceano Tethys nessas bacias ser amplamente reconhecida, a rota exata dessas incursões é motivo de debate, existindo três principais hipóteses: (1) incursão via Bacia do Parnaíba; (2) via Bacia do Sergipe e (3) via Bacia Potiguar. Arai (2014) considera que a rota mais provável seja através das Bacias de São Luís, Parnaíba, Araripe e Sergipe, que teriam permitido a ingressão das águas do Tethys nas demais bacias da margem leste e sudeste brasileiras.

4.2 Ambientes Eodiagenéticos Continental Árido, Úmido e Marinho

O estudo dos processos e constituintes eodiagenéticos é uma importante ferramenta para caracterizar as condições ambientais e climáticas atuantes nas áreas de deposição dos sedimentos. A eodiagênese é essencialmente controlada por parâmetros físicos, biológicos e químicos diretamente ligados ao ambiente de sedimentação. Os produtos e processos eodiagenéticos, quando preservados, fornecem uma amostra das características da água intersticial atuante no local de deposição daqueles sedimentos (Worden & Burley, 2003).

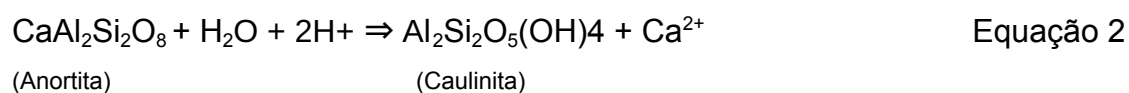
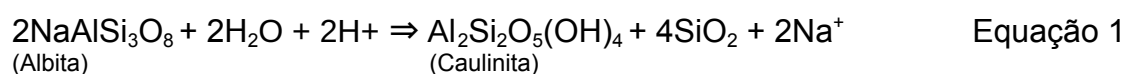
Os ambientes deposicionais são os principais controladores da composição e concentração de íons da água, bem como da quantidade nos sedimentos, além das taxas de evaporação, temperatura, exposição ao oxigênio atmosférico e conteúdo de matéria orgânica (Worden & Morad, 2003). Neste item, serão compilados os produtos e processos eodiagenéticos mais comuns em depósitos siliciclásticos, descrevendo sua relação com três categorias de ambientes sedimentares, conforme foi dividido e caracterizado por Worden & Morad (2003) e Worden & Burley (2003): (1) Ambientes continentais quentes e úmidos, caracterizados por áreas de sedimentação sujeitas a intenso intemperismo químico sob ação constante de águas meteóricas; (2) Ambientes continentais áridos, formados por ambientes deposicionais com altas taxas de evaporação, baixa recarga meteórica e baixo intemperismo químico; e (3) Ambientes marinhos, caracterizado por águas levemente alcalinas (pH de 8,3) com grande concentração de Na^+ e Cl^- e sulfato.

4.2.1 Ambientes eodiagenéticos continentais quentes e úmidos

A água intersticial típica de ambientes continentais úmidos e quentes é caracterizada por ser bastante diluída (baixa concentração de íons em solução), levemente ácida, concentrada em Ca^{2+} e HCO_3^- , e pela abundância de matéria orgânica reduzida por processos microbiais. O argilomineral diagenético mais representativo deste tipo de ambiente é a caulinita, cuja formação requer baixa concentração iônica e baixo pH da água nos poros, além de uma assembleia detrítica rica em aluminossilicatos, como feldspatos e micas, facilmente dissolvidos e substituídos pela caulinita, conforme mostram as reações Equação 1 e Equação 2. A autigênese da caulinita é favorecida em áreas adjacentes a canais fluviais, que encontram-se sob constante percolação de água meteórica, constantemente renovada, o que não permite o aumento da concentração de íons no ambiente (Ketzer *et al.*, 2003; Morad *et al.*, 2010). A formação de porosidade intragranular e móldica por dissolução de grãos detríticos, especialmente feldspatos, e a carstificação também são processos característicos de ambientes úmidos (Worden & Morad, 2003; Ketzer *et al.*, 2003; Morad *et al.*, 2012), onde a percolação de água meteórica favorece tanto a dissolução de grãos siliciclásticos quanto os carbonatos.

A siderita é um cimento carbonático característico de ambientes eodiagenéticos continentais úmidos (Worden & Burley, 2003). A baixa

disponibilidade de sulfato dissolvido em águas meteóricas, comparada a águas marinhas, inibe a precipitação de pirita, permitindo que o Fe^{2+} disponível em solução seja incorporado pela siderita (Morad, 1998). Este constituinte diagenético é mais comumente encontrado nas áreas mais afastadas dos canais de sistemas fluviais, como em planícies de inundação associadas, e zonas deltaicas, devido maior concentração de Fe^{2+} no ambiente e a maior presença de matéria orgânica (Ketzer *et al.*, 2003; Morad *et al.*, 2012).



4.2.2 Ambientes eodiagenéticos continentais áridos

São caracterizados por possuírem baixo conteúdo de matéria orgânica, sedimentos oxidados, lençóis freáticos profundos, e águas intersticiais com alta concentração de íons, como Ca^{2+} , Na^{2+} , Mg^{2+} e HCO_3^- (Worden & Morad, 2003). Considerando que as taxas de evaporação nesses ambientes normalmente excedem as de precipitação, são formadas condições propícias para a precipitação de evaporitos, como anidrita e gipsita, além de carbonatos, como calcita e dolomita. Tais condições evaporíticas somadas à depleção de HCO_3^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Cl^- devido à precipitação de carbonatos e evaporitos, leva a água intersticial a apresentar uma maior concentração de Mg^{2+} e SiO_2 , favorecendo a autigênese de esmectitas magnesianas trioctaédricas. Processos pedogenéticos em terrenos basálticos ou dolomíticos também estão associados à formação da esmectita nesses ambientes, pois tais rochas representam uma fonte significativa de Mg^{2+} (Karakas & Kadir, 1998).

Cimentos carbonáticos precipitados sob eodiagênese rasa são comuns em depósitos fluviais sob ação de clima semiárido (Dutta & Suttner, 1986; Garcia *et al.*,

1998; Morad, 1998; Morad *et al.*, 2010), sendo normalmente pobres em Fe (Worden & Burley, 2003). Calcretes e dolocretes são constituintes característicos da zona vadosa desses ambientes, onde sua precipitação é favorecida pela diminuição na PCO_2 e aH_2O , geradas pelo processo de evaporação. A precipitação de calcita costuma ocorrer nas porções mais proximais dos canais dos sistemas fluviais, retirando íons de Ca^{2+} da água. Já a ocorrência de dolomita é mais comum nas fácies mais distais dos sistemas fluviais, devido sua precipitação ser favorecida pelo aumento da razão Mg/Ca da água intersticial.

Ambientes continentais áridos são altamente oxidantes, o que força o Fe a permanecer em seu estado férrico. Isso permite a precipitação de óxidos na forma de cutículas, que comumente cobrem os sedimentos, conferindo assim a característica cor avermelhada dos depósitos desse tipo de ambiente.

A composição primária dos sedimentos depositados em ambientes semiáridos é normalmente rica em feldspatos e fragmentos de rochas vulcânicas (Morad *et al.*, 2010), constituintes quimicamente instáveis e propensos a serem dissolvidos pela água meteórica em ambientes úmidos.

4.2.3 Ambientes eodiagenéticos marinhos e mistos

A eodiagênese marinha se diferencia da continental por três aspectos principais, de acordo com Morad *et al.* (2010): (1) a composição alcalina (salina) da água encontra-se em maior equilíbrio termodinâmico com minerais siliciclásticos predominantes em arenitos, como feldspatos potássicos, plagioclásios e micas; (2) A alta atividade de SO_4^- que pode ser reduzido por bactérias, favorecendo a precipitação de pirita em detrimento de argilas ferrosas ou siderita e; (3) a abundância de organismos com carapaças carbonáticas e silicosas, que servem como fonte local de $CaCO_3$ e SiO_2 .

A composição da água marinha é levemente alcalina (pH 8,3) e apresenta alta concentração dos íons Na^+ e Cl^- , com uma salinidade de aproximadamente 35.000 ppm (Worden & Burley, 2003; Worden & Morad, (2003). A interação entre matéria orgânica e solutos inorgânicos oxidantes, como SO_4^{2-} e os minerais detriticos promove uma rápida alteração eodiagenética dos sedimentos, levando à

precipitação de uma série de constituintes diagenéticos, como pirita, carbonatos e argilas verdes como glauconita, bertierina e esmectita.

Apesar dos sedimentos siliciclásticos depositados em ambientes marinhos possuírem comumente pequena quantidade de grãos instáveis, a presença de invertebrados de conchas carbonáticas e a consequente dissolução de seus bioclastos promovem a precipitação de calcita eodiagenética (Morad *et al.*, 2010). Do mesmo modo, a dissolução de bioclastos silicosos, como espículas de esponjas, favorece a precipitação de cimentos como opala, calcedônia ou quartzo microcristalino (Aase *et al.*, 1996; Jahren & Ramm, 2000; Lima & De Ros, 2002). A presença de intraclastos carbonáticos retrabalhados ou sedimentos vulcanoclásticos altamente reativos constituem fontes alternativas para a precipitação de carbonatos (Morad, 1998). A cimentação de depósitos praias (*backshore* e *foreshore*) normalmente ocorre por calcita rica em Mg e resulta da evaporação da água do mar e perda de CO₂ (Scoffin & Stoddart, 1983; Vieira & De Ros, 2006). Apesar da calcita magnésiana ser o carbonato eodiagenético mais comum no ambiente marinho, a precipitação de dolomita também ocorre, sobretudo se associada a condições mais evaporíticas, nas quais existe uma maior razão Mg/Ca na água (Morad, 1998).

A pirita também é um cimento comum na eodiagênese marinha, especialmente precipitada na sua forma framboidal, sendo resultado da redução do sulfato e do ferro férrico (Fe³⁺) pela ação microbiana (Love, 1969). A sua ocorrência é um forte indicador de condições químicas redutoras das águas do paleoambiente deposicional.

A bertierina é um argilomineral verde rico em ferro que pertence ao grupo da caulinita e costuma precipitar tipicamente na forma de oóides e pelóides em ambientes deltáicos/estuarinos (Hornibrook & Longstaffe, 1996; De Hon *et al.*, 1999; Morad *et al.*, 2010). Sua autigênese é favorecida em ambientes redutores, com baixo aporte sedimentar, com alta presença de Fe²⁺ e baixa concentração de sulfato dissolvidos, condições características de águas salobras de deltas e estuários. A ocorrência de pelóides e oóides de bertierina em arenitos de origem deltaica/estuarina também representam um bom marcador estratigráfico, indicando depósitos típicos do trato de sistema transgressivo (TST) (Morad *et al.*, 2012).

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Levantamento bibliográfico

Foi realizada uma ampla compilação de trabalhos realizados na Bacia do Parnaíba, na qual foram analisados estudos sedimentológicos, petrológicos, estratigráficos e paleontológicos de caracterização da seção cretácea da bacia, com enfoque especial para as Formações Codó e Itapecuru. Também foram levantados estudos paleoambientais e de paleoclimatologia do intervalo Aptiano-Albiano, com o intuito de buscar relações entre o contexto deposicional local da unidade estudada e eventos geológicos e condições climáticas de âmbito global atuantes no período. Ainda, foi realizada uma revisão sobre processos, produtos e ambientes diagenéticos com o objetivo de fornecer uma base teórica sólida para a interpretação dos dados obtidos e sua discussão.

5.2 Petrografia quantitativa sistemática

Foram descritas 82 lâminas delgadas de dois poços (PN-1 e PN-2), testemunhados nas regiões de Coroatá e Trizidela do Vale (MA), localizados a uma distância de aproximadamente 50 km entre si. A análise petrográfica quantitativa foi executada com o uso de um microscópio petrográfico Leitz Labourlux 12 e do software Petroledge® (De Ros *et al.*, 2007).

As lâminas delgadas foram preparadas a partir da impregnação por resina *epoxy* azul de amostras selecionadas, com o objetivo de facilitar a visualização da porosidade e preservar os constituintes diagenéticos. As amostras contendo carbonato foram tingidas com uma solução hidroclorídrica diluída de alizarina (C₁₄H₈O₄) e ferrocianeto de potássio (C₆FeK₄N₆), com o objetivo específico de diferenciar as espécies de carbonatos (Dickison, 1966).

A análise quantitativa foi executada por meio da contagem de 300 pontos por lâmina, de acordo com o método Gazzi-Dickinson (Zuffa, 1985). Essa análise compreendeu a caracterização da textura e estrutura deposicional, composição detrítica e diagenética, bem como as relações paragenéticas e os diferentes tipos de

porosidade. Os dados analisados foram registrados sistematicamente e integrados por meio do *software* Petroledge® (De Ros *et al.* 2007), que também gera classificação textural e composicional (*sensu* Folk, 1968) e de proveniência (*sensu* Dickinson, 1985) para os arenitos. Os folhelhos descritos no intervalo estudado foram analisados qualitativamente utilizando-se uma estimativa visual.

5.3 Documentação fotomicrográfica

O registro fotomicroográfico das amostras estudadas foi executado com a utilização de um microscópio *Zeiss Axio Imager A2* com câmera acoplada e da análise de imagens ao vivo através do programa *ZEN™* 2011. Foram adquiridas imagens digitalizadas em alta resolução das diferentes petrofácies, dos principais constituintes primários e diagenéticos, bem como de texturas e estruturas deposicionais, e diferentes tipos de poros.

5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foi realizada a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no modo de elétrons retroespalhados (*backscattered electrons* - BSE) de cinco lâminas petrográficas, com suporte de análises composicionais elementares por *energy dispersive spectroscopy* (EDS), com o objetivo de identificar e caracterizar constituintes diagenéticos e relações paragenéticas de difícil reconhecimento durante a descrição petrográfica ótica. As lâminas delgadas selecionadas foram polidas e metalizadas com ouro. A análise por MEV foi realizada no Laboratório de Geologia Isotópica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, utilizando um microscópio eletrônico *JEOL JSM-6610LV* com um equipamento de EDS *Brucker* acoplado.

5.5 Difração de Raios-X

Foram realizadas sete análises da fração argila (<20 µm) para determinação da mineralogia das argilas. As amostras foram preparadas na forma natural, glicolada e calcinada, e analisadas com um difratômetro *Bruker D8 Advance* e o *software DIFFRAC.EVA V5.1*, no laboratório do Instituto do Petróleo e Recursos Naturais (IPR) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS).

6. SÍNTESE DOS RESULTADOS E INTERPRETAÇÕES

- A caracterização petrográfica dos depósitos do intervalo contínuo que compreende a transição entre as formações Codó e Itapecuru permitiu identificar sete litologias distintas: arenitos; heterolitos; conglomerados intraclásticos e arenitos conglomeráticos; lamitos e siltitos; folhelhos; ruditos e arenitos híbridos; e calcarenitos.
- Arenitos representam 38% das amostras analisadas, variando de muito finos a médios, com conteúdo variável de lama. Em termos texturais, variam de mal a bem selecionados, possuindo grãos normalmente subangulares e com média esfericidade. Apresentam estratificações irregulares, cruzadas ou horizontais, sendo raramente maciços.
- A composição primária dos arenitos, heterolitos e conglomerados intraclásticos é rica em quartzo monocristalino, plagioclásio, ortoclásio e microclínio. Grãos de biotita e muscovita são abundantes em algumas amostras de arenitos e nos heterolitos, comumente depositados em níveis associados com fragmentos carbonosos. Fragmentos vulcânicos, metamórficos, de chert e lutitos também são bastante comuns nesses litotipos.
- Lamitos e siltitos representam 25% das amostras e foram descritos na seção correspondente à Formação Itapecuru. Apresentam laminação cruzada, irregular ou horizontal, comumente deformadas por bioturbação.

- Folhelhos representam 8% das amostras e foram observados em um intervalo que marca o final da Formação. Codó. Análises de DRX determinaram que a composição primária de suas argilas é formada por proporções semelhantes de caulinita e esmectita. Bioclastos de peixes e ostracodes são os constituintes intrabaciais mais relevantes nesses depósitos, tendo sido depositados de forma dispersa na matriz argilosa.
- A distribuição dos ruditos e arenitos híbridos é limitada a dois pequenos intervalos no poço 2-TV-1-MA, associados ao intervalo maior que compreende os folhelhos. Os arenitos híbridos são formados por bioclastos de ostracodes articulados dispersos em uma matriz lamosa parcialmente substituída por pirita, calcita e dolomita. Os ruditos híbridos são compostos por bioclastos de gastrópodes e bivalves recristalizados, depositados em matriz lamosa parcialmente substituída pelos mesmos constituintes diagenéticos dos arenitos híbridos. Bioclastos de foraminíferos, pellets fecais e espinhas de peixe também foram descritos nos ruditos.
- Calcarenitos ocorrem apenas na profundidade 164,60 m na base da sucessão de folhelhos da Fm. Codó. Apresentam laminação paralela marcada pela intercalação de pelóides carbonáticos compactados e níveis cimentados por calcita, possuindo pequenas quantidades de grãos siliciclásticos, fragmentos carbonosos e pelóides argilosos.
- A porosidade primária intergranular é normalmente bem preservada nos arenitos e conglomerados intraclásticos. Já nos heterolitos e siltitos, a porosidade intergranular é restrita aos níveis mais arenosos. Porosidade por dissolução de constituintes primários, sobretudo dos feldspatos, é comum. Poros de fratura são o tipo mais comum de porosidade nos folhelhos analisados.
- Os constituintes e processos diagenéticos observados no intervalo formaram-se predominantemente durante a eodiagênese, quando a composição química das águas intersticiais foi controlada predominantemente pelo ambiente deposicional. A compactação mecânica nesses depósitos limitou-se à geração de pseudomatriz pela compactação de intraclastos lamosos, pelóides argilosos, fragmentos carbonosos e grãos alterados de biotita.

- A ocorrência de caulinita e significativa dissolução de feldspatos indicou a existência de condições climáticas úmidas nos paleoambientes que compõe a Formação Codó e Itapecuru. A precipitação de caulinita preenchendo poros intergranulares e expandindo grãos de muscovita é atribuída a reações de alteração de feldspatos e outros aluminossilicatos por águas meteóricas.
- A abundância e ampla distribuição de fragmentos carbonosos mostrou a existência de uma vegetação abundante durante um considerável período de tempo, indicando a presença de umidade significativa nestes paleoambientes.
- A distribuição de agregados e franjas de esmectita em arenitos e heterolitos ao longo do intervalo sugere a ocorrência de condições climáticas semiáridas à áridas intercaladas às úmidas durante a formação desses depósitos.
- A abundância local de bioclastos de gastrópodes e ocorrência de foraminíferos, associados à precipitação de gipsita fibrosa e pirita framboidal nos ruditos híbridos, sugeriu um paleoambiente lacustre com episódica, embora significativa, influência marinha, corroborando modelos paleodeposicionais clássicos para a porção superior da Fm. Codó. A precipitação alternada de calcita e dolomita ferrosa suporta a hipótese de uma mistura de águas marinhas e meteóricas no paleoambiente Codó, no qual a dolomita haveria precipitado em períodos de maior evaporação (e maior concentração de Mg^{2+} na água) e a calcita formada em águas mais diluídas após períodos de recarga meteórica.
- A precipitação de esferulitos de calcita associados à gipsita fibrosa eodiagenética nos folhelhos sugeriu a ocorrência de condições evaporíticas no paleolago Codó. A deformação da matriz lamosa pela nucleação dos esferulitos evidencia o caráter eodiagenético e deslocante da precipitação de calcita.
- A ocorrência de gipsita fibrosa nos folhelhos é relacionada à percolação de fluidos altamente salinos e saturados em sulfato e cálcio, característicos de ambientes evaporíticos, que foi precipitada em poros de contração da matriz durante períodos de altas taxas de evaporação.
- A ampla distribuição de pelóides de bertierina mostrou uma significativa influência marinha durante a deposição de todo o intervalo. Sua abundância nos arenitos e heterolitos da Fm. Itapecuru sugere uma origem deltaica ou

estuarina para esses depósitos. A ocorrência de pirita framboidal em todos os litotipos indica a presença de condições redutoras durante a eodiagênese de todo o intervalo, além de contribuição marinha.

- A predominância de interestratificados clorita-esmectita (C/S) substituindo e expandindo grãos de biotita em arenitos e heterolitos da Formação Itapecuru foi atribuída à precipitação eodiagenética em águas ligeiramente salinas em um sistema fluvial/deltaico ou estuarino transicional.
- A formação de óxidos de ferro ocorreu devido à alteração de depósitos de baía interdistributários do paleoambiente Itapecuru, promovida por intensa bioturbação associada a processos iniciais de pedogênese.
- A ocorrência de calcita eodiagenética poiquilotópica ou macrocristalina preenchendo poros intergranulares foi observada em maiores volumes de arenitos porosos da Fm. Itapecuru, depositados em canais fluviais ou distributários, assim como em sedimentos deltaicos ou estuarinos sob condições semiáridas.

7. CONCLUSÕES

A integração entre caracterização petrográfica, análise mineralógica das argilas por difratometria de raios-x e microscopia eletrônica indicou a alternância entre condições climáticas úmidas e áridas, além de uma variável, porém intermitente influência marinha durante a deposição do intervalo estudado. A ocorrência inequívoca de condições úmidas nestes depósitos reforça a hipótese de um aumento progressivo da umidade do final do Aptiano para o Albiano, promovido pela abertura do Oceano Atlântico Equatorial e a progressiva instauração do Cinturão Equatorial Úmido do Albiano. Tais observações ampliam a compreensão a respeito das condições paleoambientais e paleoclimáticas regionais da região norte/nordeste do Brasil durante o final do andar Aptiano e início do Albiano.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aase, N.E., Bjørkum, P. A. & Nadeau, P.A. 1996. The effect of grain-coating microquartz on preservation of reservoir porosity. *AAPG Bulletin*, 80: 1654–1673.

Aguiar, G.A. 1969. *Bacia do Maranhão: Geologia e Possibilidade de Petróleo*. Relatório Petrobras, DEPEX/ SEDOC, 371 (12): 15-46.

Aguiar, G.A. 1971. Revisão Geológica da bacia Paleozóica do Maranhão. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25., 1971, São Paulo. Anais...* São Paulo, SBG, v. 1, p. 113-122.

Antonioli, L., Thiago, L.K., Rodrigues, M.A.C. & Dino, R. 1999. Análise palinoestratigráfica de sedimentos aptianos da Bacia do Parnaíba, afloramentos na região de Codó, MA. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PALEONTOLOGIA, 16., Crato (Ceará). Resumos...* Crato, SBP, vol. 12, p. 18-19.

Antonioli, L. 2001. *Estudo palino-cronoestratigráfico da Formação Codó-Cretáceo inferior do Nordeste Brasileiro*. Rio de Janeiro, 265p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Arai, M. & Coimbra J.C. 1990. Análise paleoecológica do registro das primeiras ingressões marinhas na Formação Santana (Cretáceo Inferior da Chapada do Araripe). *In: SIMPÓSIO SOBRE A BACIA DO ARARIPE E BACIAS INTERIORES DO NORDESTE, 1., 1990, Crato. Anais...* Crato, p. 225-239.

Arai, M. 2011. Paleogeografia do Atlântico Sul no aptiano: um novo modelo a partir de dados micropaleontológicos recentes. *Boletim de geociências da Petrobras*, 17 (2): 331-351.

Arai, M. 2014. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. *Brazilian journal of Geology*, 44 (2): 339-350.

Aranha, L.G.F., Lima, H.P., Souza, J.M.P., Makino, R.K. & Figueiras, A.J.M. 1988. Evolução Tectônica e Sedimentar das Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. Anais...* Belém, SBG, p. 2487-2498.

Aranha, L.G.F., Lima, H. P., Souza, J. M. P. & Makino, R. K. 1990. Origem e evolução das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. *In: Raja Gabaglia, G. P., Milani, E.J. (Eds.). Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro, Petrobras, p. 221-233.

Araújo, D. B. 2017. *Bacia do Parnaíba: Sumário geológico e setores em oferta*. Rio de Janeiro, Superintendência de definição de blocos, 114p.

Austin, Jr, J.A. & Uchupi, E. 1982. Continental-oceanic crustal transition off Southwest Africa. *AAPG Bulletin*, 66(9): 1328-1347.

Azevedo, R.L.M. 2001. *O Albiano no Atlântico Sul: estratigrafia, paleoceanografia e relações globais*. Porto Alegre, 401p. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Azevedo, R.L.M. 2004. Paleoceanografia e a evolução do Atlântico Sul no Albiano. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 12(2): 231-249.

Batista, A.M.N. 1992. *Caracterização Paleoambiental dos Sedimentos Codó-Grajaú, Bacia de São Luís (MA)*. Belém, 102p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará.

Batista, D.L. 2009. *Quelônios da Formação Itapecuru (Cretáceo Inferior), Bacia do Parnaíba*. Rio de Janeiro, 74p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Brito-Neves, B.B., Fuck, R.A., Cordani, U.G. & Thomaz Filho, A. 1984. Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: a case of tectonic heritage. *Journal of Geodynamics*, 1: 495–510.

Bond, G.C., Nickeson, P.A. & Kominz, M.A. 1984. Breakup of a supercontinent between 625 and 555 Ma: new evidence and implications for continental histories. *Earth Planet. Sci. Lett.* 70: 325–345.

Campbell, D.F. 1949. *Revised report of the Reconnaissance Geology of the Maranhão Basin*. Rio de Janeiro, Petrobras/DEPEX, 117p. (Relatório interno).

Carneiro, R.G. 1974. *Mapeamento estrutural da área Grajaú-Imperatriz*. Belém, Petrobras, 398, 30p. (Relatório técnico).

Carvalho, M.A., Lana, C.C., Bengtson, P. & Sá, N.P. 2017. Late Aptian (Cretaceous) climate changes in northeastern Brazil: A reconstruction based on indicator species analysis (IndVal). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485: 543-560.

Carvalho, M.A., Bengtson, P., Lana, C. C., Sá, N. P., Santiago, G. & Giannerini, M. C. S. 2019. Late Aptian (Early Cretaceous) dry–wet cycles and their effects on vegetation in the South Atlantic: Palynological evidence. *Cretaceous Research*, 100: 172-183.

Chaboureau, A.C., Donnadieu, Y., Sepulchre, P., Robin, C., Guillocheau, F. & Rohais, S. 2012. The Aptian evaporites of the South Atlantic: a climatic paradox?. *Climate of the Past*, 8(3): 1047-1058.

Chumakov, N.M. 1995. The problem of the warm biosphere. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 3: 205–215.

Chumakov, N.M. 2004. Climatic zones and climate of the Cretaceous period. In: Semikhatov, M.A., Chumakov, N.M. (Eds.). *Climate in the epochs of major biospheric 40 transformations*. Moscow, Transactions of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, vol. 550, p. 105–123.

Corrêa-Martins, F., Mendes, J.C., Bertolino, L.C. & Mendonça, J.O. 2018. Petrografia, Diagênese e Considerações sobre Proveniência da Formação Itapecuru no Norte do Maranhão (Cretáceo Inferior, Bacia do Parnaíba, NE Brasil). *Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ*, 41 (3): 514-530.

Corrêa-Martins, F. 2019. The Neostatotype of Itapecuru Formation (Lower-Middle Albian) and Its Impact for Mesozoic Stratigraphy of Parnaíba Basin. *An. Acad. Bras. Cien*, 9 (2): 1-19.

Coura, A.P.P. & Borghi, L. 2014. Caracterização faciológica e paleoambiental de estromatólitos da Formação Codó (Aptiano da Bacia do Parnaíba): uma nova abordagem metodológica. *Bol. de Geociências da Petrobras*, 22 (2): 313-332.

Crafts-Brandner, S.J. & Salvucci, M.E. 2000. Rubisco activase constrains the photosynthetic potential of leaves at high temperature and CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 13430–13435.

Crowley, T.J., Mengel, J.G. & Short, D.A. 1987. Gondwanaland's seasonal cycle. *Nature*, 329: 803–807.

Crowley, T.J., Hyde, W.T. & Short, D.A. 1989. Seasonal cycle variations on the supercontinent of Pangaea. *Geology*, 17: 457–460.

Cunha, B.C.C. & Del'Arco, J.O. 1988. Variações faciológicas da Formação Itapecuru na região de Santa Inês - MA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35., 1988, Belém. *Anais...* Belém, SBG, p. 765-77.

Daly, M.C., Andrade, V., Barousse, C.A., Costa, R., McDowell, K., Piggott, N. & Poole, A.J. 2014. Brasiliano crustal structure and the tectonic setting of the Parnaíba basin of NE Brazil: Results of a deep seismic reflection profile. *Tectonics*, 33: 2102–2120.

De Hon, R.A., Clawe, L.N., Washington, P.A. & Young, L.M. 1999. Formation of northern Louisiana ironstones. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 31: 159–160.

De Ros, L.F., Golberg, K., Abel, M., Victoreti, F., Mastella, M. & Castro, E. 2007. Advanced acquisition and management of petrographic information from reservoir 42 rocks using the Petroledge® System. *In: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2007, Long Beach. Expanded Abstracts...* Long Beach, AAPG.

Dickson, J.A.D. 1966. Carbonate identification and genesis as revealed by staining. *Journal of Sedimentary Research*, 36(2): 491-505.

Dickinson, W.R. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. *In: Zuffa, G.G. (Ed.). Provenance of Arenites*. Dordrecht, Springer, NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 148, p. 333–361.

Duarte, S.G., Silva, F.J., Arai, M., Sylvestre, L.S., Wanderley, M.D., Jha, N., Joshi, H., Masure, E. & Atfy, H.E. 2021. Paleoclimatic and paleoecological inferences of the Family Anemiaceae: A palynological investigation from variable spatial and temporal strata in some lithostratigraphic units of Brazil, India and France. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 285: 104316.

Dutta, P. K., & Suttner, L.J. 1986. Alluvial sandstone composition and paleoclimate: II. Authigenic mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56: 346–358.

Ferreira, N.N., Ferreira, E.P., Ramos, R.R.C. & Carvalho, I.S. 2016. Palynological and sedimentary analysis of the Igarapé Ipiranga and Querru 1 outcrops of the Itapecuru Formation (Lower Cretaceous, Parnaíba Basin), Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 66: 15-31.

Ferreira, N.N., Ferreira, E.P., Ramos, R.R.C. & Carvalho, I.S. 2020. Terrestrial and marine palynomorphs from deposits of the pull-apart rift of West Gondwana (Parnaíba Basin, northern Brazil): Biostratigraphy and relation to tectonic events. *Journal of South American Earth Sciences*, 101: 102612.

Fluteau, F., Besse, J., Broutin, J. & Ramstein, G. 2001. The Late Permian climate. What can be inferred from climate modeling concerning Pangaea scenarios and Hercynian range altitude? *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 167: 39–71.

Folk, R.L. 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Hemphill's.

Föllmi, K. B. 2012. Early Cretaceous life, climate and anoxia. *Cretaceous Research*, 35: 230-257.

Garcia, A.J.V., Morad, S., De Ros, L.F. & Al-Aasm, I.S. 1998. Palaeogeographical, palaeoclimatic and burial history controls on the diagenetic evolution of reservoir sandstones: evidence from the Lower Cretaceous Serraria sandstones in the Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil. *In: Morad, S., (Eds). Carbonate Cementation in Sandstones.* Oxford, Blackwell Science, International Association of Sedimentologists Special Publication, vol. 26, p. 107-141.

Góes, A.M. & Feijó, F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8: 57-68.

Góes, A.M. & Rossetti, D.F. 2001. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. *In: Rossetti, D.F., Góes, A.M., Truckenbrodt, W., (Eds.). O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú.* Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, p. 15-29.

Gonçalves, R.A. & Carvalho, I.S. 1996. Contribuição ao estudo da sedimentação da Formação Itapecuru - região de Itapecuru-Mirim, Bacia do Parnaíba (Cretáceo Inferior) - Maranhão - Brasil. *Revista de Geologia*, 9: 75-81.

Granot, R. & Dymant, J. 2015. The Cretaceous opening of the South Atlantic Ocean. *Earth and Planetary Science Lett.*, 414: 156-163.

Guerra-Sommer, M., Degani-Schmidt, I., Mendonça, J.O., Mendonça Filho, J.G., Lopes, F.D.S., Salgado-Campos, V.M.J. & Carvalho, I.S. 2021. Multidisciplinary approach as a key for paleoenvironmental interpretation in a Weichselia-dominant interval from the late Aptian Codó Formation (Parnaíba Basin, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 111: 103490.

Hay, W.W., Migdisov, A., Balukhovskiy, A.N., Wold, C.N., Flögel, S. & Söding, E. 2006. Evaporites and the salinity of the ocean during the Phanerozoic: implications for climate, ocean circulation and life. *In: Buggisch, W. (Ed.). Evolution of the System Earth in the Late Palaeozoic: Clues from Sedimentary Geochemistry.* Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 240: 3–46.

Hay, W.W. & Floegel, S. 2012. New thoughts about the Cretaceous climate and oceans. *Earth-Science Reviews*, 115(4): 262-272.

Heimhofer, U., Hochuli & P.A. 2010. Early Cretaceous angiosperm pollen from a low-latitude succession (Araripe Basin, NE Brazil). *Rev. of Palaeobot. and Palynol.*, 161: 105-126.

Hornibrook, E.R.C. & Longstaffe, F.J. 1996. Berthierine from the Lower Cretaceous Clearwater Formation, Alberta, Canada. *Clays and Clay Minerals*, 44: 1–21.

Jahren, J., & Ramm, M. 2000. The porosity-preserving effects of microcrystalline quartz coatings in arenitic sandstones: Examples from the Norwegian continental shelf. *In: Worden, R. & Morad, S. (Eds.). Quartz cementation in sandstones*. Oxford, Blackwell Publishing Ltd., International Association of Sedimentologists Special Publication, vol. 29, p. 271-280.

Kegel, W. 1956. *As inconformidades da Bacia do Parnaíba e zonas adjacentes*. Rio de Janeiro, DNPM, v. 160.

Ketzer, J.M., Morad, S. & Amorosi, A. 2003. Predictive diagenetic clay-mineral distribution in siliciclastic rocks within a sequence stratigraphic framework. *In: Worden, R.H., Morad, S., (Eds.). Clay cements in sandstones*. Oxford, Blackwell Publishing Ltd. International Association of Sedimentologists Special Publication, vol. 34, p. 42–59.

Kidder, D.L. & Worsley, T.R. 2010. Phanerozoic large igneous provinces (LIPs), HEATT (Haline Euxinic Acidic Thermal Transgression) episodes and mass extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 295: 162–191.

Klein, E.L. & Sousa, C.S. 2012. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Maranhão: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Maranhão, Escala 1:750.000. Belém, Serviço Geológico do Brasil (CPRM) 152p.

Lima, E.A. & Leite, J.F. 1978. *Projeto estudo global de recursos minerais da Bacia do Parnaíba: integração geológica-metalogenética*. Recife, DNPM/CPRM, 231p. (Relatório Final da Etapa III).

Lima, M.R., 1980. Considerações palinológicas a respeito da correlação estratigráfica entre as formações Cretáceas do nordeste do Brasil. *In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE PALEONTOLOGIA*, Buenos Aires. *Anais...* Buenos Aires, vol. 5, p. 227-233.

Lima, M.R., 1982. Palinologia da Formação Codó, Maranhão. *Bol. Inst. Geociências-USP*, 13: 223-228.

Lima, R.D., & De Ros, L.F. 2002. The role of depositional setting and diagenesis on the reservoir quality of Late Devonian sandstones from the Solimões Basin, Brazilian Amazonia. *Marine and Petroleum Geology*, 19: 1047– 1071.

de Lima Barros, C., Silva, S.C., Machado, L.L., Netto, A.D.M.R., Sames, B., Alves, T.D. & da Silva Júnior, R.P. 2022. Non-marine ostracods of the Codó Formation (upper Aptian, Lower Cretaceous), Parnaíba Basin, NE Brazil: new biostratigraphic and paleoecological insights. *Cretaceous Research*, 133: 105125.

- Lindoso, R.M., Carvalho, I.S. & Mendes, I.D. 2013. An isopod from the Codó Formation (Aptian of the Parnaíba Basin), Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 43: 16-21.
- Lindoso, R.M., Maisey, J.G. & Carvalho, I.S. 2016. Ichthyofauna from the Codó Formation, Lower Cretaceous (Aptian, Parnaíba Basin), Northeastern Brazil and their paleobiogeographical and paleoecological significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 447: 53-64.
- Lindoso, R.M., Dutra, T.L., Carvalho, I.S. & Medeiros, M.A. 2018. New plant fossils from the Lower Cretaceous of the Parnaíba Basin, Northeastern Brazil: Southern Laurasia links. *Brazilian Journal of Geology*, 48(1): 127-145.
- Martill, D.M. 1988. Preservation of fish in the Cretaceous Santana Formation of Brazil. *Palaeontology*, 31(1):1-18.
- Medeiros, M.A. & Schultz, C.L. 2001. Uma paleocomunidade de vertebrados do Cretáceo Médio, Bacia de São Luís. *In*: Rossetti, D.F., Góes, A.M & 46 Truckenbrodt, W. (Eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Goeldi, p. 209-223.
- Mendes, M.S. & Borghi, L. 2005. Análise faciológica da Formação Codó (Cretáceo, Bacia do Parnaíba) em testemunhos de sondagem. *In*: III CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D DE ÓLEO E GÁS, 3., 2005, Salvador. *Anais...* Salvador, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Salvador, p. 1-6.
- Mendes, M. 2007. *Análise estratigráfica do intervalo Formacional Grajaú-Codó (aptiano) da Bacia do Parnaíba, NE do Brasil*. Rio de Janeiro, 146p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Menezes, M.N., Araújo-Júnior, H.I., Dal'Bó, P.F. & Medeiros, M.A.A. 2019. Integrating ichnology and paleopedology in the analysis of Albian alluvial plains of the Parnaíba Basin, Brazil. *Cretaceous Research*, 96: 210-226.
- Mesner, J.C. & Wooldridge, L.C.P. 1962. *The Maranhão Basin Study Revision*. Belém, Petrobras, 2: 103-645.
- Mesner, J.C. & Wooldridge, L.C.P. 1964. Maranhão Paleozoic basin and Cretaceous coastal basins, north Brazil. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 48(9): 1475–1512.
- Miranda, M.C.C. & Rossetti, D.F. 2006. Reconstituição paleoambiental de depósitos albianos na borda leste da bacia de Grajaú, MA. *Rev. Bras. Geoc.*, 36: 623-635.

Morad, S. 1998. Carbonate cementation in sandstones: distribution patterns and geochemical evolution. *In: Morad, S., (Ed.). Carbonate cementation in sandstones.* Oxford, Blackwell Publishing Ltd., International Association of Sedimentologists Special Publication, vol. 26, p. 1-26

Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J.M. & De Ros, L.F. 2010. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: a review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 94: 1267–1309.

Morad, S., Ketzer, J. & De Ros, L. 2012. Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy: An Integrated Tool for Understanding and Predicting Reservoir Quality Distribution. *In: Morad, S., Ketzer, J.M., De Ros, L. F., (Eds.). Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy.* London, John Wiley & Sons, p. 1-36.

Nascimento, M.S., Góes, A.M., Macambira, M.J.B. & Brod, J. A. 2007. Provenance of Albian sandstones in the São Luís-Grajaú Basin (northern Brazil) from evidence of Pb-Pb zircon ages, mineral chemistry of tourmaline and paleocurrent data. *Sedimentary Geology*, 201: 21-42.

Neves, I.A. 2007. *Caracterização da faciologia orgânica de uma seção sedimentar da Formação Codó, Bacia do Parnaíba.* Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Nürnberg, D. & Müller, R.D. 1991. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present. *Tectonophysics*, 191(1-2): 27-53.

Nunes, K.C. 1993. Interpretação integrada da Bacia do Parnaíba com ênfase nos dados aeromagnéticos. *In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN, 3., resumos...* Geophysical Society, p. 152–157.

Oliveira-Pessoa, V.C. & Borghi, L. 2004. Análise Faciológica da Formação Itapecuru (Cretáceo, Bacia do Parnaíba) em testemunhos de sondagem. *In: Anais CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2004, Salvador, 6 p.*

Otto-Bliesner, B. 1999. Effects of tropical mountain elevation on the climate of the Late Carboniferous: climate model simulations. *In: Crowley, T.J., Burke, K.C. (Eds.). Tectonic Boundary Conditions for Climate Reconstructions.* Oxford, Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 39, p. 100–115.

Paz, J.D.S. & Rossetti, D.F. 2001. Reconstrução paleoambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do Grajaú, MA. *In: Rossetti, D.F., Góes, A.M.,*

Truckenbrodt, W. (Eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi (Coleção Friedrich Katzer), p. 77-100.

Paz, J.D.S. & Rossetti, D.F. 2005. Linking lacustrine cycles with syn-sedimentary tectonic episodes: an example from the Codó Formation (late Aptian), Northeastern Brazil. *Geological Magazine*, 142(3): 269-285.

Pedraõ, E., Barrilari, I.M.R., Lima, H.P., 1993. *Estudos palinológicos dos sedimentos cretácicos da Bacia do Parnaíba*. Rio de Janeiro, CENPES/DIVEX/Petrobras, 40p. (Internal report).

Pedraõ, E. 1995. *Palinoestratigrafia e evolução paleoambiental de rochas sedimentares aptianas-cenomanianas das bacias de Bragança-Viseu e São Luís*. Rio de Janeiro, 225p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Poulsen, C.J., Gendaszek, A.S. & Jacob, R.L. 2003. Did the rifting of the Atlantic Ocean cause the Cretaceous thermal maximum?. *Geology*, 31(2): 115-118.

Pinto, I.D. & Ornellas, L.P. 1974. New Cretaceous Hemiptera (Insects) from Codó Formation, northern Brazil. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 28. 1974, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre, SVG, v. 1, p. 289-304.

Rodrigues, R. 1995. *A geoquímica Orgânica na Bacia do Parnaíba*. Porto Alegre, 225p. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Rossetti, D.F., Góes, A.M., Truckenbrodt, W. & Anaisse, J.R.J. 2000. Tsunami induced large-scale scour-and-fill structures in Albian to Cenomanian deposits of Grajaú Basin, Northern Brazil. *Sedimentology*, 47: 309- 323.

Rossetti, D.F., Góes, A.M. & Arai, M.A. 2001a. A passagem aptiano-albiano na Bacia do Grajaú, MA. *In: Rossetti, D.F., Góes, A.M., Truckenbrodt, W. (Eds.). O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, p. 101-117.

Rossetti, D.F., Truckenbrodt, W. & Santos Junior, A.E. 2001b. Clima do cretáceo no meio-norte brasileiro. *In: Rossetti, D.F., Góes, A.M., Truckenbrodt, W. (Eds.), O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi (Coleção Friedrich Katzer), p. 67-76.

Rossetti, D.F. & Góes, A.M. 2003. Caracterização Paleambiental de Depósitos Albianos da borda sul da Bacia de São Luís-Grajaú: Modelo de delta fluvial influenciado por tempestade. *Rev. Bras. Geoci.*, 33: 299- 312.

Rossetti, D.F., Paz, J.D.S. & Góes, A.M. 2004. Fácies analysis of the Codó Formation (Late Aptian) in the Grajaú Área, Southern São Luís-Grajaú Basin. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76(4): 791-806.

Santos, J.Q., Mamede, V.M., 1990. Litofácies e Sistemas Depositionais da Formação Itapecuru na Porção Centro-Oeste do Estado do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 36., 1988, Natal. *Anais...* Natal, SBG, p. 150-156.

Saraiva, A.A.F. 2008. Caracterização paleoambiental e paleoceanográfica da Formação Romualdo, Bacia sedimentar do Araripe. Recife, 96p. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco.

Scoffin, T.P., & Stoddart, D.R. 1983, Beachrock and intertidal cements. In: Goudie, A.S & Pye, K., (Eds.). *Chemical sediments and geomorphology: Precipitates and residua in the near-surface environment*. Chicago, Academic Press, p. 401–425.

Sellwood, B.W. & Valdes, P.J. 2008. Jurassic climates. *Proceedings of the Geologists' Association*, 119(1): 5-17.

Silva-Santos, R. 1991. Fósseis do Nordeste do Brasil: paleoictiofáunula da Chapada do Araripe. Rio de Janeiro, 64p. Departamento de Biologia Animal e Vegetal, Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

Tucker, M.E. 1991. *Sedimentary Petrology. An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. Oxford, Blackwell Scientific, 260 p.

Varejão, F.G., Warren, L.V., Simões, M.G., Buatois, L.A., Mángano, M.G., Bahniuk, A. M. & Assine, M.L. 2021. Mixed siliciclastic-carbonate sedimentation in an evolving epicontinental sea: Aptian record of marginal marine settings in the interior basins of north-eastern Brazil. *Sedimentology*, 1-40.

Vaz, P.T., Rezende, N.G.A.M., Wanderley Filho, J.R. & Travassos, W.A.S. 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2): 253-263.

Vicalvi, M.A., Ferreira, C.S., Carvalho, I.S. & Anjos, S.M. 1993. Fragmentos de ovos de dinossauros da Formação Itapecuru, Maranhão: uma discussão. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65: 218p.

Vieira, M.M., & De Ros, L.F. 2006. Cementation patterns and genetic implications of Holocene beachrocks from northeastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 192: 207–230.

Worden, R.H. & Burley, S.D. 2003. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. *In*: Burley, S.D., Worden, R.H. (Eds.). *Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient*. Oxford, Blackwell Publishing Ltd. Reprint Series of the International Association of Sedimentologists, vol. 4, p. 3–44.

Worden, R.H. & Morad, S. 2003. Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution. *In*: Worden, R.H., Morad, S. (Eds.). *Clay Mineral Cements in Sandstones*. Oxford, Blackwell Publishing Ltd. International Association of Sedimentologists Special Publication, v. 34, p. 1–41.

Zuffa, G.G. 1985. Optical analysis of arenites: influence of methodology on compositional results. *In*: Zuffa, G.G. (Ed.). *Provenance of Arenites*. Dordrecht, Springer, NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, vol. 148, p. 165–189.

9. ARTIGO SUBMETIDO

• Confirming submission to Journal of South American Earth Sciences

Yahoo/Entrada ★



• Journal of South American Earth Sciences <em@editorialmanager.com>
Para: Gustavo Kenji Lacerda Orita



seg., 25 de abr. às 10:46 ★

This is an automated message.

Evolution of Aptian-Albian deposits from the Parnaíba Basin, N-NE Brazil, and the early opening of Equatorial Atlantic Ocean - Paleoenvironmental and paleoclimate evidences from petrologic characterization

Dear Mr. Lacerda Orita,

We have received the above referenced manuscript you submitted to Journal of South American Earth Sciences.

To track the status of your manuscript, please log in as an author at <https://www.editorialmanager.com/sames/> and navigate to the "Submissions Being Processed" folder.

Thank you for submitting your work to this journal.

Kind regards,
Journal of South American Earth Sciences

Evolution of Aptian-Albian deposits from the Parnaíba Basin, N-NE Brazil, and the early opening of Equatorial Atlantic Ocean - Paleoenvironmental and paleoclimate evidences from petrologic characterization

Gustavo Kenji Lacerda Orita^{1*}, Amanda Goulart Rodrigues¹, Luiz Fernando De Ros¹, Fabia Emanuela Rafaloski Bobco², Leonardo Borghi²

¹ Postgraduate Program in Geosciences, Federal University of Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves Ave. 9500, Porto Alegre, RS, Brazil

² Laboratory of Sedimentary Geology (LAGESED), Department of Geology, Federal University of Rio de Janeiro, Athos da Silveira Ramos Ave. 274, Office J1-11, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

* Corresponding author: kenji.orita@yahoo.com.br

Keywords: Diagenesis; Paleoenvironmental analysis; Paleoclimate; Parnaíba Basin; Cretaceous; Sedimentary petrology.

Abstract

The Aptian-Albian interval is considered a period of profound shifts in Earth climate. The deposition of the Cretaceous section of the Parnaíba Basin is related to the final stages of the breakup of the Gondwana supercontinent and the consequent opening of the Equatorial Atlantic Ocean, which constitutes in a pivotal event for the evolution of the Cretaceous climate. The transitional interval between the upper section of the Aptian Codó and Aptian-Albian Itapecuru formations was petrographically characterised, contributing to the understanding of the paleoenvironmental and paleoclimatic conditions during deposition of this key interval. Several sedimentological and paleontological studies interpreted a dominantly semi-arid to arid climate during the deposition of these units, agreeing with consolidated global paleoclimatic models. However, the occurrence of eogenetic constituents typical of humid climate conditions alternated with constituents characteristic of arid conditions

was observed in this study. Humid conditions are mainly indicated by the occurrence of pore-filling and displacive kaolinite in the sandstones and in the primary composition of shales, and by the significant dissolution of feldspars. Likewise, the abundance and widespread distribution of carbonaceous fragments in the succession indicates the existence of significant vegetation during a considerable period. Dry climate conditions are indicated by the occurrence of smectite coatings and interstratified C/S aggregates in the sandstones and heterolites, and of fibrous gypsum, early ferroan dolomite and calcite spherulites in the shales and hybrid rudites. Other petrographic evidence suggested a sustained marine influence during the deposition of the interval. The occurrence of berthierine peloids and ooids suggests a marine contribution during deposition of deltaic or estuarine deposits. The wide occurrence of eogenetic framboidal pyrite suggests that reducing eogenetic conditions, probably under the influence of marine waters. The presence of foraminifera bioclasts, associated with ferroan dolomite, pyrite and gypsum in the hybrid rudites and shales suggests a significant marine influence, and the alternated calcite and ferroan dolomite cementation indicates mixing of marine and meteoric waters in the Codó paleoenvironment. The formation of calcite spherulites is attributed to abiotic precipitation within the siliciclastic matrix under eodiagenesis, and its association with early gypsum suggests evaporative conditions in the paleoenvironment. Iron oxides precipitated mostly due to the alteration of interdistributary bay Itapecuru deposits, often associated with bioturbation and early pedogenetic processes. The occurrence of alternating humid and arid climate conditions in the interval may be related to the early establishment of the Albian Equatorial Humid Belt, caused by the progressive opening of the Equatorial Atlantic Ocean.

1. Introduction

The Aptian-Albian deposits of the giant intracratonic Parnaíba Basin on northeastern Brazil are related to the final stages of the Equatorial Atlantic Ocean opening (Rossetti *et al.*, 2001a; Rossetti *et al.*, 2004; Coura and Borghi, 2014) and final breakup of the Gondwana supercontinent (Austin and Uchupi, 1982; Nürnberg and Müller, 1991; Chaboreau *et al.* 2012). These changes promoted enormous effects

on the Cretaceous climate (Poulsen *et al.*, 2003; Granot and Dymont, 2015) and on the depositional environments of the region. The Aptian-Albian boundary was also a time of major changes in the salinity levels of the oceans (Hay *et al.*, 2006), global oceanic anoxic events (Föllmi, 2012) and extreme global climate state (Kidder and Worsley, 2010).

Paleoclimate was interpreted to be dominantly semi-arid to arid during the deposition of the Aptian-Albian Codó and Itapecuru formations of the Parnaíba Basin (Lima and Leite, 1978; Mendes and Borghi, 2005; Mendes, 2007; Paz and Rossetti, 2001; 2005; Rossetti *et al.*, 2001b; Rossetti *et al.*, 2004), in agreement with classical paleoclimatic models for the Aptian-Albian interval along northern Gondwana (Chumakov *et al.*, 1995; 2004; Hay and Floegel, 2012). However, recent paleoenvironmental investigations indicated evidence of humid conditions for the Aptian-Albian deposits of Parnaíba Basin (Ferreira *et al.*, 2016; Corrêa-Martins, 2019; Menezes *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020; Duarte *et al.*, 2021; Guerra-Sommer *et al.*, 2021), as well as of adjacent Sergipe (Carvalho *et al.*, 2017; 2019) and Araripe (Heimhofer and Hochuli, 2010; Varejao *et al.*, 2021) basins, therefore challenging the standard paleoclimatic interpretation established for Early Cretaceous along northeastern Brazil.

The majority of paleoenvironmental studies on the Codó and Itapecuru deposits were developed based on paleontological and sedimentological investigations (Pinto and Ornellas, 1974; Antonioli *et al.*, 1999; Lima *et al.*, 1980, 1982; Batista, 1992; Rodrigues, 1995; Lindoso *et al.*, 2013; Ferreira *et al.*, 2016; Lindoso *et al.*, 2016, Carvalho *et al.*, 2017; Lindoso *et al.*, 2018; Menezes *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020; Duarte *et al.*, 2021; Guerra-Sommer *et al.*, 2021; De Lima Barros *et al.*, 2022). To our knowledge, only two studies using petrological analysis were conducted (Corrêa-Martins, 2018; Corrêa-Martins, 2019).

A systematic petrographic characterization is key to obtain detailed information on the depositional and diagenetic history of sediments (Tucker, 1991), representing an indispensable tool for the correct interpretation and construction of accurate paleoenvironmental models. The analysis of the early diagenetic record is essential for the comprehension of the original pore water chemistry, providing indispensable information for determining the climatic conditions of continental deposits. Diagenetic characterization also constitutes a useful tool for the recognition of stratigraphic surfaces and sequences (Morad *et al.*, 2012).

The objective of this study is to interpret the paleoenvironmental and paleoclimatic conditions during the deposition of the key interval that corresponds to a continuous and transitional succession between the upper Codó and the Itapecuru formations of the Parnaíba Basin, based on a systematic petrographic investigation. Specific aims comprise the characterization of diagenetic processes and constituents, integrated to the detrital composition, primary texture and porosity of those deposits. This study seeks to contribute to the construction of more accurate paleoenvironmental models for the Cretaceous section of the Parnaíba Basin, improving the comprehension of the climate conditions during a key period in the evolution of South America.

2. Geological setting

The Parnaíba Basin is an intracratonic basin of approximately 666,000 km², located in northeastern Brazil, with up to 3500 m of infill at its depocentre (Campbell *et al.*, 1949; Mesner and Wooldridge, 1962; 1964; Goés and Feijó, 1994). The most important morphological and structural features are the *Picos-Santa Inês* and *Marajó-Paraíba* lineaments, and the extensive Trans Brazilian Lineament that crosses the Parnaíba Basin in a NE-SW orientation (Fig.1) (Vaz *et al.*, 2007). The sedimentary infilling of the Parnaíba Basin was divided into five major sequences: Silurian, Medium-Devonian to Early Carboniferous, Late Carboniferous to Early Triassic, Jurassic and Cretaceous (Goés and Feijó, 1994; Vaz *et al.*, 2007).

The Cretaceous sequence, which is the object of this study, is composed by the *Codó*, *Corda*, *Grajaú* and *Itapecuru Formations* (Fig. 2), and its deposition correspond to the final stages of the opening of the equatorial Atlantic Ocean (Rossetti *et al.*, 2001; Coura and Borghi, 2014). The age of the Codó Formation was defined as late Aptian by different stratigraphic, sedimentological and palynological studies (Lima, 1982; Mendes, 2007; Antonioli, 2001; Rossetti *et al.*, 2001b; Arai 2014; Guerra-Sommer *et al.*, 2021). However, the age of the Itapecuru Formation is more controversial and it is still a matter of debate and investigation. Ferreira *et al.* (2020; 2021) defined the deposition of Itapecuru Formation as restricted to the late Aptian, while other studies attributed a time ranging from the Aptian to the Cenomanian for the deposition of the formation (Pedrão, 1995).

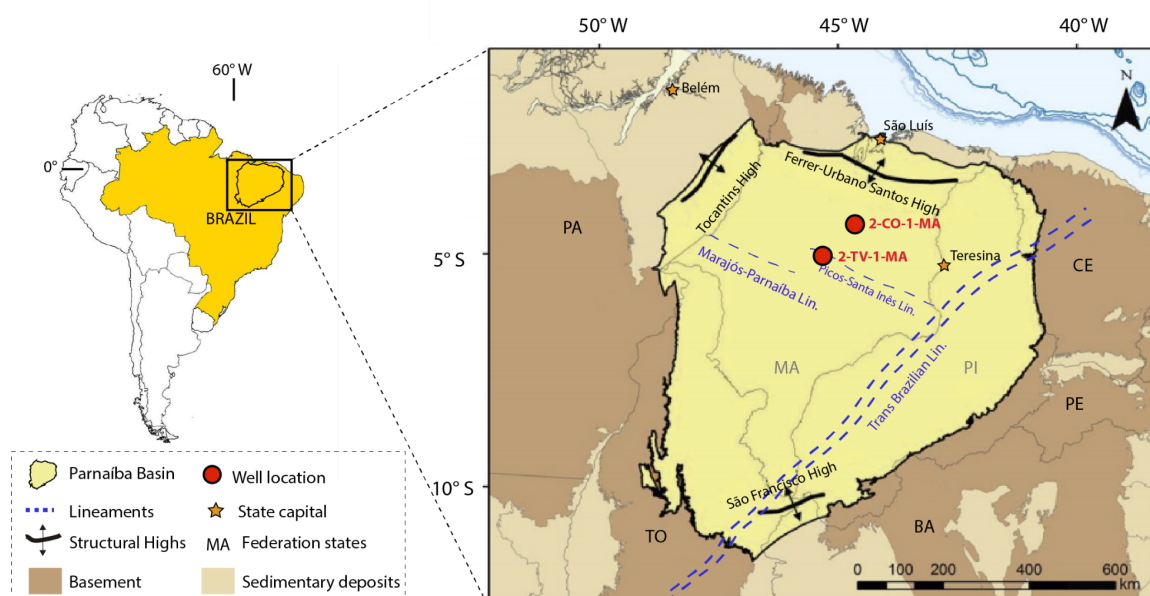


Figure 1: Map showing major structural features of Parnaíba Basin and the location of studied wells (modified from Araújo, 2017).

Mesner and Wooldridge (1964) divided the Codó Formation into three distinct units: (1) a lower bituminous black shale unit with thin interbedded fossiliferous limestones and evaporites; (2) a middle micaceous, angular and porous sandstone unit; (3) an upper fossiliferous marine shale, grey and rich in gastropods. The lower unit was interpreted as deposited in a lacustrine environment that presented evaporitic cycles generated by short marine incursions. The middle and upper units were formed by a transgressive cycle that first deposited marine/shoreface sandstones, which were subsequently overlaid by the fossiliferous shales of the upper Codó Formation. Lima and Leite (1978) also suggested that the Codó Formation was deposited under marine and lacustrine conditions. Nevertheless, some subsequent studies suggested that the depositional facies of the Codó Fm. were formed in a dominant continental lacustrine environment with variable salinity, and under the effect of an arid climate (e.g. Paz and Rossetti, 2001; Rossetti et al, 2001b; Rossetti *et al.*, 2004; Mendes and Borghi, 2005; Paz and Rossetti, 2005). However, other studies suggested that the Codó sedimentation was a result of marine incursions into a paleolake (Antonioli, 2001; Neves, 2007; Mendes, 2007), or that a shallow, restricted marine environment prevailed (Arai, 2011; 2014). In the Parnaíba Basin, the shales, sandstones and

carbonates of the Codó Formation are covered by the deposits of the Itapecuru Formation (Mesner & Wooldridge, 1964; Pedrão *et al.*, 2002; Ferreira, 2020).

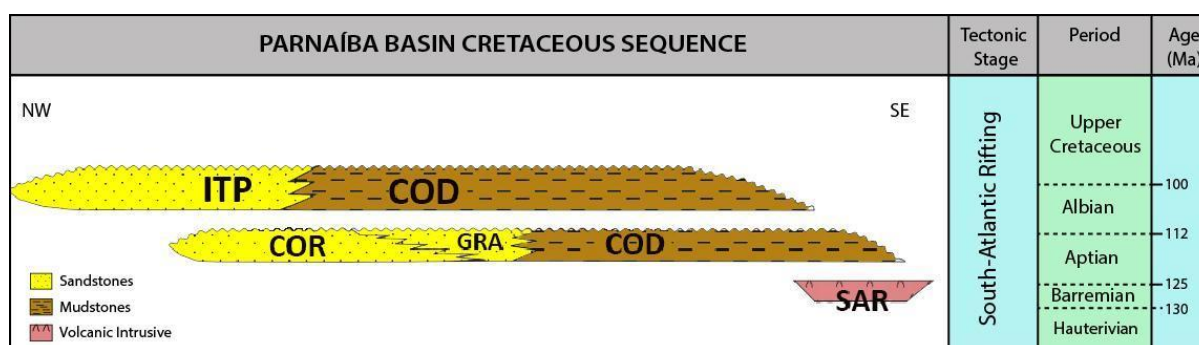


Figure 2: Stratigraphic section of the Cretaceous interval of the Parnaíba Basin, showing the studied units Itapecuru Formation (ITP) and Codó Formation (COD), and the related Corda Fm. (COR), Grajaú Fm. (GRA) and Sardinha Fm. (SAR) (modified from Vaz *et. al.*, 2007).

The Itapecuru Formation was first described by Campbell (1949), who divided the unit into the Serra Negra, Undifferentiated and Boa Vista Members, interpreted as being formed by deposition in a dominantly continental paleoenvironment. Mesner e Wooldridge (1962; 1964) later described the Itapecuru Fm. as composed by sandstones and mudstones, with characteristic reddish or greenish colours, deposited in a predominantly fluvial environment, an interpretation followed by several subsequent studies (Aguiar, 1969; 1971; Carneiro, 1974; Cunha and Del'Arco; 1988, Aranha, *et al.*, 1988; 1990; Góes and Feijó, 1994; Gonçalves and Carvalho, 1996; Santos and Mamede, 1990). The Itapecuru Formation was later interpreted by Lima and Leite (1978) as deposited in a fluvial depositional system with associated floodplains and lakes, under a semi-arid climate. Rossetti *et al.* (2000; 2001), Rossetti and Góes (2003), Miranda and Rossetti (2006), and Nascimento *et al.* (2007) interpreted that the sandstones, conglomerates, limestones and mudstones of Itapecuru Fm. were deposited in a fluvial-deltaic system that flowed into a protected bay or gulf. Pessoa and Borghi (2004), identified associations of floodplain and lateral accretion bar facies, which interpreted a meandering fluvial depositional environment. Ferreira *et al.* (2016), using palynological data, also determined the occurrence of floodplain facies association in the Itapecuru deposits. Menezes *et al.*, (2018; 2019) interpreted a considerable part of the Itapecuru Formation sedimentary succession as composed by alluvial paleosols.

The 2-CO-1 well was drilled in the city of Coroatá (04 14' 50,83"S e 44 14' 26,24"W), located about 400 km South from São Luís, capital of the Maranhão State. It comprises 251 m of sedimentary rocks, cored from the Aptian sandstones of the Itapecuru Formation to the eolian sandstones of the Corda Formation recovered (97% (Fig. 1; Fig. 3). The interval analysed in this study comprises sedimentary rocks cored down to 190 m, with the 0-146 m section interpreted to correspond to the Itapecuru Formation, and the 146-190 m section to the Codó Formation.

The 2-TV-1-MA well was drilled in the municipality of Trizidela do Vale (04 29' 25,44"S e 44 40' 02,95"W), located 450 km southwest from São Luís, comprising 273 m of sedimentary rocks, with 96% of recovery. We focused on the 0 to 160 m interval, in which the 0-112 m section corresponds to the Itapecuru Formation, and the 112-160 m section, to the Codó Formation (Fig. 1; Fig. 3).

3. Materials and methods

A quantitative petrographic analysis was performed in 83 thin sections from the 2 studied wells (Fig. 3). The lithologic types were defined with the support of the petrographic analysis of the selected samples. Petrographic analysis focused on the characterization of primary constituents and depositional texture, diagenetic constituents and pore types. Thin sections were prepared from core samples impregnated with blue epoxy resin, and stained with a solution of alizarin red and potassium ferrocyanide for the identification of carbonate minerals (Dickinson, 1965). The quantification of 300 points per thin section followed the Gazzi–Dickinson point counting method (Ingersoll *et al.* 1984; Zuffa 1985), and the petrographic characterization was performed using the Petroledge® software (De Ros *et al.*, 2007). All siliciclastic samples were classified according to Folk (1968). The most relevant compositional, textural and diagenetic features were documented in digital -photomicrographs using a Zeiss Axio Imager A2 polarising microscope, equipped with a high-resolution camera (Zeiss AXIOcam MRc).

The clay mineralogy of seven selected samples was analysed through X-ray diffraction using a *Bruker D8 Advance* diffractometer from the Institute of Petroleum and Natural Resources (IPR) of the Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul (PUCRS). The clay fractions were separated and their mineralogy was

determined using air dried, glycol-saturated, and heated treatments. The diffractograms were interpreted using the software *DIFFRAC.EVA V5.1* and the *Power Diffraction File 2021* data bank, provided by the International Centre for Diffraction Data (ICDD).

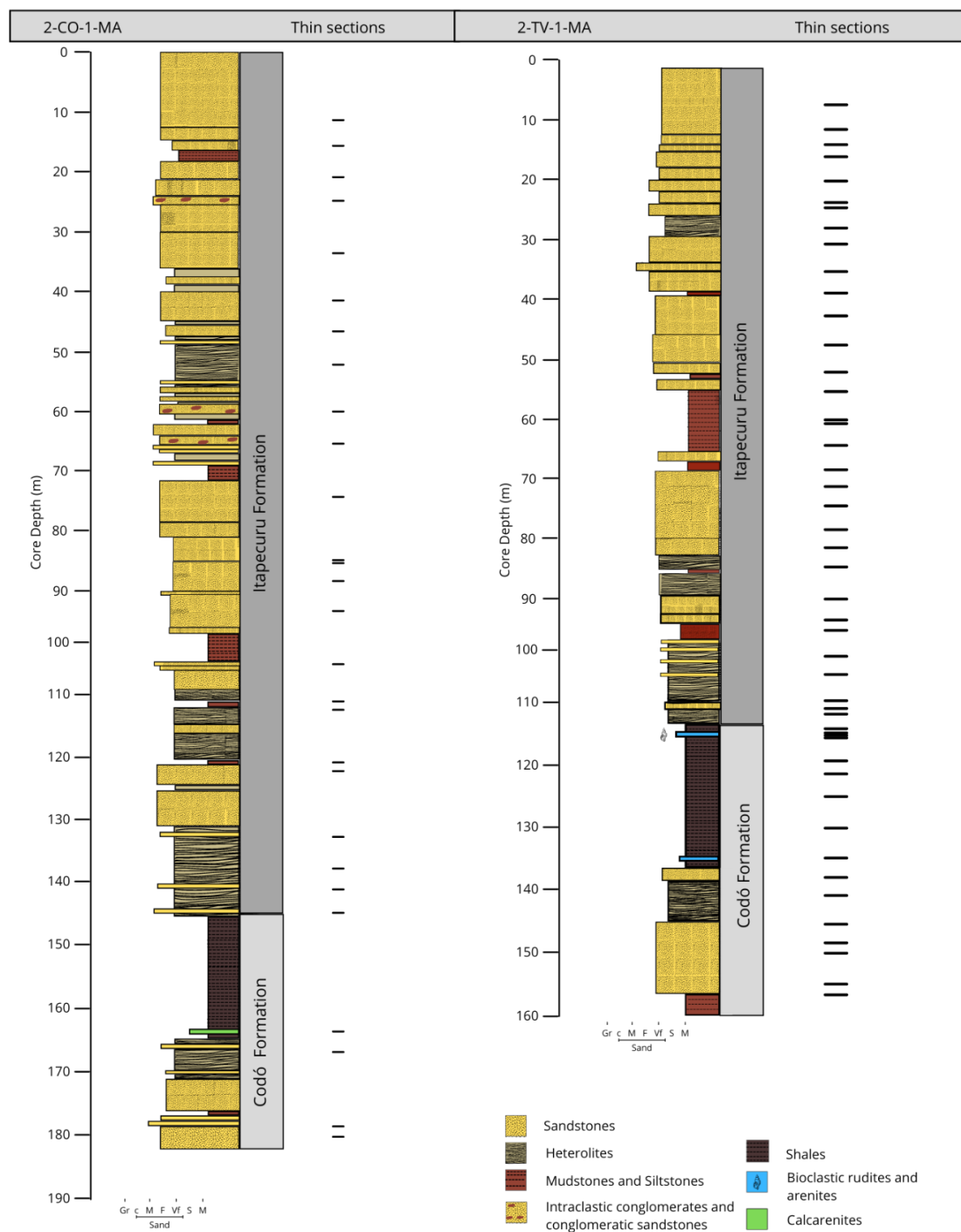


Figure 3: Schematic characterization of the main lithologies in the 2-CO-1-MA and 2-TV-1-MA cores, with the position of the analysed thin sections.

The chemical composition of primary and diagenetic constituents was determined using a JEOL JSM-6610LV scanning electron microscope with a coupled Bruker XFLASH 5030 energy dispersive X-ray spectrometer (EDS). Scanning electron microscopy was performed at the Laboratory of Isotopic Geology (LGI) of the Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS). EDS scans were executed in gold-coated polished thin sections of different types of rocks for a total of 37 analyses. The analytical conditions were a voltage range of 15-20 kV, spot size of 60, working distance of 10-14 mm, and counting time of 60 s.

4. Results

4.1 Structural and textural aspects, and primary composition

The main recognized lithotypes were sandstones, heterolites, mudstones and siltstones, shales, intraclastic conglomerates and sandstones, hybrid rudites and arenites, and calcarenites.

Sandstones represent 38% of the analysed samples and are the most common lithotype, occurring in both the Codó and Itapecuru formations (Fig. 3). They are generally fine-grained, varying from very-fine to medium-grained, presenting a good to poor sorting, with variable amounts of siliciclastic mud matrix. They present irregular, cross or horizontal stratification, which is commonly affected by bioturbation, or are rarely massive. The sandstones commonly present lamination marked by concentration of micas, heavy minerals or intrabasinal constituents (Fig. 4A). Sand grains are sub-rounded to angular, dominantly subangular, and the fabric orientation is normally parallel, with loose to normal packing. The primary composition corresponds dominantly to monocrystalline quartz and feldspars (Fig. 4B), with predominance of plagioclase over orthoclase and microcline grains (Table 1). Biotite and muscovite are very common, either as monomineralic grains (Fig. 4C) or in plutonic fragments. Heavy mineral grains such as zircon, rutile (< 1%), tourmaline (< 1%), garnet (< 1%), or rock fragments (chert, mudrock and volcanic fragments) are also frequent. Abundant carbonaceous fragments (Fig. 4D) of black

or brown colours, often with well-preserved cellular structure, are heterogeneously distributed in the sandstones, occurring deposited in association with micaceous (Fig. 4E) or mud intraclast levels, or appear as pebble-size clasts dispersed in fine or medium sand (Fig. 4F).

Table 1

Summary of the average and maximum (brackets) amounts of main primary constituents in the lithotypes defined in the studied interval.

Constituents	Paragenetic relation	Sandstones	Heterolites	Intraclastic conglomerates and conglomeratic sandstones	Mudstones and Siltstones	Shales	Hybrid rudites and arenites	Calcarenites
Quartz	Av. 35.12 (max. 47.67)	21.50 (37.00)	29.56 (35.00)	16.68 (30.54)	0.29 (0.67)	0.25 (1.00)	3.67 (3.67)	3.67 (3.67)
Microcline	3.15 (6.67)	2.05 (4.67)	1.84 (3.67)	1.43 (4.00)	-	-	0.66 (0.66)	0.66 (0.66)
Orthoclase	4.20 (7.00)	3.10 (5.00)	2.59 (5.00)	2.40 (6.04)	-	-	-	-
Plagioclase	6.45 (10.00)	5.13 (7.00)	5.10 (6.71)	4.81 (11.34)	0.09 (0.33)	-	0.67 (0.67)	0.67 (0.67)
Biotite	1.67 (10.33)	3.65 (7.03)	0.34 (1.00)	1.60 (4.67)	0.71 (2.00)	0.17 (0.67)	-	-
Muscovite	0.93 (2.33)	1.51 (2.33)	0.33 (1.67)	1.06 (1.67)	0.19 (0.33)	-	1.33 (1.33)	1.33 (1.33)
Zircon	0.55 (1.67)	0.38 (1.00)	0.33 (0.67)	0.41 (1.33)	0.09 (0.33)	-	0.33 (0.33)	0.33 (0.33)
Siliciclastic mud matrix	4.40 (36.33)	39.07 (67.67)	12.30 (34.11)	47.78 (78.67)	60.20 (83.67)	10.50 (16.67)	-	-
Chert fragments	0.45 (1.67)	0.08 (0.33)	0.17 (0.34)	0.09 (0.34)	-	-	-	-
Mudrock fragments	0.35 (2.67)	0.20 (0.67)	0.25 (0.67)	0.10 (0.67)	-	-	-	-
Volcanic fragments	0.34 (2.00)	0.03 (0.33)	0.08 (0.33)	0.03 (0.67)	-	-	-	-
Carbonaceous fragments	1.07 (14.33)	1.80 (3.67)	1.17 (2.68)	0.68 (2.00)	0.43 (1.00)	-	0.67 (0.67)	0.67 (0.67)
Berthierine Peloids	1.14 (6.67)	1.18 (2.00)	0.92 (1.33)	0.24 (1.33)	-	-	-	-
Soil intraclasts	0.25 (2.33)	0.25 (1.33)	0.58 (1.68)	0.06 (0.67)	-	-	-	-

Fish Bioclasts	0.17 (2.00)	0.05 (0.33)	0.34 (1.34)	0.02 (0.33)	0.19 (0.33)	0.92 (1.67)	-	-
Bivalve bioclasts	-	-	-	-	0.33 (1.33)	1.16 (3.33)	-	-
Gastropod bioclasts	-	-	-	-	0.05 (0.33)	16.67 (23.33)	-	-
Ostracod bioclasts	0.01 (0.33)	-	-	0.02 (0.33)	-	12.67 (50.67)	-	-
Carbonate peloids	-	-	-	-	-	-	79.00 (79.00)	79.00 (79.00)

Berthierine peloids are commonly concentrated in layers of very fine to medium-grained sandstones with low content of detrital matrix (Fig 5A), associated with mud intraclasts, phosphate and ostracod bioclasts. They usually present a greenish colour and microcrystalline texture, with low birefringence (Fig 5B and 5C). Berthierine ooids precipitated around other intrabasinal constituents, such as phosphatic grains (Fig 5D). The mineralogical characterization of the berthierine peloids was defined by DRX analysis (available in supplementary material).

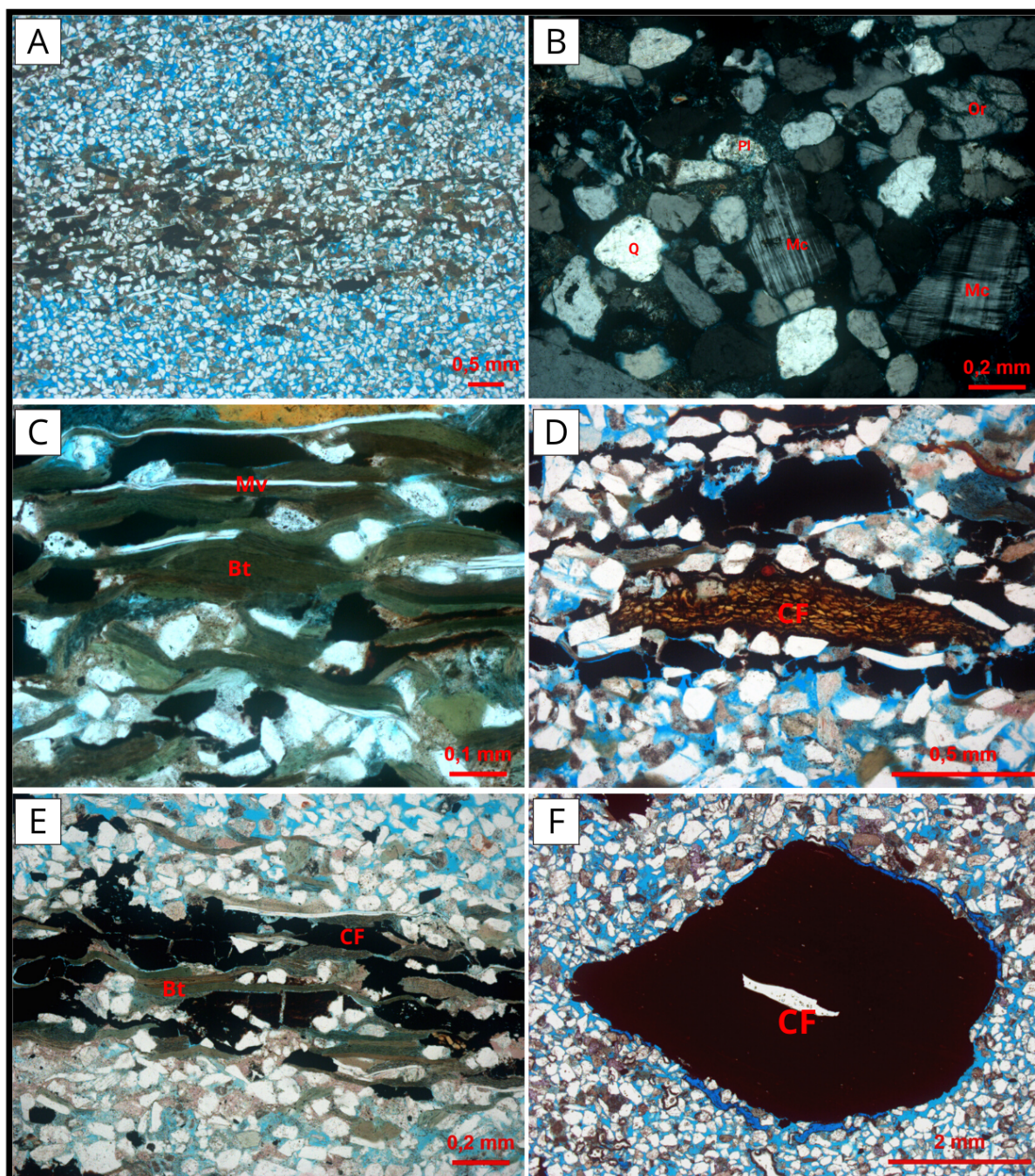


Figure. 4: Photomicrographs of textural aspects and primary constituents of the sandstones. A) Very-fine grained sandstone with an irregular lamination, marked by the concentration of intrabasinal constituents and micas (uncrossed polarizers; //P). B) Detrital feldspars and quartz in medium-grained sandstone (crossed polarizers; XP). (Mc - Microcline, Or - Orthoclase, Pl - Plagioclase, Q - Quartz). C) Abundant biotite (Bt) and muscovite (Mv) grains in a medium-grained sandstone. (//P). D) Brown phytoclast in fine-grained sandstone. (//P). E) Level of concentration of carbonaceous fragments and biotite (Bt). (//P). F) Large carbonaceous fragment (CF) in medium-grained sandstone. (//P).

Other relevant intrabasinal constituents are argillaceous soil intraclasts (Fig. 5E and F), which present pink to orange colour and “silky” extinction texture, predominantly

in the sandstones of the Itapecuru Formation. Phosphatic bioclasts which apparently correspond to fish and bird bones occur rarely in the sandstones (Fig. 6A and B).

Heterolites correspond to 17% of the analysed samples, occurring also through the whole cored interval. These rocks present irregular millimetric laminations, formed by the intercalation of sandy laminae rich in quartz, feldspars, micas, berthierine and argillaceous peloids, with siliciclastic mud laminae enriched in micas and carbonaceous fragments (Fig 7A). They are generally very fine-grained, with variable proportions of mud and sand. Bioturbation locally deformed the parallel heterolithic lamination (Fig 7B). The sand and silt grains are subangular, and heterogeneously packed. The primary composition of the sandy fraction of the heterolites is similar to the sandstones, with slightly smaller amounts of detrital quartz, feldspars, heavy minerals and rock fragments (Table 1), and significantly larger volumes of biotite, muscovite and carbonaceous fragments. Berthierine peloids and soil intraclasts occur in very similar proportions to what is seen in the sandstones.

Mudstones and Siltstones comprise 25% of the analysed samples, occurring in the middle and upper sections of the Itapecuru Formation interval (Fig. 3). This lithofacies comprises clay-rich mudstones, siltstones and sandy mudstones with horizontal, cross or irregular lamination (Fig. 7C), commonly disturbed by bioturbation. Burrows in the mudstones vary from 0.6 mm to more than 2.5 mm of diameter, and are normally filled by sand (Fig. 7D) locally with preserved intergranular porosity. Quartz and feldspars occur in the sand and silt fraction of the mudrocks in lower amounts than in the sandstones and heterolites, but biotite and muscovite occur in significant amounts (Table 1). Fragments of volcanic rocks, mudrocks and chert occur in minor amounts (av. <1%), preferentially in the sandy or silty levels. Other intrabasinal constituents, such as carbonaceous fragments, berthierine peloids, soil intraclasts, fish and ostracod bioclasts occur in minor amounts.

Shales comprise 8% of the studied samples, and were described only in the upper parts of the Codó Formation, in both wells. They show thin horizontal to sub-horizontal regular laminations. X-ray diffraction analyses indicate a composition dominated by smectite and kaolinite. The most relevant primary constituents observed in the shales are bivalve and ostracod bioclasts (Fig. 7E), or fish bioclasts, which appear heterogeneously dispersed within the siliciclastic matrix.

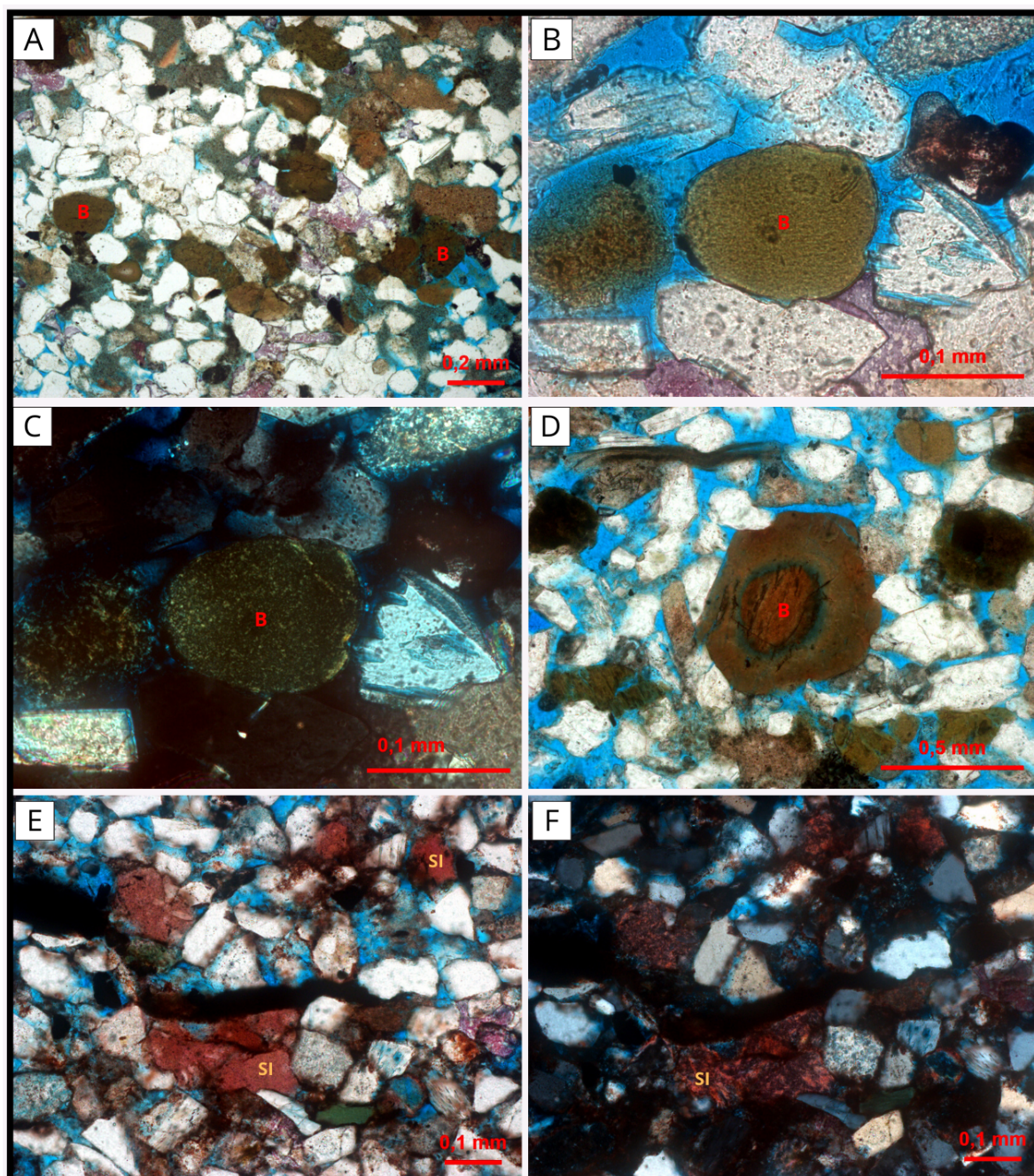


Figure 5: Photomicrographs of the primary constituents in the siliciclastic deposits. A) Abundant berthierine peloids (B) in a sandstone (//P). B) Berthierine peloid (B) in sandstone, with uncrossed polarizers, and C) crossed polarizers. D) Berthierine ooid (B) with a phosphatic nucleus in a sandstone (//P). E) Pink argillaceous soil intraclasts dispersed in fine sandstone, with uncrossed polarizers, and F) crossed polarizers.

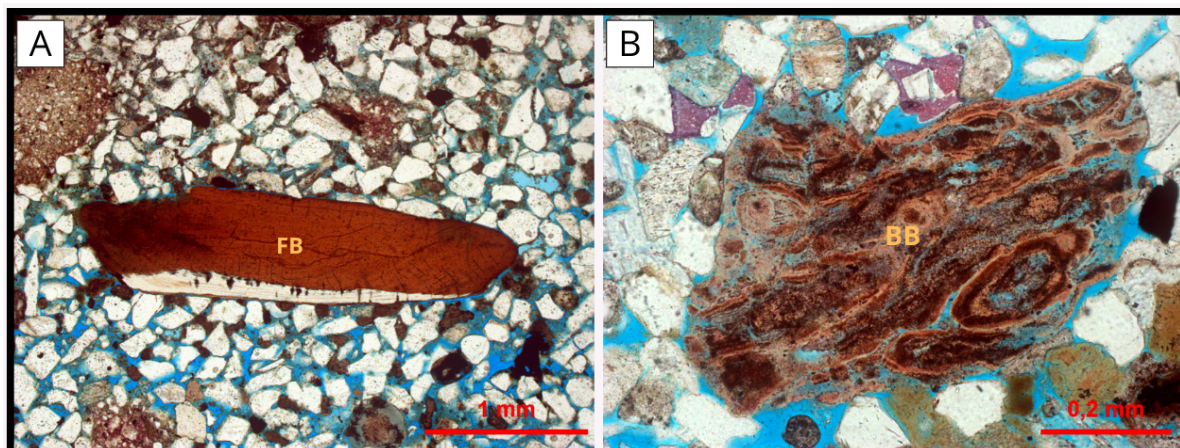


Figure 6: Photomicrographs of phosphatic bioclasts with uncrossed polarizers of: A) a fish scale bioclast (FB) in an intraclastic sandy conglomerate; B) hollow bone bioclast probably of a bird (BB) in a sandstone (//P).

Intraclastic conglomerates and sandstones (5%) were observed in the middle and upper parts of the Itapecuru Formation section in the 2-CO well. These rocks are massive, poorly sorted, heterogeneously or loosely-packed, and constituted by mud intraclasts (up to 8 mm), dispersed in medium to fine-grained sand (Fig. 7F). The mud intraclasts contain quartz sand, micas or carbonaceous fragments, or correspond to argillaceous soil intraclasts with pink colour and silky fabric. They were often heterogeneously compacted, forming pseudomatrix. The detrital composition of the sandy fraction is similar to the sandstones, although with significantly less micas.

Hybrid rudites and arenites represent 5% of the samples, and their distribution is limited to two small intervals of the 2-TV well, in the upper part of the Codó Formation. These rocks are composed of carbonate bioclasts in a siliciclastic muddy matrix. The hybrid arenites are formed by dominantly articulated ostracod within a muddy matrix partially replaced by calcite, pyrite and dolomite (Fig. 8A). The hybrid rudites are composed of recrystallized gastropod and bivalve bioclasts, with rare ostracods, and abundant siliciclastic argillaceous matrix partially replaced by calcite, dolomite and pyrite (Fig. 8B). Quartz, biotite, phosphate bioclasts, and faecal pellets occur in trace quantities. Foraminifera bioclasts occur in one sample of hybrid rudite, within a gastropod shell (Fig. 8C). The occurrence of hybrid rudites is limited to a 15 cm interval of the 2-TV well, associated with the shales of the Codó Formation.

Calcarenites occur very locally (164.60 m) at the base of the upper Codó shale succession in 2-CO well. There, a thin bed shows parallel lamination by the intercalation of compacted carbonate peloids and calcite-cemented layers with small

amounts of siliciclastic grains, carbonaceous fragments or argillaceous peloids (Fig. 8D).

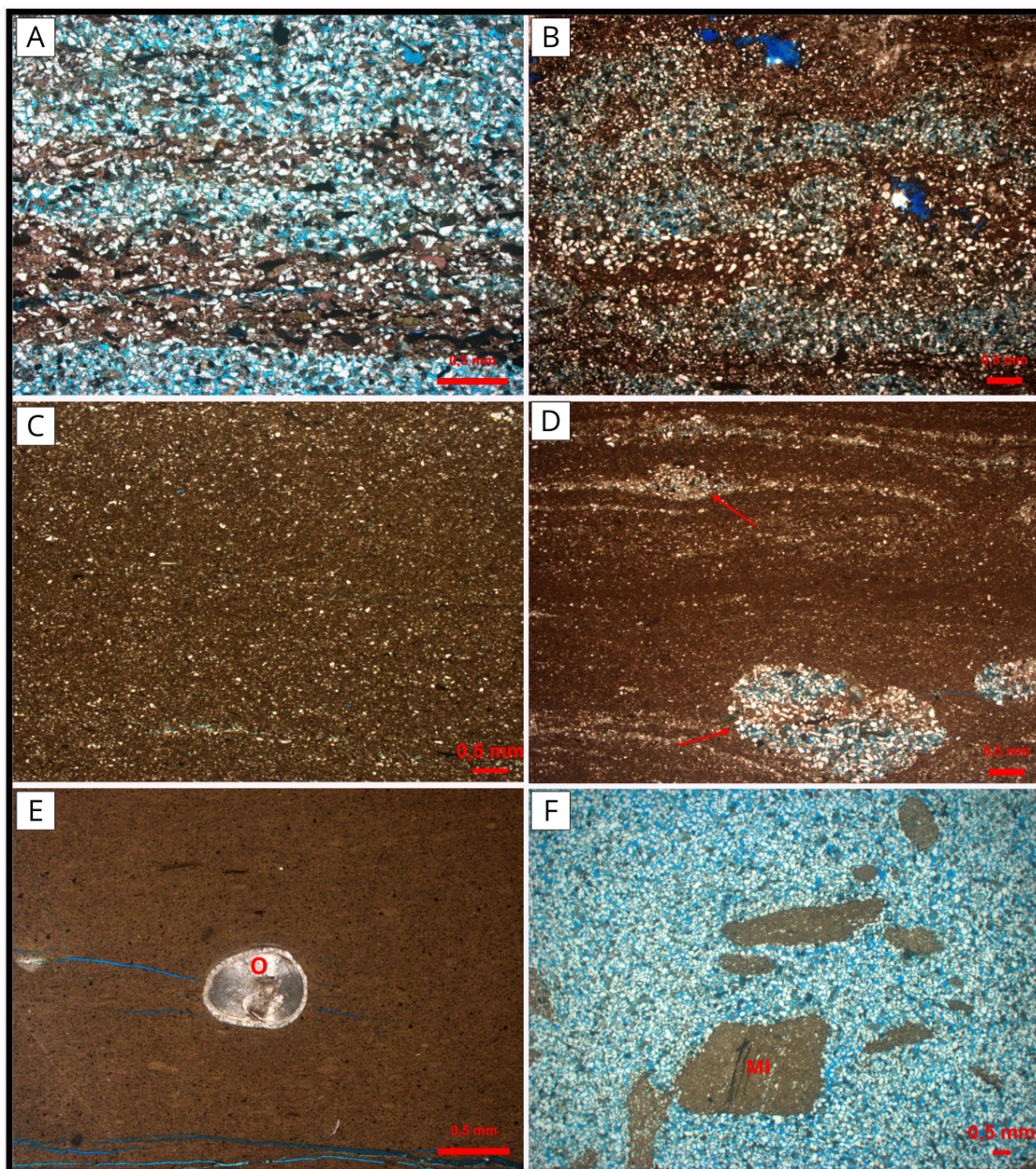


Figure. 7: Photomicrographs of primary textural and compositional characteristics of the heterolites, mudstones, shales and intraclastic conglomerates and sandstones. A) Intercalation of laminae of silt and siliciclastic mud in a heterolite (//P). B) Deformation of the heterolithic lamination by bioturbation (//P). C) Massive mudstone (//P). D) Burrows (arrows) filled by sand and silt in a mudstone (//P). E) Ostracod bioclast, filled by radial cement, in a shale (//P). F) Mud intraclasts (MI; up to 8 mm) dispersed in fine-grained quartz-feldspathic sand (//P).

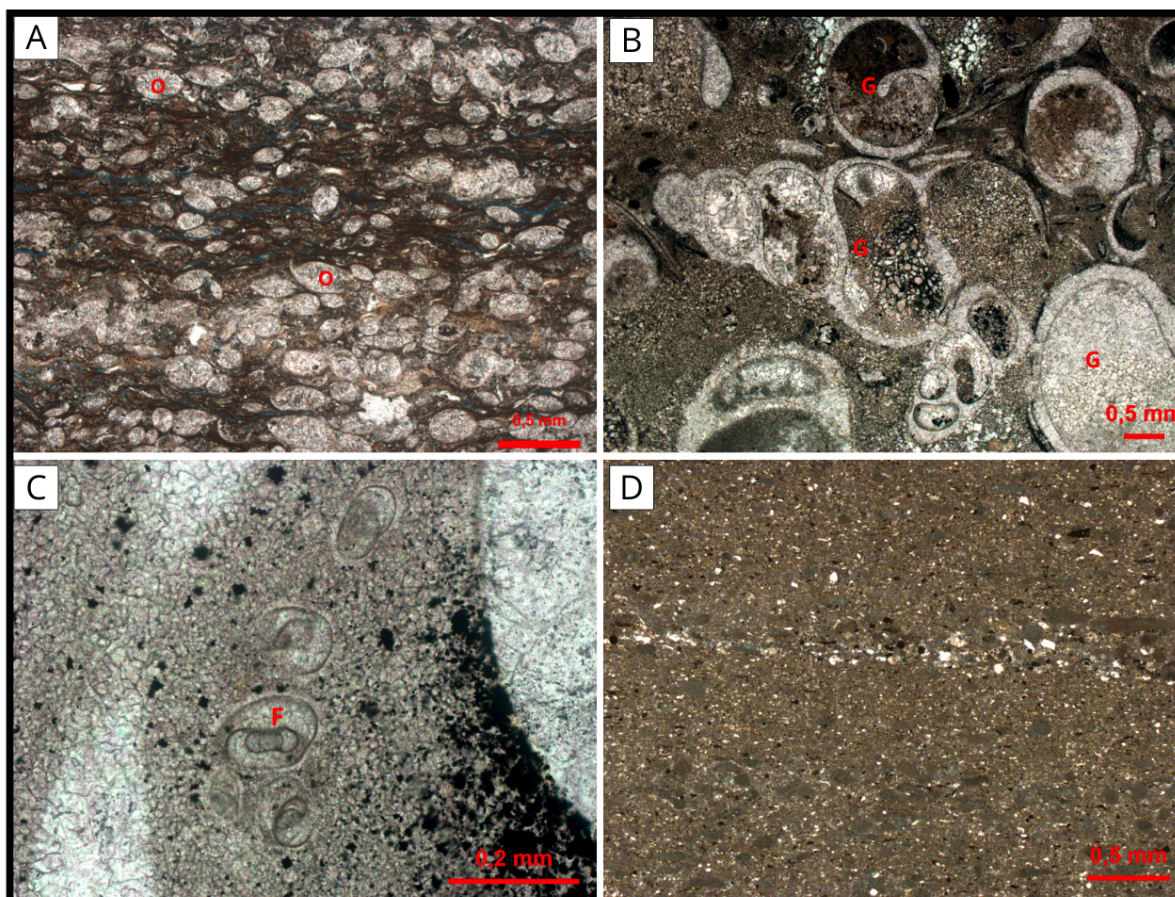


Figure. 8: Photomicrographs of primary constituents of hybrid rudites, arenites, and calcarenites. A) Abundant articulated ostracod bioclasts (O) in siliciclastic mud matrix (//P). B) Gastropod (G) bioclasts and mud partially replaced by microcrystalline calcite in hybrid rudite (//P). C) Foraminifera bioclasts (F), microcrystalline calcite and framboidal pyrite within a gastropod bioclast (//P). D) Intensively compacted carbonate peloids in calcarenite (//P).

4.3 Diagenetic constituents

The diagenetic constituents identified in the studied interval are heterogeneously distributed in the different lithotypes and correspond to calcite, dolomite, corrensite, smectite, kaolinite, pyrite, iron oxides/hydroxides, gypsum and quartz. Table 2 shows the average and maximum amounts of these diagenetic constituents described in each lithologic type, as well as their most common paragenetic relationships.

Interstratified chlorite/smectite as identified by DRX analysis (Fig. 9), occurs in green microcrystalline aggregates, replacing detrital grains, mostly replacing and expanding biotite grains (Fig. 10A and B). Replacement of biotite by chlorite/smectite took place more abundantly in the heterolites due to their higher quantities of micas, but occurred in micaceous sandstones as well (Fig. 4C).

Table 2

Summary of the average and maximum (in brackets) amounts of major diagenetic constituents and porosity types of the lithotypes in the studied interval.

Constituents	Paragenetic relation	Sandstones	Heterolites	Intraclastic conglomerates and conglomeratic sandstones	Mudstones and Siltstones	Shales	Hybrid rudites and arenites	Calcarenites
Calcite	Filling primary porosity Replacing primary constituent	4.02 (14.37)	0.84 (3.00)	0.83 (3.32)	2.13 (11.32)	15.95 (77.00)	35.58 (45.33)	2.00 (2.00)
Dolomite	Replacing primary constituent Filling primary porosity	0.30 (8.65)	-	0.33 (1.33)	-	5.42 (35.67)	11.42 (17.00)	-
Kaolinite	Filling primary pores Replacing primary constituents Expanding grains	0.54 (3.99)	0.05 (0.33)	0.17 (0.66)	0.02 (0.33)	-	-	-
Chlorite/Smectite	Replacing primary constituents Expanding grains	1.28 (6.66)	1.44 (4.35)	0.58 (1.00)	0.49 (2.33)	-	-	-
Smectite	Covering grains Replacing primary constituents Filling primary porosity	1.71 (8.66)	0.97 (3.66)	1.25 (3.67)	0.13 (1.33)	-	-	-
Iron oxides/hydroxides	Covering grains Replacing primary constituents	0.97 (8.66)	0.10 (0.67)	-	4.11 (27.33)	-	-	-
Gypsum	Filling secondary rock fracturation porosity Expanding grains	0.09 (1.67)	0.03 (0.33)	-	-	4.013 (21.01)	0.42 (1.00)	0.67 (0.67)
Pyrite	Replacing primary constituents Filling primary pores	2.78 (6.32)	4.51 (6.67)	2.59 (3.66)	4.57 (9.34)	6.29 (9.66)	6.75 (12.67)	11.98 (11.98)

Quartz	Covering grains	0.46 (2.33)	0.03 (0.33)	0.67 (1.00)	-	-	-	-
Mud-pseudo matrix	Filling primary porosity	0.22 (0.33)	-	-	0.03 (0.67)	-	-	-
Primary porosity		10.98 (22.67)	3.72 (9.67)	11.09 (20.33)	0.79 (4.67)	-	-	-
Intragranular porosity	Primary constituent dissolution	2.34 (9.33)	3.59 (6.99)	2.59 (5.00)	3.11 (8.00)		0.08 (0.33)	-
Mouldic porosity	Primary constituent dissolution	1.71 (4.66)	0.59 (1.67)	0.42 (1.00)	0.68 (2.33)		-	-
Matrix dissolution porosity	Primary constituent dissolution					1.14 (4.34)	0.17 (0.67)	-
Rock fracture porosity	Fabric fracturing	0.48 (2.33)	0.95 (2.00)	1.09 (4.00)	0.57 (3.67)	2.93 (4.67)	0.17 (0.33)	0.67 (0.67)

Smectite occurs in small amounts, as thin coatings and rims (Fig. 10C), covering discontinuously the grains, or as microcrystalline aggregates replacing detrital grains, specially the feldspars, and filling intergranular pores. Authigenic smectite is heterogeneously distributed in the Codó and Itapecuru deposits. The smectite coatings and rims are more common in the most porous sandstones. Discontinuous inherited clay coatings (cf. Wilson, 1992) of unidentified composition were also observed in some sandstones.

Kaolinite occurs as lamellar aggregates replacing and expanding muscovite grains (Fig. 10D), and as booklets filling intergranular pores or replacing feldspars, predominantly in porous sandstones. Kaolinized micas appear in trace amounts in sandstones and heterolites of the whole interval, but pore-filling kaolinite in booklets are limited to fine- to medium-grained Codó sandstones of 2-TV well.

Iron oxides/hydroxides are common as thin coatings, covering very-fine to fine sand or coarse silt grains discontinuously (Fig. 10E). Microcrystalline aggregates occur associated with the siliciclastic muddy matrix pervasively, but also replacing other primary constituents, such as feldspars, biotite, heavy minerals, or berthierine peloids. In some mudstones and muddy sandstones, halos of iron oxides/hydroxides reach up to 5 mm (Fig. 10F). The larger amounts of iron oxides/hydroxides occur in the mudstones and siltstones of the Itapecuru Formation from both wells.

Carbonate cements occur in different habits in all described lithotypes. They are fundamentally represented by calcite, dolomite, and rarely siderite. Calcite occurs dominantly with non ferroan composition, as macrocrystalline, poikilotopic or blocky crystals. In the sandstones and heterolites, poikilotopic calcite usually fills intergranular primary pores often as patches (Fig. 11A), which also replaced detrital grains, specially feldspars and quartz (Fig. 11B). Pore-filling poikilotopic or macrocrystalline calcite appears mostly in loose-packed, porous sandstones. Pore-filling calcite often covered and/or replaced other diagenetic constituents, such as iron oxide or smectite coatings. Blocky and microcrystalline calcite are the main diagenetic product in the hybrid rudites, replacing the siliciclastic matrix, ostracod and bivalve bioclasts, faecal pellets or filling intraparticle pores in gastropods (Fig. 11C). In these rocks, blocky calcite precipitated in an unusual rounded shape (Fig. 11D), locally replacing rhombohedral ferroan dolomite cements or calcite spherulites (Fig. 11E).

Well-preserved 0.6 to 1.2 mm calcite spherulites occur in one shale sample at 129.85 m of 2-TV well. The spherulites replaced and displaced the argillaceous matrix (Fig. 11F). EDS analyses showed that calcite in the shales and hybrid rudites presents a non-ferroan composition (av. 2.7% of Fe).

Ferroan **dolomite** precipitated in the hybrid rudites and arenites as rhombohedral crystals that replaced predominantly the detrital siliciclastic matrix (Fig. 12A and 12B). BSE images show no evidence of zonation in the crystal (Fig. 12C). Saddle dolomite with typical wavy extinction is rare and was observed only in one sandstone sample at 145.74 m of the 2-CO well, filling primary intergranular pores and replacing detrital grains (Fig. 12D), berthierine peloids and ferroan calcite. In the hybrid rudites, the combination of BSE images and elemental distribution mapping showed that ferroan dolomite replaced dominantly the gastropods shells, while calcite precipitated predominantly in the intraparticle pores (Fig. 12E and 12F).

Siderite is very rare in the interval, identified in one sample of a sandy mudstone at the top of the Itapecuru Formation, as irregular patches of partially oxidized microcrystalline crystals, which replaced the siliciclastic matrix and other detrital or intrabasinal constituents.

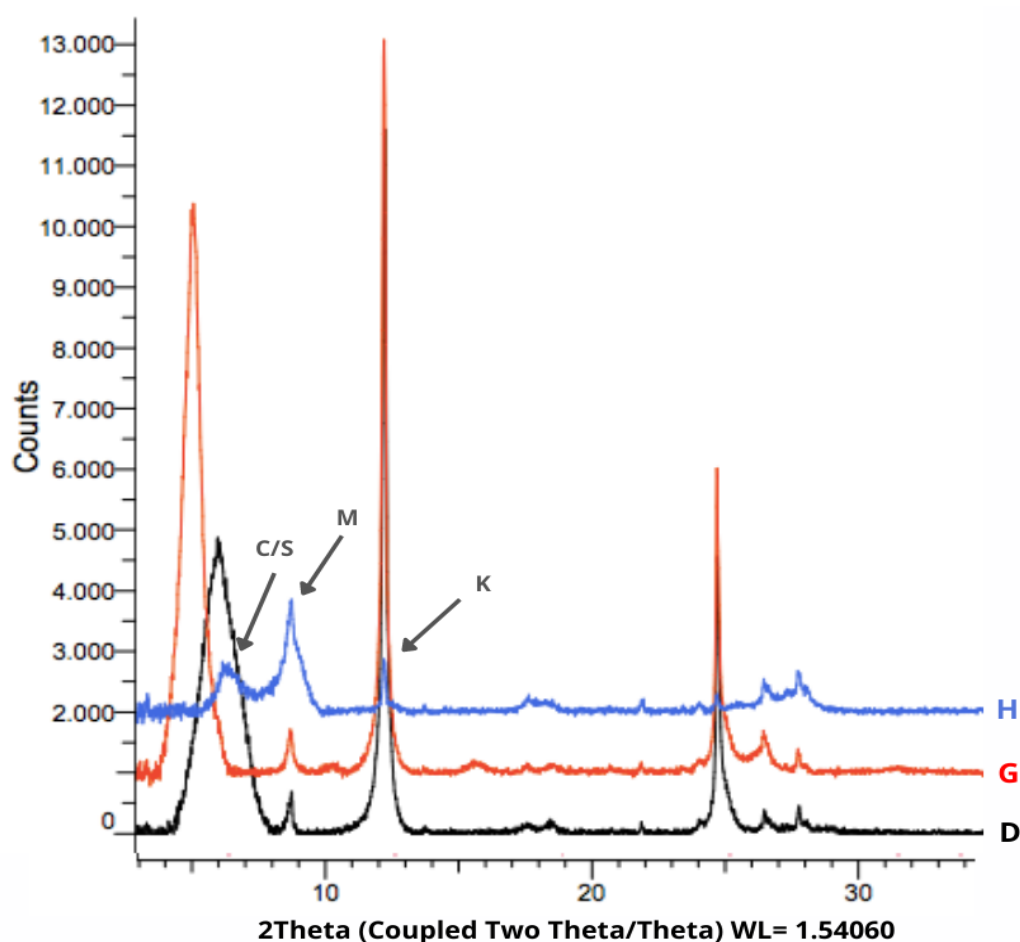


Figure. 9: X-ray diffraction diagram of the clay fraction of a sandstone from depth 123.00 m. Interstratified chlorite-smectite (C/S), micas (M) and kaolinite (K) are present. D) Air dried; G) glycol-saturated; and H) heated at 490 °C.

Fibrous **gypsum** occurs in the shales of the Codó Formation, filling shrinkage pores formed by dehydration of the siliciclastic matrix (Fig. 13A). In the sandstones and heterolites, lamellar or fibro-radiated gypsum occurs in trace amounts (<1%), filling fractures or expanding micas.

Pyrite is a very common diagenetic constituent in the studied interval, appearing in all lithotypes. It occurs dominantly in framboidal habit (Fig. 13B), and subordinately as microcrystalline crystals, replacing primary constituents such as detrital argillaceous matrix, mud intraclasts, carbonaceous fragments, feldspars and biotite grains (Fig. 13C), lithic fragments, bioclasts and berthierine peloids. Framboidal pyrite is an important diagenetic constituent in the shales and hybrid rudites and

arenites, where it occurs dominantly replacing the siliciclastic matrix (Fig. 13D) or fecal pellets, often precipitating in association with ferroan dolomite.

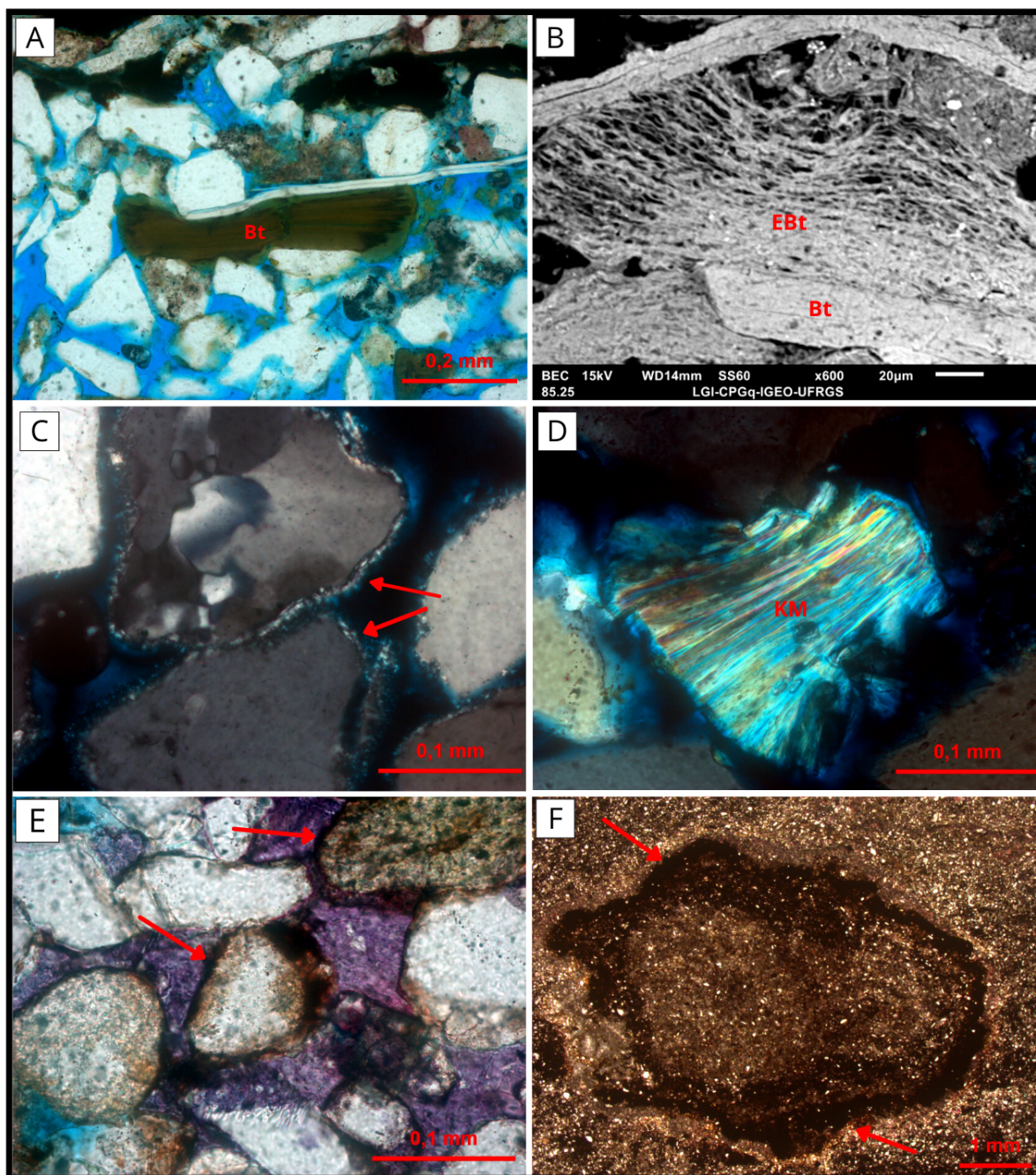


Figure 10: Photomicrographs and backscattered electrons (BSE) images of diagenetic constituents and processes. A) Microcrystalline interstratified C/S replacing and expanding detrital biotite (Bt). (//P). B) BSE image of biotite grain (EBt), replaced and expanded by C/S. C) Thin smectite rims discontinuously covering quartz grains. (XP). D) Lamellar kaolinite replacing and expanding muscovite (KM). (XP). E) Iron oxides/hydroxides coatings covering detrital grains, partially replaced by ferroan calcite (stained purple). (//P). F) Halo of iron oxides/hydroxides in mudstone.(//P).

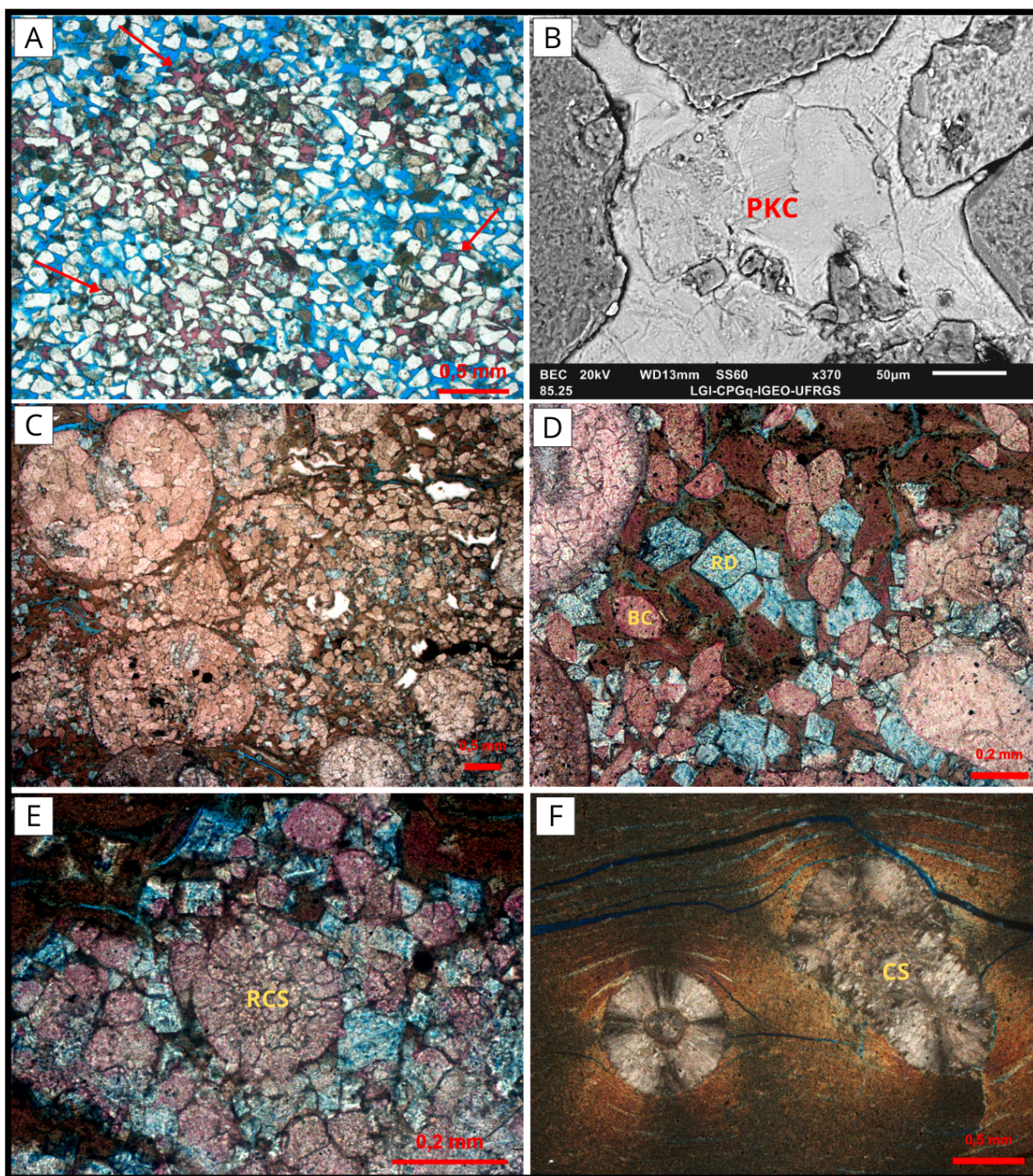


Figure.11: Images of diagenetic carbonates. A) Poikilotopic calcite patches in porous fine-grained sandstone. (//P). B) BSE image of replacement of detrital grains by poikilotopic calcite (PKC) in sandstone. C) Blocky calcite pervasively filling and replacing gastropod bioclasts and siliciclastic matrix in hybrid rudite. (//P). D) Blocky rounded Blocky calcite (BC) and rhombohedral dolomite (RD) replacing the siliciclastic matrix in hybrid rudite. (//P). E) Calcite spherulite (RCS) totally replaced by blocky calcite. (//P). F) Calcite spherulites displacing and replacing the argillaceous matrix in a shale (XP).

Pseudomatrix occurs as a result of the compaction of muddy and argillaceous intraclasts. Quartz appear in low amounts in the sandstones, heterolites and

intraclastic conglomeratic sandstones, covering detrital quartz grains as discontinuous overgrowths (Fig. 13E and F). Diagenetic titanium minerals appear in trace amounts, as microcrystalline brown crystals replacing biotite, zircon and other undifferentiated heavy minerals.

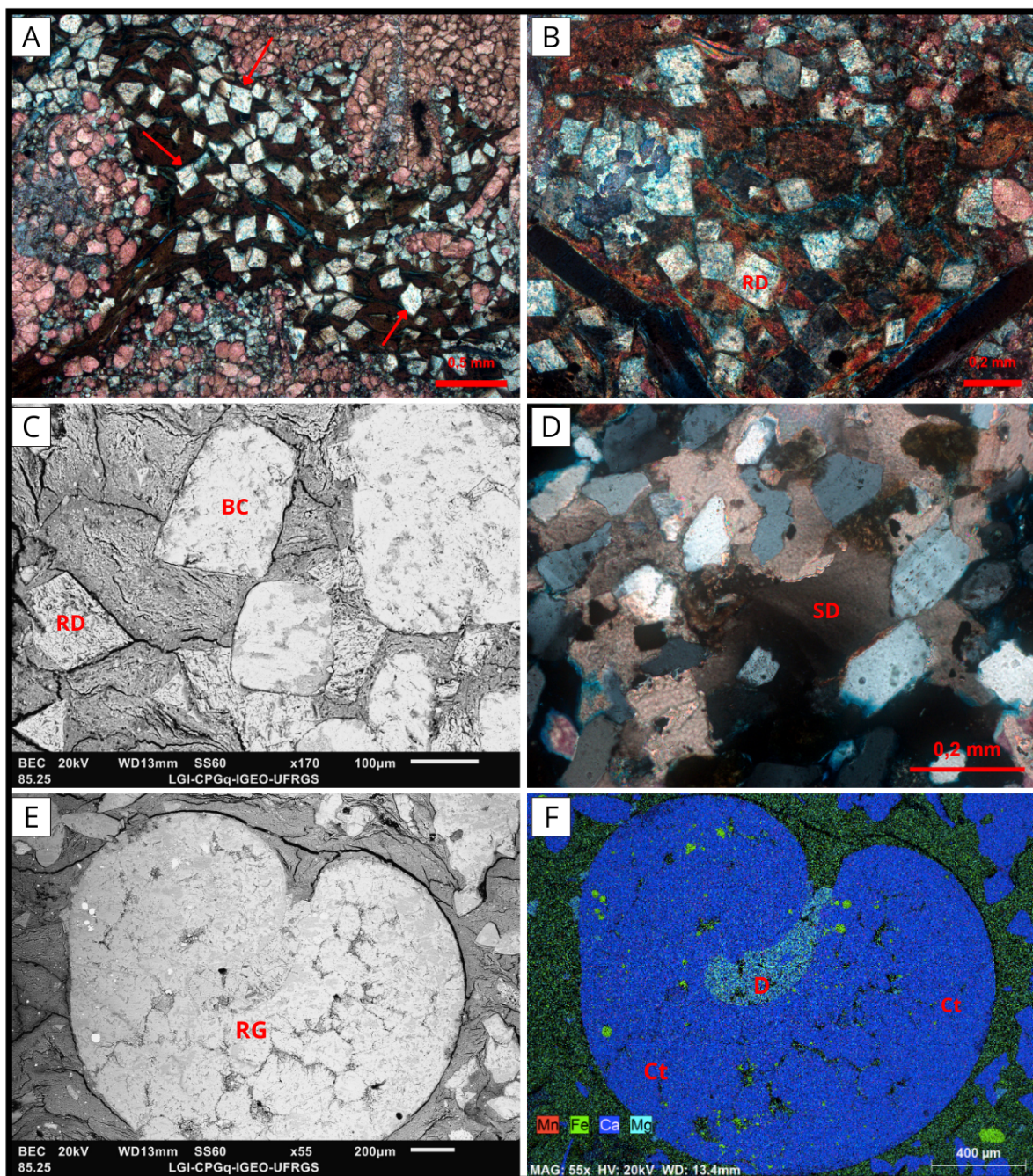


Figure 12: Aspects of dolomite and calcite cementation in different lithofacies. Small rhombohedral of ferroan dolomite crystals (RD), replacing the siliciclastic matrix in hybrid rudites in: A) Uncrossed polarizers ; B) Crossed polarizers. C) Dolomite rhombs (RD), replacing siliciclastic matrix next to calcite (BSE image). D) Saddle dolomite (SD) showing the typical wavy extinction, filling intergranular pores with blocky calcite (stained pink) and replacing primary constituents in sandstone. (XP). E) BSE image of recrystallized gastropod bioclast (RG) in hybrid rudite. F) Elemental map of recrystallized

gastropod, showing that dolomite (D) replaced preferentially part of the shell and calcite (Ct) filled the intraparticle space.

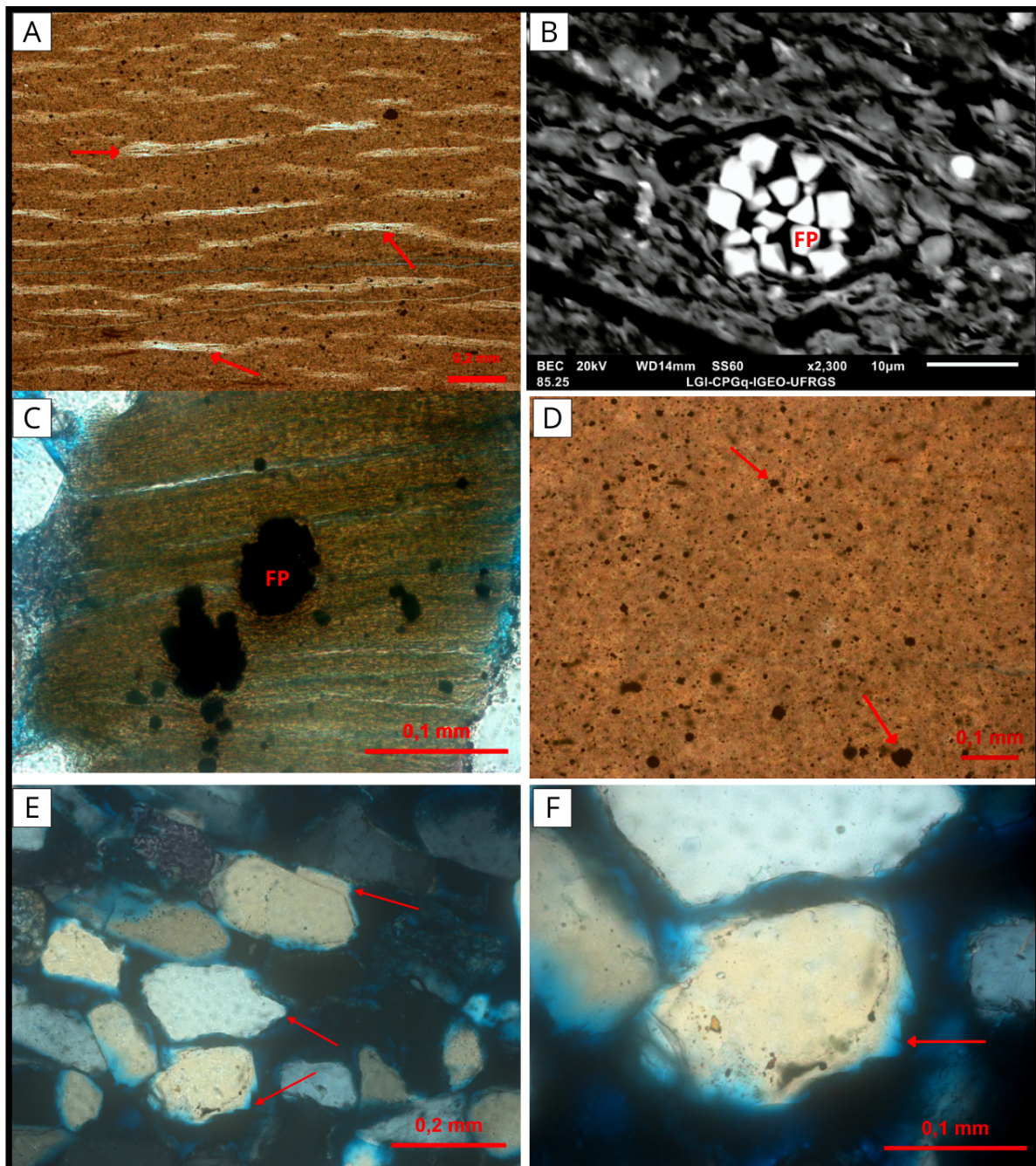


Figure 13: A) Fibrous gypsum filling pores of shrinkage of the siliciclastic matrix in a shale. (//P). B) Euhedral crystals of pyrite in a framboidal aggregate (SEM image). C) Framboidal pyrite replacing an expanded biotite grain in sandstone. (XP). D) Disseminated framboidal pyrite replacing the siliciclastic matrix in a shale. (//P). E) Discontinuous quartz overgrowths in a sandstone. (XP). F) Detail of a discontinuous quartz overgrowths covering a detrital quartz (XP).

4.4 Porosity

Primary intergranular porosity (Table 2) is generally well preserved in the sandstones (Fig. 14A) and in the intraclastic conglomeratic sandstones. In the heterolites and siltstones intergranular porosity is restricted to the sandy layers (Fig. 14B). Secondary intragranular and moldic pores originated by the dissolution of primary constituents (mainly feldspars, Fig. 14C) are abundant in the sandstones, heterolites, intraclastic conglomerates and mudstones. Fractures are more common in the shales (Fig. 14D), but rare in the other lithotypes. Secondary intergranular pores formed by the dissolution of siliciclastic matrix or poikilotopic calcite were also observed in trace amounts in few samples of different lithofacies.

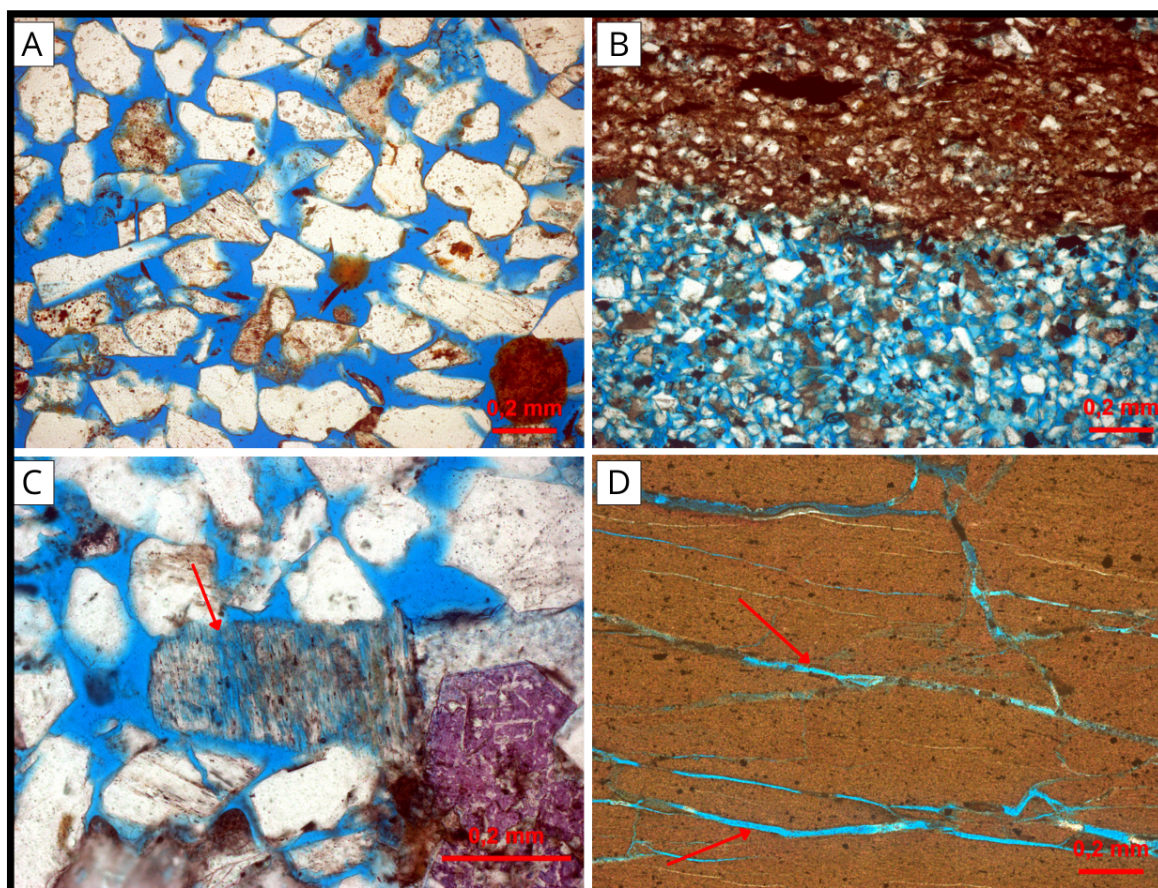


Fig. 14: Types of pores in the studied samples. A) Intergranular primary porosity in a sandstone. (//P). B) Preserved intergranular porosity in a sandy layer of an heterolite. (//P). C) Intragranular pores in a partially dissolved plagioclase grain in a sandstone. (//P). D) Fracture pores in a shale. (//P).

Table 3: Average and maximum (in brackets) amounts of the main primary and diagenetic constituents, and pore types of the Codó and Itapecuru Formation sandstones

Constituents (%)	Codó Sandstones n=8	Itapecuru Sandstones n=24
Quartz	41.08 (47.67)	33,13 (44.00)
Microcline	2.83 (4.33)	3.25 (6.67)
Orthoclase	2.67 (5.33)	4.08 (7.00)
Plagioclase	7.08 (9.34)	6.24 (10.00)
Biotite	1.25 (2.33)	1.80 (10.33)
Muscovite	0.75 (1.33)	0.90 (2.33)
Zircon	0.42 (1.00)	0.61 (1.67)
Siliciclastic mud matrix	1.17 (9.33)	5.47 (36.33)
Chert fragments	0.33 (0.67)	0.49 (1.67)
Mudrock fragments	0.08 (0.33)	0.50 (2.67)
Volcanic fragments	0.29 (1.33)	0.36 (2.00)
Berthierine peloids/ooids	0.29 (1.00)	1.47 (6.67)
Phosphatic bioclasts	0.08 (0.67)	0.06 (0.67)
Soil intraclasts	0.04 (0.33)	0.33 (2.33)
Carbonaceous fragments	0.63 (2.67)	1.22 (14.33)
Calcite	4.37 (8.66)	3.90 (14.37)
Chlorite/Smectite	0.46 (1.33)	1.55 (6.66)
Smectite	2.83 (8.66)	1.33 (7.01)
Kaolinite	1.21 (3.99)	0.32 (1.33)
Iron oxides/hydroxides	-	2.42 (13.34)
Pyrite	2.78 (5.99)	2.78 (6.32)
Quartz	0.50 (1.33)	0.44 (2.33)
Primary porosity	11.75 (17.33)	10.92 (22.67)
Intragranular porosity	5.50 (6.99)	5.60 (9.33)
Mouldic porosity	2.00(4.33)	1.61 (4.66)

5. Discussion

5.1 Paleoenvironmental inferences from the petrologic aspects of the Codó deposits

The diagenetic constituents in the studied deposits were formed predominantly under eogenetic, near surface conditions, where the chemistry of the interstitial waters was dominantly controlled by the depositional environment (cf. Choquette and Pray, 1970; Worden and Burley, 2003). Several sedimentological, stratigraphic and geochemical studies suggested the predominance of semi-arid to arid climate during the deposition of the Cretaceous section of the Parnaíba basin (Campbell, 1949; Mesner and Wooldridge, 1964; Lima, 1982; Antonioli, 2001; Paz and Rossetti, 2001; Rossetti *et al.*, 2001a; 2004; Paz and Rossetti, 2005). Carvalho *et al.* (2017) interpreted the Aptian vegetation throughout northeastern Brazil as typical of semi-arid and arid climates. Palynological investigations (Antonioli *et al.*, 1999; Batista, 1992; Lima *et al.*, 1980; 1982; Rodrigues, 1995) and insects (Pinto and Ornellas, 1974) of the Codó Formation shales were, likewise, considered typical of hot and arid climates. Palynological and sedimentological evidence of hypersalinity and seasonally arid conditions in the Codó (Bahniuk *et al.*, 2015; Lindoso *et al.*, 2018) and Itapecuru deposits (Pedrão *et al.*, 1993b; 1996) were also determined.

At a global scale, the broad paleoclimatic study by Chumakov *et al.* (1995) indicated the occurrence of a wide arid belt covering practically all the low-latitude zones during the Aptian. This Tropical Equatorial Hot Arid Belt would include the whole Parnaíba Basin. Hay and Floegel (2012) proposed that the apparent lack of an equatorial humid zone in Chumakov *et al.* (1995) model would be related with the equatorial location of the Gondwana supercontinent. This would amplify the interior desertification processes, as well as the extreme global temperatures estimated for the Aptian (Frakes *et al.*, 1994; Frakes, 1999; Kidder and Worsley, 2010), inhibiting vegetation significantly (Crafts-Brandner and Salvucci, 2000).

However, the early authigenesis of kaolinite (Table 1; Fig. 10D), and the extensive dissolution of feldspar grains (Fig. 14C) observed in this study suggests the intercalation of humid conditions with a predominant dry climate in both the Itapecuru and Codó paleoenvironments. This is supported by recent paleontological and

sedimentological studies (e.g. Menezes *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2020; Duarte *et al.*, 2021; Guerra-Sommer *et al.*, 2021).

The early authigenesis of kaolinite occurred before any significant mechanical compaction, as shown by the expanded texture of kaolinized muscovite grains (Fig. 10D). Consequently, the formation of associated pore-filling and replacive kaolinite booklets is attributed to the alteration of detrital feldspars and other aluminosilicates by dilute meteoric waters under humid climatic conditions (Worden and Morad, 2003). The distribution of pore-filling kaolinite booklets, which is limited to the Codó sandstones, suggests that those sediments were percolated by an active influx of meteoric water, what helped to maintain low ionic concentrations and low pH of the pore waters (Ketzer *et al.*, 2003b; Worden and Burley, 2003; Morad *et al.*, 2010).

Therefore, the intensity of feldspar grains dissolution, and consequent formation of intragranular and mouldic porosity in the Codó and Itapecuru sandstones and heterolites is ascribed to the percolation of meteoric waters under humid climate conditions (Worden and Morad, 2003; Ketzer *et al.*, 2003a; Morad *et al.*, 2012). The broad distribution of secondary dissolution porosity (Table 3), associated with the limited yet common occurrence of kaolinized muscovites indicates that humid conditions were present at least temporarily, through the whole studied interval. The quartz overgrowths (Fig. 13E and 13F) described in some sandstones may be attributed to silica dissolved in the pore waters, provided by feldspar dissolution and feldspar to kaolinite alteration reaction (Worden and Morad, 2000). The replacive microcrystalline diagenetic titanium oxides are derived from the dissolution of detrital heavy minerals and biotites (Morad *et al.*, 1994).

The occurrence of smectite aggregates and rims (Fig. 10C) in the Codó sandstones indicates that dry conditions were also present during the deposition of those sediments. Smectite authigenesis is favoured in pore waters with high activity of K^+ , Mg^{2+} , Na^+ and Ca^{2+} , characteristic of continental environments under semi-arid to arid climatic conditions (Worden and Morad, 2003).

Duarte *et al.* (2021), observed the coexistence of *psilate trilete* spores, evidence of humid paleoclimate, and the more abundant *Classopollis* pollen, typical of dry conditions, in deposits of the Codó Formation. Conversely, Guerra-Sommer *et al.* (2021), based on the observation of the association of the fern *Weichselia* with the terrestrial bryophyte *Muscites* in the upper/transitional Codó Formation, suggested the predominance of a humid climate over less expressive semi-arid conditions

during the deposition of the unit. The high content of kaolinite of the shales determined by DRX analysis (see supplementary material) supports the interpretation of Guerra-Sommer *et al.* (2021), that humid conditions were also present during the deposition of the upper Codó Formation. These results differ from the clay mineralogy of lutites from the lower Codó Formation of Rossetti *et al.* (2001a) and Gonçalves *et al.* (2006), who determined the higher proportion of montmorillonite (smectite) in relation to kaolinite, thus indicating the dominance of arid conditions. The comparison between those different studies of different portions of the Codó Formation supports the hypothesis of shifting climate conditions during the Mid Cretaceous, from a dry early Aptian to a slightly wetter and warmer late Aptian (Zhang *et al.*, 2014; Duarte *et al.*, 2021). This climatic transition could be related to the transition from the Tropical Equatorial Arid Belt to the early stages of the Equatorial Humid Belt proposed by Chumakov *et al.* (1995), associated with the opening of the Equatorial Atlantic Ocean at the onset of the Albian time (Guerra-Sommer *et al.*, 2021). Mutterlose *et al.* (2009) pointed to the existence of a global cooling event during that period, suggesting this event could have caused increased water circulation, regional high surface water fertility and upwelling, which may have triggered a progressive increase in humidity in the Parnaíba basin area. Similarly, Carvalho *et al.* (2017) observed a progressive development of more humid conditions in deposits of the northeastern Brazil Sergipe-Alagoas Basin during late Aptian, based on the shift from a *Classopollis* to an *Araucariacites* dominated flora. Those authors attributed the development of humid conditions to the general rise in sea level from the late Aptian, ultimately promoting the establishment of lowland humid environments.

Other palynological studies in the adjacent Araripe (Heimhofer and Hochuli, 2010; Varejão *et al.*, 2021) and Sergipe (Carvalho *et al.*, 2017; 2019) basins suggested that humid conditions were present during the Aptian, interpreted to be related to the opening of the Equatorial Atlantic Ocean. The abundance of carbonaceous fragments (Fig. 4D, 4E and 4F) in the studied interval indicates the existence of significant vegetation during a considerable period of time in the area (Correa-Martins *et al.*, 2018), indicating that some humidity must have been present in the Codó environment.

On the other hand, the local abundance of gastropods (Fig. 8B) and occurrence of foraminifera (Fig. 8C) in the fine-grained deposits, associated with the precipitation of

fibrous gypsum (Fig. 13A) and pyrite (Fig. 13B and 13D) suggests a lacustrine paleoenvironment with episodic, yet significant marine influence, supporting classical depositional models proposed for the upper Codó Formation (Mesner and Wooldridge 1964; Lima and Leite, 1978; Antonioli, 2001; Neves, 2007; Mendes, 2007; Barros *et al.*, 2022). This petrographic evidence contradicts the depositional model proposed by Rossetti *et al.* (2004), who interpreted a continental paleoenvironment, without influence of marine waters, based on the lack of foraminifera in the shales, and of dolomite in the limestones.

In a recent paleontological study on ostracods of the Codó Formation, Barros *et al.* (2022) proposed a depositional model of a lagoonal/lacustrine environment, separated from the sea by a physical barrier, which presented permanent brackish waters fed by variable fluvial and marine groundwater influx, with sporadic sea incursions. Foraminifera bioclasts, observed in the hybrid conglomerates, (Fig. 8C) are unequivocal evidence of marine influence, suggesting that the Codó lagoon/lake indeed received mixed marine/meteoric influx (cf. Magaritz *et al.*, 1981). The alternated precipitation of calcite and ferroan dolomite (Fig. 11D and 11E) supports the mixing of meteoric and marine waters in the Codó paleoenvironment (Watts, 1980; Morad, 1998; Morad *et al.*, 2012). The formation of eogenetic rhombohedral ferroan dolomite in the shales, hybrid rudites and arenites is attributed to the prevalence of marine over the meteoric recharge, therefore creating an evaporative environment with high concentration of Mg^{2+} in the water (Morad, 1998). The ferroan composition of the dolomite in association with early framboidal pyrite suggests reducing conditions in the system (Worden and Burley, 2003). In the bioclastic hybrid rudites, the replacement of the siliciclastic matrix and gastropod shells by ferroan dolomite (Fig. 12A, B and F) may have been associated with the replacement of faecal pellets by framboidal pyrite by sulphate reduction processes. The precipitation of non-ferroan calcite is interpreted to be a result of periods of meteoric recharge of the lake (Watts, 1980; Morad, 1998; Morad *et al.*, 2012). Blocky calcite subsequently replaced partially the siliciclastic matrix, dolomite, and bivalve shells (Fig. 11C, 11D and 11E). Kroth *et al.* (2021), described similar bioclastic deposits of gastropods, bivalves, foraminifera and ostracods in the Aptian Romualdo Formation in the adjacent Araripe Basin, and determined that their formation was related to marine incursions. Arai (2014) proposed that the Aptian-Albian marine incursions to the Parnaíba Basin may have come from the Central North Atlantic Ocean (or

Western Tethys). This hypothesis, however, requires further paleogeographic, paleontological and stratigraphic investigation.

Calcite spherulites were described in the Codó Formation by Barros (2012), who interpreted their precipitation as product of early diagenesis, and by Bahniuk *et al.* (2015), who attributed their occurrence to a high evaporation stage in a lacustrine environment. The calcite spherulites described by Barros (2012) and Bahniuk *et al.* (2015) were described in deposits of the lower Codó Formation (Mesner and Wooldridge, 1964), and until the present study, were never observed in the upper part of the unit. The observed association of calcite spherulites and fibrous gypsum cementation (Fig. 11F) suggests evaporative conditions in the lacustrine environment. The deformation of the clay matrix by the spherulites (Fig. 11F) suggests a displacive early calcite precipitation. Calcite spherulites are typical constituents of the giant Aptian Pre-salt reservoirs of the eastern Brazilian margin. The petrological study of Lima and De Ros (2019) of Aptian lacustrine Pre-salt deposits of the Campos Basin presented petrographic evidence that similar calcite spherulites replaced and displaced the laminated argillaceous matrix of those deposits.

Paz and Rossetti (2001) described the occurrence of aggregates of gypsum crystals parallel to the bedding planes of laminated argillites, in a similar aspect to the paragenetic relation between fibrous gypsum and siliciclastic matrix observed in this study (Fig. 13A). The occurrence of gypsum in the shales supports the idea that the waters in the Codó lacustrine environment were highly saline and saturated in sulphate and calcium, characteristic of evaporative environments close to the sea.

Those saline fluids percolated through shrinkage pores in the siliciclastic matrix, precipitating fibrous gypsum crystals during periods of high evaporation. The paragenetic relation between calcite spherulite and gypsum suggests an eogenetic precipitation, since the gypsum cemented levels are displaced within the siliciclastic matrix by the spherulite growth (Fig. 11F).

The preservation of gypsum is an evidence of limited later burial, since it tends to dehydrate to anhydrite at shallow depths between 1.5 and 4 km (Hardie, 1967; Jowett *et al.*, 1993; Worden and Burley, 2003).

The relative abundance of framboidal pyrite is related to the reduction of sulphate in the Codó paleoenvironment (Paz and Rossetti, 2001), what may suggest a significant marine influence during eodiagenesis (Love, 1967; Coleman *et al.*, 1993;

Worden and Burley, 2003; Rodrigues *et al.*, 2015). Its broad distribution in the whole studied interval suggests that significant reducing conditions existed during the early diagenesis of both Codó and Itapecuru successions.

The thin strata of articulated ostracod bioaccumulation (Fig. 8A) at the base of the shale interval (Fig. 3) may be related to an increase in the salinity in the Codó Lake. After the hybrid arenite ostracod level, the appearance of calcite spherulites, gypsum and ferroan dolomite, associated with foraminifera and gastropods in the overlaid shales and hybrid rudites, suggests that marine and evaporative conditions dominated again the Codó lacustrine environment. The alternated precipitation of ferroan dolomite and pyrite with non-ferroan calcite indicate the input of freshwater (Morad, 1998; Morad *et al.*, 2012), probably related to wetter periods (Barros *et al.* 2022).

5.1 Paleoenvironmental inferences from the petrologic aspects of the Itapecuru deposits

The occurrence of berthierine peloids and ooids is commonly related to brackish waters of mixed marine/meteoric composition (Johnsson, 1990; Kronen and Glenn, 2000). Their abundance in the sandstones and heterolites of the basal Itapecuru Formation (Table 3; Fig. 5A) thus indicates a deltaic or estuarine environment (Anaisse *et al.*, 2001; Rossetti and Goés, 2003; Ferreira *et al.*, 2020). This evidence contradicts the dominant interpretation of a strictly continental environment for the Itapecuru Formation (Wooldridge, 1962; 1964; Aguiar, 1969; 1971; Carneiro, 1974; Lima and Leite, 1978; Cunha and Del'Arco, 1988; Aranha, *et al.* 1988; 1990; Santos and Mamede, 1990; Goés and Feijó, 1994; Gonçalves and Carvalho, 1996). Berthierine peloids and ooids are syngenetic constituents typically formed in deltaic-estuarine environments (Hornibrook and Longstaffe, 1996; De Hon *et al.*, 1999), commonly present in tropical to subtropical delta-front deposits (Odin, 1990; Thamban and Purnachandra, 2000, Morad *et al.*, 2010). The authigenesis of berthierine is favoured in reducing conditions, where iron reduction, rather than sulphate reduction, is the dominant anaerobic reaction within the sediments (Worden and Morad, 2003), which is typically supplied by tropical weathering (Taylor and Macquaker, 2011). Brackish waters found in transitional environments typically present lower concentrations of dissolved sulphate than marine waters, hence

limiting the sequestration of Fe^{2+} by pyrite authigenesis, which favours berthierine precipitation (Morad *et al.*, 2010). Such geochemical conditions can also occur by rapid sea level rise during marine transgressions (Macquaker and Taylor, 1996; Taylor *et al.* 2002; Morad *et al.*, 2012). This scenario would agree with the transgressive character of the estuarine facies associations interpreted for the Itapecuru deposits by Anaisse *et al.* (2001). The depositional association of abundant berthierine peloids (Fig. 5A) with other intrabasinal constituents like fish bone bioclasts, phosphatic nodules and ostracods suggests the interpretation that berthierine peloids were formed in periods of low sediment influx in an estuarine system (Anaisse *et al.*, 2001; Rossetti and Goés, 2003). The abundance of berthierine peloids in sandstones of the Itapecuru Formation (Table 3) could be explained by a high influx of ferric iron derived from the weathering in the source areas, suggested by the associated occurrence of soil intraclasts (Fig. 5E and 5F). Dutra and Malabarba (2001), in a paleontological study, interpreted the occurrence of both marine and continental fishes in the Itapecuru Formation as evidence of a transitional, estuarine and tidal dominated paleoenvironment. In such a depositional system, the deposition of heterolites (Fig. 7A and 7B) may have occurred due to alternate traction and suspension, under a tidal-dominated regime (Anaisse *et al.*, 2001).

Rossetti and Goés (2003) described laminated, massive and commonly bioturbated mudstone facies associated with paleosol horizons in the Itapecuru Formation, interpreting them as deposited in an interdistributary bay environment. They observed *Taenidium*, *Skolithos* e *Planolites* trace fossils in the sandy parts of this facies association, and intense undifferentiated bioturbation in the muddy levels. The textural aspects (Fig. 7C), intense bioturbation (Fig. 7D) and occurrence of berthierine peloids described in the mudstones and siltstones (Table 1) of the studied interval suggests that these lithotypes may have been indeed deposited in a deltaic interdistributary bay environment (Rossetti and Goés, 2003).

The formation of Iron oxides and hydroxides is commonly attributed to the alteration of ferromagnesian detrital grains in mudstones and sandstones under predominantly semi-arid climate conditions (Worden and Burley, 2003). The precipitation of iron oxides coatings before pore-filling calcite cement (Fig. 10E) clearly indicates an eogenetic origin, and not due to late exposure alteration. Correa-Martins *et al.*, (2018) also interpreted an eogenetic origin for the iron oxide coatings in Itapecuru

sandstones and siltstones of the Itapecuru Formation. The occurrence of iron oxides in some paleosols (Fig. 10F) may also have been related to early stages of pedogenesis from the interdistributary areas (Rossetti and Goés, 2003) or associated floodplains (Ferreira *et al.*, 2016). Paleosols are common in the Itapecuru Formation sedimentary succession, providing relevant paleoenvironmental and paleoclimate information. The integrated ichnologic-paleopedogenic study of Menezes *et al.* (2019) determined that the paleoclimate of the Itapecuru paleoenvironment was characterised by a marked seasonality, in which the occurrence of iron oxide concretions and nodules, and concentric rims of calcite around roots evidence periodic wet and dry seasons. The observed occurrence of iron oxide coatings in the studied fine-grained sandstones (Fig. 10E) would, therefore, suggest semi-arid to arid conditions, while iron oxides halos (Fig. 10F) around bioturbation features, similar to those described by Menezes *et al.* (2019), would suggest an early stage of pedogenesis under wetter climate periods.

Ferreira *et al.* (2016) and Menezes *et al.* (2019) observed *Afropollis* palynomorphs in deposits of the Itapecuru Formation, interpreting their occurrence as evidence of a humid tropical climate. Likewise, the high frequency of *Araucariacites* palynomorphs in Itapecuru deposits was associated with humid conditions (Ferreira *et al.*, 2020). Evidence of large dinosaurs is also documented in deposits of the Itapecuru Formation (Medeiros and Schultz, 2001; Vicalvi *et al.* 1993; Menezes *et al.*, 2019). Medeiros and Schulz (2001) stated that the abundance of sauropods, theropods, crocodiles and large fishes in the Itapecuru paleoenvironment is incompatible with strict arid climate conditions.

However, the distribution of smectite in the Itapecuru sandstones suggests that semi-arid to arid conditions were also present, at least seasonally, in the interval. Under dry conditions, limited meteoric water influx promotes an inefficient ionic leaching, and consequently the precipitation of smectites and mixed-layer clays, such as chlorite-smectite (C/S), commonly as pore-lining or grain-replacive minerals (Ketzer *et al.*, 2003b, Morad *et al.* 2010). The authigenesis of diagenetic trioctahedral chloritic clays, such as C/S, is often related to in the availability of Mg^{2+} and Fe^{2+} from the dissolution of detrital ferromagnesian minerals, or to saline lacustrine systems (Pay *et al.*, 2000; Hillier *et al.*, 2006). The observed association of smectite coatings and rims (Fig. 10C) with grain-replacive C/S (Fig. 10A and 10B) in the micaceous sandstones and heterolites of the Itapecuru Formation may suggest

an eogenetic formation from slightly saline waters (Morad *et al.*, 2010) in a fluvial-deltaic system (Rossetti *et al.* 2000, 2001; Rossetti and Góes, 2003; Miranda and Rossetti, 2006; Nascimento *et al.*, 2007), or a transitional estuarine paleoenvironment (Anaisse *et al.*, 2001; Dutra and Malabarba, 2001) as those proposed for the Itapecuru Formation.

The concentration of micas in the fine-grained sandstones is similar to what was observed by Althaus *et al.* (2020) and Pantopoulos *et al.* (2021) in Aptian coastal-lacustrine sandstones of the Espírito Santo Basin. The platy shape of biotite and muscovite grains (Fig. 4C and 4E) allowed these grains to be winnowed out of high-energy proximal environments, and carried in suspension to the distal parts of the system, where they were deposited in hydraulic equivalence with finer quartz and feldspars grains.

Burial diagenesis was limited in the studied succession. This is indicated by the limited mechanical compaction, evidenced by the commonly loose packing of the sandstones. Compaction features were limited mostly to the generation of pseudomatrix by the compaction of mud intraclasts, argillaceous peloids, altered biotite grains and carbonaceous fragments. Loose-packed sandstones with large primary intergranular porosity, as those from the upper cored section of the Itapecuru Formation, were commonly only partially cemented by patches of poikilotopic (Fig. 11A) and macrocrystalline calcite, suggesting that the carbonate precipitated before significant compaction.. Early calcite precipitated mostly in the porous Itapecuru sandstones deposited in fluvial or distributary channels (Rossetti and Goés, 2003), as in other fluvial, deltaic and estuarine sediments under semi-arid climate conditions (Dutta and Suttner, 1986; Garcia *et al.*, 1998; Morad, 1998; Morad *et al.*, 1998; Morad *et al.*, 2010).

The occurrence of saddle dolomite in a single of Itapecuru sandstone sample represents the only evidence of mesodiagenesis in the whole analysed interval. The authigenesis of pore-filling and replacive saddle dolomite typically requires temperatures above 60-80 °C (Radke and Mathis, 1980) and concentrated interstitial waters (Spötl and Pitman, 1998).

Conclusions

The petrographic characterization of the interval that comprises the transition between the upper Codó and the Itapecuru formations revealed the occurrence of diagenetic constituents characteristic of both humid and arid climate conditions. Humid conditions are mainly indicated by the occurrence of kaolinite in the sandstones and shales, and by the extensive dissolution of feldspars. Arid conditions are mainly indicated by the broad occurrence of smectite and interstratified C/S in the sandstones and heterolites, and of fibrous gypsum, early ferroan dolomite and calcite spherulites in the shales and hybrid rudites.

The broad distribution of berthierine peloids suggests a significant marine influence during the deposition of the whole interval, and their abundance in sandstones and heterolites of the Itapecuru Formation supports a deltaic or estuarine origin for those deposits. The wide occurrence of eogenetic pyrite suggests that reducing conditions were present during early diagenesis, also suggesting a significant contribution of marine waters.

The abundance of carbonaceous fragments and their widespread distribution in the succession indicates the existence of significant vegetation in the area, suggesting significant humid periods.

The occurrence of foraminifera bioclasts, associated with ferroan dolomite, pyrite and gypsum in the hybrid rudites indicates marine incursions in the Codó lacustrine paleoenvironment. The alternated calcite and ferroan dolomite cementation indicates the mixing of marine and meteoric waters, with the dolomite precipitating during evaporative periods and the calcite forming from more dilute pore waters, after meteoric recharge periods.

The formation of calcite spherulites is attributed to abiotic eogenetic precipitation within the clay matrix, and its association with early gypsum cementation suggests evaporative conditions in the Codó Lake.

The precipitation of Iron oxides occurred mostly due to alteration of interdistributary bay deposits of the Itapecuru paleoenvironment, promoted by bioturbation associated with early pedogenetic processes.

The integration of petrographic characterization, clay mineral analysis and electron microscopy indicated an alternation of humid and arid climate conditions, and variable but intermittent marine influence during the deposition of the upper Codó and Itapecuru deposits. This contributes to the understanding of the regional

paleoenvironmental and paleoclimatic conditions along northern-northeastern Brazil during the late Aptian and early Albian. The unequivocal occurrence of humid conditions in the interval supports the hypothesis of progressive humidity increase promoted by the opening of the Equatorial Atlantic and the early establishment of the Albian Equatorial Humid Belt.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the research and development project “Correlação estratigráfica, evolução paleoambiental e paleogeográfica e perspectivas exploratórias do Andar Alagoas”, sponsored by Shell Brasil Petróleo Ltda, with resources allocated to R&D institutions accredited by the Brazilian National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels - ANP (technical cooperation agreement #20219). We would also like to thank the "Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (PRH.14 - ANP)" for the support of the first author during his masters. Bruno Araújo is thanked for his logistical and technical support.

References

Aguiar, G. A., 1969. Bacia do Maranhão: Geologia e Possibilidade de Petróleo. Relatório Petrobras, DEPEX/ SEDOC, 371 (12), 15-46.

Aguiar, G. A., 1971. Revisão Geológica da bacia Paleozóica do Maranhão. In: Annals of the Congresso Brasileiro de Geologia. São Paulo, 113-122.

Althaus, C. E., dos Santos Scherer, C. M., Kuchle, J., dos Reis, A. D., Ferronato, J. P. F., De Ros, L. F., Bardola, T. P., 2020. Wave-dominated lacustrine margin of Aptian pre-salt: Mucuri Member, Espírito Santo Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 99, 102490. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102490>

Anaisse Jr. J, Truckenbrodt W., Rossetti D.F. 2001. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecurú, região de Açailândia/ MA, Bacia do Grajaú. In: D.F Rossetti, A. M Góes and W. Truckenbrodt (Eds.) *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Editora do Museu Goeldi, pp.:119-150.

- Antonioli, L., Thiago, L.K., Rodrigues, M.A.C., Dino, R., 1999. Análise palinoestratigráfica de sedimentos aptianos da Bacia do Parnaíba, afloramentos na região de Codó, MA. In: *Substracts of the Congresso Brasileiro de Paleontologia*, 12, 18-19.
- Antonioli, L., 2001. Estudo palino-cronoestratigráfico da Formação Codó-Cretáceo inferior do Nordeste Brasileiro. 2001. Ph.D. thesis. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 265 pp.
- Austin Jr, J.A., Uchupi, E., 1982. Continental-oceanic crustal transition off Southwest Africa. *AAPG Bulletin*, 66(9), 1328-1347.
<https://doi.org/10.1306/03B5A79B-16D1-11D7-8645000102C1865D>
- Arai, M., 2011. Paleogeografia do Atlântico Sul no aptiano: um novo modelo a partir de dados micropaleontológicos recentes. *Boletim de geociências da Petrobras*, 17 (2), 331-351.
- Arai, M., 2014. Aptian/Albian (Early Cretaceous) paleogeography of the South Atlantic: a paleontological perspective. *Brazilian journal of Geology*, 44 (2), 339-350.
- Aranha, L.G.F., Lima, H.P., Souza, J. M. P., Makino, R.K., Figueiras, A.J.M., 1988. Evolução Tectônica e Sedimentar das Bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. In: *Annals of the XXXV Congresso Brasileiro de Geologia*. Belém, 6, 2487-2498.
- Aranha, L.G.F., Lima, H.P., Souza, J.M.P., Makino, R.K., 1990., Origem e evolução das bacias de Bragança-Viseu, São Luís e Ilha Nova. In: *Raja Gabaglia, G. P., Milani, E. J. (Eds.), Origem e evolução de bacias sedimentares*. Petrobras, Rio de Janeiro, 221-233.
- Araújo, D. B., 2017. Bacia do Parnaíba. Sumário geológico e setores em oferta. Superintendência de definição de blocos, Rio de Janeiro, 114.
- Bahniuk, A.M., Anjos, S., França, A.B., Matsuda, N., Eiler, J., Mckenzie, J.A., Vasconcelos, C., 2015. Development of microbial carbonates in the Lower Cretaceous Codó Formation (north-east Brazil): Implications for interpretation of microbialite facies associations and palaeoenvironmental conditions. *Sedimentology* 62, 155–181. <https://doi.org/10.1111/sed.12144>.
- Barros, J.P.P., 2012. Caracterização dos esferulitos carbonáticos da Formação Codó (aptiano, Bacia do Parnaíba), em afloramentos da Região de Codó (MA). M.Sc. dissertation. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 112 pp.

Batista, A.M.N., 1992. Caracterização Paleoambiental dos Sedimentos Codó-Grajaú, Bacia de São Luís (MA). M.Sc. dissertation. Universidade Federal do Pará 102.

Campbell, D.F., 1949. Revised report of the Reconnaissance Geology of the Maranhão Basin. Rio de Janeiro, 117 pp.

Carneiro, R. G., 1974. Mapeamento estrutural da área Grajaú-Imperatriz. Technical report for Petrobras. Belém, 398, 30 pp.

Carvalho, M.A., Lana, C. C., Bengtson, P., Sá, N. P., 2017. Late Aptian (Cretaceous) climate changes in northeastern Brazil: A reconstruction based on indicator species analysis (IndVal). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485, 543-560. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2017.07.011>

Carvalho, M.A., Bengtson, P., Lana, C. C., Sá, N. P., Santiago, G., Giannerini, M. C. S., 2019. Late Aptian (Early Cretaceous) dry–wet cycles and their effects on vegetation in the South Atlantic: Palynological evidence. *Cretaceous Research*, 100, 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2019.03.021>

Crafts-Brandner, S.J., Salvucci, M.E., 2000. Rubisco activase constrains the photosynthetic potential of leaves at high temperature and CO₂. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97, 13430–13435.

Chaboureau, A. C., Donnadieu, Y., Sepulchre, P., Robin, C., Guillocheau, F., Rohais, S., 2012. The Aptian evaporites of the South Atlantic: a climatic paradox?. *Climate of the Past*, 8(3), 1047-1058.

Chumakov, N.M., 1995. The problem of the warm biosphere. *Stratigraphy and Geological Correlation* 3, 205–215.

Chumakov, N.M., 2004. Climatic zones and climate of the Cretaceous period. In: Semikhatov, M.A., Chumakov, N.M. (Eds.), *Climate in the epochs of major biospheric transformations*. Transactions of the Geological Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow, 550, 105–123.

Choquette, P.W., Pray, L., 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *American Association Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 207-250.

Coleman, M.L., Hedrick, D.B., Lovley, D.R., White, D.C., Pye, K., 1993. Reduction of Fe (III) in sediments by sulphate-reducing bacteria. *Nature* 361, 436–438.

Corrêa-Martins, F., Mendes, J.C., Bertolino, L.C., Mendonça, J.O., 2018. Petrografia, Diagênese e Considerações sobre Proveniência da Formação Itapecuru no Norte do Maranhão (Cretáceo Inferior, Bacia do Parnaíba, NE Brasil). *Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ*, 41 (3), 514-530.

Corrêa-Martins, F. 2019. The Neostatotype of Itapecuru Formation (Lower-Middle Albian) and Its Impact for Mesozoic Stratigraphy of Parnaíba Basin. *An. Acad. Bras. Cien*, 9 (2), 19 pp.

Coura, A.P.P., Borghi, L., 2014. Caracterização faciológica e paleoambiental de estromatólitos da Formação Codó (Aptiano da Bacia do Parnaíba): uma nova abordagem metodológica. *Bol. de Geociências da Petrobras*. 22 (2), 313-332.

Cunha, B.C.C., Del'Arco, J.O., 1988. Variações faciológicas da Formação Itapecuru na região de Santa Inês - MA. In: *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Geologia*. Belém, 35, 765-777.

De Hon, R.A., Clawe, L.N., Washington, P.A., Young, L.M., 1999. Formation of northern Louisiana ironstones. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 31, 159–160.

De Ros, L.F., Golberg, K., Abel, M., Victoreti, F., Mastella, M., Castro, E., 2007. Advanced acquisition and management of petrographic information from reservoir rocks using the Petroledge® System. *AAPG Annual Convention and Exhibition, Long Beach (Expanded Abstracts)*.

De Ros, L.F., Scherer, C.M.S., 2012. Stratigraphic controls on the distribution patterns of diagenetic processes, quality and heterogeneity of continental reservoirs from the Recôncavo Basin, Brazil, in: S. Morad, J. M. M. Ketzer, and L. F. De Ros, eds., *Linking diagenesis to sequence stratigraphy of sedimentary rocks: International Association of Sedimentologists Special Publication 45*.

Dickson, J.A.D., 1965. A modified staining technique for carbonates in thin section. *Nature*, 205(4971), 587-587.

Duarte, S. G., Silva, F. J., Arai, M., Sylvestre, L. S., Wanderley, M. D., Jha, N., Joshi, H., Masure, E., Atfy, H. E., 2021. Paleoclimatic and paleoecological inferences of the Family Anemiaceae: A palynological investigation from variable spatial and temporal strata in some lithostratigraphic units of Brazil, India and France. *Review of*

Palaeobotany and Palynology, 285, 104316.
<https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2020.104316>

Dutra, M.F.A., Malabarba, M.C.S.L., 2001. Peixes do Albiano-Cenomaniano do Grupo Itapecuru no estado do Maranhão, Brasil. In: D.F Rossetti, A. M Góes and W. Truckenbrodt (Eds.) *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Editora do Museu Goeldi, pp.:191-209.

Dutta, P. K., and L. J. Suttner, 1986, Alluvial sandstone composition and paleoclimate: II. Authigenic mineralogy. *Journal of Sedimentary Petrology*, 56, 346–358.

Ferreira, N.N., Ferreira, E.P., Ramos, R.R.C., Carvalho, I. S., 2016. Palynological and sedimentary analysis of the Igarapé Ipiranga and Querru 1 outcrops of the Itapecuru Formation (Lower Cretaceous, Parnaíba Basin), Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 66, 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.12.005>

Ferreira, N. N., Ferreira, E. P., Ramos, R. R. C., Carvalho, I. S. 2020. Terrestrial and marine palynomorphs from deposits of the pull-apart rift of West Gondwana (Parnaíba Basin, northern Brazil): Biostratigraphy and relation to tectonic events. *Journal of South American Earth Sciences*, 101,102612.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102612>

Ferreira, N.N., Ramos, R.R., Ferreira, E.P., Carvalho, I.S., 2021. Lithofaciological analysis of the exposed rocks of the Itapecuru Formation, northeastern Parnaíba Basin, Brazil: paleoenvironmental implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 107, 103114. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.103114>.

Frakes, L.A., Probst, J.L., Ludwig, W., 1994. Latitudinal distribution of paleotemperature on land and sea from early Cretaceous to middle Miocene. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris* 318 (2), 1209–1218.

Frakes, L.A., 1999. Estimating the global thermal state from Cretaceous sea surface and continental temperature data. In: Barrera, E., Johnson, C.C. (Eds.), *Evolution of the Cretaceous Ocean-Climate System*. Geological Society of America, Special Paper 332, 49–57.

Folk, R.L., 1968. *Petrology of Sedimentary Rocks*. University of Texas publication, Austin, 170 pp.

Föllmi, K.B., 2012. Early Cretaceous life, climate and anoxia. *Cretaceous Research*, 35, 230-257.

Garcia, A.J.V., Morad, S., De Ros, L.F., Al-Aasm, I.S., 1998. Palaeogeographical, palaeoclimatic and burial history controls on the diagenetic evolution of reservoir sandstones: evidence from the Lower Cretaceous Serraria sandstones in the Sergipe-Alagoas Basin, NE Brazil. In: Morad, S., (Eds.), Carbonate Cementation in Sandstones. Blackwell Science, Oxford, 26, 107-141.

Guerra-Sommer, M., Degani-Schmidt, I., Mendonça, J.O., Mendonça Filho, J.G., Lopes, F.D.S., Salgado-Campos, V.M.J., Carvalho, I.S., 2021. Multidisciplinary approach as a key for paleoenvironmental interpretation in a Weichselia-dominant interval from the late Aptian Codó Formation (Parnaíba Basin, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 111, 103490.
<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103490>

Góes, A.M.O., Feijó, F.J., 1994. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8, 57-68.

Góes, A.M., Rossetti, D.F., 2001. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú, Meio-Norte do Brasil. In: Rossetti, D.F., Góes, A. M., Truckenbrodt, W., (Eds), *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, 15-29.

Gonçalves, R.A., Carvalho, I.S., 1996. Contribuição ao estudo da sedimentação da Formação Itapecuru - região de Itapecuru-Mirim, Bacia do Parnaíba (Cretáceo Inferior) - Maranhão - Brasil. *Revista de Geologia*, 9, 75-81.

Goudie, A.S., 1983. Calcrete. In: Goudie, A. S., Pye, K., (Eds), *Chemical Sediments and Geomorphology: Precipitates and Residues in the NearSurface Environment*. Academic Press, San Diego, 93-131.

Granot, R., Dymant, J., 2015. The Cretaceous opening of the South Atlantic Ocean. *Earth and Planetary Science Lett.*, 414, 156-163.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2015.01.015>

Hardie, L.A., 1967. The gypsum-anhydrite equilibrium at one atmosphere pressure. *American Mineralogist*, 52, 171-200.

Hay, W.W., Migdisov, A., Balukhovsky, A.N., Wold, C.N., Floßgel, S., Soßding, E., 2006. Evaporites and the salinity of the ocean during the Phanerozoic: implications for climate, ocean circulation and life. In: Buggisch, W. (Ed.), *Evolution of the System Earth in the Late Palaeozoic: Clues from Sedimentary Geochemistry*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 240, 3–46.

Hay, W. W., Floegel, S., 2012. New thoughts about the Cretaceous climate and oceans. *Earth-Science Reviews*, 115(4), 262-272.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.09.008>

Heimhofer, U., Hochuli, P. A., 2010. Early Cretaceous angiosperm pollen from a low-latitude succession (Araripe Basin, NE Brazil). *Rev. of Palaeobot. and Palynol.*, 161, 105-126. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2010.03.010>

Hillier, S., Wilson, M., Merriman, R., 2006. Clay mineralogy of the Old Red Sandstone and Devonian sedimentary rocks of Wales, Scotland and England. *Clay Minerals*, 41(1), 433-471. doi:10.1180/0009855064110203

Hornibrook, E. R. C., Longstaffe, F. J., 1996. Berthierine from the Lower Cretaceous Clearwater Formation, Alberta, Canada. *Clays and Clay Minerals*, 44, 1–21, doi:10.1346/CCMN.1996.0440101.

Ingersoll, R.V., Bullard, T., Ford, R., Grimm, J., Pickle J., Sares, S., 1984. The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi–Dickinson point-counting method. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54, 103–116.
<https://doi.org/10.1306/212F83B9-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Janks, J.S., Yusas, M.R., Hall, C.M., 1992. Clay mineralogy of an interbedded sandstone, dolomite, and anhydrite: The Permian Yates Formation, Winkler County Texas. *Origin, Diagenesis and Petrophysics of Clay Minerals in Sandstones*, SEPM special publication, 47, 145-157.

Johnsson, M.J., 1990. Overlooked sedimentary particles from tropical weathering environments. *Geology*, 18, 107–110.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0107:OSPFTW>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0107:OSPFTW>2.3.CO;2)

Jowett, E.G., Cathles, L.M., Davis, B.W., 1993. Predicting the depths of gypsum dehydration in evaporitic sedimentary basins. *Amer. Assoc. of Petrol. Geol. Bull.*, 77, 402-413. <https://doi.org/10.1306/BDF8C22-1718-11D7-8645000102C1865D>

Kegel, W., 1956. As inconformidades da Bacia do Parnaíba e zonas adjacentes. *Rio de Janeiro. DNPM Bulletin*, Rio de Janeiro, 160.

Ketzer, J.M., Holz, M., Morad, S., Al-Aasm, I., 2003a. Sequence stratigraphic distribution of diagenetic alterations in coal-bearing, paralic sandstones: evidence from the Rio Bonito Formation (Early Permian), southern Brazil. *Sedimentology*, 50, 855–877. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2003.00586.x>

Ketzer, J.M., Morad, S., Amorosi, A., 2003b. Predictive diagenetic clay-mineral distribution in siliciclastic rocks within a sequence stratigraphic framework. In: Worden, R.H., Morad, S., (Eds.), *Clay cements in sandstones*. Blackwell Publishing Ltd. International Association of Sedimentologists Special Publication, 34, 42–59.

Kidder, D.L., Worsley, T.R., 2010. Phanerozoic large igneous provinces (LIPs), HEATT (Haline Euxinic Acidic Thermal Transgression) episodes and mass extinctions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 295, 162–191 <http://dx.doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.05.036>.

Kronen Jr., J.D., Glenn, C.R., 2000. Pristine to reworked verdine: Keys to sequence stratigraphy in mixed carbonate siliciclastic forereef sediments (Great Barrier Reef). In: Glenn, C.R., Prevot-Lucas, L., Lucas, J., (Eds.), *Marine authigenesis: From global to microbial*. SEPM Special Publication 66, 387–403.

Kroth, M., Borghi, L., Bobco, F.E.R., Araújo, B.C., Silveira, L.F., Duarte, G., Ferreira, L.O., Guerra-Sommer, M., Mendonça, J.O., 2021. Aptian shell beds from the Romualdo Formation (Araripe Basin): Implications for paleoenvironment and paleogeographical reconstruction of the Northeast of Brazil. *Sedimentary Geology*, 426, 10625. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2021.106025>

Lima, E.A., Leite, J.F., 1978. Projeto estudo global de recursos minerais da Bacia do Parnaíba: integração geológica-metalogenética. Relatório Final da Etapa III, DNPM/CPRM, Recife, 231 pp.

Lima, M.R., 1980. Considerações palinológicas a respeito da correlação estratigráfica entre as formações Cretáceas do nordeste do Brasil: Congresso Latinoamericano de Paleontologia. *Annals, Buenos Aires*, 5, 227-233.

Lima, M.R., 1982. Palinologia da Formação Codó, Maranhão. *Bol. Inst. Geociências-USP*, 13, 223-228.

Lima, M.R., 1983. Paleoclimatic reconstruction of the Brazilian Cretaceous based on palynological data. *Rev. Bras. Geociên.*, 13, 223-228.

de Lima Barros, C., Silva, S.C., Machado, L. L., Netto, A.D.M.R., Sames, B., Alves, T.D., da Silva Júnior, R.P., 2022. Non-marine ostracods of the Codó Formation (upper Aptian, Lower Cretaceous), Parnaíba Basin, NE Brazil: new biostratigraphic and paleoecological insights. *Cretaceous Research*, 133, 105125. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2021.105125>

Lima, B.E.M., De Ros, L.F., 2019. Deposition, diagenetic and hydrothermal processes in the Aptian Pre-Salt lacustrine carbonate reservoirs of the northern Campos Basin, offshore Brazil. *Sedimentary Geology*, 383, 55-81.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.01.006>

Lindoso, R.M., Carvalho, I.S., Mendes, I.D., 2013. An isopod from the Codó Formation (Aptian of the Parnaíba Basin), Northeastern Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 43, 16-21. DOI: 10.5327/Z2317-48892013000100003

Lindoso, R.M., Maisey, J.G., Carvalho, I.S., 2016. Ichthyofauna from the Codó Formation, Lower Cretaceous (Aptian, Parnaíba Basin), Northeastern Brazil and their paleobiogeographical and paleoecological significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 447, 53-64.
<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.01.045>

Lindoso, R.M., Dutra, T.L., Carvalho, I.S., Medeiros, M.A., 2018. New plant fossils from the Lower Cretaceous of the Parnaíba Basin, Northeastern Brasil: Southern Laurasia links. *Brazilian Journal of Geology*, 48(1), 127-145.
<https://doi.org/10.1590/2317-4889201820170071>

Love, L.G., 1967. Early diagenetic iron sulphide in Recent sediments of the Wash, England. *Sedimentology*, 9, 327-352.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1967.tb01339.x>

Macquaker, J.H.S., Taylor, K.G., 1996. A sequence-stratigraphic interpretation of a mudstone-dominated succession: the Lower Jurassic Cleveland Ironstone Formation, UK. *Journ. of the Geol. Soci.*, 153, 759-770.

Magaritz, M., Kaufman, A., Yaalon, D.H., 1981. Calcium carbonate nodules in soils: $^{13}\text{O}/^{16}\text{O}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios and ^{14}C contents. *Geoderma*, 25, 157-172.
[https://doi.org/10.1016/0016-7061\(81\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(81)90033-1)

Medeiros, M.A., Schultz, C.L., 2001. Uma paleocomunidade de vertebrados do Cretáceo Médio, Bacia de São Luís. In: D.F Rossetti, A. M Góes and W. Truckenbrodt (Eds.) *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Editora do Museu Goeldi, pp.:209-223.

Mendes, M.S., Borghi, L., 2005. Análise faciológica da Formação Codó (Cretáceo, Bacia do Parnaíba) em testemunhos de sondagem. In: *Anais do III Congresso Brasileiro de P&D em Óleo e Gás*. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Salvador, 1-6.

Mendes, M., 2007. Análise estratigráfica do intervalo Formacional Grajaú-Codó (aptiano) da Bacia do Parnaíba, NE do Brasil. 2007. M.Sc. dissertation, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 146 pp.

Menezes, M.N., 2018. Icnologia e Paleopedologia aplicadas ao estudo de planícies aluviais albianas da Bacia do Parnaíba, Brasil. M.Sc. dissertation, Rio de Janeiro, State University of the Rio de Janeiro, 92 pp.

Menezes, M.N., Araújo-Júnior, H.I., Dal' Bó, P.F., Medeiros, M. A. A., 2019. Integrating ichnology and paleopedology in the analysis of Albian alluvial plains of the Parnaíba Basin, Brazil. *Cretaceous Research*, 96, 210-226. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2018.12.013>

Mesner, J.C., Wooldridge, L.C.P., 1962. The Maranhão Basin Study Revision. Petrobras, Belém, 2, 103-645.

Mesner, J.C., Wooldridge, L.C.P., 1964. Maranhão Paleozoic basin and Cretaceous coastal basins, north Brazil. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 48(9), 1475–1512.

Miranda, M.C.C., Rossetti, D.F., 2006. Reconstituição paleoambiental de depósitos albianos na borda leste da bacia de Grajaú, MA. *Rev. Bras. Geoc.*, 36, 623-635.

Morad, S., Ben Ismail, H.N., De Ros, L.F., Al-Aasm, I.S., Serrhini, N.-E., 1994. Diagenesis and formation water chemistry of Triassic reservoir sandstones from southern Tunisia. *Sedimentology*, 41, 1253–1272. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1994.tb01452.x>

Morad, S., 1998. Carbonate cementation in sandstones: distribution patterns and geochemical evolution. In: Morad, S., (Ed.), *Carbonate cementation in sandstones*: Blackwell Publishing Ltd., International Association of Sedimentologists Special Publication 26, 1-26.

Morad, S., De Ros, L.F., Nystuen, J.P., Bergan, M., 1998, Carbonate diagenesis and porosity evolution in sheetflood sandstones: evidence from the middle and lower Lunde members (Triassic) in the Snorre field, Norwegian North Sea. In: Morad, S., (Ed.), *Carbonate cementation in sandstones*: Blackwell Publishing Ltd., International Association of Sedimentologists Special Publication 26, 53–85.

Morad, S., Ketzer, J.M., De Ros, L.F., 2000. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology* 47, 95–120.

- Morad, S., Al-Ramadan, K., Ketzer, J.M., De Ros, L.F., 2010. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: a review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 94, 1267–1309. <https://doi.org/10.1306/04211009178>
- Morad, S., Ketzer, J. and De Ros, L., 2012. Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy: An Integrated Tool for Understanding and Predicting Reservoir Quality Distribution. In: Morad, S., Ketzer, J.M., De Ros, L. F., (Eds.), *Linking Diagenesis to Sequence Stratigraphy*. John Wiley & Sons, 45, 1-36. <https://doi.org/10.1002/9781118485347.ch1>
- Mutterlose, J. Bornemann, A., Herrle, J., 2009. The Aptian-Albian cold snap: Evidence for "mid" Cretaceous icehouse interludes. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie-Abhandlungen*, 252(2), 217-225.
- Nascimento, M.S., Góes, A.M., Macambira, M.J.B., Brod, J. A., 2007. Provenance of Albian sandstones in the São Luís-Grajaú Basin (northern Brazil) from evidence of Pb-Pb zircon ages, mineral chemistry of tourmaline and paleocurrent data. *Sedimentary Geology*, 201, 21-42. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.04.005>
- Neves, I.A., 2007. Caracterização da faciologia orgânica de uma seção sedimentar da Formação Codó, Bacia do Parnaíba, 2007. M.Sc. dissertation, Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Nunes, K.C., 1993. Interpretação integrada da Bacia do Parnaíba com ênfase nos dados aeromagnéticos. In: 3rd International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Expanded Abstracts, 152–157.
- Nürnberg, D., Müller, R.D., 1991. The tectonic evolution of the South Atlantic from Late Jurassic to present. *Tectonophysics*, 191(1-2), 27-53. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(91\)90231-G](https://doi.org/10.1016/0040-1951(91)90231-G)
- Oliveira Pessoa, V.C., Borghi, L., 2004. Análise Faciológica da Formação Itapecuru (Cretáceo, Bacia do Parnaíba) em testemunhos de sondagem. In: *Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás*. Salvador, 6 pp.
- Odin, G.S., 1990. Clay mineral formation at the continent-ocean boundary: The verdine facies. *Clay Minerals*, 25, 477–483. [doi:10.1180/claymin.1990.025.4.06](https://doi.org/10.1180/claymin.1990.025.4.06)
- Pantopoulos, G., Orita, G. K. L., Armelenti, G., Althaus, C. E., Kuchle, J., Scherer, C. M. S., Rodrigues, A. G., De Ros, L. F., 2021. Depositional conditions at the Aptian

pre-salt margins: evidence from quantitative petrography and textural analysis of the Mucuri Member, Espírito Santo Basin, Brazil. *Petroleum Geoscience*, 27. 1-18.
<https://doi.org/10.1144/petgeo2020-112>

Paz, J.D.S., Rossetti, D.F., 2001. Reconstrução paleoambiental da Formação Codó (Aptiano), borda leste da Bacia do Grajaú, MA. In: Rossetti, D.F., Góes, A.M., Truckenbrodt, W. (Eds.), *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Museu Paraense Emílio Goeldi (Coleção Friedrich Katzer), Belém, 77-100.

Paz, J.D.S., Rossetti, D.F., 2005. Linking lacustrine cycles with syn-sedimentary tectonic episodes: an example from the Codó Formation (late Aptian), Northeastern Brazil. *Geological Magazine*, 142(3), 269-285.
<https://doi.org/10.1017/S0016756805000488>

Pay M.D., Astin T.R., Parker, A., 2000. Clay mineral distribution in the Devonian-Carboniferous sandstones of the Clair Field, west of Shetland, and its significance for reservoir quality. *Clay Minerals*, 35, 151-162.

Pedraão, E., Barrilari, I.M.R., Lima, H.P., 1993a. Estudos palinológicos dos sedimentos cretácicos da Bacia do Parnaíba. Internal report from CENPES/DIVEX/Petrobras, Rio de Janeiro, 40 pp.

Pedraão, E., Arai, M., Carvalho, I.S., Santos, M.H.B., 1993b. Palinomorfos da Formação Itapecuru- análise palinológica de uma amostra de superfície da Ponta do Farol, município de São Luís (MA). In: *Relatório Interno Petrobras, SEBIPE/CENPES*, 13 pp.

Pedraão, E., 1995. Palinoestratigrafia e evolução paleoambiental de rochas sedimentares aptianas-cenomanianas das bacias de Bragança-Viseu e São Luís. Ph.D. thesis., Rio de Janeiro, Federal University of Rio de Janeiro, 225 pp.

Pedraão, E., Carvalho, I.S., Martins, F.J.C., Santos, M.H.B., 1996. Palinoestratigrafia e análise quantitativa de amostras de superfície (Formação Itapecuru, Bacia de São Luís). In: *An. Acad. Bras. Ciên.*, 62, 268 pp.

Pedraão, E., Lima, H.P., Makino, R.K., Barrilari, I. M.R., 2002. Palinoestratigrafia e evolução ambiental da seção cretácea das bacias de Bragança-Viseu e São Luís (margem equatorial brasileira). *Acta. Geol. Leopoldensia XXV*, 21-39.

Pinto, I.D., Ornellas, L.P., 1974. New Cretaceous Hemiptera (Insects) from Codó Formation, northern Brazil. In: *Anais do XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia*. Porto Alegre, 2, 289-304.

Poulsen, C.J., Gendaszek, A. S., Jacob, R. L., 2003. Did the rifting of the Atlantic Ocean cause the Cretaceous thermal maximum?. *Geology*, 31(2), 115-118.
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0115:DTROTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0115:DTROTA>2.0.CO;2)

Radke, B.M., Mathis, R.L., 1980. On the formation and occurrence of saddle dolomite. *Journal of Sedimentary Research*, 50(4), 1149-1168.
<https://doi.org/10.1306/212F7B9E-2B24-11D7-8648000102C1865D>

Rodrigues, R., 1995. A geoquímica Orgânica na Bacia do Parnaíba. Ph. D. thesis. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 22, 225 p.

Rodrigues, A. G., De Ros, L. F., Neumann, R., Borghi, L., 2015. Paleoenvironmental implications of early diagenetic siderites of the Paraíba do Sul Deltaic Complex, eastern Brazil. *Sedimentary Geology*, 323, 15-30.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.04.005>

Rossetti, D.F., Góes , A.M., Truckenbrodt, W., Anaisse, J.R.J., 2000. Tsunami induced large-scale scour-and-fill structures in Albian to Cenomanian deposits of Grajaú Basin, Northern Brazil. *Sedimentology*, 47, 309- 323.

Rossetti, D.F., Goés, A.M., Arai, M.A., 2001a. A passagem aptiano-albiano na Bacia do Grajaú, MA. In: Rossetti, D.F., Goés, A.M., Truckenbrodt, W. (Eds.), *O cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Museu Paraense Emílio Goeldi, 101-117.

Rossetti, D.F., Truckenbrodt, W., Santos Junior, A.E., 2001b. Clima do cretáceo no meio-norte brasileiro. In: Rossetti, D.F., Góes, A.M., Truckenbrodt, W. (Eds.), *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Museu Paraense Emílio Goeldi (Coleção Friedrich Katzer), Belém, 67-76.

Rossetti, D.F., Goés, A.M., Truckenbrodt, W., 2001. *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Museu Paraense Emílio Goeldi Friedrich Katzer, Belém, 264 pp.

Rossetti, D.F., Góes , A.M., 2003. Caracterização Paleoambiental de Depósitos Albianos da borda sul da Bacia de São Luís-Grajaú: Modelo de delta fluvial influenciado por tempestade. *Rev. Bras. Geoci.*, 33, 299- 312.

Rossetti, D.F., Paz, J.D.S., Góes, A.M., 2004. Fácies analysis of the Codó Formation (Late Aptian) in the Grajaú Área, Southern São Luís-Grajaú Basin. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Rio de Janeiro, 76(4), 791-806.

Santos, J.Q., Mamede, V.M., 1990. Litofácies e Sistemas Depositionais da Formação Itapecuru na Porção Centro-Oeste do Estado do Maranhão. In: Anais do XXXVI Congresso Brasileiro de Geologia. Natal, 1, 150-156.

Spötl, C. Pitman, J. K., 1998. Saddle (baroque) dolomite in carbonates and sandstones: a reappraisal of a burial-diagenetic concept. In: Morad, S. (Eds), Carbonate Cementation in Sandstones. Blackwell Science Special publication of the International Association of Sedimentologists, 26, 437-461.

Taylor, K.G., Macquaker, J.H.S. 2000. Early diagenetic pyrite morphology in a mudstone-dominated succession: the Lower Jurassic Cleveland Ironstone Formation, eastern England. *Sedimentary Geology*, 131, 77-86.
[https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(00\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(00)00002-6)

Taylor, K.G., Simo, J.A., Yocum, D., Leckie, D.A., 2002. Stratigraphic significance of ooidal ironstones from the Cretaceous Western Interior Seaway: The Peace River Formation, Alberta, Canada, and the Castlegate Sandstone, Utah, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 72, 316-327. <https://doi.org/10.1306/060801720316>

Taylor, K.G., Macquaker, J.H.S., 2011. Iron Minerals in Marine Sediments Record Chemical Environments. *Elements*, 7(2), 113–118.
<https://doi.org/10.2113/gselements.7.2.113>

Thamban, M., Purnachandra, R.V., 2000. Distribution and composition of verdine and glaucony facies from the sediments of the western continental margin of India. In: Glenn, C.R., Prevot, L.L., Lucas, J., (Eds.), *Marine Authigenesis; from Global to Microbial*. Society for Sedimentary Geology Special Publication, Tulsa (OK), 66, 233–244.

Tucker, M.E., 1991. *Sedimentary Petrology. An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. Blackwell Scientific, Oxford, 260 pp.

Varejão, F.G., Warren, L.V., Simões, M.G., Buatois, L.A., Mángano, M.G., Bahniuk, A. M., Assine, M.L., 2021. Mixed siliciclastic-carbonate sedimentation in an evolving epicontinental sea: Aptian record of marginal marine settings in the interior basins of north-eastern Brazil. *Sedimentology*, 1-40.

Vaz, P.T., Rezende, N.G.A.M., Wanderley Filho, J.R., Travassos, W.A.S., 2007. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15(2), 253-263.

Vicalvi, M.A., Ferreira, C.S., Carvalho, I.S., Anjos, S.M., 1993. Fragmentos de ovos de dinossauros da Formação Itapecuru, Maranhão: uma discussão. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 65, 218 pp.

Watts, N.L., 1980. Quaternary pedogenic calcretes from the Kalahari (southern Africa): mineralogy, genesis and diagenesis. *Sedimentology*, 27, 661 -686. In: Morad, S., (Ed.), *Carbonate Cementation in Sandstones*. Blackwell Science, Oxford, 26, 514 pp.

Wilson, M.D., 1992. Inherited grain-rimming clays in sandstones from eolian and shelf environments: their origin and control on reservoir properties. In: Houseknecht, D.W., Pittman, E.D., (Eds.), *Origin, Diagenesis, and Petrophysics of Clay Minerals in Sandstones*. Society for Sedimentary Geology SEPM Special Publication, Tulsa, 47, 209-225.

Worden, R.H., Morad, S., 2000. Quartz cementation in oil field sandstones: a review of the key controversies. In: Worden, R.H., Morad, S. (Eds.), *Quartz Cementation in Sandstones*. International Association of Sedimentologists Special Publication 29, pp. 1–20.

Worden, R.H., Burley, S.D., 2003. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. In: Burley, S.D., Worden, R.H. (Eds.), *Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient*. Blackwell Publishing Ltd. Reprint Series of the International Association of Sedimentologists, Oxford, 4, 3–44.

Worden, R.H., Morad, S., 2003. Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution. In: Worden, R.H., Morad, S. (Eds.), *Clay Mineral Cements in Sandstones*. Blackwell Publishing Ltd. International Association of Sedimentologists Special Publication, 34, 1–41.

Wright, V.P., Barnett, A.J., 2015. An abiotic model for the development of textures in some South Atlantic Early Cretaceous lacustrine carbonates. In: Grotzinger, J.P., James, N. (Eds.), *Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production*. Geological Society, London, Special Publication, Oxford, 418, 209–219.


Zhang, M., Dai, S., Pan, B., Wang, L., Peng, D., Wang, H., Zhang, X., 2014. The palynoflora of the Lower Cretaceous strata of the Yingen-Ejinaqi Basin in North China and their implications for the evolution of early angiosperms. *Cretac. Res.* 48, 23–38.


Zuffa, G.G. 1985. Optical analysis of arenites: influence of methodology on compositional results. In: Zuffa, G.G. (ed.), Provenance of Arenites. NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, 148, 165–189.

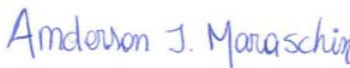
10. ANEXOS

Uma pasta em formato digital contendo:

- a) Planilhas em formato *Excel* exportadas do programa *Petroledge*, contendo os resultados das descrições petrográficas das lâminas sistematicamente quantificadas.
- b) Fotomicrografias em formato JPEG das principais lâminas analisadas.
- c) Resultados obtidos pelas análises de EDS e imagens adquiridas em MEV.
- d) Difractogramas de DRX em formato PDF das frações finas (<20 μm).

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
“EVIDÊNCIAS PETROGRÁFICAS DAS CONDIÇÕES PALEOAMBIENTAIS E PALEOCLIMÁTICAS DE DEPOSIÇÃO DAS FORMAÇÕES CODÓ E ITAPECURU (APTIANO-ALBIANO) DA BACIA DO PARNAÍBA”	
Área de Concentração: Estratigrafia	
Autor: Gustavo Kenji Lacerda Orita	
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros	
Examinadora: Profa. Dra. Cassiana Roberta Lizzoni Michelin	
Data: 02/06/2022	
Conceito: A	
PARECER:	
<p>O discente Gustavo Kenji Lacerda Orita desenvolveu a dissertação intitulada <i>“EVIDÊNCIAS PETROGRÁFICAS DAS CONDIÇÕES PALEOAMBIENTAIS E PALEOCLIMÁTICAS DE DEPOSIÇÃO DAS FORMAÇÕES CODÓ E ITAPECURU (APTIANO-ALBIANO) DA BACIA DO PARNAÍBA”</i> de forma clara e satisfatória. O tema escolhido é relevante e essencial à análise e interpretação de rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba. Com base nos dados obtidos, foi possível estabelecer condições paleoclimáticas e paleoambientais durante a deposição do intervalo. O capítulo introdutório contempla principalmente o estado da arte e metodologia, está sucinto e atende as necessidades de evolução do conhecimento científico sobre o tema.</p> <p>Como produto da dissertação, foi submetido o artigo científico intitulado “Evolution of Aptian-Albian deposits from the Parnaíba Basin, N-NE Brazil, and the early opening of Equatorial Atlantic Ocean - Paleoenvironmental and paleoclimate evidences from petrologic characterization.” O manuscrito está bem estruturado e redigido, apresenta resultados petrográficos robustos, além de interpretações diagenéticas bem fundamentadas. A dissertação apresentada é de excelente qualidade científica, representa um avanço significativo na geologia da área. Por fim, parabênizo o orientando e orientadores pela qualidade do trabalho apresentado.</p>	
	
Assinatura:	Data: 02/06/2022
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
“EVIDÊNCIAS PETROGRÁFICAS DAS CONDIÇÕES PALEOAMBIENTAIS E PALEOCLIMÁTICAS DE DEPOSIÇÃO DAS FORMAÇÕES CODÓ E ITAPECURU (APTIANO-ALBIANO) DA BACIA DO PARNAÍBA”	
Área de Concentração: Estratigrafia	
Autor: Gustavo Kenji Lacerda Orita	
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros	
Examinador: Dr. Garibaldi Armelenti	
Data: 13-06-2022	
Conceito: A	
PARECER:	
<p>A tese de mestrado do aluno Gustavo Kenji Lacerda Orita é bem organizada, objetiva de fácil leitura e compreensão. O texto do estado da arte é bom e bem resumido, talvez até demais principalmente em relação aos diferentes ambientes eodiagenéticos e seus processos. A metodologia empregada esta de acordo com a proposta do trabalho realizado e atinge o objetivo do estudo. O tema estudado é interessante e contribui para a melhor compreensão do paleoambiente -paleoclima vigente no período. A utilização da petrografia neste estudo mostrou se uma ferramenta muito útil para a ser utilizada em trabalhos paleoambientais e paleoclimáticos. O artigo científico esta bem redigido, organizado e ilustrado. As relações dos constituintes primários e diagenéticos esta muito bem descrita. Sugiro apenas uma modificação na fig8 do artigo em relação as escalas das fotomicrografias que não estão padronizadas em tamanho e forma e na figura 7 as fotomicrografias 7b e 7d as escalas são de difícil visualização. As conclusões estão de acordo com os resultados obtidos durante a realização deste estudo. O trabalho contribui de forma significativa com novas informações sobre o paleoclima e o paleoambiente na área evidenciando a existência de intercalações climáticas através de processos e produtos diagenéticos desenvolvidos. Diferente de trabalhos antigos baseados apenas em dados sedimentológicos e paleontológicos.</p> <p>Considero a tese e o artigo um bom trabalho realizado pelo aluno Gustavo Kenji Lacerda Orita, o qual demonstrou ter domínio sobre o assunto estudado. Esta dissertação aqui avaliada cumpre os requisitos necessários para a obtenção do título de mestre.</p> <p>Parabenizo o aluno Orita e seus orientadores pela excelente pesquisa realizada.</p>	
Assinatura: 	Data: 13-6-2022
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese:
detalhadas “EVIDÊNCIAS PETROGRÁFICAS DAS CONDIÇÕES PALEOAMBIENTAIS E PALEOCLIMÁTICAS DE DEPOSIÇÃO DAS FORMAÇÕES CODÓ E ITAPECURU (APTIANO-ALBIANO) DA BACIA DO PARNAÍBA”
Área de Concentração: Estratigrafia
Autor: Gustavo Kenji Lacerda Orita
Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando De Ros
Examinador: Prof. Dr. Anderson José Maraschin
Data: 02/06/2022
Conceito: B
PARECER:
<p>O tema proposto na Dissertação traz uma importante contribuição ao estudo paleoclimático e paleoambiental de bacias intracratônicas durante o Cretáceo inferior, utilizando como exemplo a Bacia do Parnaíba e suas formações Codó e Itapecuru.</p> <p>Ressalto o mérito do estudo em destacar a importante contribuição da petrologia sedimentar na reconstituição de análises de bacias, aliada a estudos sedimentológicos, estratigráficos e paleontológicos, especificamente nas formações-alvo analisadas, cuja aplicação de métodos petrográficos é escassa.</p> <p>As descrições e interpretações diagenéticas estão muito bem detalhadas e interpretadas, de acordo com o objetivo proposto. As figuras são representativas das feições petrográficas e os capítulos da primeira parte da dissertação estão claros e didáticos, assim como o artigo. A boa escrita e com poucos erros de digitação facilita a leitura e deixa claro que o autor domina o conteúdo.</p> <p>Entretanto, há algumas observações e sugestões detalhadas em arquivo anexado, as quais poderão ser apreciadas pelo autor e seu orientador.</p> <p>Finalizo parabenizando ao autor, seus orientadores e ao IG pela excelência no estudo desenvolvido.</p>

Assinatura:
Data: 02/06/2022
Ciente do Orientador:
Ciente do Aluno: