



**Petrografia, Diagênese e Considerações sobre Proveniência da Formação Itapecuru no Norte do Maranhão (Cretáceo Inferior, Bacia do Parnaíba, NE Brasil)**  
Petrography, Diagenesis and Considerations About Provenance of the Itapecuru Formation in Northern Maranhão (Lower Cretaceous, Parnaíba Basin, NE Brazil)

Francisco José Corrêa-Martins<sup>1,2</sup>; Julio Cezar Mendes<sup>3</sup>,  
Luiz Carlos Bertolino<sup>4</sup> & Joalice de Oliveira Mendonça<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia - PPGL, Av. Athos da Silveira Ramos, 274, 21941-916, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Agronomia, Departamento de Geociências, BR-465, Km 7, 23.897-000, Seropédica, RJ, Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco F, Ilha do Fundão Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, 21949-900, Brasil

<sup>4</sup> Centro de Tecnologia Mineral,

Avenida Pedro Calmon, 900, Ilha do Fundão, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, 21941-908, Brasil

<sup>5</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Laboratório de Palinofácies & Fácies Orgânica, Av. Athos da Silveira Ramos, 274, 21941-916, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

E-mails: correa\_martins@ufrj.br; julio@geologia.ufrj.br; lcbertolino@cetem.gov.br; joalice@lfo.geologia.ufrj.br

Recebido em: 04/09/2018 Aprovado em: 20/10/2018

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_514\\_530](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_514_530)

## Resumo

Estudos anteriores apontam que a Formação Itapecuru (Albiano Inferior a Médio) é a unidade litoestratigráfica com maior área aflorante da seção mesozoica da Bacia do Parnaíba, NE do Brasil. Este trabalho apresenta os resultados relativos à sua caracterização petrográfica, a partir de uma ampla coleta de amostras realizada em afloramentos da unidade no norte do Maranhão. A análise revelou que a formação é constituída principalmente por argilitos siltosos e siltitos argilosos. Litotipos psamíticos tais como wackes feldspáticas e arenitos, muito finos a finos, predominantemente quartzosos, subangulosos a subarredondados, ocorrem de maneira subordinada. A sedimentação ocorreu predominantemente por decantação e secundariamente por processos trativos. O exame dos difratogramas de rocha total na fração abaixo de 0,062 mm revelou a presença de quartzo, caulinita, esmectita e illita. Uma característica marcante encontrada é a ocorrência de fitoclastos em todas as seções delgadas. Esta gama de atributos permite afirmar que a Formação Itapecuru é produto do retrabalhamento de unidades litoestratigráficas sotopostas, cujos sedimentos foram reelaborados por um sistema fluvial de baixa energia, com planícies de inundação associadas. A deposição ocorreu sob um clima semi-árido quente com marcada sazonalidade, e com tendência ao aumento da umidade naquela porção setentrional da América do Sul em razão da abertura do Atlântico Equatorial. Do ponto de vista diagenético, o pacote sedimentar não ultrapassou os limites da eodiagênese. Este conjunto de informações permite concluir que pesquisas anteriores, realizadas na parte central e centro-leste da sinéclise, e que caracterizaram as rochas encontradas como essencialmente psamíticas, interpretadas como depositadas em ambiente parálico com influência marinha, e que foram submetidas à mesodiagênese, pertencem à sotoposta Formação Grajaú.

**Palavras-chave:** Formação Itapecuru; Petrografia; Cretáceo do Brasil

## Abstract

The Itapecuru Formation (Lower to Middle Albian) is the largest lithostratigraphic unit outcropping in the Mesozoic section of the Parnaíba Basin, NE Brazil. This work presents detailed petrographic characterization of seventy samples collected in outcrops of the unit in the north of Maranhão state. The study revealed that formation consists mainly of silty argillites and clayey siltstones. Psamitic lithotypes such as feldspathic wackes and sandstones, very thin to thin and predominantly quartzous, subangled to subround, are less frequent. The main sedimentation process was decantation and traction processes are secondary. Diffraction spectrum of the total rock in the fraction below 0.062 mm revealed the presence of quartz, kaolinite, smectite and illite. The occurrence of phytoclasts in all thin sections is an important striking feature. This set of attributes allows us to attest that the Itapecuru Formation is a product of the reworking of underlying lithostratigraphic units, whose sediments were reworked by a low energy river system with associated floodplains. The deposition occurred under a semi-arid, hot climate with marked seasonality, with tendency to increasing humidity in that northern portion of South America due to the opening of the Equatorial Atlantic. With regard to diagenesis, the sedimentary package did not cross the limits of the eodiagenesis. In addition, we conclude that rocks studied previously in the central and east-central part of the basin, essentially psammitic, interpreted as deposited in a marine-influenced paralic environment, which were submitted to mesodiagenesis, attributed to the Itapecuru Formation, are lithotypes of the underlying Grajaú Formation instead.

**Keywords:** Itapecuru Formation; Petrography; Cretaceous of Brazil

## 1 Introdução

A Formação Itapecuru, considerada a maior unidade litoestratigráfica em área aflorante da seção mesozoica da Bacia do Parnaíba (Mesner & Wooldridge, 1962, 1964), ocupa a porção centro-noroeste da bacia, possuindo uma espessura máxima de 724 m, sendo relacionada com a fase rifte do Atlântico Equatorial (Góes & Feijó, 1994, Vaz *et al.*, 2007). O estudo de suas rochas, especialmente em superfície, tem contribuído para um melhor conhecimento de suas fácies sedimentares e conteúdo paleontológico (e.g. Gonçalves & Carvalho, 1996, Pedrão & Corrêa-Martins, 1999, Rossetti *et al.*, 2000, Ferreira *et al.*, 2016).

Contudo, a análise petrográfica da formação recebeu pouca atenção, apesar de sua potencialidade para classificar corretamente as litologias, bem como aferir os processos diagenéticos, entre outros aspectos, contribuindo para a compreensão do preenchimento sedimentar da bacia. Ademais, como lembram Worden *et al.* (2018), a petrografia é parte dos estudos-padrão para a avaliação da qualidade de rochas siliciclásticas como reservatórios.

Assim, esta pesquisa apresenta a caracterização petrográfica da Formação Itapecuru no norte da Bacia do Parnaíba, descrevendo seus aspectos texturais e mineralógicos, avaliando os processos diagenéticos a que foi submetida, além de fazer considerações a respeito de sua proveniência.

## 2 Materiais e Métodos

As amostras da Formação Itapecuru foram coletadas em trabalhos de campo realizados em 2014, 2015 e 2018 durante a estação seca, nos municípios de Rosário, Bacabeira, Santa Rita e Itapecuru-Mirim, principalmente em afloramentos ao longo do rio Itapecuru, no norte do estado do Maranhão (Figuras 1 e 2), onde foram elaborados perfis sedimentológicos, para caracterização das fácies sedimentares, além da coleta de amostras de rochas.

A partir do conjunto coletado, 70 amostras das litologias mais representativas encontradas foram selecionadas para a confecção de igual número de lâminas delgadas, que foram impregnadas com resina

líquida sem corante, em razão do seu grau de litificação. Para sua descrição foi utilizado o microscópio binocular de luz branca transmitida Zeiss Axio Imager A.1, com câmera digital acoplada.

Foram analisados aspectos tais como granulometria, composição mineralógica, seleção, esfericidade, arredondamento, matriz, cimento, contato entre os grãos e porosidade. As determinações relativas à granulometria, feitas com o auxílio de retículo graduado, foram realizadas com base na classificação estabelecida por Udden-Wentworth (Wentworth, 1922).

Para a descrição das rochas areníticas foi empregada a classificação de Gilbert (1982), modificada no tocante à dimensão da matriz, aqui compreendendo as partículas com dimensão inferior a 0,062 mm. E, para as rochas constituídas predominantemente por partículas nas frações silte e argila, foi empregada a classificação de Picard (1971).

Para identificar os minerais existentes na fração fina, foram selecionadas 08 amostras que tivessem ao menos 20% de silte e argila, que foram imersas em água destilada para serem desagregadas, secas e então passadas em peneira de 250 mesh (0,063mm). Na fração oriunda do peneiramento das amostras escolhidas foram realizadas análises por difração de raios-X (DRX), pelo método do pó, executadas em equipamento Bruker-AXS D8 Advance Eco, radiação Cu K $\alpha$  (40 kV/25 mA), com passo de 0,01° 2 $\theta$ , tempo de contagem de 92 segundos por passo com detector linear sensível à posição do tipo *silicon drift* de última geração (com discriminação de energia) LynxEye XE, coletados de 5 a 105° 2 $\theta$ , pertencente ao Setor de Caracterização Tecnológica (SCT), do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). A interpretação qualitativa de espectro foi efetuada por comparação com padrões contidos no banco de dados relacional PDF 4+ (ICDD, 2014) em software Bruker Diffrac.EVA.

Das amostras acima selecionadas, em 06 foram também realizadas determinações do carbono orgânico total (COT), enxofre (S) e resíduo insolúvel (RI). Essas análises, que seguiram as normas de referência da American Society for Testing and Materials (ASTM), foram realizadas no aparelho SC 144 da LECO,

pertencente ao Laboratório de Palinofácies & Fácies Orgânica (LAFO), do Departamento de Geologia, Instituto de Geociências (IGEO), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

### 3 Contexto Geológico

#### 3.1 A Bacia do Parnaíba

A Bacia do Parnaíba, que já foi chamada de Bacia do Maranhão, é uma bacia intracratônica (Allen & Armitage, 2012), com formato irregular e cerca de 600.000 km<sup>2</sup> de área (Campbell *et al.*, 1949, Mesner & Wooldridge, 1962, 1964), preenchida por rochas sedimentares e magmáticas, tendo uma espessura máxima estimada em 3.500 m (Vaz *et al.*, 2007). A sinéclise ocupa principalmente os estados do Maranhão (MA) e Piauí (PI), atingindo também pequenas porções do Ceará (CE), Bahia (BA), Tocantins (TO) e Pará (PA). Os limites da bacia são: ao norte, o Alto Ferrer-Urbano Santos (AFUS); ao leste, a Província Borborema; ao sul, o Alto de São Francisco (ASF); ao oeste, a Província Tocantins; e a noroeste, o Alto de Tocantins ou Capim (ATC) (Figura 1). Trabalhos recentes feitos com base em dados sísmicos (Daly *et al.* 2014) apontam que o embasamento é compartimentado, tendo o Cráton Amazônico e a Província Tocantins no lado ocidental, o Bloco Parnaíba na área centro-ocidental, como sugerido por Brito Neves *et al.* (1984), e a Província Borborema ao leste. Por outro lado, as análises gravimétricas e magnéticas realizadas por Castro *et al.* (2014) sugerem que o embasamento da bacia propriamente dito possui um maior grau de complexidade.

Os lineamentos Marajó-Parnaíba (LMP) e Picos-Santa Inês (LPSI) e a Zona de Falha Transbrasiliana (ZFT) (Figura 1), controlaram os eixos deposicionais da bacia (Fortes 1978, Vaz *et al.* 2007). Segundo Loczy (1968), as falhas que ocorrem na bacia têm predominantemente direções ENE e NNW, correspondendo a um sistema de fraturas de direções similares, sendo observadas estruturas de hortes e grábens com 120 a 200 m de rejeito.

As rochas essencialmente siliciclásticas que preencheram a Bacia do Parnaíba podem ser divididas em ciclos ou supersequências (Góes & Feijó, 1994, Vaz *et al.*, 2007, Linol *et al.*, 2016), resultantes tanto das flutuações do nível do mar como da tectônica, no

contexto da formação dos supercontinentes Gondwana e Pangea, e sua posterior fragmentação. A primeira supersequência é a Siluriana, representada pelo Grupo Serra Grande, que inclui as formações Ipu, Tianguá e Jaicós. Seguem-se, então a Mesodevoniana-Eocarbonífera, constituída pelo Grupo Canindé, composto pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti; a Neocarbonífera-Eotriássica, representada pelo Grupo Balsas, composta pelas formações Piauí, Pedra de Fogo, Motuca e Sambaíba, a Jurássica, que corresponde à Formação Pastos Bons; encerrando com a Cretácea, definida pelas formações Corda, Grajaú, Codó e Itapecuru (Figura 1).

As rochas ígneas básicas ocorrem na bacia principalmente como intrusões, sendo que os derrames têm ocorrência mais restrita. A datação radiométrica revelou idades entre 215 e 87 Ma, o que levou à separação dessas rochas em duas formações: a Formação Mosquito, do Eojurássico, no centro-oeste; e a Formação Sardinha, do Eocretáceo, no centro-leste e nordeste (Góes & Feijó, 1994, Vaz *et al.*, 2007, Linol *et al.*, 2016).

Em relação à seção cretácea, Góes & Coimbra (1996) e Góes & Rossetti (2001) propuseram separar algumas formações da sinéclise do Parnaíba, constituindo uma bacia à parte. Contudo, essas propostas tiveram pouca aceitação (Klein & Sousa, 2012). Este trabalho considera a Formação Itapecuru como pertencente à seção cretácea da Bacia do Parnaíba.

É oportuno registrar que o mapeamento geológico atualmente disponível da Bacia do Parnaíba foi realizado por equipes da CPRM, sendo de 1:500.000 para toda a sinéclise (Lima & Leite, 1978) e de 1:250.000, dentro do Programa Grande Carajás (PGC), tendo como limites os paralelos 0°00'S e 08°00'S e os meridianos 42°00'W e 52°30'WGr (Lovato *et al.*, 1995).

#### 3.2 A Formação Itapecuru

A Formação Itapecuru foi proposta por Campbell (1949, 1950), dividida em três membros (Serra Negra, Indiferenciado e Boa Vista), tendo como localidade-tipo os afloramentos existentes nas margens do rio Itapecuru, junto à cidade de Itapecuru-Mirim, MA (Figura 2).

Petrografia, Diagênese e Considerações sobre Proveniência da Formação Itapecuru no Norte do Maranhão (Cretáceo Inferior, Bacia do Parnaíba, NE Brasil)  
Francisco José Corrêa-Martins; Julio Cezar Mendes, Luiz Carlos Bertolino & Joalce de Oliveira Mendonça

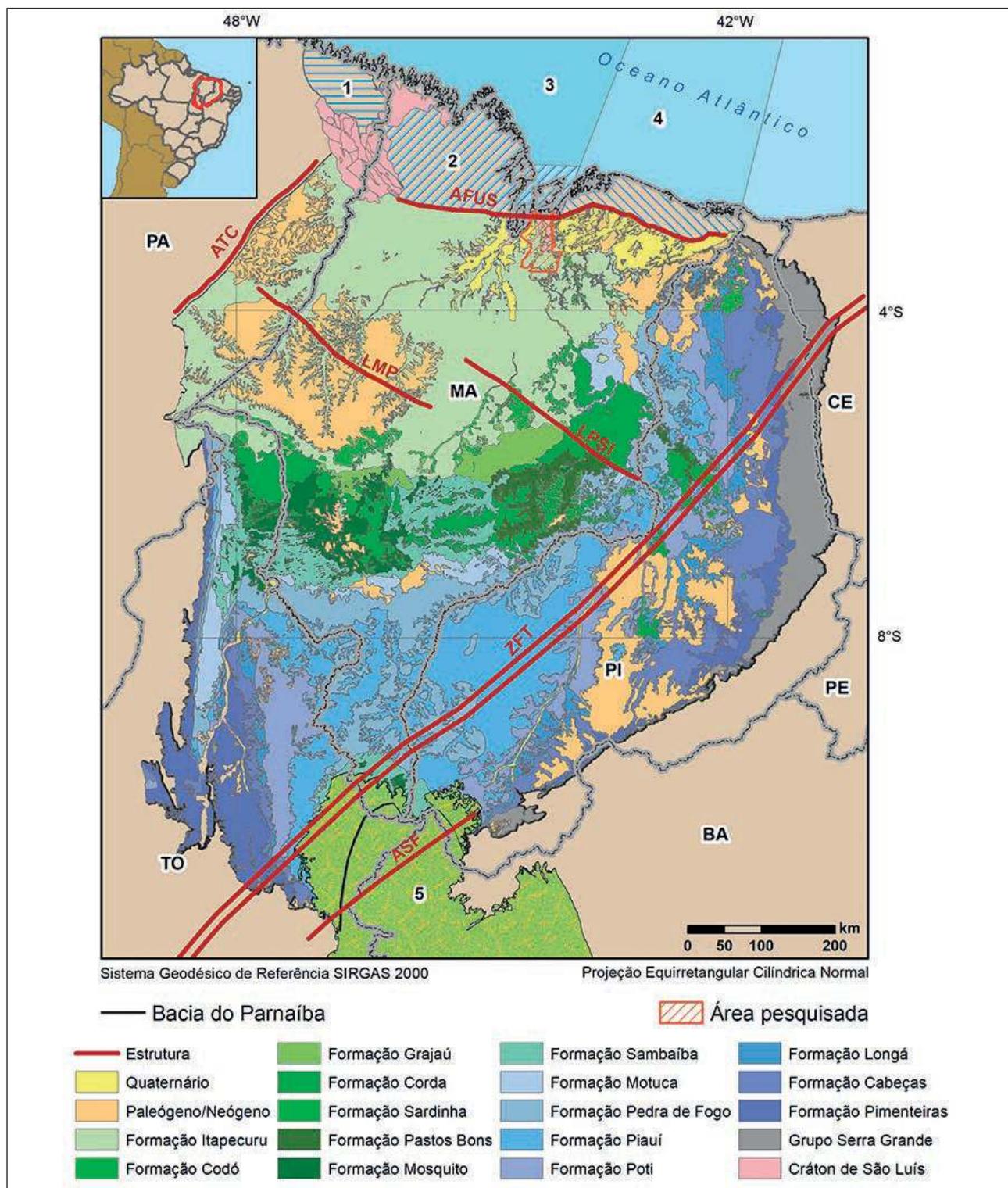


Figura 1 Mapa geológico simplificado da Bacia do Parnaíba, com a localização da área pesquisada, mostrando os limites com o embasamento e outras bacias (1) Bragança-Viséu, (2) São Luís, (3) Pará-Maranhão, (4) Barreirinhas e (5) Sanfranciscana. Estruturas: Zona de Falha Transbrasiliana (ZFT), altos do Tocantins (ATC), Ferrer-Urbano Santos (AFUS), São Francisco (ASF) e os lineamentos Marajó-Parnaíba (LMP) e Picos-Santa Inês (LPSI). Estados que abrange: Pará (PA), Maranhão (MA), Ceará (CE), Piauí (PI), Bahia (BA) e Tocantins (TO). Fonte: Modificado da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas, Programa Geologia do Brasil, Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), 2004.

Posteriormente Mesner & Wooldridge (1962, 1964) revisaram a unidade, considerando-a indivisa, e a caracterizaram como essencialmente siliciclástica, constituída por psamitos e lutitos, depositados em ambientes interpretados como planícies aluvial e fluvial, estuarino e deltaico. A maioria dos pesquisadores, como Aguiar (1969, 1971), Santos & Mamede (1990), Góes & Feijó (1994) e Gonçalves & Carvalho (1996), entre outros, acompanhou a caracterização litológica proposta, entendendo que a sedimentação da unidade ocorreu em ambiente continental. Lima & Leite (1978) tiveram o mesmo entendimento sobre as rochas, e consideraram que a Formação Itapecuru resultou de sedimentação em ambiente fluvial, com lagos e planícies de inundação associados, em clima semi-árido devido ao caráter marcadamente oxidante das rochas. Lima & Leite (1978) afirmaram que falhas atectônicas de pequenos rejeitos, causadas provavelmente por acomodação de camadas plásticas, ocorrem em praticamente toda a Formação Itapecuru.

Contudo, alguns pesquisadores, dentro da concepção da Bacia do Grajaú (Góes & Coimbra, 1996) ou Bacia de São Luís-Grajaú (Góes & Rossetti, 2001), sugeriram uma interpretação distinta. Autores como Anaisse *et al.* (2001), Rossetti *et al.* (2000), Rossetti *et al.* (2001), Rossetti & Góes (2003), Miranda & Rossetti (2006), Nascimento & Góes (2007) e Mendes & Truckenbrodt (2009) consideraram que as rochas que estão sobrepostas às formações Grajaú e Codó na Bacia do Parnaíba, são a Unidade Indiferenciada do Grupo Itapecuru (*sensu* Rossetti & Truckenbrodt, 1997) ou as sequências deposicionais S2 e parte da S3 do mesmo grupo, na concepção de Rossetti (2001a), descritas como psamitos finos a grossos, eventualmente ruditos, frequentemente carbonáticos, por vezes intercalados com calcários, além de lamitos. Essas rochas foram interpretadas como depositadas em ambiente flúvio-deltaico que desaguava em uma baía protegida ou golfo, sujeito a tempestades. E, no que tange à análise de sua petrografia, localizamos dois estudos.

Nascimento & Góes (2007) realizaram estudos petrográficos em amostras coletadas em afloramentos na rodovia MA-006, situada ao norte da cidade de Grajaú, no centro do Maranhão, distante cerca de 300 km ao sudoeste da área

de trabalho (Figura 2), classificando-as como quartzo-arenito fino a médio, por vezes grosso, com seleção boa a moderada. Afirmaram que a maioria dos grãos de quartzo são monocristalinos com extinção “oscilatória”, enquanto aqueles com extinção simultânea são minoritários, exibindo formas angulosas, subarredondadas a arredondadas, ocorrendo também chert. Segundo Nascimento & Góes (2007), os contatos são principalmente pontuais e raramente suturados, sugerindo pouca compactação química, registrando ainda a ocorrência de grãos de quartzo com evidências de deformação, e que sobrecrecimentos foram observados, embora com pequena frequência. Cabe registrar que Rossetti & Góes (2003) descreveram as rochas encontradas na mesma rodovia como siliciclásticas quartzosas, aonde os feldspatos não chegariam a 15%.

Posteriormente, em outra pesquisa realizada com amostras coletadas em pontos ao longo do rio Itapecuru, nas proximidades de Timbiras e Coroatá, cerca de 50 km ao sul de Itapecuru-Mirim (Figura 2), Mendes & Truckenbrodt (2009) caracterizaram as rochas ali encontradas também como quartzo-arenito, finos a médios, bem selecionados. Afirmaram que, do ponto de vista mineralógico, são constituídas principalmente por quartzo monocristalino e, subordinadamente, por plagioclásio e microclina, exibindo formas subarredondadas. Os grãos apresentam contatos pontuais, raramente “retilíneos”, exibindo frequentemente sobrecrecimento sintaxial, além de cimentação dolomítica espática, que preencheu espaços intersticiais, e substituiu, parcialmente, grãos do arcabouço.

Saliente-se que Rossetti & Góes (2003) afirmaram existir “grande similaridade faciológica” entre essas rochas, encontradas em afloramentos “datados do Eo?mesoalbianos” (Rossetti *et al.*, 2001), com aquelas descritas ao norte de Grajaú, sendo ambas inseridas na Sequência Depositional S2 acima mencionada (Rossetti 2001a).

## 4 Resultados

### 4.1 Aspectos Texturais e Mineralógicos

A análise das lâminas petrográficas revelou a existência de quatro litotipos: argilito siltoso; silito argiloso; wacke (Williams *et al.*, 1970) feldspática muito fina; e quartzo-arenito fino a muito fino.

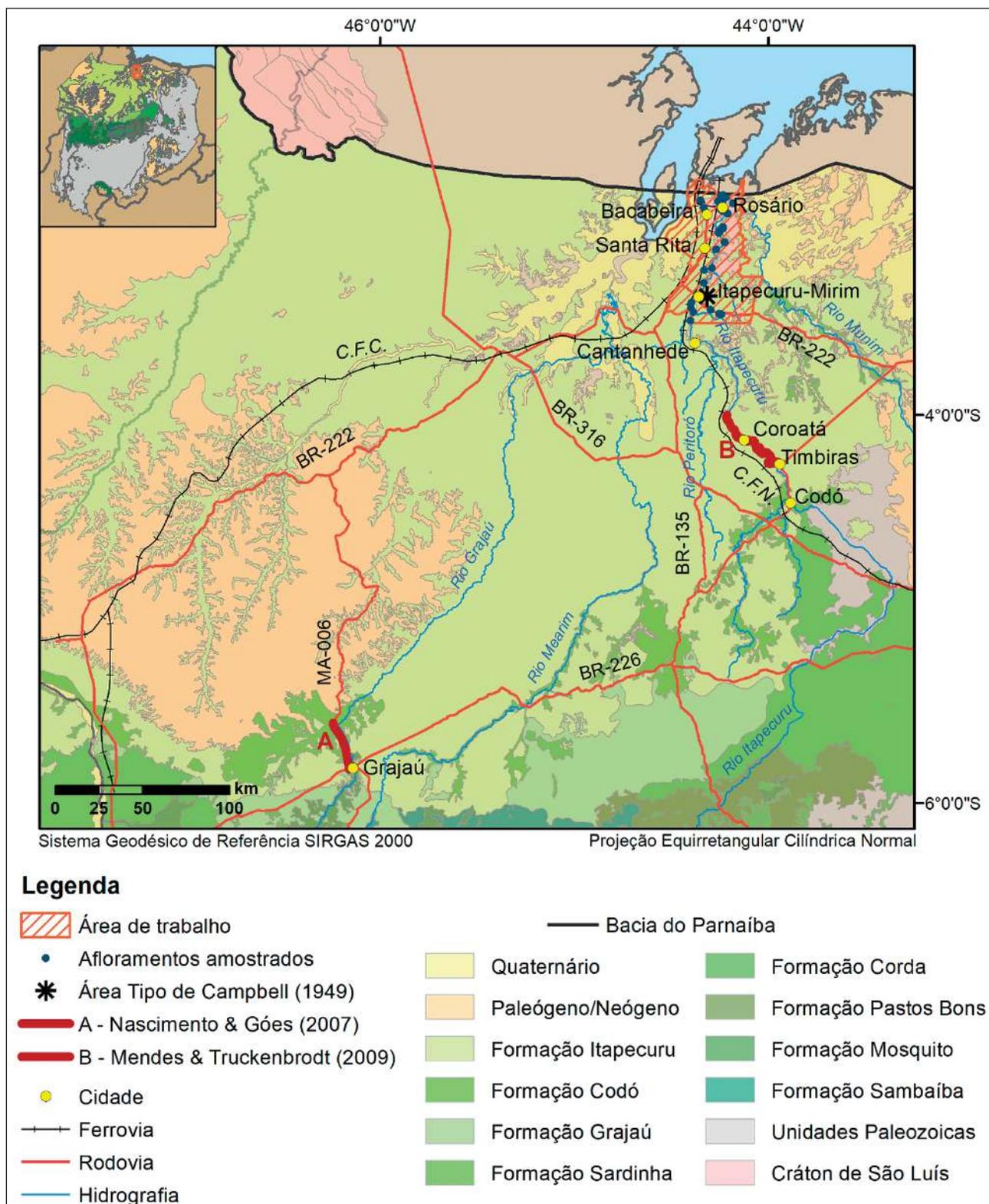


Figura 2 Mapa geológico simplificado de parte de Formação Itapecuru na Bacia do Parnaíba, com a localização da área de trabalho, dos pontos de coleta, e de outros locais citados neste trabalho. Fonte: Modificado da Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo, Sistema de Informações Geográficas, Programa Geologia do Brasil, Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), 2004.

Os argilitos siltosos (AS) são constituídos essencialmente por argila (55 – 85%, média 73%) e silte (15-30%, média 26%) e ocasionalmente areia muito fina (1-30%, média 2%). Neles o silte grosso a muito grosso e os grãos de areia muito fina são subangulosos a subarredondados, existindo tanto equidimensionais como alongados, e normalmente aparecem flutuando em meio à argila. Os grãos são de quartzo monocristalino com extinção reta, ocasionalmente ocorrendo também muscovita. Os minerais opacos são raros. Sua porosidade é estimada em 22% em média. Em alguns exemplares (Figuras 3A e 3B), a laminação plano-paralela é bastante evidente, em outras é conspícua. É resultado da decantação de finos dentro de um corpo subaquoso em baixa energia, raso, sobre uma superfície plana ou com muita pouca inclinação.

Os siltitos argilosos (SA) são constituídos essencialmente por silte (50 – 88%, média 71%) e argila (10-35%, média 21%) e por vezes areia muito fina (2-20%, média 8%). As partículas de silte grosso a muito grosso e os grãos de areia são angulosos a subarredondados, equidimensionais e alongados, e os contatos, quando ocorrem, são pontuais. O silte e a areia são principalmente de quartzo monocristalino, com algum plagioclásio (<2%) e muscovita (1%). Ocorrem poucos minerais opacos e sua porosidade média é estimada em 24%. Alguns exemplares apresentam laminação plano-paralela incipiente (Figuras 3C e 3D). Resulta de processos de tração e decantação dentro de um corpo subaquoso em baixa energia, raso, sobre uma superfície muito pouco inclinada.

As wackes feldspáticas (WF) tem seu arcabouço constituído essencialmente por areia muito fina (65 – 80%, média 72%) e a matriz é composta por silte (5-32%, média 21%) e muitas vezes argila (2-15%, média 7%). São moderadamente a bem selecionados, sendo que os grãos são angulosos a subarredondados, alongados e equidimensionais, ocorrendo por vezes o predomínio de uma forma sobre a outra. Os grãos são principalmente de quartzo monocristalino (70-80%), plagioclásio (a maioria albita, 20-28%), com rara presença de feldspatos alcalinos e muscovita, ocorrendo também zircão com hábito prismático, com arredondamento nas extremidades. A presença de minerais opacos é diminuta. Portanto, são

mineralogicamente maduros e texturalmente imaturos. Os grãos têm contatos pontuais e longos com a mesma frequência, e por vezes estão flutuando na matriz. Por suas características, a matriz é classificada como primária, ou protomatriz, no conceito de Dickinson (1970). Apresenta uma porosidade média estimada de 40%. Praticamente todos os exemplares permitem a observação de estruturas sedimentares, em alguns casos mais evidentes do que em outros, resultantes de processos predominantemente trativos (Figuras 3E e 3F).

Os quartzo-arenitos (QA) têm seu arcabouço constituído por areia fina (20-70%, média 35%), areia muito fina (25-70%, média 62%) e, quando ocorre matriz, ela é constituída de silte (1-3%, média 2%) e argila (0-2%, média 1%), sendo esse material intersticial de origem primária. Esse litotipo é muito bem selecionado, e os grãos de areia e silte são angulosos a subarredondados, alongados e equidimensionais. Poucos minerais opacos estão presentes (<1%). Os grãos são predominantemente de quartzo monocristalino (~95%), plagioclásio (anortita ~4%), microclina (~1%), zircão (~1%) e muscovita (~1%). Os contatos entre os grãos são pontuais a longos. A porosidade média é estimada em 43%. São supermaturos do ponto de vista mineralógico, e maduros do ponto de vista textural. Os exemplares permitem visualizar estruturas sedimentares, resultantes de processos trativos (Figuras 3G e 3H).

Em algumas das seções delgadas se verificou ainda a ocorrência de intercalações dos litotipos acima descritos. Algumas são compostas por lâminas ou lentes de silito médio a grosso intercaladas com argilito siltoso (Figura 4A), e outras são constituídas por lâminas de wacke muito fina que se justapõem ao argilito siltoso (Figura 4B). As espessuras variam entre 0,1 e 1,0 mm.

Os resultados da análise por difração de raios X (DRX) estão expostos na Tabela 1, e serão analisados mais adiante.

Um aspecto marcante em todas as lâminas de todos litotipos acima caracterizados da Formação Itapecuru foi a constatação da presença de fitoclastos, com variação dimensional, cromática, morfológica, e com frequência variada. Para fins de descrição, optou-

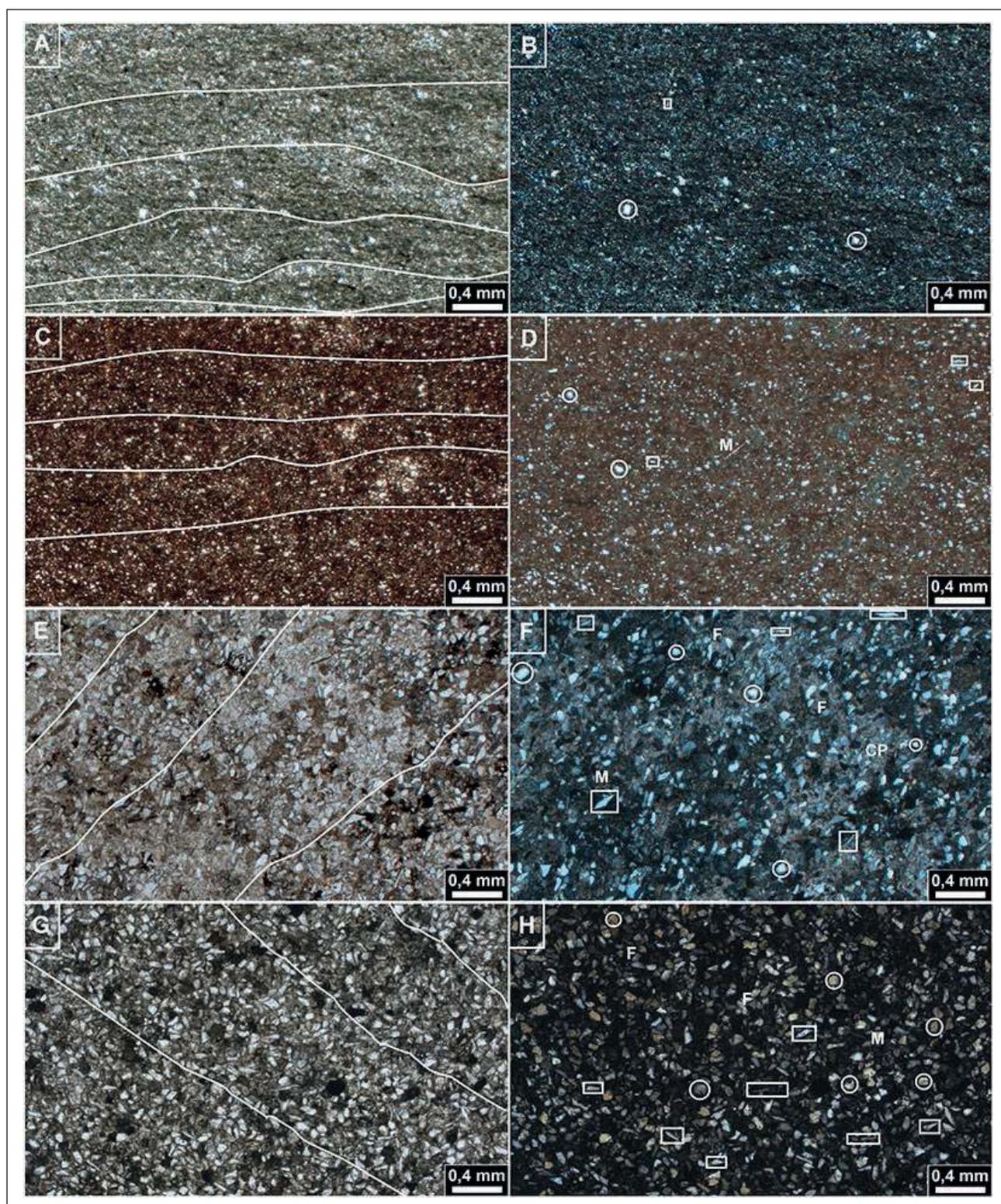


Figura 3 Fotomicrografias dos litotipos identificados. A e B, argilito siltoso (AS), C e D, siltito argiloso (SA), E e F, wacke feldspática (WF), G e H, quartzo-arenito (QA). Grãos de quartzo com duas formas destacadas, equidimensionais (círculos) e longos (retângulos), feldspato (F), muscovita (M), cimentação poiquilótópica (CP). As linhas indicam as estruturas sedimentares observadas. Imagens A, C, E e G com polarizadores paralelos, B, D, F e H, com polarizadores cruzados.

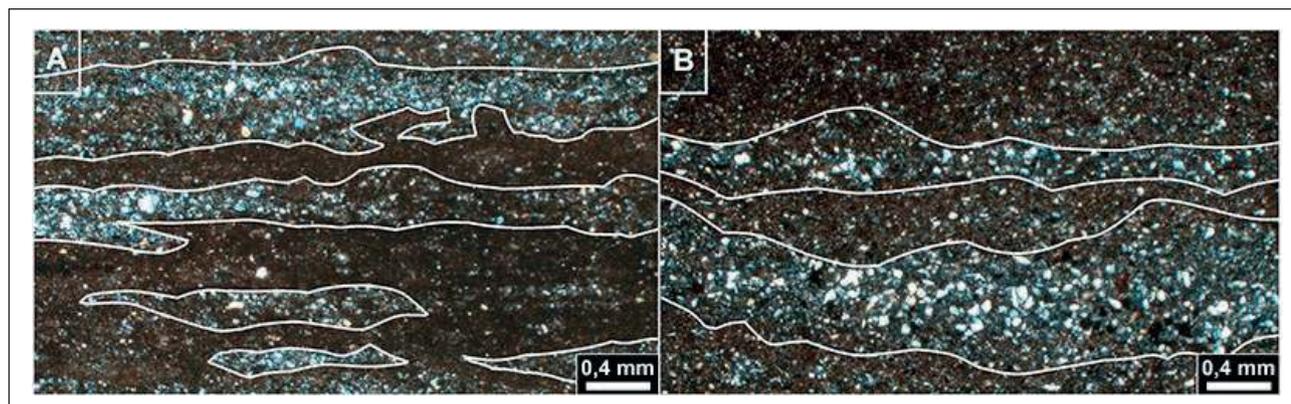


Figura 4 Fotomicrografias com as intercalações de litotipos destacadas. (A) Lâminas de argilito e de siltito médio a grosso. (B) Lâminas de argilito siltoso e wacke muito fina. Polarizadores cruzados.

Amostras	R2	R6	R11	R46	R47	C1	R49	R52
Litotipo	AS	AS	AS	WF	SA	SA	SA	AS
Mineral								
Caulinita	X	X	X	X	X	X	X	X
Montemorillonita (esmectita)	X	X		X	X	X	X	
Illita/Illita	X	X			X		X	X
Quartzo	X	X	X	X	X	X	X	X
Albita	X	X	X	X	X		X	
Microclina						X		
Microclina intermediária (?)	X	X	X	X	X		X	X
Muscovita			X			X		
Calcita Mg				X				

Tabela 1  
Minerais encontrados nas amostras selecionadas  
Litotipos:  
AS – Argilito siltoso,  
SA – Siltito argiloso,  
WF – Wacke feldspática.

se por separá-los pela forma de ocorrência, resultando em três agrupamentos.

O de fitoclastos dispersos é relativo às partículas oxidadas de tecido vegetal dispersas nas lâminas (Figuras 5A e 5B). De coloração preta e acastanhada, o tamanho e a forma destas partículas variam entre os tipos delgados tabulares (0,005-0,05 X 0,003-0,6 mm) e equidimensionais (0,003 X 0,003 – 0,12 X 0,15 mm).

Outro grupo é constituído pela ocorrência do material vegetal concentrado em níveis dentro das lâminas, tanto de maneira amorfa, degradada, de cor acastanhada (0,03 X 0,25 mm), como delgada tabular (0,005-0,05 X 0,03-0,2 mm), de cor preta (Figuras 5C e 5D). Aqui, a quantidade de material vegetal é maior do que na categoria anterior.

O terceiro grupo tipifica a ocorrência dos dois grupos anteriores em uma mesma lâmina petrográfica.

Ou seja, estão presentes tanto as faixas ou bandas de fitoclastos concentrados em níveis como aqueles dispersos na rocha (Figuras 5E e 5F).

Tendo em vista a grande ocorrência de fitoclastos, foram realizadas análises de COT, enxofre e RI, e cujos resultados, expostos na Tabela 2, mostram um percentual elevado de resíduo insolúvel (acima de 90%) para todas as amostras.

#### 4.2 Aspectos Diagenéticos

As lâminas de wacke feldspática e quartzarenito mostram que os grãos de silte grosso a muito grosso e de areia muito fina a fina estão envolvidos por uma fina cutícula de hematita, o que também foi detectado nas mesmas granulometrias em alguns argilitos siltosos e siltitos argilosos. Somente em poucas amostras de wacke feldspática foi observada

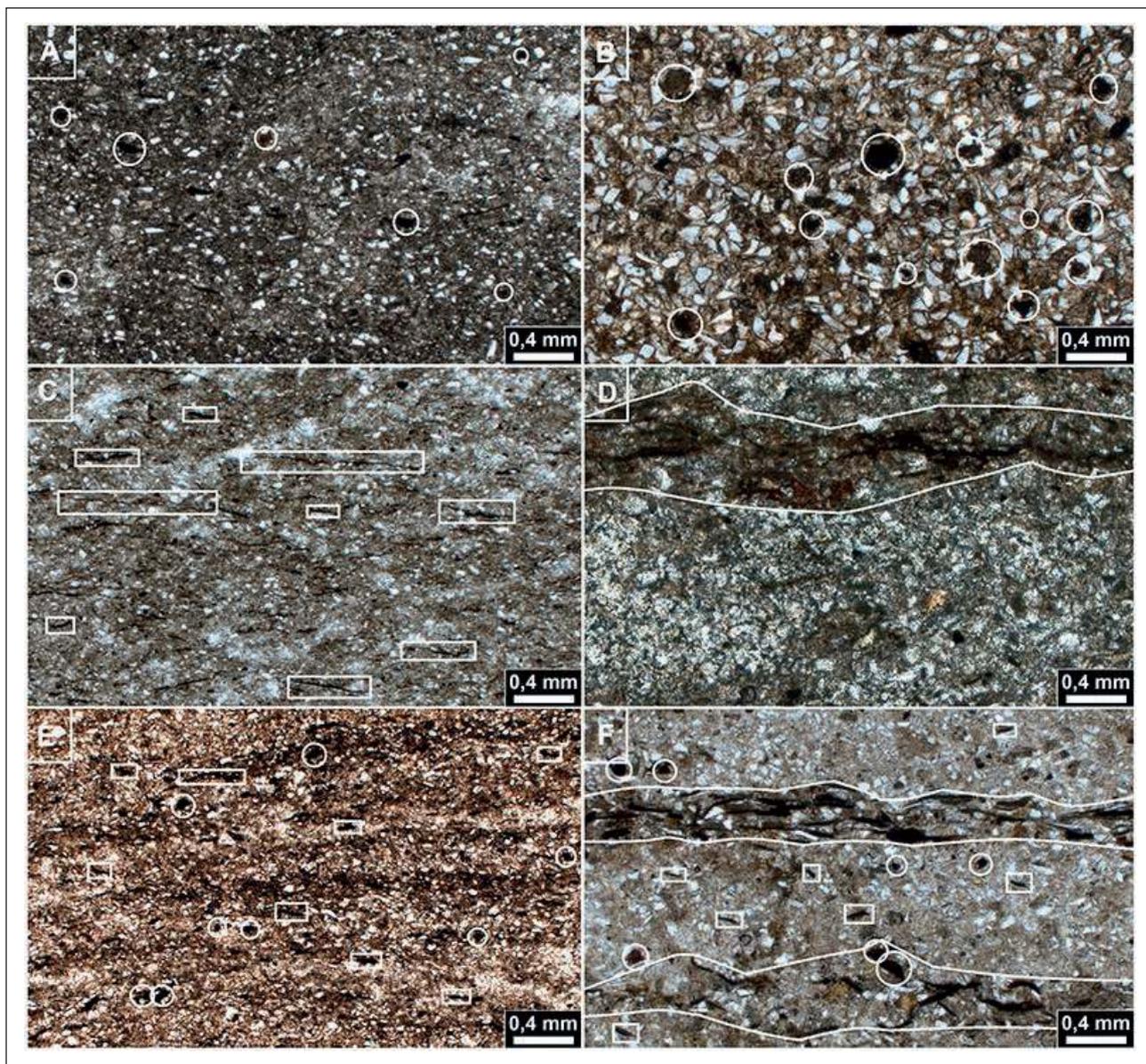


Figura 5 Formas de ocorrência dos fitoclastos nos litotipos da Formação Itapecuru, Bacia do Parnaíba. A e B, dispersos na seção delgada, C e D, concentrados em lâminas/bandas, E e F, dispersos e em bandas. As fotomicrografias 5A, 5C e 5E mostram as frequências comuns, enquanto 5B, 5D e 5F mostram as maiores frequências de fitoclastos. Observar que os fitoclastos não estão dobrados e que apenas alguns foram destacados. Fotomicrografias com polarizadores paralelos.

Amostras	COT (%)	S (%)	RI (%)
R2	0,11	<0,01	92
R6	0,16	0,02	93
R11	0,27	<0,01	94
R46	0,09	<0,01	97
R47	0,10	<0,01	96
R52	0,14	<0,01	96

Tabela 2 Teores de COT, S e RI nas amostras selecionadas.

a ocorrência de calcita poiquilótópica em algumas partes das lâminas petrográficas (Figuras 3E e 3F).

Foi possível observar em algumas seções delgadas ocorrências de microfalha (Figura 6), que podem estar relacionadas à acomodação de camadas, como interpretado por Lima & Leite (1978), como podem também indicar movimentos distensionais, sugerindo a instabilidade tectônica da Bacia do

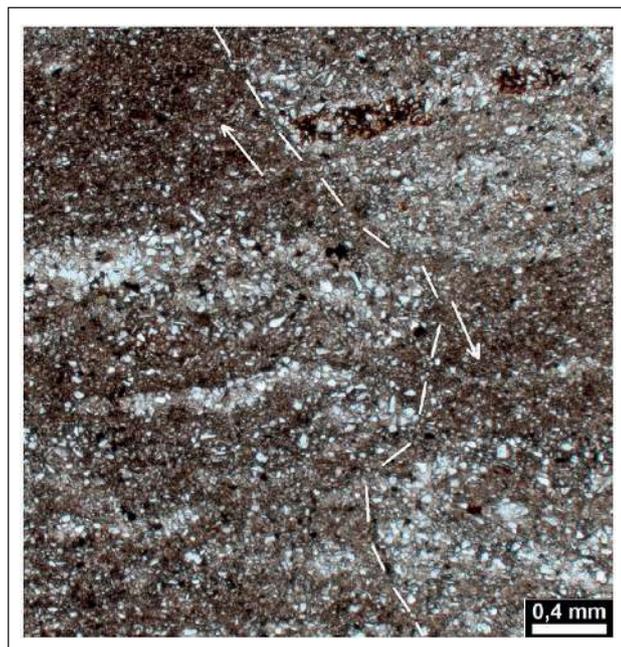


Figura 6 Microfalha (ressaltada) afetando lâminas intercaladas de siltito argiloso e argilito siltoso, com indicação do movimento relativo. Fotomicrografia com polarizadores paralelos.

Parnaíba no tempo da deposição dos sedimentos, como apontado por Rossetti (2001b).

Em uma amostra de siltito argiloso, com grãos de areia muito fina, foi verificada a presença de uma estrutura com círculos aproximadamente concêntricos, com cerca de 5,0 mm de diâmetro, interpretada como um icnito, já que não exhibe deformação (Figura 7).

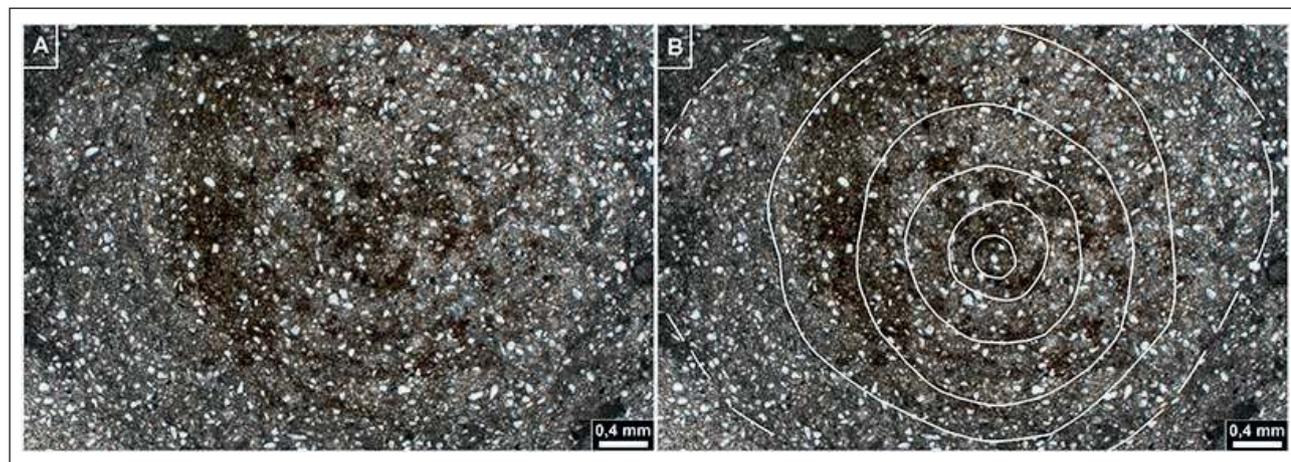


Figura 7 Tubo de escavação de invertebrado preenchido, encontrado em siltito argiloso, cuja estrutura não está deformada. Fotomicrografias com polarizadores paralelos, sendo que em (B) o icnito foi ressaltado.

## 5 Discussão

Apesar da extensão areal da Formação Itapecuru, os poucos estudos realizados a respeito de sua petrografia ocuparam-se, sobretudo, com a proveniência de suas rochas (Nascimento & Góes, 2007, Mendes & Truckenbrodt, 2009), não obstante a recomendação da avaliação petrográfica para rochas areníticas e silticas como uma das técnicas recomendadas para uma correta caracterização granulométrica (e.g. Pettijohn *et al.*, 1972, Boggs, 1995, 2009, Miall, 2016).

### 5.1 Petrografia nas Áreas dos Municípios de Itapecuru-Mirim, Santa Rita, Bacabeira e Rosário

A análise petrográfica realizada, a partir de amostras coletadas em afloramentos nas áreas de quatro municípios no norte do Maranhão, permitiu constatar a presença de quatro litotipos. Em termos totais, o argilito siltoso representa 35%, o siltito argiloso 33%, wacke feldspática muito fina 30% e quartzo-arenito fino a muito fino 2%. Estes resultados são análogos aos apresentados por Gonçalves & Carvalho (1996) que, em perfis sedimentológicos realizados em afloramentos ao longo do rio Itapecuru, entre Cantanhede e Itapecuru-Mirim (Figura 2), verificaram que os lamitos são preponderantes, variando entre 70 a 95%, enquanto as frações psamíticas variam entre 5 e 30%.

Do ponto de vista mineralógico, na fração areia o predomínio é do quartzo monocristalino (70-95%), seguindo-se plagioclásio (3-28%), feldspato alcalino (0-1%) e muscovita (0-1%). Na fração abaixo de 0,062 mm, ao quartzo segue-se a caulinita, ocorrendo ainda albita, microclina, montemorillonita (esmetita) e illita. Estes resultados são bastante semelhantes aos reportados por Menezes & Carvalho (1996) na região de Itapecuru-Mirim, e por Sachs *et al.* (2017) para as jazidas explotadas para produção de cerâmica vermelha existentes na área pesquisada.

Nos litotipos examinados, os grãos de quartzo têm pelo menos duas formas de maior frequência, e que ficam mais evidentes nas wackes feldspáticas (Figura 3E e, 3F) e nos quartzo-arenitos (Figura 3G e 3H). Uma delas é alongada e angulosa, enquanto a outra é equidimensional e subarredondada. Os feldspatos exibem formas geralmente equidimensionais, angulosas a subangulosas, indicando condições de intemperismo predominantemente físico, com pH alcalino (Tucker, 2001, Worden & Burley, 2003).

A caulinita, segundo Chamley (1989) está normalmente associada a um intemperismo químico forte de aluminossilicatos, com pH ácido, indicando climas subtropicais a tropicais úmidos, enquanto outros argilominerais, como as esmetitas e illitas, estão em posição oposta, com pH alcalino e condições de umidade mais restritas, como em regiões semi-áridas do Brasil hoje (Corrêa *et al.*, 2003). Por outro lado, Chamley (1989) lembrou que, no Cretáceo, a presença de caulinita e esmetita juntas pode ser relacionada com uma sazonalidade em relação à umidade, o que explicaria os resultados apresentados na Tabela 1.

As formas e minerais encontrados nos litotipos descritos na Formação Itapecuru sugerem, em princípio, que provavelmente o quartzo de formato alongado e anguloso, juntamente com o plagioclásio, o feldspato alcalino e parte da esmetita e illita são provenientes de rochas crustais, como granitos e gnaisses, que sofreram intemperismo em condições semiáridas quentes. Os grãos de quartzo equidimensionais subarredondados indicam que são provavelmente fruto de reciclagem (Tj. H. van Andel 1958 *apud* Pettijohn *et al.*, 1972), interpretação essa reforçada pela ausência de quartzo policristalino.

Assim, esse conjunto de dados evidencia que os sedimentos que constituem a Formação Itapecuru tiveram pelo menos duas origens distintas. E, com base na granulometria predominante no conjunto de amostras examinadas, pode-se afirmar que as áreas-fonte foram as unidades litoestratigráficas sotopostas.

A ocorrência de retrabalhamento foi comprovada pela presença de palinomorfos paleozoicos encontrados em amostras coletadas e analisadas por Ferreira *et al.* (2016), cerca de 15 km ao norte de Itapecuru-Mirim. E explicaria a calcita magnésiana encontrada na amostra R46, de wacke feldspática, coletada em Itapecuru-Mirim, que está possivelmente relacionada aos grãos de carbonato, provavelmente resultantes de processos de intemperismo, erosão e transporte de unidades preexistentes (Pettijohn *et al.*, 1972), como a subjacente Formação Codó.

Deve-se salientar que Carneiro (1974) já considerara que as rochas da Formação Itapecuru são provenientes do retrabalhamento de unidades litoestratigráficas mais antigas, como as formações Sambaíba e Corda.

A ocorrência de fitoclastos em todas as lâminas de todos os litotipos aqui descritos, fato não registrado anteriormente, comprova a existência de vegetação durante um período significativo da sedimentação da Formação Itapecuru. Este fato corrobora estudos palinológicos anteriores (e.g. Pedrão & Corrêa-Martins, 1999, Ferreira *et al.*, 2016), que apontaram a existência de um clima semi-árido quente no Aptiano Superior-Albiano Inferior, e que vai se tornando mais úmido durante o Albiano Inferior a Médio. E o clima, como afirmou Tyson (1987, 1995), controla as variações de COT em ambientes oxidantes, sendo que o teor encontrado nas amostras examinadas nesta pesquisa, apresentados na Tabela 2, varia de 0,09 a 0,27%, um valor baixo de COT, que corresponde justamente aos fitoclastos, os quais respondem pela abundância absoluta do conteúdo de carbono.

Com base nos trabalhos de Chumakov *et al.* (1995), Spicer & Skelton (2003) e Price (2009), pode-se afirmar que a alteração climática observada foi resultado da abertura do Atlântico Equatorial, fruto da fragmentação da Pangea, com a consequente entrada de correntes aéreas carregando umidade

continente adentro. E o esforço relativo à dispersão continental provavelmente teve reflexos no interior da bacia e pode ter contribuído para a ocorrência de microfalhas sindeposicionais, como aquela mostrada na Figura 6, o que está de acordo com as observações de Rossetti (2001b), embora não deva ser descartada a possibilidade da ocorrência de falhas atectônicas, como assinalado por Lima & Leite (1978).

O aumento de umidade pela presença de uma Zona Equatorial Úmida (Chumakov *et al.*, 1995) provavelmente é representado pelos fitoclastos de cor acastanhada, interpretados como matéria vegetal degradada em corpos aquosos. Já os fitoclastos de cor preta, muitas vezes de formato tabular longo, podem estar relacionados aos paleoincêndios que aconteciam durante a estação seca, de forma muito similar ao que ocorre hoje em regiões semi-áridas, como no Brasil (Santana *et al.*, 2011) e na Austrália (Turner *et al.*, 2011), em que a estiagem provoca incêndios naturais e o material particulado é disperso pelo vento, sendo depositado e recoberto posteriormente por sedimentos.

Como visto, a granulometria presente nos litotipos é essencialmente fina, e há o domínio da sedimentação por decantação sobre os processos por tração, aspectos que apontam para um sistema deposicional de baixa energia com uma paleotopografia com pouca declividade. A presença de intercalações de lâminas dos litotipos corresponde, em escala maior, à ocorrência de fácies heterolíticas verificada em vários afloramentos, e que são interpretadas como partes de lobos de crevasse e de planície de inundação fluvial, conforme Jain *et al.* (2005) e McKie (2014). A presença dos fitoclastos apoia essa interpretação, pois, segundo afirmou Tyson (1995), baseado em uma ampla compilação de dados, mais de 90% da matéria orgânica transportada por cursos d'água é constituída por fitoclastos, cujas dimensões são muito semelhantes àquelas encontradas.

Anteriormente Gonçalves & Carvalho (1996) registraram a ocorrência de *Skolithos* em alguns litotipos da Formação Itapecuru. Contudo, com a presença de icnitos agora verificada, recomenda-se uma maior atenção para a descrição dessas ocorrências.

Por outro lado, a ausência de fósseis marinhos e rochas carbonáticas, reforçada pelos índices de RI

encontrados, que variam entre 92 e 97%, bem como a análise geoquímica das concentrações de Boro indicando salinidade praticamente ausente na formação (Lins, 1978), confirmadas nas análises geoquímicas de 50 amostras coletadas na região pesquisada, que apresentaram uma concentração de Boro entre 1 e 2ppm (Dados inéditos de Francisco José Corrêa-Martins), reforçam a interpretação de que se trata de um paleoambiente continental.

## 5.2 Petrografia Reportada em Grajaú, Timbiras e Coroatá

As amostras estudadas por Nascimento & Góes (2007), obtidas na área de Grajaú, e nas localidades de Timbiras e Coroatá, por Mendes & Truckenbrodt (2009), levaram esses autores a caracterizarem as rochas Itapecuru como quartzo-arenito, fino a médio, com quartzo monocristalino, por vezes chert e, subsidiariamente feldspato, bem a moderadamente selecionado, cujos grãos exibem formas que variam entre angulosos, subarredondados e arredondados, e que teriam sido depositados em ambiente parálico com influência marinha.

Porém, revendo as descrições e as imagens petrográficas relativas às rochas existentes nos arredores de Grajaú (Nascimento & Góes, 2007) e de Timbiras e Coroatá (Mendes & Truckenbrodt, 2009), verifica-se que os contatos observados entre os grãos são predominantemente longos, ocorrendo também côncavo-convexos, sendo plausível a presença de contatos suturados. Registre-se que esses autores não fizeram quaisquer menções sobre a permeabilidade das rochas que analisaram.

## 5.3 Diferenças Diagenéticas Encontradas

Do ponto de vista diagenético, o exame petrográfico dos litotipos encontrados nas áreas dos municípios de Itapecuru-Mirim, Santa Rita, Bacabeira e Rosário mostra a ocorrência de grãos de quartzo nas frações de silte grosso, areia muito fina e fina envolvidos por películas de hematita. Os contatos entre os grãos de quartzo e, eventualmente de feldspato, são flutuantes nos argilitos siltosos e siltitos argilosos, enquanto nas wackes feldspáticas são predominantemente pontuais e nos quartzo-arenitos os contatos longos e pontuais são equivalentes.

As lâminas de muscovita, quando presentes, não exibem deformação, modificação essa que também está ausente nos fitoclastos. Não há indícios de alterações pós-deposicionais dos argilominerais. A ocorrência de calcita poiquilotópica é restrita. Esse conjunto de dados aponta para um empacotamento aberto, característico de uma petrotrama deposicional (Worden & Burley, 2003).

Já Nascimento & Góes (2007) reportaram o sobrecrecimento de quartzo, feição essa ressaltada pela película de hematita presente, bem como a ocorrência de deformação nas amostras de Grajaú. Mendes & Truckenbrodt (2009) também citaram a existência de sobrecrecimento de quartzo, além da substituição parcial de grãos do arcabouço por cimentação dolomítica nas amostras oriundas de Timbiras e Coroatá. Na reavaliação aqui realizada, verificou-se que os contatos entre os grãos daquelas amostras são predominantemente longos, com a presença de côncavo-convexos também. Essas feições apontam para uma petrotrama que reflete as ocorrências tanto da compactação mecânica como química (Worden & Burley, 2003).

A presença de películas de hematita envolvendo os grãos está ligada à diagenese rasa, ou eodiagenese (Schmidt & McDonald, 1980, Bjørlykke, 2014). A forma de ocorrência da cimentação carbonática encontrada nas amostras analisadas neste trabalho indica, segundo os dados compilados por Burley *et al.* (1985) e Worden & Burley (2003), que o pacote de rochas parece não ter ultrapassado a profundidade de 500m. A porosidade observada nos litotipos de Rosário, Bacabeira, Santa Rita e Itapecuru-Mirim indica uma pressão de soterramento inferior a 10 Mpa (Burley *et al.*, 1985, Worden & Burley, 2003, Mondol *et al.*, 2007), confirmando que os processos diagenéticos ocorreram a pouca profundidade.

Já os contatos longos e côncavo-convexos entre os grãos, o crescimento sintaxial ou secundário do quartzo e a substituição parcial de grãos do arcabouço evidenciam, respectivamente, compactações mecânica e química (Worden & Burley, 2003), comprovando que as rochas existentes ao norte de Grajaú e entre Timbiras e Coroatá foram submetidas à mesodiagenese (Schmidt & McDonald, 1979, 1980, Bjørlykke, 2014). Segundo Morad *et al.* (2000), a mesodia-

genese caracteriza as condições de soterramento a partir de 1 km, estendendo-se até cerca de 5 a 7 km de profundidade.

Vale ressaltar que as feições mesodiagenéticas mencionadas também foram encontradas em rochas psamíticas em outras sinéclises brasileiras, tanto em bacias interiores (e.g. Bocardi *et al.*, 2006, Costa *et al.*, 2014), como em bacias marginais (e.g. Rodrigues & Goldberg, 2014), inclusive nas de Bragança-Viséu e São Luís (Schrank & De Ros, 2015), contíguas à Bacia do Parnaíba (Figura 1).

## 6 Conclusões

As análises petrográficas apresentadas neste trabalho vão de encontro ao entendimento predominante da caracterização litológica da Formação Itapecuru, pois que as amostras oriundas de afloramentos existentes nos municípios de Itapecuru-Mirim, Santa Rita, Bacabeira e Rosário, no norte do estado do Maranhão, revelaram o domínio dos lamitos, constituídos por argilito siltoso e silito argiloso, sobre os litotipos da fração areia, como wacke feldspática e quartzito-arenito, ambos finos a muito finos. Constatou-se a preponderância dos processos de decantação sobre a tração, indicando condições de sedimentação de baixa energia.

As presenças de formas distintas de grãos de quartzo, juntamente com feldspatos e argilominerais como caulinita, montemorillonita (esmectita) e illita, caracterizados como protomatriz, indicam que provêm de locais distintos que, aliado às reduzidas dimensões dos grãos e partículas, apontam para o retrabalhamento de formações sotopostas como origem dos sedimentos que compõem a Formação Itapecuru. Note-se também a presença de cutículas de hematita em partículas de silte grosso e grãos de areia muito fina a fina.

O registro inédito da ocorrência de fitoclastos, tanto de maneira amorfa como de fragmentos finos e longos carbonizados, em todas as seções delgadas examinadas, evidenciam a presença de vegetação durante parte da sedimentação da Formação Itapecuru. A dimensão dos fitoclastos encontrados é pertinente com aqueles transportados por rios.

Estes resultados são respaldados pelos estudos de Pedrão & Corrêa-Martins (1999) e Ferreira *et al.* (2016), que analisaram palinomorfos encontrados em amostras coletadas em alguns pontos na área

de trabalho, e a partir dos quais verificaram que os sedimentos da Formação Itapecuru foram depositados entre o Albiano Inferior e o Albiano Médio.

O conjunto de dados obtidos no presente estudo permite afirmar que a Formação Itapecuru é constituída de sedimentos oriundos de unidades litoestratigráficas sotopostas, como as formações Grajaú e Codó, entre outras, carreados por processos fluviais, em ambientes de baixa energia, em um relevo monótono, sendo que as condições climáticas durante a deposição foram provavelmente marcadas pela sazonalidade, como aquelas verificadas atualmente em regiões semi-áridas do NE do Brasil.

Estes resultados contrastam com as análises petrográficas previamente realizadas em amostras consideradas como litotipos da Formação Itapecuru, oriundas do norte de Grajaú (Nascimento & Góes, 2007), além das coletadas entre Timbiras e Coroatá (Mendes & Truckenbrodt, 2009), que foram caracterizadas como quartzo-arenítica ou sublitarenítica, com poucos feldspatos, e com a presença preponderante de estruturas deposicionais de tração, e sem a presença de qualquer tipo de matriz.

Outro aspecto distintivo verificado foi a diagênese. Nas amostras analisadas neste trabalho, os contatos pontuais são as feições mais frequentes entre os grãos, e os fragmentos de muscovita e fitoclastos não exibem deformação, aspectos esses que apontam para a eodiagênese. Já nas rochas estudadas por Nascimento & Góes (2007) e Mendes & Truckenbrodt (2009) verificou-se o predomínio dos contatos longos, além de côncavo-convexos; a ocorrência de sobrecrecimento sintaxial dos grãos de quartzo, e a substituição parcial de grãos do arcabouço por cimentação dolomítica. Tais aspectos evidenciam tanto a compactação mecânica como química, indicando a ocorrência de mesodiagênese.

Portanto, a partir das análises petrográfica e diagenética realizadas, associadas à presença consistente dos fitoclastos, se conclui que os litotipos que ocorrem nos municípios de Itapecuru-Mirim, Santa Rita, Bacabeira e Rosário são distintos daqueles descritos ao norte de Grajaú por Nascimento & Góes (2007), e entre Timbiras e Coroatá por Mendes & Truckenbrodt (2009). E, com base no fato de que

Campbell (1949) definiu a localidade-tipo da Formação Itapecuru em Itapecuru-Mirim, pode-se afirmar que as rochas existentes ao sul, como em Grajaú, Timbiras e Coroatá, não pertencem àquela formação, sendo, portanto, litotipos de unidades litoestratigráficas sotopostas, muito provavelmente da Formação Grajaú. Estas conclusões têm respaldo nos mapeamentos geológicos produzidos por Lima & Leite (1978) e Lovato *et al.* (1994), que mostram ao norte de Grajaú, na MA-006 (Figura 2), litotipos das formações Grajaú e Codó, o que foi corroborado posteriormente em trabalho de campo (Corrêa-Martins *et al.*, 2016).

## 7 Agradecimentos

Os autores agradecem à Dra Luciana Witovisk Gussella (MN/UFRJ) e ao Dr. Rafael Costa da Silva (CPRM) pelas discussões e sugestões feitas, a primeira com relação à análise dos fitoclastos e o segundo em relação ao icnito encontrado. A Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS), pela autorização e acesso aos relatórios internos citados nesta pesquisa. Aos Dr. Sérgio Brandolise Citroni (Degeo/UFRRJ) e Dr. Claudio Limeira Mello (DEGEO/UFRJ) pelas revisões e sugestões feitas a este trabalho.

## 8 Referências

- Aguiar, G.A. 1969. *Bacia do Maranhão: Geologia e Possibilidade de Petróleo*. [Belém]: PETROBRAS, DEPEX/SEDOC, Relatório [Interno] nº 371 - 108-03447, p. 12, 15-46.
- Aguiar, G.A. 1971. Revisão Geológica da Bacia Paleozóica do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 25, São Paulo, 1971. *Anais*, São Paulo, SBG, 3: 113-122.
- Allen, P.A & Armitage, J.L. 2012. Cratonic basins. In: BUSBY, C. & AZOR, A. (eds.) *Tectonics of Sedimentary Basins: Recent Advances*. Blackwell Publishing Ltd, p. 602-620.
- Anaisse Jr., J.; Truckenbrodt, W. & Rossetti, D.F. 2001. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, região de Açailândia/MA, Bacia do Grajaú. In: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. & TRUCKENBRODT, W. (eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Editora do Museu Goeldi, p. 119-150.
- Bjørlykke, K. 2014. Relationships between depositional environments, burial history and rock properties. Some principal aspects of diagenetic process in sedimentary basins. *Sedimentary Geology*, 301: 1-14.
- Bocardi L.B.; Fernandes L.A.; Rostirolla S.P. & Appi C.J. 2006. Diagênese dos arenitos do Grupo Itararé, permocarbonífero, Bacia do Paraná. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(7): 221-231.
- Boggs, S. 1995. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. 2<sup>nd</sup> ed. Englewood Cliffs, Prentice Hall. 774p.
- Boggs, S. 2009. *Petrology of Sedimentary Rocks*. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Cambridge University Press. 600p.
- Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A.; Cordani, U.G. & Thomas Filho, A. 1984. Influence of basement structures on the evolution of the major sedimentary basins of Brazil: A case of tectonic heritage. *Jour-*

**Petrografia, Diagênese e Considerações sobre Proveniência da Formação Itapecuru no Norte do Maranhão (Cretáceo Inferior, Bacia do Parnaíba, NE Brasil)**  
Francisco José Corrêa-Martins; Julio Cezar Mendes, Luiz Carlos Bertolino & Joalce de Oliveira Mendonça

- nal of Geodynamics*, 1(3-5): 495–510.
- Burley, S.D.; Kantorowicz, J.D. & Waugh, B. 1985. Clastic diagenesis. In: BRENCHLEY, P.J. & WILLIAMS, B.P.J. (eds.). *Sedimentology: recent developments and applied aspects*. Blackwell Scientific Publications, Geological Society of London, Special Publication, 18, p. 189-226.
- Campbell, D.F. 1949. *Revised report of the Reconnaissance Geology of the Maranhão Basin*. [São Luís, Rio de Janeiro:] CNP/DEPEX/SEDOC 103-00093. 117 p. + anexos.
- Campbell, D.F. 1950. Bacia do Maranhão (Geologia). In: BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO PETRÓLEO. *Relatório de 1949*. Rio de Janeiro, p. 81-85.
- Carneiro, R.G. 1974. *Mapeamento estrutural da área Grajaú-Imperatriz*. [Belém]: PETROBRAS, DIREX/RENOR, Relatório Técnico nº 398. 30p.
- Castro, D.L. de; Fuck, R.A.; Phillips, J.D.; Vidotti, R.M., Bezerra, F.H.R. & Dantas, E.L. 2014. Crustal structure beneath the Paleozoic Parnaíba Basin revealed by airborne gravity and magnetic data, Brazil. *Tectonophysics*, 614: 128–145.
- Chamley, H. 1989. *Clay sedimentology*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 623p.
- Chumakov N. M.; Zharkov M. A.; Herman A. B.; Doludenko M. P.; Kalandadze N. N.; Lebedev E. L.; Ponomarenko A. G. & Rautian, A. S. 1995. Climatic zones in the middle of the Cretaceous period. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 3: 3-14.
- Corrêa, M. M.; Ker J. C.; Ruiz H. A. & Mendonça E. S. 2003. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa (PB). *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 27: 311-324.
- Corrêa-Martins, F.J.; Assis, A.P.; Mendes, J.C. & Schmitt, R.S. 2016. Considerações sobre o Mesozoico da Bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 48, Porto Alegre, 2016. *Anais*, Porto Alegre, SBG, 1: 9074-9074.
- Costa, A.B.S.; Córdoba, V.C.; Jardim de Sá, E.F. & Scherer, C.M. dos S. 2014. Diagênese dos arenitos da Tectonoconsequência Rife na Bacia do Araripe, NE do Brasil. *Brazilian Journal of Geology*, 44(3): 457-470.
- Daly, M.C.; Andrade, V.; Barousse, C.A.; Costa, R.; McDowell, K.; Piggott, N. & Poole, A.J. 2014. Brasileiro crustal structure and the tectonic setting of the Parnaíba basin of NE Brazil: Results of a deep seismic reflection profile. *Tectonics*, 33: 2102–2120.
- Dickinson, W.R. 1970. Interpreting detrital modes of graywacke and arkose. *Journal of Sedimentary Geology*, 40(2): 695-707.
- Ferreira, N.N.; Ferreira, E.P.; Ramos, 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.
- Fortes, F.P. 1978. Geologia Estrutural e Tectônica da Bacia Sedimentar do Meio-Norte do Brasil (Uma Síntese com Implicações Metalogenéticas). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. *Anais*, Recife, SBG, 1: 321–336.
- Gilbert, C.M. 1982. Sedimentary rocks. In: WILLIAMS, H., TURNER, F.J. & GILBERT, C.M. *Petrography: an introduction to the study of rocks in thin sections*. 2<sup>nd</sup> ed. W. H. Freeman and Company, p. 275-427.
- Góes, A.M. & Coimbra, A.M. 1996. Bacias sedimentares da província sedimentar do meio-norte do Brasil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5, Belém, 1996. *Boletim*, Belém, SBG, p. 186-187.
- Góes, A.M. & Rossetti, D.F. 2001. Gênese da Bacia de São Luís-Grajaú. In: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. & TRUCKENBRODT, W. (eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Editora do Museu Goeldi, p. 15-30.
- Góes, A.M.O. & Feijó, F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8(1): 57-68.
- 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.
- Klein, E.L. & Sousa, C.S. (org.). 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, 152 p.
- Jain, M.; Tandon, S.K.; Singhvi, A.K.; Mishra, S. & Bhatt, S.C. 2005. Quaternary alluvial stratigraphical development in a desert setting: a case study from the Luni River Basin, Thar Desert of western India. In: BLUM, M. D.; MARRIOT, S.B. & LECLAIR, S.F. (eds.) *Fluvial Sedimentology VII*. International Association of Sedimentologists, Special publication, 35, p. 349–371.
- 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, CPRM. V 2, 3, 4 e 15.
- Linol, B.; de Wit, M.J.; Kasanzu, C.H.; Schmitt, R.S.; Corrêa-Martins, F.J. & Assis, A. 2016. Correlation and Paleogeographic Reconstruction of the Cape-Karoo Basin Sequences and Their Equivalents Across Central West Gondwana. In: LINOL, B. & DE WIT, M.J. (eds.). *Origin and Evolution of the Cape Mountains and Karoo Basin*. Springer, p. 183-192.
- Lins, C.A.C. 1978. *O Boro como elemento indicador de Paleosalinidade da Bacia do Parnaíba*. Recife, SUREG/CPRM, 21p. Contribuição Técnica Nº 5350.004.
- Loczy, L. de. 1968. Geotectonic evolution of the Amazon, Parnaíba and Paraná basins. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 40(supl.): 231-249.
- Lovato, O.G.; Caye, B.R.; Araújo, C.C. & Camozzato, E. (org.). 1994. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto especial mapas de recursos minerais de solos e de vegetação para a área do programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Folha Barra do Corda. SB 23-V-D, estado do Maranhão, escala 1:250.000*. Brasília, CPRM, 96 p.
- Lovato, O.G.; Caye, B.R. & Araújo, C.C. (org.). 1995. *Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Projeto especial mapas de recursos minerais de solos e de vegetação para a área do programa Grande Carajás. Subprojeto Recursos Minerais. Folha Itapecuru-Mirim. SA 23-Z-C, estado do Maranhão, escala 1:250.000*. Brasília, CPRM, 96 p.
- McKie, T. 2014. Climatic and tectonic controls on Triassic dryland terminal fluvial system architecture, central North Sea. In: MARTINIUS, A.W.; RAVNÁS, R.; HOWELL, J.A.; STEEL, R.J. & WONHAM, J.P. (eds.). *From Depositional Systems to Sedimentary Successions on the Norwegian Continental Margin*. International Association of Sedimentologists, Special publication, 46: p. 19-58.
- Mendes, A.C. & Truckenbrodt, W. 2009. Proveniência de arenitos albianos (Grupo Itapecuru), borda leste da bacia de São Luís-Grajaú, Maranhão, usando análise de minerais pesados e química mineral. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais*, 4(1): 57-74.
- Menezes, T.R. & Carvalho, I.S. de. 1996. Análise dos argilominerais da seção-tipo da Formação Itapecuru (bacia do Parnaíba, estado do Maranhão). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, Salvador, 1996. *Anais*, Salvador, SBG, 4: 314-316.
- Mesner, J.C. & Wooldridge, L.C.P. 1962. *The Maranhão Basin Study Revision*. [Belém:] [PETROBRAS], DEPEX/SEDOC 103-00645. 2 v.
- 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.
- Miall, A.D. 2016. *Stratigraphy: A Modern Synthesis*. Heidelberg, Springer. 454p.
- Miranda, M.C.C. & Rossetti, D.F. 2006. Reconstituição paleoambiental de depósitos albianos na borda leste da bacia de Grajaú, MA. *Revista Brasileira de Geociências*, 36(4): 623-635.
- Mondol, N.Z.; Bjarlykke, K.; Jahren, J. & Høeg, K. 2007. Experimental

**Petrografia, Diagênese e Considerações sobre Proveniência da Formação Itapecuru no Norte do Maranhão (Cretáceo Inferior, Bacia do Parnaíba, NE Brasil)**

Francisco José Corrêa-Martins; Julio Cezar Mendes, Luiz Carlos Bertolino & Joalice de Oliveira Mendonça

- mechanical compaction of clay mineral aggregates-Changes in physical properties of mudstones during burial. *Marine and Petroleum Geology*, 24: 289–311.
- Morad, S.; Ketzer, J.M. & De Ros, L.F. de. 2000. Spatial and temporal distribution of diagenetic alterations in siliciclastic rocks: implications for mass transfer in sedimentary basins. *Sedimentology*, 47(1): 95-120.
- Nascimento, M.S. & Góes, A.M. 2007. Petrografia de arenitos e mineirais pesados de depósitos cretáceos (Grupo Itapecuru), Bacia de São Luís-Grajaú, norte do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 37(1): 50–63.
- Pedraõ, E. & Corrêa-Martins, F.J. 1999. Palinoestratigrafia de um afloramento da Formação Itapecuru (Bacia do Parnaíba) em Rosário, Estado do Maranhão: Correlações Cronoestratigráficas. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 71(4-I): 767-776.
- Pettijohn, F.J.; Potter, P.E. & Siever, R. 1972. *Sand and Sandstone*. [1<sup>st</sup> ed.] Berlin, Springer-Verlag, 1972. 618p.
- Picard, D.M. 1971. Classification of fine-grained sedimentary rocks. *Journal of Sedimentary Petrology*, 41(1): 179–195.
- Price, G.D. 2009. Mesozoic Climate. In: GORNITZ, V. (ed.). *Encyclopedia of Paleoclimatology and Ancient Environments*. Springer, p. 554-559.
- Rodrigues, A.G. & Goldberg, K. 2014. Primary composition and diagenetic patterns of sandstones from Barra de Itiúba Formation in Atalaia High, Sergipe Sub-Basin. *Brazilian Journal of Geology*, 44(4): 545-560.
- Rossetti, D.F. 2001a. Arquitetura deposicional 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*. Editora do Museu Goeldi, p. 31-46.
- Rossetti, D.F. 2001b. Evidência de atividade sísmica sinsedimentar em depósitos cretácicos da Bacia de São Luís-Grajaú. In: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. & TRUCKENBRODT, W. (eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Editora do Museu Goeldi, p. 47-66.
- Rossetti, D.F. & Truckenbrodt, W. 1997. Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano-Terciário Inferior (?) na Bacia de São Luís, Maranhão *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências Naturais*, 9: 29-41.
- Rossetti, D.F.; Góes, A.M.; Truckenbrodt, W. & Anaisse Jr., 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. 2001. A passagem Aptiano-Albiano na Bacia do Grajaú, Maranhão. In: ROSSETTI, D.F.; GÓES, A.M. & TRUCKENBRODT, W. (eds.). *O Cretáceo na Bacia de São Luís-Grajaú*. Editora do Museu Goeldi, p. 101-118.
- Rossetti, D.F. & Góes, A.M. 2003. Caracterização paleoambiental de depósitos albianos na borda sul da Bacia de São Luís-Grajaú: modelo de delta fluvial influenciado por tempestade. *Revista Brasileira de Geociências*, 33(3): 299-312.
- Sachs, L.L.B., Alcantara, K.C. & Mendes, V.A. 2017. *Projeto materiais de construção da região metropolitana de São Luís e entorno: estado do Maranhão*. Teresina, CPRM. 341 p.
- Santana, J.A. da S.; Araujo, I.M.M. de; Sena, C.M. de; Pimenta, A.S. & Fonseca, F. das C. E. da. 2011. Determinação dos períodos críticos de ocorrência de incêndios florestais na Estação Ecológica do Seridó, Serra Negra-RN. *Revista Caatinga*, 24(1): 43-47.
- 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, Natal, 1990. *Anais*, Natal, SBG, v.1, p. 150-156.
- Schmidt, V. & McDonald, D.A. 1979. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis. In: SCHOLLE, P.A. & SCHULUGER, P.R. (eds.). *Aspects of Diagenesis*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 26, p.175–207.
- Schmidt, V. & McDonald, D.A. 1980. Modern Concepts in Sandstone Diagenesis - Abstract. In: MIALL, A.D. (ed.). *Facts and Principles of World Petroleum Occurrence*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir, 6: p. 998-999.
- Schrank, A.B.S. & De Ros, L.F. 2015. Diagenetic processes in cretaceous sandstones from occidental Brazilian Equatorial Margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 63: 1-19.
- Spicer B. & Skelton P.W. 2003. The operation of the major geological carbon sinks. In: SKELTON, P.W. (ed.). *The Cretaceous World*. The Open University, Cambridge University Press, p. 249-271.
- Tucker, M.E. 2001. *Sedimentary Petrology: An Introduction to the Origin of Sedimentary Rocks*. 3<sup>rd</sup> ed. Oxford, Blackwell Science. 262p.
- Turner, D.; Lewis, M. & Ostendorf, B. 2011. Spatial indicators of fire risk in the arid and semi-arid zone of Australia. *Ecological Indicators*, 11: 149-167.
- Tyson, R.V. 1987. The genesis and palynofacies characteristics of marine petroleum source rocks. In: BROOKS, J. & FLEET, A.J. (eds.) *Marine Petroleum Source Rocks*. Geological Society, Special Publication, 26, p. 47-68.
- Tyson R. V. 1995. *Sedimentary Organic Matter: Organic facies and palynofacies*. 1<sup>st</sup> ed. Devon, Chapman and Hall. 614p.
- 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.
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30(5): 377-392.
- Williams, H.; Turner, F.J. & Gilbert, C. M. 1970. *Petrografia: Uma introdução ao estudo das rochas em seções delgadas*. Trad. R. R. Franco. São Paulo, Polígono, Editora da Universidade de São Paulo. 424p.
- 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, p. 3-44.
- Worden, R.H.; Armitage, P.J.; Butcher, A.R.; Churchill, J.M.; Csoma, A.E.; Hollis, C.; Lander, R.H. & Omma J.E. 2018. Petroleum reservoir quality prediction: overview and contrasting approaches from sandstone and carbonate communities. In: ARMITAGE, P.J.; BUTCHER, A.R.; CHURCHILL, J.M.; CSOMA, A.E.; HOLLIS, C.; LANDER, R.H.; OMMA, J.E. & WORDEN, R.H. (eds.). *Reservoir Quality of Clastic and Carbonate Rocks: Analysis, Modelling and Prediction*. London: Geological Society, Special Publications, 435. First published online May 01, 2018, <http://doi.org/10.1144/SP435.21>