

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

FÁCIES SEDIMENTARES DAS FORMAÇÕES ANDIRÁ E
ARARI, PERMIANO DA BACIA DO AMAZONAS, COM BASE
EM TESTEMUNHOS DE SONDAÇÃO NO LAGO SOARES,
AMAZONAS.

ZIOMAR COSTA E SILVA JUNIOR

MANAUS

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ZIOMAR COSTA E SILVA JUNIOR

FÁCIES SEDIMENTARES DAS FORMAÇÕES ANDIRÁ E ARARI,
PERMIANO DA BACIA DO AMAZONAS, COM BASE EM
TESTEMUNHOS DE SONDAGEM NO LAGO SOARES, AMAZONAS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Emílio Alberto Amaral Soares

MANAUS

2018

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586f Silva Junior, Ziomar Costa e
Fácies sedimentares das formações Andirá e Arari, permiano da
bacia do Amazonas, com base em testemunhos de sondagem no
lago Soares, Amazonas. / Ziomar Costa e Silva Junior. 2018
75 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Emílio Alberto Amaral Soares
Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal
do Amazonas.

1. Bacia do Amazonas. 2. Formações Andirá e Arari. 3. Lago
Soares. 4. Fácies sedimentares. 5. Paleoambiente. I. Soares,
Emílio Alberto Amaral II. Universidade Federal do Amazonas III.
Título

ZIOMAR COSTA E SILVA JÚNIOR

FÁCIES SEDIMENTARES DAS FORMAÇÕES ANDIRÁ E ARARI,
PERMIANO DA BACIA DO AMAZONAS, COM BASE EM TESTEMUNHOS
DE SONDAÇÃO NO LAGO SOARES, AMAZONAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Aprovado em 13 de abril de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Emílio Alberto Amaral Soares, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dr. Roberto César de Mendonça Barbosa, Membro.
Universidade Federal do Amazonas



Prof.ª Dr.ª Elena Franzinelle, Membro.
Universidade Federal do Amazonas

À minha esposa Raquel, minhas filhas Ana
Beatriz e Maria Fernanda, meu pai Ziomar (*in
memoriam*), minha mãe Joana e meus irmãos.
Família, a base de tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pois até aqui Ele me ajudou, nunca deixou desanimar, e sem Ele nada seria possível para a realização deste trabalho.

Agradeço de todo o coração à minha esposa Raquel Brandão Costa e Silva, e minhas filhas Ana Beatriz Brandão e Maria Fernanda Brandão, por todo amor a mim dedicados e pela compreensão mesmo nos momentos em que não pude dar atenção, me incentivando durante este estudo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Emílio Soares, em meio a todas dificuldades ocorridas nestes últimos dois anos, por todo apoio, pela valiosa contribuição nas sugestões, discussões e correções do texto, pelos puxões de orelha, que foram de grande importância tanto para meu aprendizado como para o dia a dia. Lembrando que nem sempre o “sim” como resposta e os textos que sumiam do nada eram pra passar insegurança, mas significavam que tudo ia dar certo.

Agradeço ao CAPES, pelo apoio financeiro e implementação da bolsa de estudos, assim como a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-Graduação em Geociências, por toda infraestrutura oferecida para a realização deste trabalho.

À empresa Potássio do Brasil pelos testemunhos de sondagem e informações cedidos para a realização do trabalho. À todos os colegas do Projeto Potássio Amazonas – Autazes e Belo Horizonte, com quem tive a honra de trabalhar, em especial ao Geol. José Jacob Fanton pela cordialidade e incentivo.

Ao Prof. Dr. Roberto César de Mendonça Barbosa e Prof^ª. Dra. Elena Franzinelli pelas sugestões na elaboração da dissertação.

Aos professores do Departamento de Geociências-UFAM, Prof. Dr. Lucindo Antunes Fernandes Filho, Prof^ª. Dra. Rosemary Silveira da Rocha, Prof^ª. Michelle Andriolli e Prof^ª. Suzy Pedroza, que colaboraram com sugestões e comentários sobre alguns capítulos da dissertação.

Ao técnico de laminação Wianeí e ao Geol. Gato, da CPRM, pela confecção das lâminas delgadas.

Ao técnico Alfredo do laboratório de Técnicas Mineralógicas da UFAM, pelo auxílio durante as análises de DRX.

Agradeço aos meus amigos de pós-graduação Katy Marylim, Patrícia Rocha, Marcelo Versiani, Paulo Jerry, Consuelo Andrade, Adnilson Cruz, Manoel Zafra Torres, Leonardo

Palmera, Marcel Passos, e em especial aos meus amigos Igor Torres, Francisco Plebson e Rafaela Santana, por toda ajuda, apoio, conversas e momentos de descontração, e a todos os demais colegas da pós-graduação que sempre me ajudaram e apoiaram em todas etapas da pós-graduação.

Aos Prof. Dr. Rodolfo Dino e Prof^a. Dra. Luzia Antonioli pelas análises e contribuição para o capítulo de palinologia.

Aos alunos de graduação William Nunes, André Sena e Samuel, pela ajuda nas análises no laboratório de Sedimentologia (UFAM).

À Jéssica Muniz pelo auxílio na formatação da dissertação.

Agradeço a todos os irmãos do Grupo de Oração Ricarte e Cinthia, por fazer parte desse grupo e por sempre colocarem a realização deste trabalho em seus pedidos de orações, com palavras de bom ânimo em todos momentos. Que Deus os abençoe sempre. Amém!

Agradeço também a todos que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

*Combati o bom combate, terminei a corrida,
gardei a fé.*

2 Timóteo 4:7

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de análises sedimentológicas realizadas em aproximadamente 230m de testemunhos do furo de sondagem, PBAT-15-43, onde foram descritas as fácies sedimentares e relações de contato entre depósitos de leques aluviais (base) e fluviais (topo) das formações paleozoicas Andirá e Arari da Bacia do Amazonas, respectivamente. Esta sondagem localiza-se no Lago do Soares (Autazes, Amazonas) e foi selecionada em função da qualidade dos testemunhos recuperados, disponibilizados pela empresa Potássio do Brasil. Dez fácies sedimentares foram identificadas e agrupadas em três associações de fácies, denominadas informalmente de I, II e III. A associação I foi interpretada como de ambiente fluvial com depósitos de canal e planície de inundação. A associação II igualmente de ambiente fluvial engloba fácies deformadas oriundas de processos de sobrecarga, liquefação e atividade sísmica, penecontemporâneas à formação dos depósitos aluviais. A associação III foi interpretada como de ambiente de leques aluviais com depósitos de fluxos gravitacionais de detritos. Adicionalmente procedeu-se a análise palinológica destas formações que ratificaram a interpretação da fase final do processo de deposição no Permiano da região. A unidade inferior (Arari) mostrou-se estéril em palinófitos e nas amostras da unidade superior (Andirá) não foram detectados elementos do paleomicroplankton marinho. A palinoflora recuperada é constituída principalmente pelas espécies *Lueckisporites virkkiae*, *Corisaccites alutas*, *Hamiapollenites andiraensis*, *H. karooensis*, *Vittatina costabilis*, *V. saccata*, *V. subsaccata* e *Tornopollenites toreutos*; secundadas por espécies dos gêneros *Punctatisporites*, *Verrucosisporites*, *Limitisporites*, *Cycadopites* e *Stratopodocarpites*. Os dados sedimentológicos, corroborados pelos palinológicos indicam que a sedimentação pode ser associada ao ambiente continental (fluvial-lacustre), definindo a idade Permiano Superior para as camadas da Formação Andirá.

Palavras-chave: Bacia do Amazonas, Formações Andirá e Arari, Lago Soares, fácies sedimentares, palinologia, paleoambiente

ABSTRACT

This work presents the results of sedimentological and palynological analysis carried out in approximately 230 m of core samples of the PBAT-15-43 borehole, where sedimentary facies and contact relationships were described among alluvial (base) deposits and fluvial (top) fans of the Paleozoic Andirá and Arari formations from Amazon basin, respectively. This borehole is located at Soares' Lake (Autazes, Amazon) and it was selected in function of the good quality of the recovered cores, freely available by the Potassio do Brazil company. Ten sedimentary facies were identified and clustered in three facies associations, denominated informally as I, II and III. The facies association I were interpreted as fluvial with channel and flood plain deposits. The association II, similarly, of fluvial environment includes facies from processes of seismic nature and pen contemporaneous to the formation of alluvial deposits. The association III were interpreted as an alluvial fan environment with deposits of gravitational debris flows. Additionally palynological analysis in these formations endorsed the age, and environmental interpretation of the final deposition process phase of the Permian in the area. The inferior unit (Arari) was barren in palynomorphs. The Andirá Formation, superior unit, contains a fairly well preserved palynoflora constituted mainly by the species *Lueckisporites virkkiae*, *Corisaccites alutas*, *Hamiapollenites andiraensis*, *H. karoensis*, *Vittatina costabilis*, *V. saccata*, *V. subsaccata* and *Tornopollenites toreutos*. Important species of the *Punctatisporites*, *Verrucosisporites*, *Limitisporites*, *Cycadopites* and *Stratopodocarpites* genera are also present. Elements of the paleomicroplankton (acritarchs) were not detected. The sedimentologic data, corroborated by the recovered palynoflora indicate that the sedimentation can be associated to the continental (fluvial-lacustrine) environment, indicating a Late Permian age for the Andirá's strata formation.

Keywords: Amazon Basin, Andirá and Arari Formation, Soares Lake, sedimentary facies, palynology, paleoenvironment

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1: Mapa do Estado do Amazonas com a localização do furo PBAT-15-43 na região do Lago Soares, a Nordeste de Autazes. Imagem LANDSAT 8, b654, 2017, Instituto de Pesquisas Espaciais – INPE 17
- Figura 2: Descrição macroscópica de testemunhos de sondagem. A) Sonda Atlas Copco CS-4002; B) Descrição das caixas de amostras no galpão da empresa (Autazes) 18
- Figura 3: Tabela de descrição de testemunhos de sondagem, seguindo a compilação dos modelos de Boyle *et al.* (1986), Pessoa & Borghi (2005) e Mendes & Borghi (2005) 19
- Figura 4: Perfil litológico cedido pela empresa Potássio do Brasil (Relatório Interno, Potássio do Brasil 2014), indicando os locais de coleta de amostras para análises sedimentológica, granulométrica, química e palinológica 20
- Figura 5: Esquema ilustrando a relação entre fácies sedimentares, associações, ambientes e sistemas deposicionais. Modificado de Walker (1992) 21
- Figura 6: Equipamentos utilizados na análise granulométrica. A) Estufa TECNAL-TE-394/1 utilizada na secagem das amostras; B) Peneiramento com agitador mecânico; C) Aparato para separação de minerais pesados por sedimentação gravimétrica 22
- Figura 7: Diagrama de classificação das rochas sedimentares (Pettijonh *et al.*, 1987) 23
- Figura 8: Tabela do grau de arredondamento e esfericidade. Fonte: Powers (1953) 24
- Figura 9: Preparação de amostras para análise por difração de raios-x 24
- Figura 10: Organograma contendo todas as etapas empregadas na análise palinológica 27

CAPÍTULO II – CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

- Figura 11: Localização da Bacia do Amazonas, delimitada pelos escudos das Guiana e Brasil Central e arcos estruturais (Cunha *et al.*, 2007) 28
- Figura 12: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas (Fonte: Cunha 2007) 29

CAPÍTULO III – ARTIGO

- Figura 1 Mapa do Estado do Amazonas com a localização do furo PBAT-15-43 na região do Lago Soares, Nordeste de Autazes (Fonte: Imagem de Satélite LANDSAT 8, b654, 2017 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) 35
- Figura 2 Seção colunar do Furo PBAT-15-43 (Autazes-AM) ilustrando a distribuição vertical das fácies sedimentares individualizadas, bem como as relações de contato entre as unidades Superior e Inferior e os locais de coleta de amostras 38
- Figura 3 Fácies Conglomerado de arcabouço aberto (Cma) 40
- Figura 4 Fácies Conglomerado de arcabouço fechado (Cmf) 41
- Figura 5 Fácies Pelito laminado (Pl) com Detalhe 10x-NP. NP - nicóis paralelos 43

Figura 6 Fácies Pelito maciço (Pm)	44
Figura 7 Fácies Arenito maciço (Am). Fotomicrografia mostrando grãos de quartzo-arenito mal selecionado (5x-NX), contatos longitudinais (Cl) e côncavo-convexos (Cc), além de poros (P) intergranulares e irregulares (5x-NP); Histograma de frequência simples, mostrando a predominância de arenitos fino a grosso. Siglas: NX – nicóis cruzados e NP – nicóis paralelos	45
Figura 8 Fácies Arenito com laminação plano-paralela (Ap)	46
Figura 9 Fácies Arenito e Pelito com laminação heterolítica inclinada (APhi)	47
Figura 10 Estampa I com Fotomicrografia dos palinomorfos identificados nas amostras do furo PBAT-15-43, com vista proximal e lateral, foco mediano e proximal. Abreviações: VP , vista proximal; VL , vista lateral; FM , foco mediano; FP , foco proximal	52
Figura 11 Estampa II com Fotomicrografia dos palinomorfos identificados nas amostras do furo PBAT-15-43, com vista distal, proximal e foco mediano. Abreviações: VD , vista distal; VP , vista proximal; FM , foco mediano	52
Figura 12 Estampa III com a Fotomicrografia dos palinomorfos identificados nas amostras do furo PBAT-15-43, com vista proximal e foco mediano. Abreviações: VP , vista proximal; FM , foco mediano	53
Figura 13 Bloco diagrama do modelo deposicional proposto para as formações Andirá e Arari, com base nos dados de litofácies e palinológicos obtidos no furo PBAT-15-43, da região de Autazes-AM	55
 CAPÍTULO IV	
Figura 13: Fácies Pelito deformado (Pd)	61
Figura 14: Fácies Arenito deformado (Ad)	62
Figura 15: Fácies Ritmito deformado (Rd)	63
Figura 16: Associação das principais estruturas descritas na Unidade Superior e sua comparação com as classificações de Owen (1977) e Allen (1977)	64
Figura 17: A) Sequência idealizada por Seilacher (1969) para o desenvolvimento de sismito e Detalhes B e C mostrando zonas fraturadas e brechadas que se assemelham as zonas 2 e 3 de Seilacher (1969)	65
Figura 18: Histogramas de frequência das amostras PB-03G, PB-04G e PB-05 (Unidade Superior) com posicionamento estratigráfico indicadas na Figura 4	65
Figura 19: Assembleia de minerais pesados da Unidade Superior (Formação Andirá): Zircão – Zr (prismáticos e subarredondados), Turmalina – Tu (amarela e esverdeada), Granada – Gr, Monazita – Mo, Cianita – Ci, Silimanita – Sl, Topázio – To e Estaurolita – Es	66
Figura 20: A-C) Difratogramas de raios x da unidade inferior (Arari) mostrando a mineralogia da matriz dominada por quartzo (Qz), calcita (Ca), dolomita (Do), anidrita (Anh) e rutilo (Ru)	67
Figura 21: A-F) Difratogramas de raios x da unidade superior (Andirá) mostrando a mineralogia da matriz dominada por quartzo (Qz), calcita (Ca), dolomita (Do), caulinita (Ka), ilita (I), feldspato potássico (FK) e rutilo (Ru)	68

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO III – ARTIGO

Tabela 1 Resumo das fácies sedimentares grossas indeformadas da Unidade Inferior	39
Tabela 2 Resumo das fácies sedimentares indeformadas da Unidade Superior	42
Tabela 3 Resumo das associações de fácies sedimentares das unidade Superior e Inferior descritas no furo PBAT-15-43, da região de Autazes-AM (Amazônia Central)	48
Tabela 4 Ocorrências dos palinomorfos identificados nas amostras do furo PBAT-15-43, com a atribuição da palinozona e idade inferidas.....	51

CAPÍTULO IV

Tabela 1: Resumo das fácies sedimentares deformadas da Unidade Superior	60
Tabela 2: Intervalos granulométricos das três amostras da Formação Andirá (Unidade Superior)	65

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	16
1 INTRODUÇÃO	16
2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	17
3 OBJETIVOS	17
3.1. Objetivo Geral	17
3.2. Objetivos Específicos	17
4 MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1. Levantamento Bibliográfico	18
4.2. Sondagens exploratórias, Descrição e Coleta Sistemática de Amostras	18
4.3. Análise de Fácies	19
4.4. Análise Granulométrica	21
4.5. Separação de Minerais Pesados	21
4.6. Confecção de Lâminas Delgadas	22
4.7. Descrição Petrográfica de Lâminas de Grãos e Delgadas	23
4.8. Análise por Difração de Raios X	24
4.9. Datação Palinológica	25
4.9.1 Fotomicrografias	26
4.9.2 Análise Qualitativa	26
4.9.3 Análise Quantitativa	26
CAPÍTULO II – CONTEXTO GEOLÓGICO	28
5 BACIA DO AMAZONAS	28
5.1. Arcabouço estratigráfico da região de Autazes	29
5.2. Formação Nova Olinda	29
5.3. Formação Arari	30
5.4. Formação Andirá	31
DECLARAÇÃO DO IGEO.....	32
CAPÍTULO III – ARTIGO	33
1 Introdução	34
1.1 Contexto estratigráfico da região de Autazes (Amazônia Central)	34
2 Materiais e métodos	37
3 Fácies Sedimentares	37

3.1 Fácies Grossas indeformadas – Unidade Inferior	39
3.1.1 Conglomerado Maciço de Arcabouço Aberto (Cma)	39
3.1.2 Conglomerado Maciço de Arcabouço Fechado (Cmf)	40
3.2 Fácies Finas indeformadas – Unidade Superior	42
3.2.1 Pelito Laminado (Pl)	42
3.2.2 Pelito Maciço (Pm)	43
3.2.3 Arenito Maciço (Am)	44
3.2.4 Arenito com Laminação Plano-paralela (Ap)	45
3.2.5 Arenito e Pelito com Laminação Heterolítica Inclínada (APhi)	46
4 Associação de Fácies	47
5 Palinologia	48
5.1 Principais Características da Palinoflora	48
6 Modelo Depositional	53
7 Discussões e Conclusões	54
8 Agradecimentos	56
9 Referências	56
Apêndice 1	59
CAPÍTULO IV	60
6 FÁCIES DEFORMADAS – UNIDADE SUPERIOR	60
6.1 Pelito Deformado (Pd)	60
6.2 Arenito Deformado (Ad)	61
6.3 Ritmito Deformado (Rd)	62
7 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA	65
8 ANÁLISE DE MINERAIS PESADOS	66
9 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X	67
CAPÍTULO V – DISCUSSÕES E CONCLUSÕES	69
CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS	71

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

A megassequência paleozóica da Bacia do Amazonas tem sido definida principalmente com base em dados de sondagens (Cunha *et al.* 2007). Entretanto, essa megassequência ainda é pouco estudada, principalmente em função da dificuldade de acesso aos testemunhos, já que a maioria das perfurações é de uso restrito das empresas de petróleo e gás. Parte dela também aflora em faixas contínuas e paralelas nas bordas norte e sul da bacia, onde o acesso é dificultado pela escassez de estradas e densa cobertura de vegetação e solo. Desde a década de 1970, com a pesquisa da silvinita na seqüência pensilvaniana-permiana em sondagens nos municípios de Nova Olinda do Norte e Itacoatiara, Amazônia Central, pela Petrobrás Mineração S.A (PETROMISA), a prospecção deste bem mineral tornou-se potencialmente interessante, em função da dependência do país à importação de cloreto de potássio, que hoje supera os 90% (Potássio do Brasil 2014). Desde 2009, a empresa Potássio do Brasil é a nova detentora dos direitos de exploração deste recurso mineral e já executou 43 sondagens exploratórias profundas em Autazes, totalizando mais de 34.000 metros perfurados. Preliminarmente, os dados indicam a descoberta de uma reserva mineral de potássio (silvinita), de classe mundial, na profundidade entre 700 a 900m, inserida na Formação Nova Olinda (Grupo Tapajós), composta de folhelhos, carbonatos, anidritas, e halitas, depositados em ambiente marinho raso. Entretanto, pouco se conhece sobre a unidade paleozóica sobreposta a camada de silvinita nesta região, incluindo dados faciológicos, posicionamento estratigráfico e relações de contato e, de forma generalizada, tem sido associada a Formação Andirá, constituída por arenitos e siltitos fluvio-lacustres. Para tal propósito, foi estudado aproximadamente 230m (intervalo 631,93 a 397,67m) do Furo PBAT-15-43, situado acima da camada de silvinita e localizado na região do Lago Soares, nordeste de Autazes, Amazonas (Figura 1). Este furo, disponibilizado pela Potássio do Brasil, foi escolhido em função da qualidade dos testemunhos, que permitiram identificar os conjuntos de fácies sedimentares e eventos relacionados a deposição, bem como o posicionamento estratigráfico e os processos diagenéticos superimpostos.

2 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo localiza-se na região do Lago Soares, situado a 15 km à nordeste do município de Autazes (Amazônia Central) ($03^{\circ}29'29,39''\text{S}$ e $58^{\circ}58'24,83''\text{W}$), que tem como principal via de acesso à rodovia AM-254 o Rio Madeirinha (Figura 1).

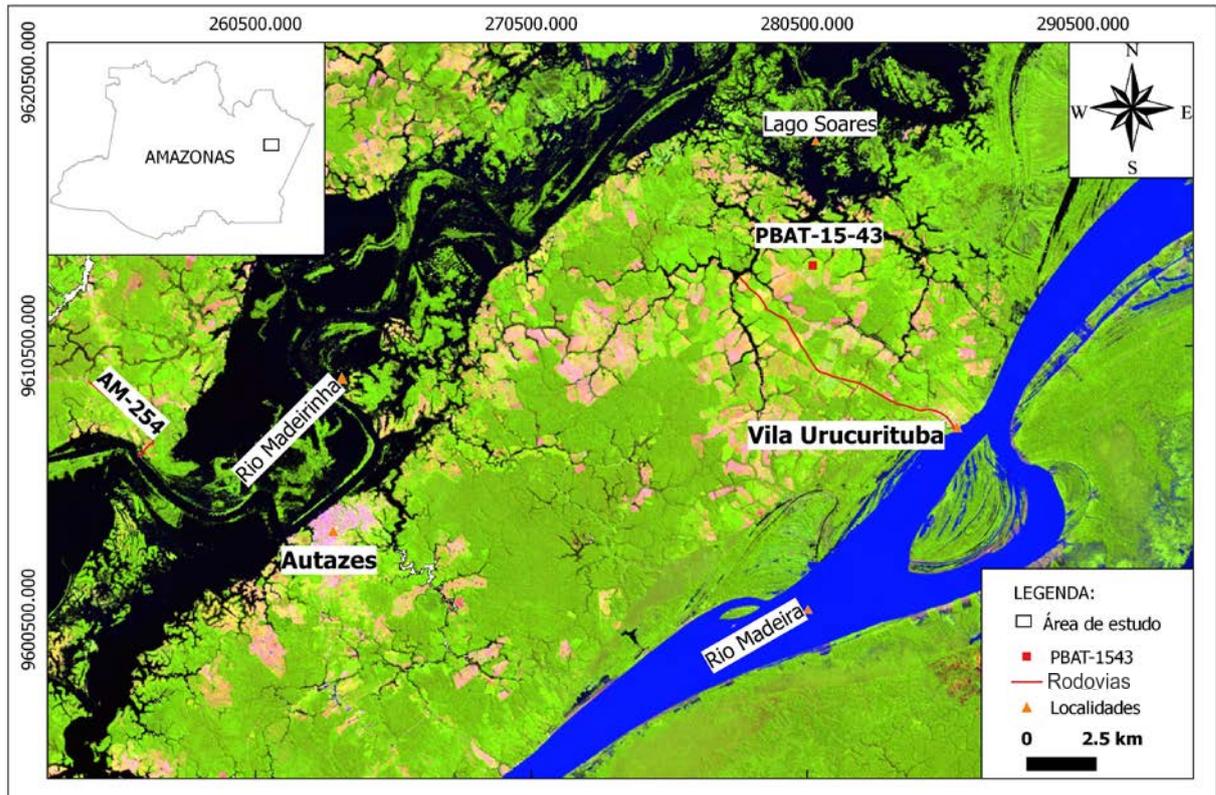


Figura 1: Mapa do Estado do Amazonas com a localização do furo PBAT-15-43 na região do Lago Soares, a Nordeste de Autazes. Imagem LANDSAT 8, b654, 2017, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

3 OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Este trabalho visa a identificação das fácies sedimentares das formações Andirá e Arari (Grupo Tapajós) em testemunhos de sondagens do Furo PBAT-15-43 (Município de Autazes – AM), visando a definição do paleoambiente deposicional.

3.2. Objetivos Específicos

- Definir o arcabouço estratigráfico e obtenção de dados sobre a proveniência sedimentar a partir da análise de fácies sedimentares das formações Andirá e Arari, auxiliadas por estudos petrográficos (classificação textural, estrutural, morfológica e aspectos diagenéticos superimpostos) e de minerais pesados;
- Posicionamento estratigráfico, dados paleoambientais e correlação estratigráfica a

partir de datação palinológica do intervalo estudado;

- Proposição de um modelo deposicional com base na integração de dados sedimentológicos, estratigráficos, palinológicos e químicos.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Levantamento Bibliográfico

Na compilação de dados bibliográficos, foram enfocados temas relacionados aos métodos sedimentológicos (análises granulométricas, texturais e de minerais pesados), estratigráficos, ambientes de sedimentação, estruturas sedimentares e análise palinológica. Além destes, dados estratigráficos e perfis geológicos da empresa Potássio do Brasil.

4.2. Sondagens exploratórias, Descrição e Coleta Sistemática de Amostras

Na região de Autazes, cerca de 43 furos de sondagens com até 950m de profundidade (Projeto Amazonas) foram realizados pela empresa Potássio do Brasil, entre 2009 a 2016. Para este Projeto de Mestrado, foi escolhido o furo PBAT-15-43, em função continuidade lítica (sondagem rotativa) e da boa qualidade dos testemunhos, obtidos pela sonda Atlas Copco CS-4002 (Figura 2A).

A descrição macroscópica dos testemunhos e documentação fotográfica foi realizada no galpão da referida empresa, em Autazes (Figura 2B). A descrição teve como base a tabela confeccionada a partir dos modelos de Boyle *et al.* (1986), Pessoa & Borghi (2005) e Mendes & Borghi (2005) (Figura 3), que enfatizam a litologia, textura (tamanho, seleção e arredondamento dos grãos), estruturas sedimentares, cor, relações das camadas em termos de espessura e composição, feições biogênicas, conteúdo fossilífero e contatos geológicos.



Figura 2: Descrição macroscópica de testemunhos de sondagem. A) Sonda Atlas Copco CS-4002; B) Descrição das caixas de amostras no galpão da empresa (Autazes).

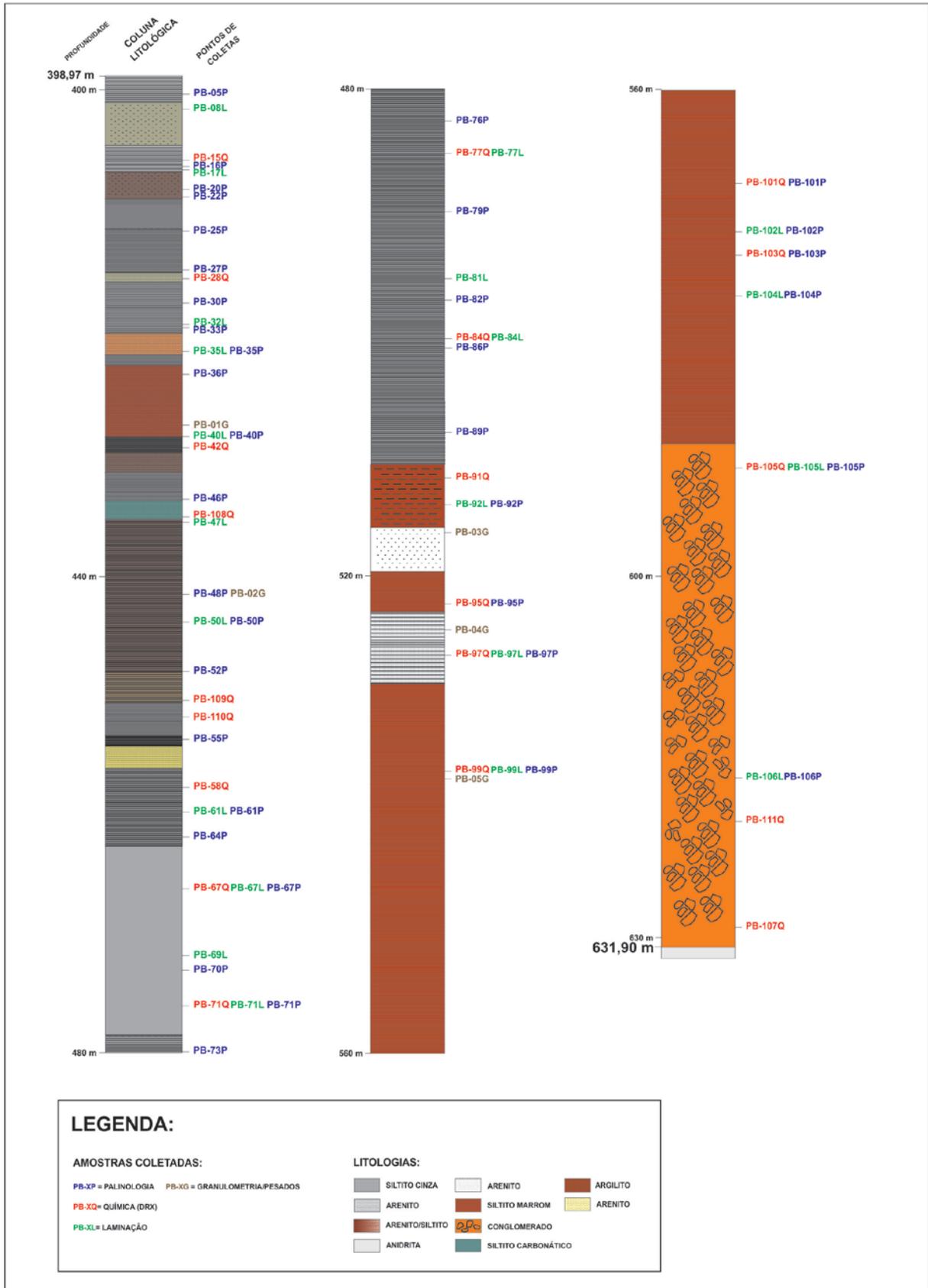


Figura 4: Perfil litológico cedido pela empresa Potássio do Brasil (Relatório Interno, Potássio do Brasil 2014), indicando os locais de coleta de amostras para análises sedimentológica, granulométrica, química e palinológica.

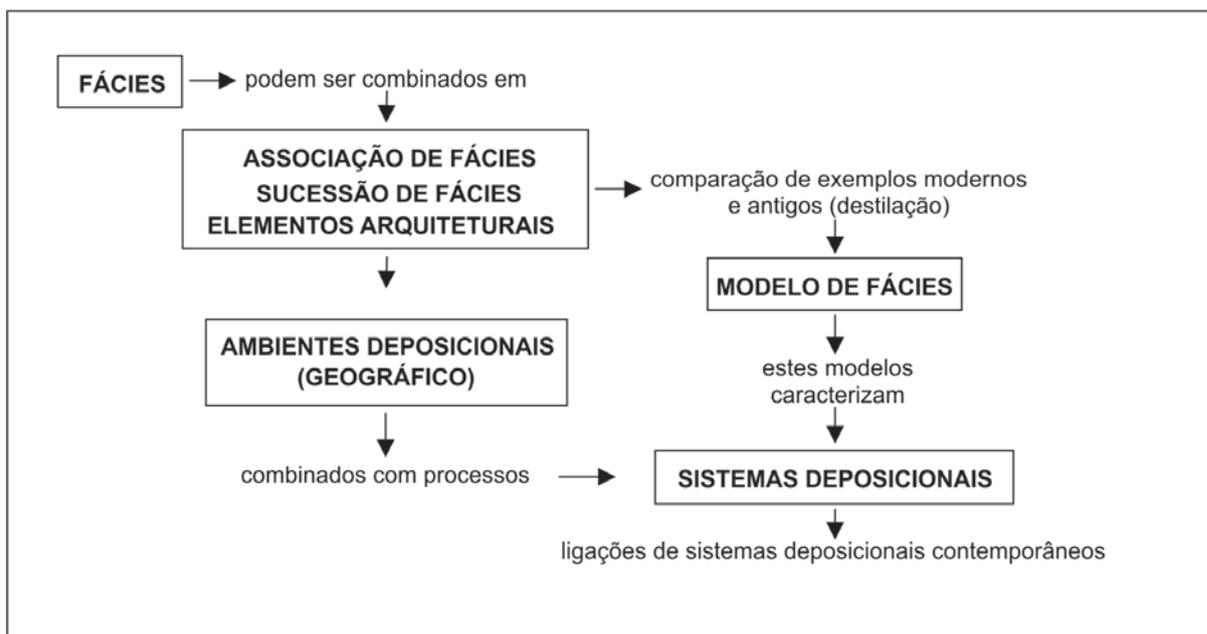


Figura 5: Esquema ilustrando a relação entre fácies sedimentares, associações, ambientes e sistemas deposicionais. Modificado de Walker (1992).

4.4. Análise Granulométrica

Para a análise granulométrica, foram coletadas 05 amostras predominantemente arenosas (100 a 300g) ao longo do furo. Destas, 03 foram submetidas ao método convencional de peneiramento no Laboratório de Sedimentologia do Departamento de Geociências (DEGEO/UFAM). As amostras foram levadas para secagem na estufa (TECNAL-TE-394/1) a uma temperatura de 60°C (Figura 6A) durante 72 horas. Posteriormente, foram homogeneizadas e peneiradas durante 15 minutos (Figura 6B), nos intervalos 1 mm, 0,71mm, 0,50mm, 0,35mm, 0,25mm, 0,177mm, 0,125mm, 0,088mm, 0,062mm e <0,062mm; abrangendo desde a fração areia grossa (2 φ ou 1mm) até muito fina (4 φ ou 0,0625mm), conforme proposto por Folk & Ward (1957). A geração dos dados estatísticos foi pelo *software Sysgran 3.0*, segundo metodologia de Camargo (2006).

4.5. Separação de Minerais Pesados

Após a determinação das frações granulométricas, foi separada a fração 0,125mm – 0,062mm (areia muito fina) para separação de minerais pesados. Para a individualização dos grãos magnéticos foi utilizado o ímã de mão. Posteriormente, visando à limpeza dos grãos (possivelmente recobertos por cimento ferruginoso), parte das amostras foi submetida a banhos com ácido oxálico (H₂C₂O₄) com densidade de 1,653 g/cm³, na concentração de 5% e aquecida a 50°C por até 6 horas. Após a lavagem, os pesados transparentes foram recuperados e postos para secagem. A separação densimétrica de minerais leves e pesados

segiu a metodologia enfatizada por Remus *et al.* (2008), na qual utiliza-se uma estrutura (Figura 6C) com o líquido denso convencional bromofórmio ($d= 2,89$). Os grãos foram montados em lâminas de vidro com a utilização de uma resina não birrefringente (Bálsamo do Canadá com índice de refração = 1,54) aquecidas a cerca de 70°C, recobertas com lamínulas de vidro para fixação. Por último as lâminas de grão, foram etiquetadas e armazenadas em caixas apropriadas.

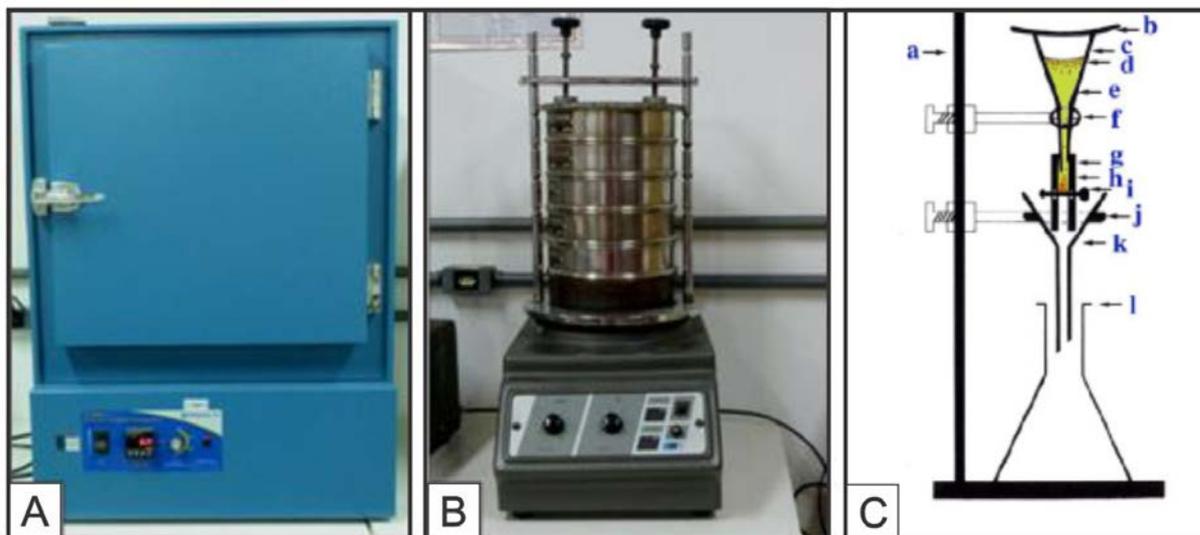


Figura 6: Equipamentos utilizados na análise granulométrica. A) Estufa TECNAL-TE-394/1 utilizada na secagem das amostras; B) Peneiramento com agitador mecânico; C) Aparato para separação de minerais pesados por sedimentação gravimétrica. a) estrutura de apoio; b) vidro de relógio; c) funil de separação; d) minerais leves; e) líquido de separação; f) suporte do funil; g) tubo de borracha; h) minerais pesados; i) pinça que não deixa (ou deixa) passar o líquido e a fração pesada; j) suporte do funil de filtração; k) funil de filtração; l) frasco de recepção.

4.6. Confeção de Lâminas Delgadas

De um total de 67 amostras coletadas, apenas 21 foram escolhidas para a confecção de lâminas delgadas (Figura 6), segundo a metodologia utilizada no laboratório de Laminação da CPRM (Serviço Geológico do Brasil), sede Manaus (AM). As amostras previamente orientadas foram cortadas com serra elétrica *Tyrolit* para obter dimensões apropriadas de 30x50mm de área. Uma das superfícies do tablete obtida foi polida em politriz metalográfica a uma rotação de ~450 rpm com abrasivo (Alumina – Al₂O₃) de 320# (*mesh*/peneira) finalizando com um de 600#. Posteriormente, a amostra foi levada à estufa por 6 horas a 70°C e, ainda quente, é colada nela uma lâmina de vidro com araldite. Uma vez coladas, as amostras e a lâmina de vidro foram levadas novamente para a estufa por 20 min. a 70°C, onde logo após esfriar, a amostra foi rebaixada com a microserra *Hillquist*, se obtendo uma espessura aproximada de 2,5 mm (2,0 mm da lâmina + 0,5 mm da amostra). A amostra (tablete + lâmina de vidro) foi desgastada no rebolo abrasivo até atingir uma espessura

aproximada de 70 μm . O conjunto de tablete + lâmina de vidro foi submetido ao desgaste novamente com alumina (320#, finalizando com 600#) com a ajuda de um disco rotativo até que se obtenha uma superfície polida e com uma espessura de rocha da ordem dos 30 μm .

4.7. Descrição Petrográfica de Lâminas de Grãos e Delgadas

A descrição das lâminas de grãos e delgadas foi realizada no Laboratório de Microscopia do PPGGEO (UFAM), utilizando o microscópio óptico (*Olympus-BX51*) com luz polarizada transmitida. As principais feições petrográficas das lâminas foram fotografadas com ajuda do *software Soft Imaging System/FIVE (Olympus Soft Imaging Solutions)* para a aquisição de imagens no microscópio.

Neste estudo, foi efetuada apenas a análise quantitativa visando individualização da unidade foco deste estudo, e sua comparação mineralógicas com outras unidades da Bacia do Amazonas. Na descrição das lâminas de grãos, foram observadas feições diagnósticas características dos minerais pesados, como forma, cor, propriedades óticas, clivagem, inclusões, alteração, zoneamento, entre outros, descritas por Mange & Maurer (1992).

A descrição das lâminas delgadas visou descrever e identificar os constituintes do arcabouço da rocha sedimentar (grãos, matriz, cimento e poros) para posterior classificação no diagrama de Pettijonh *et al.* (1987) (Figura 7). De forma complementar, o grau de arredondamento foi determinado com auxílio da tabela comparativa de Powers (1953) (Figura 8).

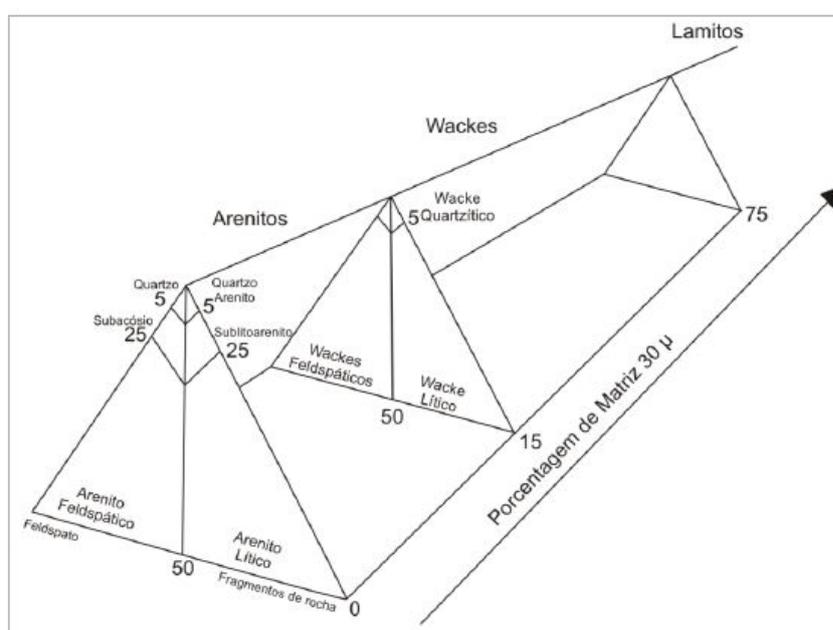


Figura 7: Diagrama de classificação das rochas sedimentares (Segundo Pettijonh *et al.* 1987).

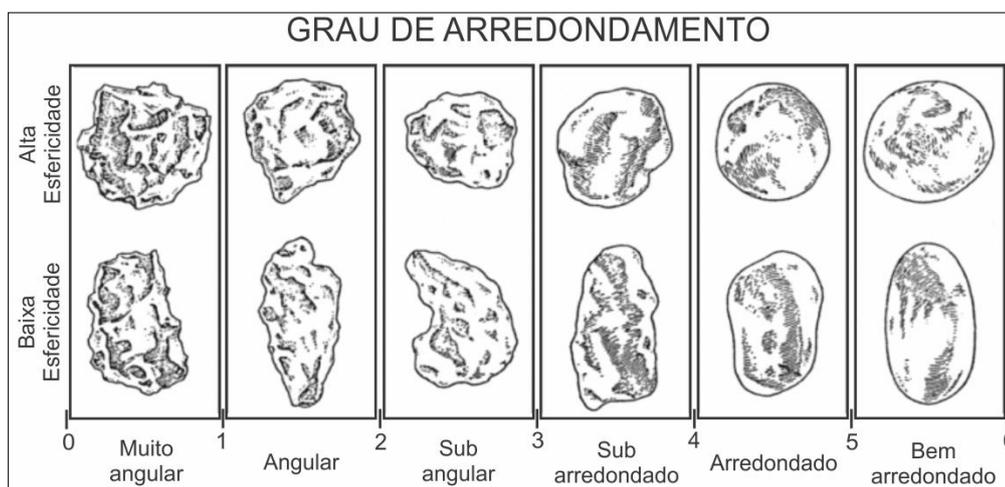


Figura 8: Tabela do grau de arredondamento e esfericidade. Fonte: Powers (1953)

4.8. Análise por Difração de Raios-X

A análise por difração de raios X das amostras (rocha total) visa determinar a composição mineralógica das rochas, principalmente as pelíticas, por meio dos argilominerais (Suguio, 1992). Foram coletadas um total de 68 amostras, das quais 16 foram escolhidas em função do posicionamento estratigráfico (Figura 4). Na análise de rocha total, coletou-se cerca de 5g em cada amostra, para uso no Difratorômetro *Lab X*, modelo XR-6000, do Laboratório de Difração de Raios-X do Departamento de Geologia da UFAM (DEGEO). O estudo dos argilominerais foi efetuado em frações finas, menores do que $2\mu\text{m}$, cuja preparação, ilustrada na Figura 9, incluiu as etapas: **1)** secagem das amostras em estufa com temperatura controlada a 60°C ; **2)** desagregação das amostras com água deionizada, em almofariz de cerâmica com pistilo de borracha; **3)** preparação no porta amostra para análise de Raios-x. Os argilominerais foram analisados em seu estado natural (seco ao ar).

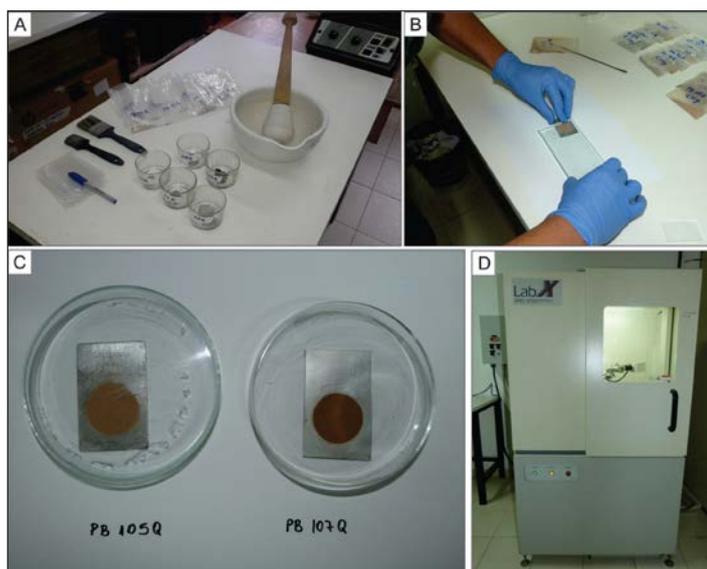


Figura 9: Preparação de amostras para análise por difração de raios-x. A) Obtenção da fração fina; B e C) Preparação de porta amostra para análises; C) Difratorômetro *Lab X*, modelo XR-6000.

4.9. Datação Palinológica

De um total de 67 amostras coletadas, somente 31 amostras foram selecionadas para o estudo palinológico, identificadas na Figura 4. Como critério de escolha das amostras, procurou-se obter amostras em intervalos aproximados de 10 em 10m ou intervalos ainda menores, dependendo das variações faciológicas identificadas. A amostragem recaiu preferencialmente nos sedimentos finos e de coloração mais cinza a preto, por constituírem sedimentos ricos em matéria orgânica e, em consequência, potencialmente portadores de grande número de palinomorfos.

As amostras palinológicas foram preparadas nos laboratórios de palinomacerais da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) utilizando as técnicas de processamento palinológico descritas inicialmente por Uesugui (1979), e que seguem as mesmas utilizadas por Dettmann (1963), Phipps & Playford (1984) e Wood *et al.* (1996).

Inicialmente foram fragmentadas 45 gramas de cada amostras em tamanhos 5,0 mm aproximadamente e transferidas para bécheres de polipropileno, devidamente identificados, para o primeiro estágio da maceração por acidificação. Após a desagregação mecânica do material seguida de uma sequência de ataques químicos, pôde-se obter um resíduo isento de material inorgânico e húmico, contendo apenas material orgânico concentrado em palinomorfos. A seguir descreveu-se resumidamente as etapas deste processamento químico (Figura 10), segundo as técnicas de Uesugui (1979):

O tratamento inicia adicionando às amostras, ácido clorídrico concentrado (HCl-32%) a fim de eliminar os possíveis carbonatos (2 horas). Em seguida a amostra sofre um ataque com ácido fluorídrico concentrado (HF-40%), visando a eliminação dos silicatos (12 horas). Posteriormente é adicionado à mesma ácido clorídrico diluído (HCl-10%), para eliminação do fluorsilicato, formado durante o processo anterior.

Ressalta-se que, ao final de cada etapa anteriormente descrita, procedeu-se a lavagem das amostras com água destilada, visando neutralizar as amostras, para posterior ataque químico. No intuito de eliminar a fração mais grossa do resíduo, e conseqüentemente proporcionar a concentração dos palinomorfos, fez-se uso de peneira com malha de 200 μm ; Em seguida, o material sofre ataque com ácido nítrico concentrado (HNO_3) juntamente com clorato de potássio (KClO_3) com duração de 15 minutos. Posteriormente é adicionado ao material cloreto de zinco (20 minutos), objetivando a separação do material pesado do material mais leve (separação por flotação) e, finalmente, o material resultante é peneirado em malha de 10 μm onde foram montadas as lâminas palinológicas.

4.9.1. Fotomicrografias

Com a utilização do fotomicroscópio (Axiophot) da Zeiss, e com uma câmera acoplada utilizando o programa Analsys, foram obtidas as fotos de palinomorfos. Os palinomorfos diagnósticos de idade e ambiente foram marcados através das coordenadas da lâmina (*England Finder*).

A maior parte das fotografias dos morfotipos foram confeccionadas com a objetiva de imersão de 100x, sendo algumas com objetiva de 40x devido as dimensões de alguns dos palinomorfos.

4.9.2. Análise Qualitativa

A análise qualitativa consistiu na individualização dos diferentes morfotipos presentes no material. Em estudos palinológicos essas análises são efetuadas através da observação das lâminas palinológicas à luz do microscópio óptico comum.

As análises foram realizadas utilizando um microscópio óptico do tipo AXIOPLAN da Zeiss, com objetivas de 20X e 40X, seguindo caminhos verticais consecutivos e realizando uma superposição ao redor de 10% dos campos observados.

Cada tipo encontrado foi identificado, fotografado e marcadas as suas coordenadas nas lâminas. Após a identificação taxonômica de cada morfotipo encontrado, procedeu-se à individualização de cada grupo de acordo com sua similitude morfológica (esporos de briófitas e pteridófitas, grãos de pólen e esporos; e grãos de afinidade incerta).

4.9.3. Análise Quantitativa

Os trabalhos bioestratigráficos, envolvendo a utilização das técnicas de tratamento de dados quantitativos, inclusive com o auxílio de programas de computação específicos para este fim, vêm demonstrando a vital importância do uso desta ferramenta na resolução de estudos detalhados de correlação estratigráfica.

Desta forma, a partir do tratamento estatístico dos morfogrupos presentes nos depósitos da Formação Andirá, será possível obter um panorama de toda a composição palinoflorística da seção sedimentar analisada.

Os dados para a contagem de frequência relativa foram obtidos através da contagem dos primeiros 200 palinomorfos encontrados na lâmina, por estar de acordo com as argumentações de Chang (1967), onde o autor demonstrou que ao contar-se 200 espécimes, a margem de erro será de apenas 5% da população presente.

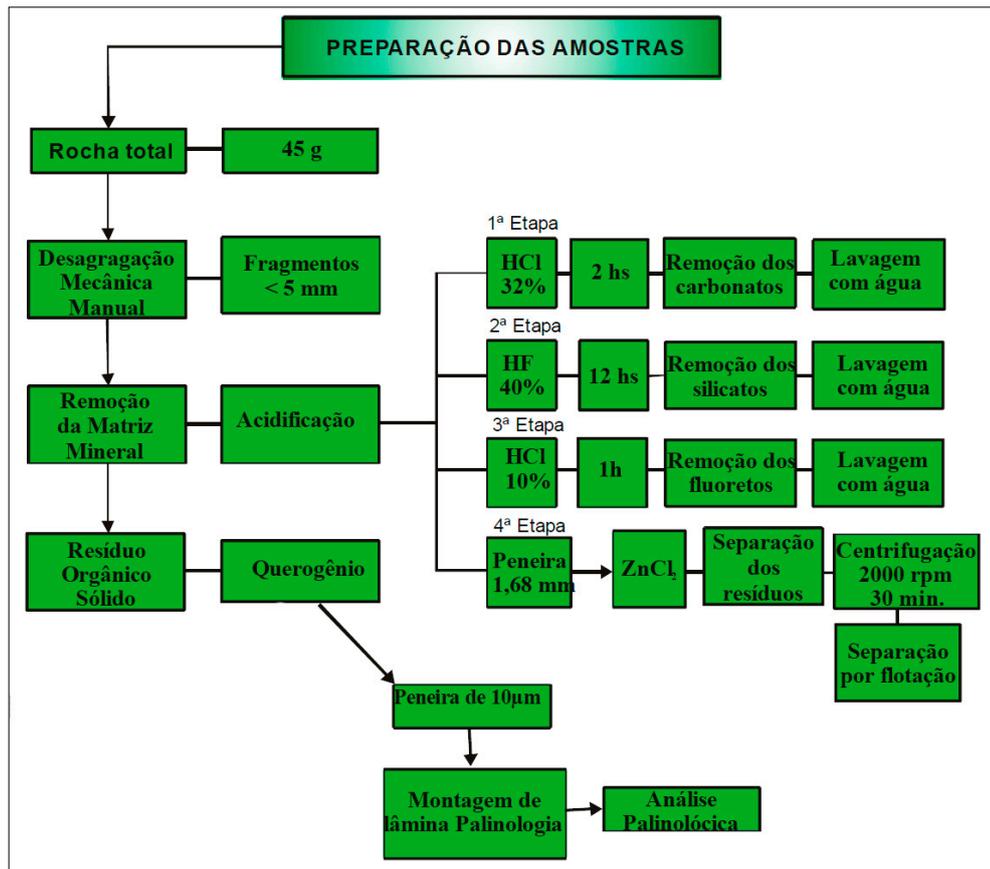


Figura 10: Organograma contendo todas as etapas empregadas na análise palinológica.

CAPÍTULO II – CONTEXTO GEOLÓGICO

5. BACIA DO AMAZONAS

A Bacia Sedimentar do Amazonas apresenta cerca de 500.000 km², sendo limitada ao norte e ao sul pelos escudos das Guianas e Brasil Central, respectivamente, a leste pelo Arco de Gurupá, que a delimita da Bacia do Marajó e, a oeste, pelo arco de Purus, que a delimita da Bacia do Solimões (Cunha, 2000) (Figura 11).

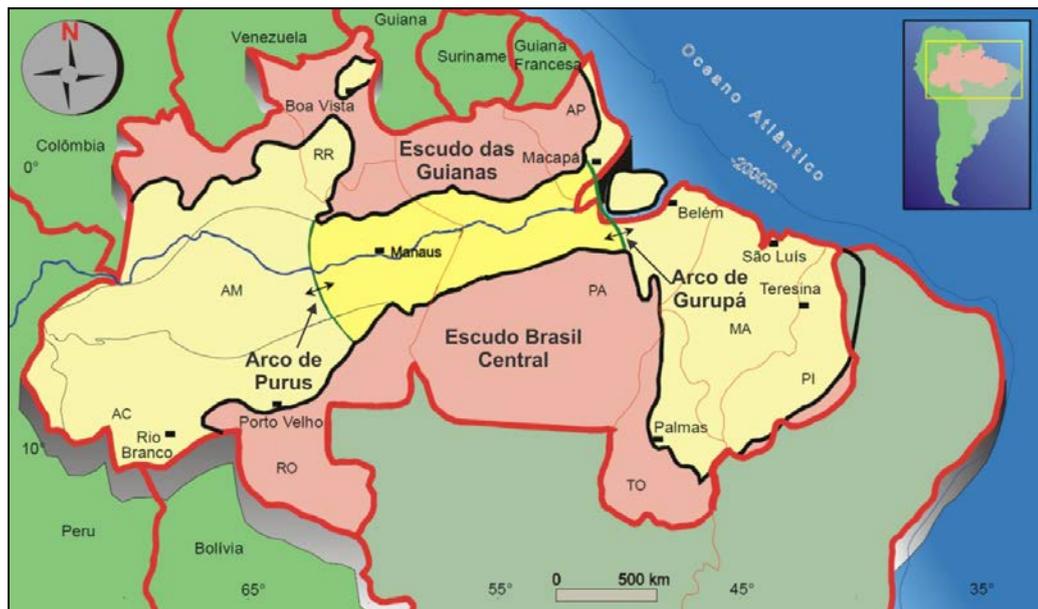


Figura 11: Localização da Bacia do Amazonas, delimitada pelos escudos das Guiana e Brasil Central e arcos estruturais (Cunha, 2000).

O preenchimento da Bacia do Amazonas é caracterizado por duas megassequências de primeira ordem, paleozoica e mesozoica-cenozoica, que totalizam mais de 5.000m (Cunha *et al.*, 2007) (Figura 12). A paleozoica tem sido mais estudada em função da indústria do Petróleo, sendo constituída por quatro sequências de segunda ordem: Sequência Ordovício-Devoniana (Grupo Trombetas), Sequência Devono-Tournaisiana (Grupos Urupadi e Curuá), Sequência Neoviseana (Formação Faro) e Sequência Pensilvaniano-Permiana (Grupo Tapajós), delimitadas por superfícies de descontinuidades (Cunha *et al.*, 2007). Destas, a sequêcia Pensilvaniano-Permiana é a mais expressiva em área aflorante, principalmente na borda sul da bacia, com as faixas das formações Monte Alegre e Itaituba (Matsuda *et al.*, 2010).

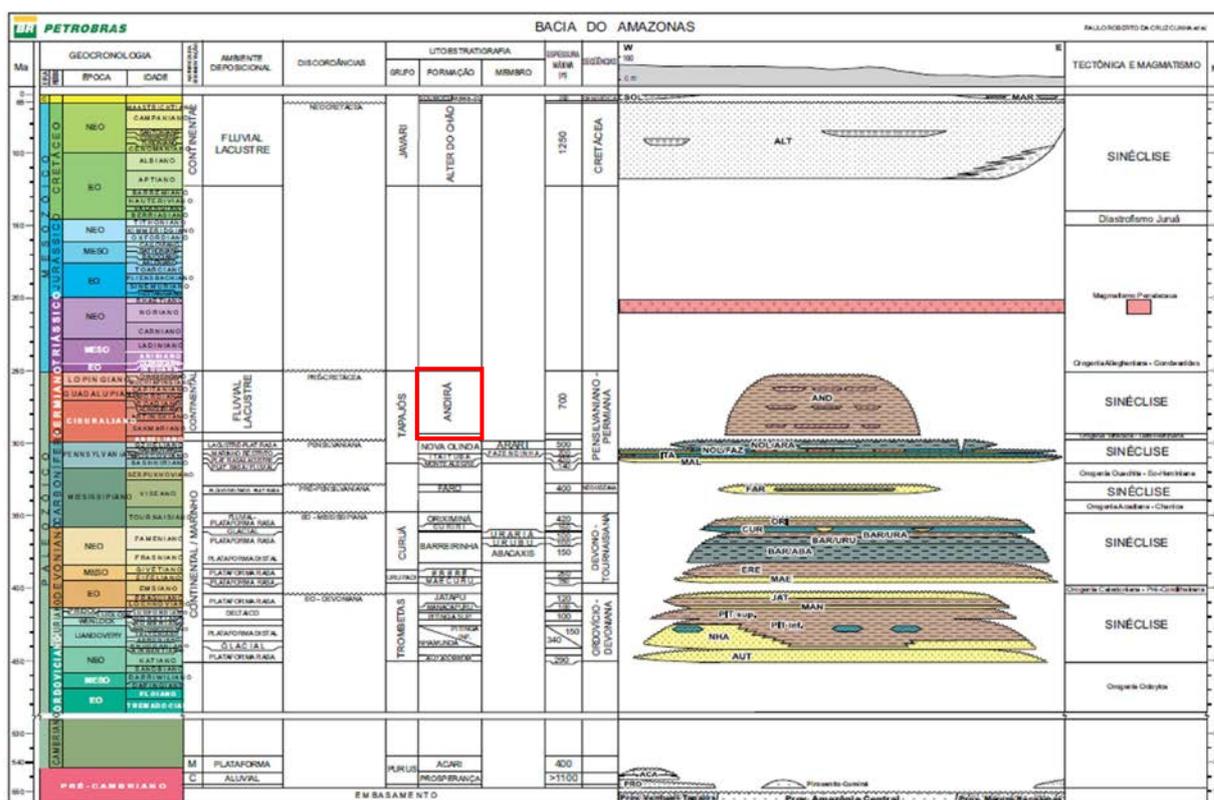


Figura 12: Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas (Fonte: Cunha *et al.*, 2007). Em vermelho destaque para a formação estudada.

5.1. Arcabouço estratigráfico da região de Autazes

Na região de Autazes, sudeste de Manaus, se concentra grande parte dos furos de sondagens da Empresa Potássio do Brasil que visa a exploração da silvinita contida na Formação Nova Olinda (Sequência Pensilvaniano-Permiana, Grupo Tapajós) por meio de mina subterrânea. O contexto estratigráfico desta região ainda é pouco conhecido devido a carência de dados geológicos disponibilizados para estudos sedimentológicos e estratigráficos. Dados do Projeto Amazonas (Potássio do Brasil, 2016) contemplam 43 furos de sondagens exploratórias efetuadas entre 2009-2016, que alcançaram os limites superiores da Formação Nova Olinda, a qual é recoberta nesta região por cerca de 2000m de rochas sedimentares das formações Andirá e Alter do Chão.

5.2. Formação Nova Olinda

A denominação de Formação Nova Olinda foi proposta por Kistler (1954) no relatório final do poço 1-NO-1-AM (Petrobras) como um intervalo constituído por camadas de evaporitos, sobreposto a Formação Itaituba. Posteriormente, a formação foi subdividida por Cunha *et al.* (2007) nos membros Fazendinha (basal) e Arari (Superior). O primeiro é composto de folhelhos, carbonatos, anidritas, halitas e, localmente silvinita, depositados em

ambientes marinho raso, de planície de *sabkha* e lagos hipersalinos, enquanto o segundo, constituído por folhelhos e siltitos, com pacotes de halitas cristaloblástica, também de ambiente marinho restrito. Em função da natureza dos sedimentos e datações palinológicas, Matsuda *et al.* (2004) reconheceram uma discordância na parte superior da Formação Nova Olinda, separando-a em duas unidades, superior (Membro Arari) e inferior (Formação Nova Olinda). Caputo (2014) propõe que a seção inferior, situada desde o marco 70 até o marco 07 de Szatmari *et al.* (1975) continue como Formação Nova Olinda, enquanto que a seção superior, discordante, seja elevada à categoria de Formação Arari.

A porção basal da Formação Nova Olinda aflora nas bordas da Bacia do Amazonas, mas grande parte ocorre apenas em subsuperfície (Caputo, 2014). Esta porção basal é composta por calcário fino (pobre em fósseis), folhelho variegado, anidrita ou gipsita branca a cinza clara, nodular ou laminada, além de arenito fino variegado e halita branca a rosa, em repetições cíclicas resultantes de mudanças rápidas do nível do mar e de flutuações sazonais e climáticas na região (Caputo, 2014). Ocorrem também depósitos de silvinita branca rósea na parte superior da unidade (Szatmari *et al.*, 1975). Estudos palinológicos de Playford & Dino (2000), permitiram posicionar a Formação Nova Olinda na porção superior do Mesopensilvaniano (eo-mesodesmoinesiano).

5.3. Formação Arari

Apresenta sedimentação cíclica (flutuações sazonais e climáticas) com menos influência marinha na deposição (Cunha *et al.*, 2007). Corresponde a fase regressiva continental clástica, contendo halita cristaloblástica em rede argilosa, depositados em ambiente fluvial-lacustre, o que indica redeposição de sal na bacia, proveniente da erosão desse material na borda leste (Gurupá) por águas continentais.

Neste período, a bacia de sedimentação encolheu e muito material depositado da Formação Nova Olinda foi parcialmente redepositado na Formação Arari, que contém halita (Caputo 2014), as quais gradam lateralmente para sais menos solúveis, como carbonatos e sulfatos (Szatmari *et al.*, 1975). Arenitos, geralmente de feições deltaicas e de leques aluviais são comuns na base desta Formação.

É atribuída à Formação Arari idade eopermiana (sakmariana-artinskiana?) por Playford & Dino (2000), baseados nos estudos da palinozona *Vittatina costabilis*, enquanto o hiato com a Formação Nova Olinda (sobrepota) pode exceder 20 Ma (Caputo, 2014). Anteriormente, Daemon & Contreiras (1971), Caputo *et al.* (1971), Carozzi *et al.* (1972), Szatmari (1975), consideravam este contato como concordante.

5.4. Formação Andirá

A Formação Andirá, proposta por Caputo *et al.* (1972), foi incluída por Caputo (1984) no Grupo Tapajós. O contato superior com a Formação Alter do Chão é descrito como discordante e subparalelo (Daemon & Contreiras, 1971, Caputo *et al.*, 1971, Carozzi *et al.*, 1972 e Szatmari *et al.*, 1975). Esta formação encerra a deposição paleozoica na Bacia do Amazonas, com sedimentação flúvio-lacustre e eólica (Caputo, 2014), representada por siltitos e arenitos avermelhados (*red beds*) e raras anidritas, que atestam uma mudança climática significativa, passando de clima frio para quente e árido (Cunha *et al.*, 2007). Ao final da deposição dos evaporitos, a bacia foi definitivamente isolada e submetida à erosão e diluição com sedimentação continental progressiva, culminando em assoreamento por sedimentos clásticos (Szatmari *et al.*, 1975). A Formação Andirá ocorre apenas em subsuperfície, nas porções mais centrais da bacia, com espessura de aproximadamente 700m (Cunha *et al.*, 2007).

Na região de Autazes, dados do relatório interno da Empresa Potássio do Brasil (2014) mostram sua continuidade lateral da Formação Andirá por cerca de 10 km nos furos analisados e mergulho suave das camadas para SE. É constituída por sedimentos siliciclásticos, onde predominam litotipos finos, carbonáticos, como calcilito marrom a cinza com intercalações métricas a decamétricas de calcarenito marrom a marrom amarelado. Além destes, correm também espessos pacotes de brecha sedimentar, com matriz suportada, contendo clastos angulosos de tamanho grânulo a seixos, de siltitos, arenitos e anidrita, depositados em ambiente continental lacustre e fluvial. Neste região, o contato com a Formação Alter do Chão sobreposta, é marcado por discordância angular erosiva. Segundo dados palinológicos de Daemon & Contreiras (1971) e Playford & Dino (2000), principalmente pela ocorrência de *Lueckisporites virkkae* e outros pólenes bissacados teniados, a idade da formação Andirá foi posicionada no Neopermiano. Porém, Rodrigues *et al.* (1993, 1997), através de dados isotópicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, mostram que a idade da formação Andirá remete ao Eopermiano.



Rio de Janeiro, 11 de junho de 2018.

DECLARAÇÃO

Declaro para os devidos fins que o manuscrito Fácies Sedimentares das formações Andirá e Arari, Permiano da bacia do Amazonas, com base em testemunhos de sondagem no Lago Soares, Amazonas de autoria de Ziomar Costa e Silva Junior, Emílio Alberto Amaral Soares , Rodolfo Dino & Luzia Antonioli foi submetido para avaliação no Anuário do Instituto de Geociências.

Ismar de S. Carvalho
Ismar de Souza Carvalho
Editor

CAPÍTULO III – ARTIGO

FÁCIES SEDIMENTARES DAS FORMAÇÕES ANDIRÁ E ARARI, PERMIANO DA BACIA DO AMAZONAS, COM BASE EM TESTEMUNHOS DE SONDAEM NO LAGO SOARES, AMAZONAS

Sedimentary facies of the Andirá and Arari formations, Permian of the Amazon basin, based on cores from Soares Lake, Amazonas

Ziomar Costa e Silva Junior ¹; Emílio Alberto Amaral Soares ², Rodolfo Dino ³ & Luzia Antonioli ⁴

^{1,2} Universidade Federal do Amazonas (UFAM), Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO), Departamento de Geociências (DEGEO), Av. Gal. Rodrigo O. J. Ramos, 3000, 69077-000, Manaus-AM, Brasil;

^{3,4} Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Rua São Francisco Xavier, 524, 20550-900, Rio de Janeiro-RJ, Brasil;

Resumo Este trabalho apresenta os resultados de análises sedimentológicas realizadas em aproximadamente 230m de testemunhos do furo de sondagem, PBAT-15-43, onde foram descritas as fácies sedimentares e relações de contato entre depósitos de leques aluviais (base) e fluviais (topo) das formações paleozoicas Andirá e Arari, respectivamente. Esta sondagem localiza-se no Lago do Soares (Autazes, Amazonas) e foi selecionada em função da qualidade dos testemunhos recuperados, disponibilizados pela empresa Potássio do Brasil. Sete fácies sedimentares foram identificadas e agrupadas em duas associações de fácies, denominadas informalmente de I e II. A associação I foi interpretada como de ambiente fluvial com depósitos de canal, planície de inundação e *crevasse splay*. A associação II foi interpretada como de ambiente de leques aluviais com depósitos de fluxos gravitacionais de detritos. Adicionalmente procedeu-se a análise palinológica destas formações que ratificaram a interpretação da fase final do processo de deposição no Permiano da região. A unidade inferior (Arari) mostrou-se estéril em palinóforos e nas amostras da unidade superior (Andirá) não foram detectados elementos do paleomicroplâncton marinho. A palinoflora recuperada é constituída principalmente pelas espécies *Lueckisporites virkkiae*, *Corisaccites alutas*, *Hamiapollenites andiraensis*, *H. karoensis*, *Vittatina costabilis*, *V. saccata*, *V. subsaccata* e *Tornopollenites toreutos*; secundadas por espécies dos gêneros *Punctatisporites*, *Verrucosisporites*, *Limitisporites*, *Cycadopites* e *Stratopodocarpites*. Os dados sedimentológicos, corroborados pelos palinológicos indicam que a sedimentação pode ser associada ao ambiente continental (fluvial-lacustre), definindo a idade Permiano Superior para as camadas da Formação Andirá.

Palavras-chave: Bacia do Amazonas; Formação Andirá; Formação Arari; Lago Soares; fácies sedimentares; palinologia; paleoambiente

Abstract This work presents the results of sedimentological and palynological analysis carried out in approximately 230m of core samples of the PBAT-15-43 borehole, where sedimentary facies and contact relationships were described among alluvial (base) deposits and fluvial (top) fans of the Paleozoic Andirá and Arari formations, respectively. This borehole is located at Soares' Lake (Autazes, Amazon) and it was selected in function of the good quality of the recovered cores, freely available by the Potassio do Brazil company. Seven sedimentary facies were identified and clustered in two facies associations, denominated informally as I and II. The facies association I were interpreted as fluvial with channel, flood plain and *crevasse splay* deposits. The association II were interpreted as an alluvial fan environment with deposits of gravitational debris flows. Additionally palynological analysis in these formations endorsed the age, and environmental interpretation of the final deposition process phase of the Permian in the area. The inferior unit (Arari) was barren in palynomorphs. The Andirá Formation, superior unit, contains a fairly well preserved palynoflora constituted mainly by the species *Lueckisporites virkkiae*, *Corisaccites alutas*, *Hamiapollenites andiraensis*, *H. karoensis*, *Vittatina costabilis*, *V. saccata*, *V. subsaccata* and *Tornopollenites toreutos*. Important species of the *Punctatisporites*, *Verrucosisporites*, *Limitisporites*, *Cycadopites* and *Stratopodocarpites* genera are also present. Elements of the paleomicroplâncton (acritarchs) were not detected. The sedimentologic data, corroborated by the recovered palynoflora indicate that the sedimentation can be associated to the continental (fluvial-lacustrine) environment, indicating a Late Permian age for the Andirá's strata formation.

Keywords: Amazon Basin; Andirá Formation; Arari Formation; Soares Lake; sedimentary facies; palynology; paleoenvironment

1 Introdução

A megassequência paleozoica da Bacia do Amazonas, subdividida nas sequências Ordovício-Devoniana, Devono-Toirnaiana, Neoviseana e Pensilvaniano-Permiana tem sido definida principalmente com base em dados de sondagens (Cunha *et al.*, 2007). Entretanto, essa megassequência ainda é pouco estudada, principalmente em função da dificuldade de acesso aos testemunhos, já que a maioria das perfurações é de uso restrito das empresas de petróleo e gás. Parte dela também aflora em faixas contínuas e paralelas nas bordas norte e sul da bacia, onde o acesso é dificultado pela escassez de estradas e densa cobertura de vegetação e solo. Desde a década de 1970, com a pesquisa da silvinita na sequência pensilvaniana-permiana em sondagens nos municípios de Nova Olinda do Norte e Itacoatiara, Amazônia Central, pela Petrobrás Mineração S.A (PETROMISA), a prospecção deste bem mineral tornou-se potencialmente interessante, em função da dependência do país à importação de cloreto de potássio, que hoje supera os 90% (Potássio do Brasil, 2014). Desde 2009, a empresa Potássio do Brasil é a nova detentora dos direitos de exploração deste recurso mineral e já executou 43 sondagens exploratórias profundas em Autazes, totalizando mais de 34.000m perfurados. Preliminarmente, os dados indicam a descoberta de uma reserva mineral de potássio (silvinita), de classe mundial, na profundidade entre 700 a 900m, inserida na Formação Nova Olinda (Grupo Tapajós). Entretanto, pouco se conhece sobre a unidade paleozóica sobreposta a camada de silvinita nesta região, incluindo dados faciológicos, posicionamento estratigráfico e relações de contato e, de forma generalizada, tem sido associada a Formação Andirá. Para tal propósito, foi estudado aproximadamente 230m (intervalo 631,93 a 397,67m) do Furo PBAT-15-43, situado acima da camada de silvinita e localizado na região do Lago Soares, nordeste de Autazes, Amazonas (Figura 1). Este furo, disponibilizado pela Potássio do Brasil, foi escolhido em função da qualidade dos testemunhos, que permitiram identificar os conjuntos de fácies sedimentares e eventos relacionados a deposição, bem como o posicionamento estratigráfico e os processos diagenéticos superimpostos.

1.1 Contexto estratigráfico da região de Autazes (Amazônia Central)

O preenchimento sedimentar da Bacia do Amazonas é baseado principalmente em dados de furos de sondagens, sendo caracterizado por duas megassequências de primeira ordem, paleozoica e mesozoica-cenozoica, que totalizam mais de 5.000m (Cunha *et al.*, 2007). A paleozoica tem sido mais estudada em função da indústria do Petróleo, sendo constituída por quatro sequências de segunda ordem: Sequência Ordovício-Devoniana (Grupo

Trombetas), Sequência Devono-Tournaisiana (Grupos Urupadi e Curuá), Sequência Neoviseana (Formação Faro) e Sequência Pensilvaniano-Permiana (Grupo Tapajós), delimitadas por superfícies de descontinuidades (Cunha *et al.*, 2007). Parte destas sequências afloram em faixas nas bordas norte e sul da bacia, sendo que as faixas das formações Monte Alegre e Itaituba, se destacam na borda sul.

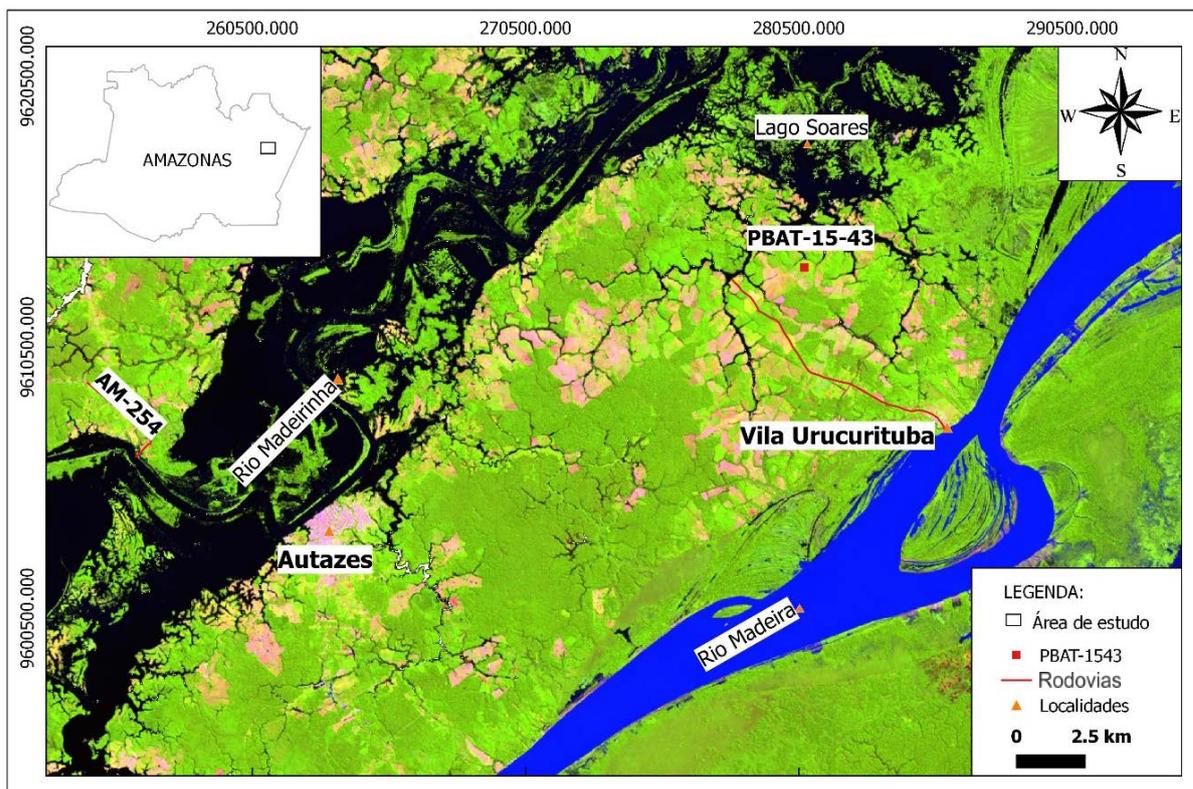


Figura 1 Mapa do Estado do Amazonas com a localização do furo PBAT-15-43 na região do Lago Soares, Nordeste de Autazes (Fonte: Imagem de Satélite LANDSAT 8, b654, 2017 – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)).

Na região de Autazes, sudeste de Manaus, se concentra grande parte dos furos de sondagens da Empresa Potássio do Brasil que visa a exploração da silvinita na Formação Nova Olinda por meio de mina subterrânea. O contexto geológico desta região ainda é pouco conhecido devido a carência de estudos sedimentológicos e estratigráficos detalhados. Dados do Projeto Amazonas (Potássio do Brasil, 2014) contemplam 43 furos de sondagens exploratórias efetuadas entre 2009-2016, que alcançaram os limites da Formação Nova Olinda, a qual encontra-se recoberta por aproximadamente 2000m de rochas sedimentares das formações Andirá e Alter do Chão.

A denominação de Formação Nova Olinda foi proposta por Kistler (1954) para o intervalo do poço 1-NO-1-AM (Petrobras), constituído por camadas de evaporitos, sobreposto a Formação Itaituba. Posteriormente, esta formação foi subdividida por Cunha *et al.* (2007) nos membros Fazendinha (basal) e Arari (Superior). O primeiro é composto de folhelhos,

carbonatos, anidritas, halitas e, localmente silvinita, depositados em ambientes marinho raso, de planície de *sabkha* e lagos hipersalinos, enquanto o segundo, é constituído por folhelhos e siltitos, com pacotes de halitas cristaloblástica de ambiente marinho restrito. Matsuda *et al.* (2004) reconheceram uma discordância na parte superior da Formação Nova Olinda, separando-a em duas unidades, Membro Arari (superior) e Formação Nova Olinda (inferior). Caputo (2014) propõe que a inferior, situada entre os marcos 70 e 07 de Szatmari *et al.* (1975) continue como Formação Nova Olinda, enquanto que a superior, discordante, seja elevada à categoria de Formação Arari. A porção basal da Formação Nova Olinda aflora nas bordas da bacia, sendo que grande parte ocorre apenas em subsuperfície. É constituída por calcário (pobre em fósseis), folhelho, anidrita ou gipsita branca a cinza (nodular ou laminada), além de arenito fino variegado e halita branca a rosa, em repetições cíclicas resultantes de mudanças rápidas do nível do mar e de flutuações sazonais e climáticas na região (Caputo, 2014). Na porção superior desta formação ocorrem depósitos de silvinita branca-róseo (Szatmari *et al.*, 1975). Estudos palinológicos de Playford & Dino (2000), posicionaram-na na porção superior do Mesopensilvaniano (eo-mesodesmoinesiano).

A Formação Arari corresponde a fase regressiva continental clástica, contendo halita cristaloblástica argilosa, depositados em ambiente fluvial-lacustre (Cunha *et al.*, 2007). Em função do encolhimento da bacia, material da Formação Nova Olinda foi parcialmente redepositado na Formação Arari (Caputo, 2014), que contém também carbonatos e sulfatos, além de arenitos deltaicos e leques aluviais na base (Szatmari *et al.*, 1975). Idade eopermiana (sakmariana-artinskiana?) foi atribuída a esta formação, com base na definição da palinozona *Vittatina costabilis* (Playford & Dino, 2000), cujo hiato com a Formação Nova Olinda pode exceder 20 Ma (Caputo, 2014).

A Formação Andirá, proposta por Caputo *et al.* (1972), foi incluída no Grupo Tapajós por Caputo (1984). Esta formação encerra a deposição paleozoica na Bacia do Amazonas, com sedimentação flúvio-lacustre e eólica (Caputo, 2014), representada por siltitos e arenitos avermelhados (*red beds*) e raras anidritas, que atestam uma mudança climática significativa, de frio para quente e árido (Cunha *et al.*, 2007). Ao final da deposição dos evaporitos, a bacia foi definitivamente isolada e submetida à erosão com sedimentação continental progressiva, culminando em assoreamento por sedimentos clásticos (Szatmari *et al.*, 1975). Esta formação ocorre apenas em subsuperfície, nas partes mais centrais da bacia, com espessura de aproximadamente 700 m. Daemon & Contreiras (1971) e Playford & Dino (2000), com base nos palinomorfos, principalmente pela ocorrência de *Lueckisporites virkkae* e outros grãos de pólen bissacados teniados, atribuem idade Neopermiano a Formação Andirá. Entretanto,

dados isotópicos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ de Rodrigues *et al.* (1993, 1997) indicam idade Eoperminano. Os estudos de Cunha *et al.* (1994) e Reis *et al.* (2006) consideram que os contatos desta unidade com as formações Nova Olinda e o Alter do Chão são discordante e subparalelo, respectivamente.

2 Materiais e Métodos

A análise de fácies do intervalo de 232,68m estudados do furo PBAT-1543 considerou principalmente a descrição detalhada das litologias, estruturas sedimentares, relações de contatos e conteúdo fóssilífero (quando presente), seguindo a metodologia de Walker (1992, 2006). Posteriormente, as fácies foram agrupadas em associações, cuja características e inter-relações permitiram a interpretação dos processos, ambientes e subambientes sedimentares em que a rocha foi gerada. Das 67 amostras coletadas, 35 amostras foram selecionadas para palinologia, consistindo de sedimentos finos cinza a preto, ricos em matéria orgânica e, portanto, potencialmente portadores de grande número de palinóforos, conforme distribuição ilustrada na Figura 2. As amostras palinológicas foram preparadas nos laboratórios de palinóforos da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) utilizando as técnicas de processamento palinológico descritas inicialmente por Uesugui (1979), e que seguem as mesmas utilizadas por Dettmann (1963), Phipps & Playford (1984) e Wood *et al.* (1996).

3 Fácies Sedimentares

No intervalo estudado do furo PBAT-15-43 foram individualizadas sete litofácies, segundo a metodologia de Walker (1992, 2006) e agrupadas nas unidades Inferior (Formação Arari) e Superior (Formação Andirá). A Inferior, definida entre 590,15 a 631,65m, é composta por 2 fácies, Conglomerado de Arcabouço Aberto – Cma e Conglomerado de Arcabouço Fechado – Cmf. A Superior, definida no intervalo entre 398,97-590,15m, é constituída pelas fácies indeformadas Pelito Laminado – Pl, Pelito Maciço – Pm, Arenito Maciço – Am, Arenito com Laminação Plano-Paralela – Ap, Arenito e Pelito com Laminação Heterolítica Inclinada – APhi) (Tabelas 1, 2 e Figura 2). Localmente, parte das fácies da unidade Superior apresenta-se deformada, exibindo laminação convoluta, estruturas de sobrecarga e diques clásticos, entre outros. No local do furo, a unidade superior é recoberta por espesso pacote sedimentar (intervalo de 398,97m até a superfície) constituído por camadas métricas a decamétricas de arenitos com intercalações de siltitos e argilitos, atribuídos a cobertura sedimentar cretácea-neógena (Potássio do Brasil, 2014).

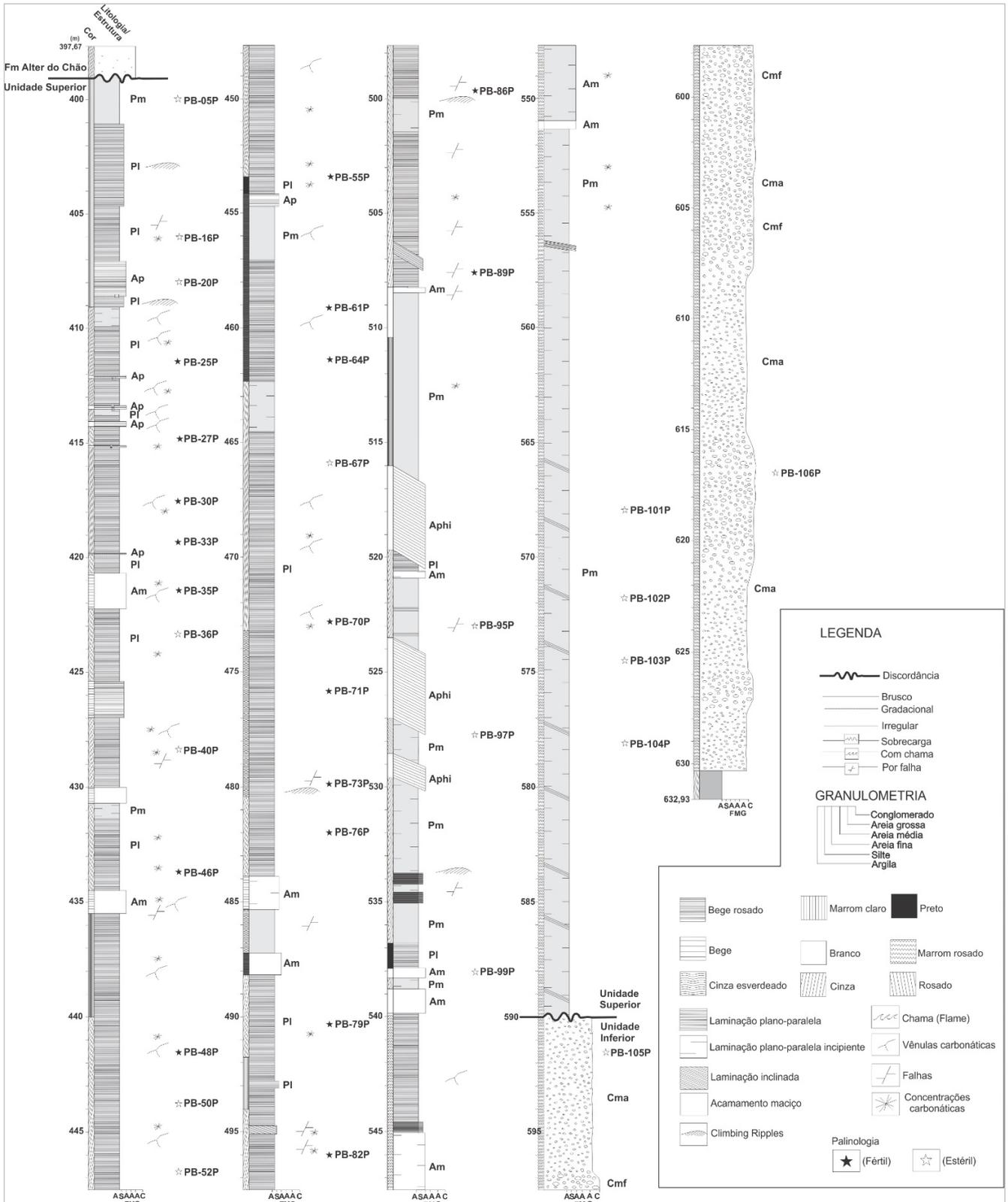


Figura 2 Seção colunar do Furo PBAT-15-43 (Autazes-AM) ilustrando a distribuição vertical das fácies sedimentares individualizadas, bem como as relações de contato entre as unidades Superior e Inferior e os locais de coleta de amostras.

Tabela 1 Resumo das fácies sedimentares grossas indeformadas da Unidade Inferior.

Fácies		Litologia	Estruturas Sedimentares	Outras Características	Contatos	Interpretação dos Processos
Fácies Sedimentares Grossas	Cma	Conglomerado de arcabouço aberto com clastos (cm a dm) diversos de anidrita e, subordinadamente, de siltitos e arenitos	Maciço	Camadas com granocrescência ascendente	Contato superior e inferior gradacional com a fácies Cmf	Rápida sedimentação, fluxos gravitacionais de detritos
	Cmf	Conglomerado de arcabouço fechado com clastos (cm a dm) de anidrita	Maciço	Feições de dissoluções nas bordas dos clastos	Contatos superior e inferior gradacional com a fácies Cma	Rápida sedimentação, fluxos gravitacionais de detritos

3.1 Fácies Grossas indeformadas – Unidade Inferior

3.1.1 Conglomerado Maciço de Arcabouço Aberto (Cma)

Esta fácies é representada por paraconglomerado de coloração marrom rosado, maciço, polimítico e intraformacional, de arcabouço aberto, cujos constituintes clásticos são suportados por matriz areno-siltosa com grânulos (Figuras 3A-G). Os clastos variam de centimétricos a decimétricos, são compostos predominantemente de anidrita e, subordinadamente, de pelitos e arenitos maciços e laminados, subarredondados a subangulosos, com menor proporção de angulosos (Figuras 3B-G). Em geral, esta fácies é constituída por camadas métricas (até 10 m) com variações no tamanho e quantidade de clastos, que definem um tênue padrão de estratos plano-paralelos (Figura 2).

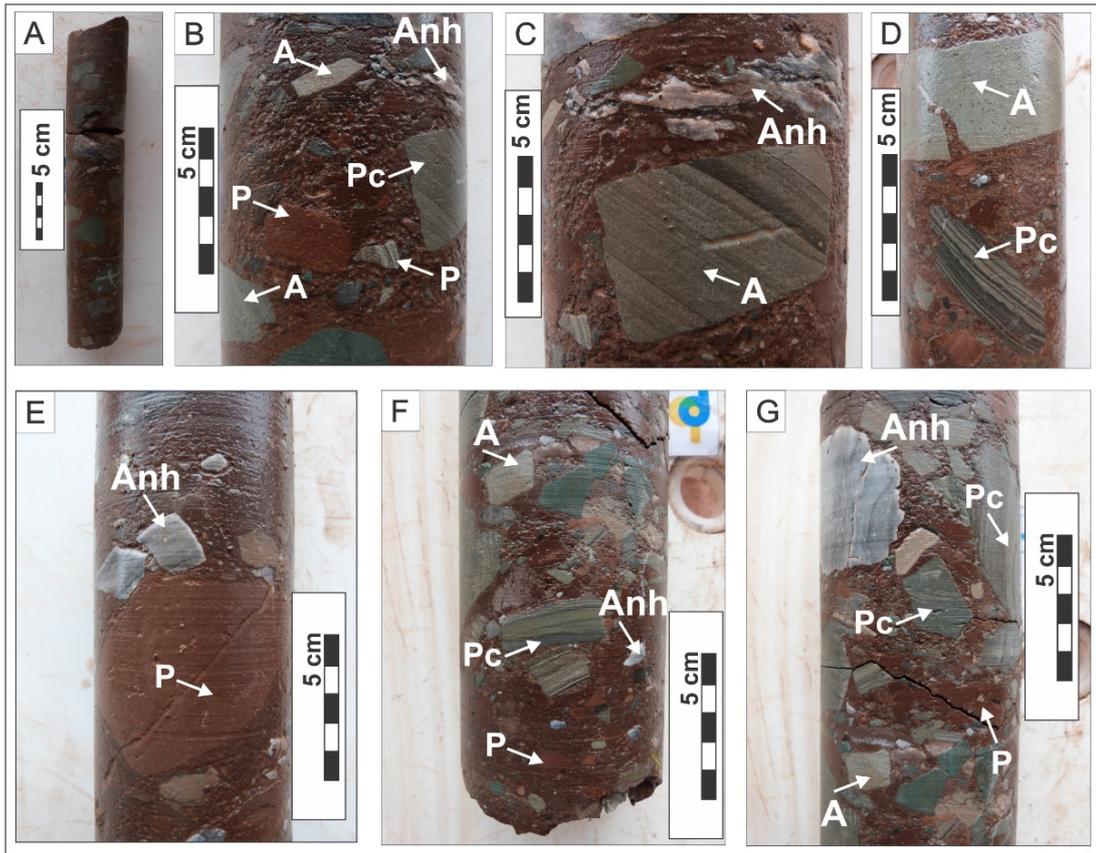


Figura 3 Fácies Cma. A – D) Paraconglomerado polimítico, com clastos de pelitos marrom (P) e cinza (Pc),

3.1.2 Conglomerado Maciço de Arcabouço Fechado (Cmf)

A fácies Cmf é representada por um ortoconglomerado de coloração cinza com porções marrom, maciço, oligomítico e intraformacional, de arcabouço fechado, com clastos suportados por matriz areno-siltosa intersticial (Figuras 4A-C). Os seixos são de anidrita cinza (maciça e laminada), subangulosos, com até 10 cm de comprimento, que definem contatos longitudinal e côncavo-convexo (Figura 4A). Parte dos clastos apresentam feições de dissolução nas bordas (Figura 4C).

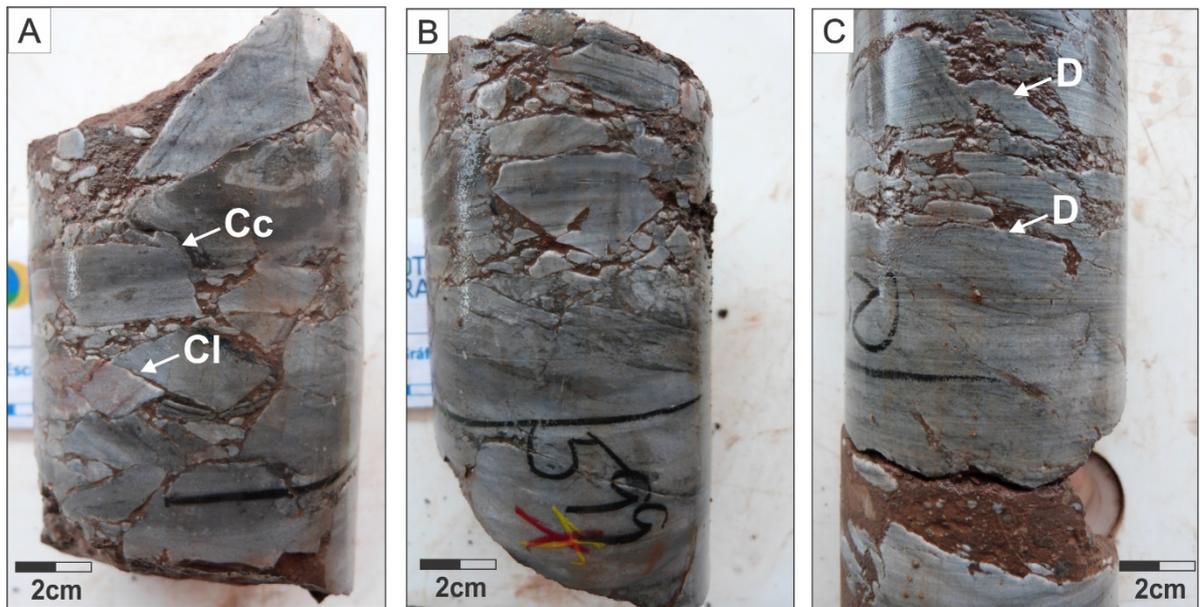


Figura 4 Fácies Cmf. A – C) Ortoconglomerado com seixos (centimétricos) de anidrita cinza (maciça e laminada – Anh), predominantemente subangulosos, que definem contatos longitudinal (Cl) e concâvo-convexo (Cc). Exibem feições de dissolução (D) nas bordas.

Interpretação das Fácies Grossas

Paraconglomerados e ortoconglomerados maciços, mal selecionados, tem sido associados por Miall (1996), a fluxos de detritos de alta intensidade. Bull (1977) também associa esses litotipos a fluxos de detritos (viscosos ou coesivos), em função da variação de tamanho dos clastos, matriz areno-siltosa suportada e ausência de estruturação. Em geral, o aspecto maciço é resultante do transporte dos clastos sob alta viscosidade, em função da elevado teor de matriz (areno-siltosa), comum nos depósitos gravitacionais (Reineck & Singh, 1980), denominados também de fluxos de detritos pseudoplásticos por Lowe (1975, 1982) e Miall (1996). Sem distinção, Fambrini *et al.* (2006), associa a gênese de conglomerados de arcabouço aberto e fechado, com clastos de até 1 metro de diâmetro, à fluxos de detritos de porções proximais de leques aluviais. Segundo Shultz (1984), o caráter proximal é função da ausência de matriz.

Tabela 2 Resumo das fácies sedimentares indeformadas da Unidade Superior.

Fácies	Litologia	Estruturas Sedimentares	Outras Características	Contatos	Interpretação dos Processos	
Fácies Sedimentares Deposicionais (Indeformadas)	PI	Pelito laminado variegado, com intercalações milimétricas arenosas	Laminação plano-paralela, localmente laminação cruzada cavalgante nas intercalações arenosas	Concentrações dispersas de cristais (mm) de carbonatos e no preenchimento de planos de falhas	O contato superior irregular-erosivo e inferior gradacional-irregular com a fácies Ap	Decantação a partir de suspensão
	Pm	Pelito variegado, com delgadas intercalações de areia fina. Localmente, intercalações de pelito escuro	Aspecto maciço e laminações plano-paralela e inclinadas, incipientes	Cristais (mm) de carbonatos dispersos e no preenchimento de planos de falhas	Contato superior e inferior brusco com as fácies PI e Am, respectivamente. Localmente, contato discordante com a fácies Cma sobreposta	Deposição por suspensão e rápido influxo trativo em área externa ao canal
	Ap	Arenito fino, bem selecionado	Laminação plano-paralela com intercalações delgadas (mm) de pelitos. Por vezes, ocorre laminação cruzada cavalgante	Porções carbonáticas, irregulares e dispersas	Contatos superior e inferior irregular e erosivo com a fácies PI	Deposição por suspensão e, por vezes, tração
	Am	Arenito fino a grosso, mal selecionado	Aspecto maciço, por vezes, com laminação plano-paralela incipiente	Planos de fraturas preenchidas por cristais de carbonato	Contatos superior e inferior brusco e irregular com as fácies PI e Pm.	Rápida deposição, sem tempo suficiente para a formação de estruturas sedimentares
	Aphi	Intercalações milimétricas de arenito bege, muito fino a fino com pelito cinza escuro	Laminação plano-paralela, por vezes, ondulada e inclinada	Concentrações carbonáticas irregulares dispersas e no preenchimento de fraturas	Contatos superior e inferior brusco com as fácies PI e Pm	Alternância de processos de suspensão e tração

3.2 Fácies Finas indeformadas – Unidade Superior

3.2.1 Pelito Laminado (PI)

A fácies PI é a mais representativa do furo estudado, sendo constituída por pelitos variegados (cinza, cinza esverdeado e marrom rosado), com laminação plano-paralela, definida por intercalações milimétricas de arenito fino (Figuras 5A-D). Localmente, são observadas intercalações milimétricas de arenito fino com laminação cruzada cavalgante (Lcv) (Figura 5B). Esta fácies exibe contato superior por sobrecarga e inferior gradacional-irregular com a fácies Ap. Por vezes, falhas deslocam as laminações (Figura 5C) e cristais carbonáticos (aciculares e alongados) ocorrem dispersos (Figura 5E), por vezes, preenchendo

planos de microfalhas e microfraturas (Figuras 5C e F).

Interpretação

Pelitos com laminação plano-paralela podem ser interpretados como resultados da deposição por alternância de processos de suspensão e tração relacionadas a ambiente de maré (Miall, 1996). A migração de formas de leito é responsável pela formação de laminação cruzada cavalgante, onde o influxo de areias finas intercala-se com o pelito (Lindholm, 1987).

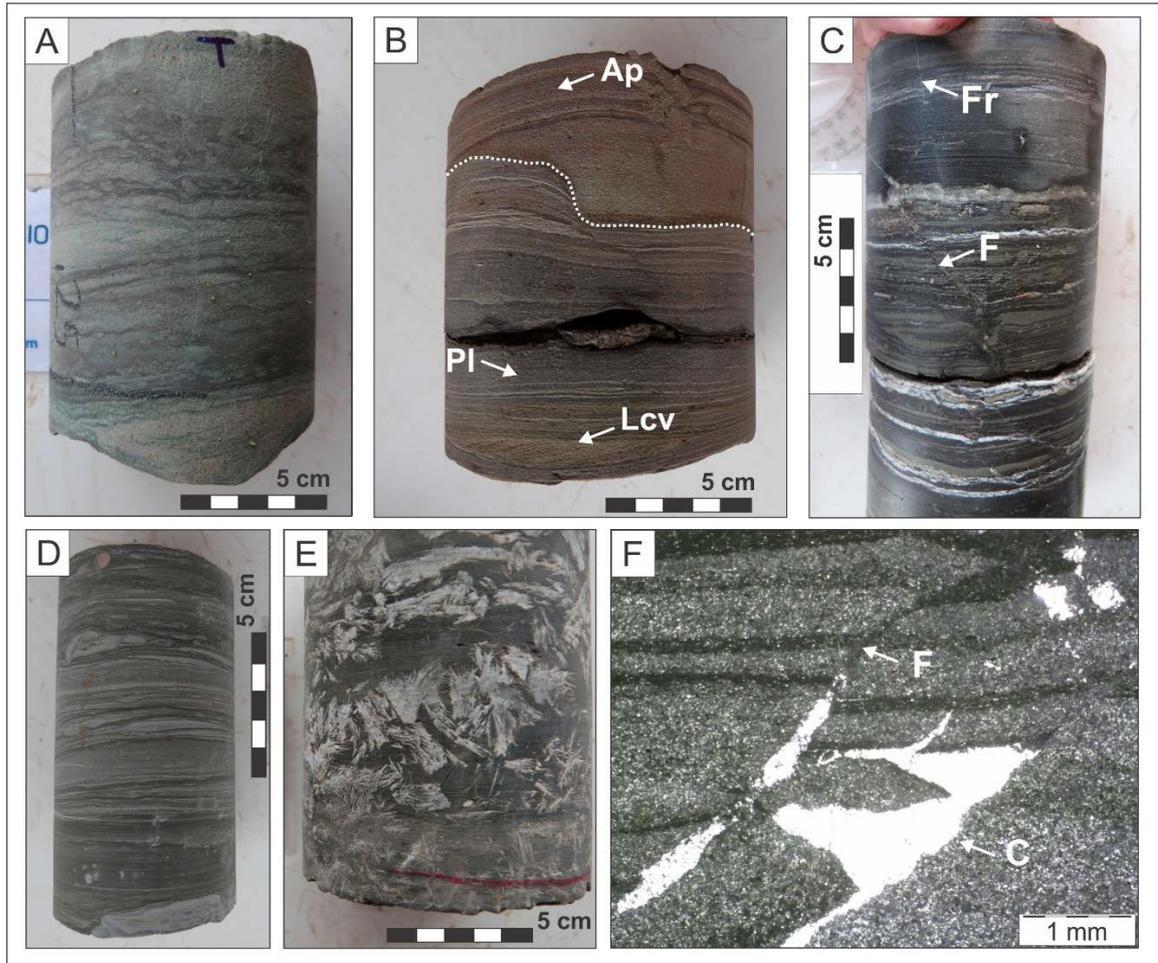


Figura 5 Fácies Pl. A, C, D) Pelito com laminação plano paralela definida por delgadas intercalações arenosas; B) Contato por sobrecarga (linha tracejada) entre as fácies Ap e Pl, sendo que a última apresenta intercalações arenosas (mm) com laminação cruzada cavalgante (Lcv); C e F) Microfalhas (F) e microfraturas (Fr) preenchidas por material carbonáticos que seccionam a laminação (Detalhe F, 10x-NP). NP - nicóis paralelos; E) Porções com concentrações localizadas de cristais carbonáticos aciculares e alongados.

3.2.2 Pelito Maciço (Pm)

Esta fácies é formada por pelito de cores variegadas (marrom, cinza, bege rosado), de aspecto maciço (Figuras 6A-C). Localmente, ocorrem porções com tênue laminação plano-paralela, marcada por intercalações milimétricas de areia fina (Figura 6A). Esporadicamente, porções centimétricas de pelito cinza com laminação inclinada (até 20°) se destacam no pelito maciço (Figura 6C). O contato superior e inferior é brusco com as fácies Pl e Am e

discordante com a fácies Cma. Por vezes, porções do pelito alterado, exibem coloração esverdeada. Nesta fácies ocorrem cristais carbonáticos dispersos (aciculares e alongados) (Figuras 6A e B) e, localmente, preenchendo planos de microfalhas.

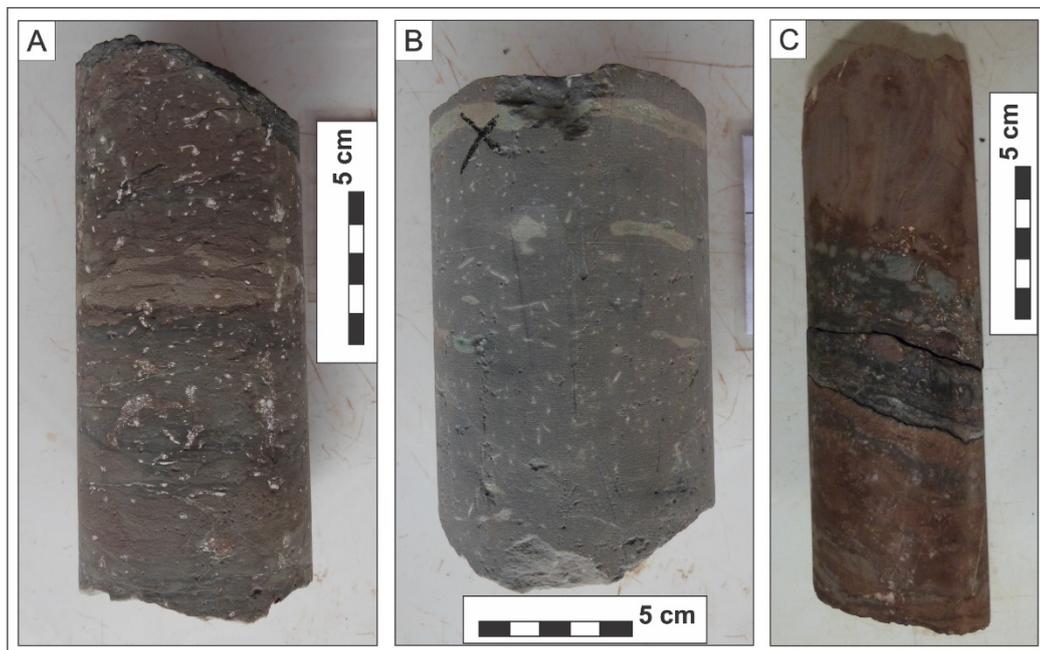


Figura 6 Fácies Pm. A e B) Aspecto maciço da fácies Pm, com delgadas intercalações de areia fina, com cristais carbonáticos (aciculares e alongados) dispersos; C) Intercalação centimétrica de pelito cinza, com laminação inclinada.

Interpretação

A fácies Pm representa a deposição a partir de suspensão em áreas de planícies inundadas, com rápidos influxos trativos de sedimentos externos ao canal, que permitiram a deposição de delgadas intercalações de areias (Miall, 1996; Tucker, 2003).

3.2.3 Arenito Maciço (Am)

Esta fácies é constituída por quartzo-arenito friável, predominantemente de aspecto maciço (Figuras 7A-C), exibindo localmente laminação plano-paralela incipiente (Figura 7A). Apresenta coloração bege rosada com tonalidades avermelhada a esbranquiçada (Figuras 7A-F), sendo constituído principalmente por grãos de quartzo finos a grossos, mal selecionados, que variam de subarredondados a arredondados, que definem um arcabouço fechado (Figuras 7D-F). Predominam contatos superior e inferior bruscos com as fácies Pl, Pm e Rd e, localmente, contato superior irregular por falha com a fácies Pl (Figura 7C).

Interpretação

A deposição da fácies Am pode estar associada à rápida sedimentação, com a

obliteração total de estruturas primárias em zonas com elevada taxa de acumulação de sedimentos (Miall, 1996).

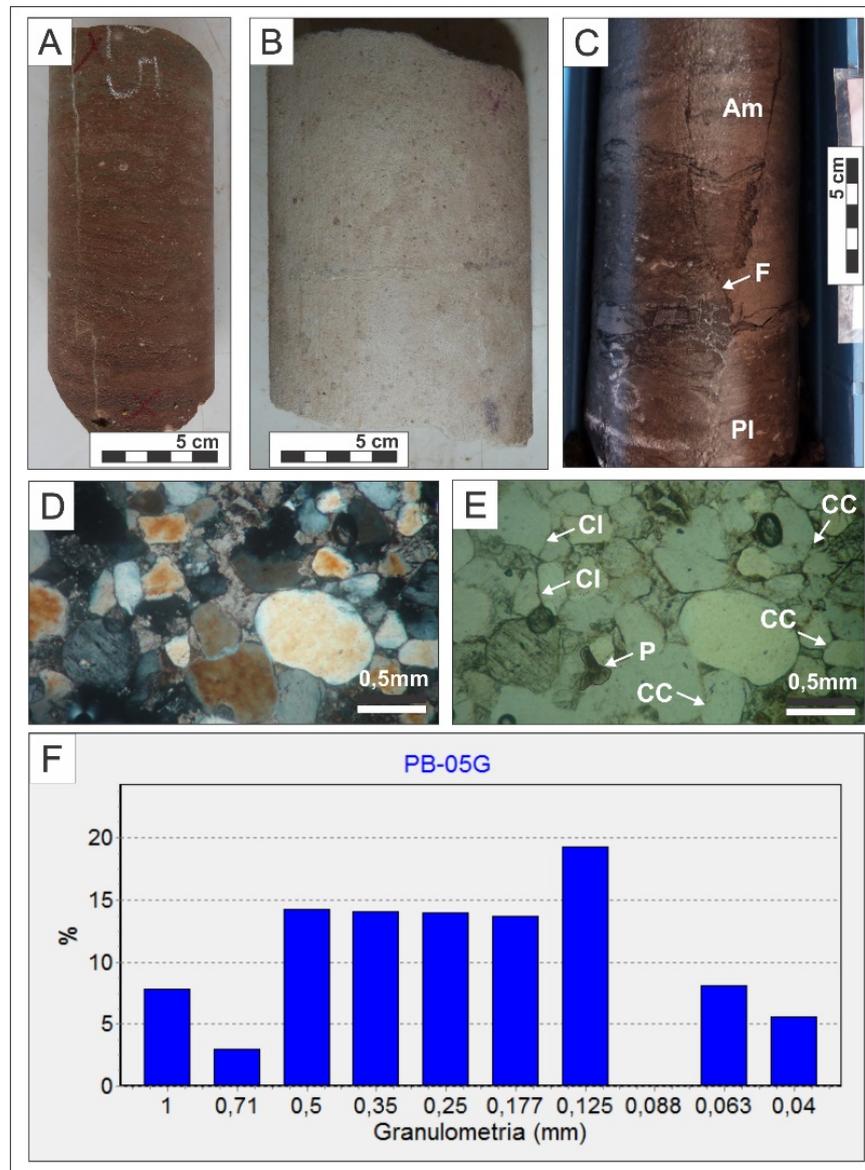


Figura 7 Fácies Am. A-B) Arenito fino a grosso de aspecto maciço, por vezes com laminação plano-paralela incipiente; C) Contato lateral por falha com a fácies Pl; D) Fotomicrografia mostrando grãos de quartzo-arenito mal selecionado, que varia, de subarredondados a arredondados, com arcabouço fechado (5x-NX). E) Arenito com arcabouço fechado exibindo principalmente contatos longitudinais (Cl) e côncavo-convexos (Cc), além de poros (P) intergranulares e irregulares (5x-NP); F) Histograma de frequência simples, mostrando a predominância de arenitos fino a grosso. Siglas: NX – nicóis cruzados e NP – nicóis paralelos.

3.2.4 Arenito com Laminação Plano-paralela (Ap)

A fácies Ap é constituída por arenitos muito finos, bem selecionados, com grãos que variam de subarredondados a arredondados. Exibe coloração bege a avermelhado, com laminação plano-paralela (Figuras 8A-D) marcada por intercalações milimétricas de pelitos (Figuras 8B e C) e, por vezes, apresenta níveis com laminação cruzada cavalgante (Figuras 8A e C). Os contatos superior e inferior com a fácies Pl são predominantemente irregulares e

erosivos (Figura 8B), sendo que por vezes, o inferior com a fácies PI é marcado feições de sobrecarga com estrutura em chama (Ec). Localmente, ocorrem feições carbonáticas irregulares com até 1 cm de diâmetro (Figura 8D).

Interpretação

Esta fácies pode ser formada a partir de processos de deposição em formas de leito plano subaquosas em correntes de altas velocidades, durante regime de fluxo superior (Miall, 1996), com períodos de baixa energia e decantação de pelito.

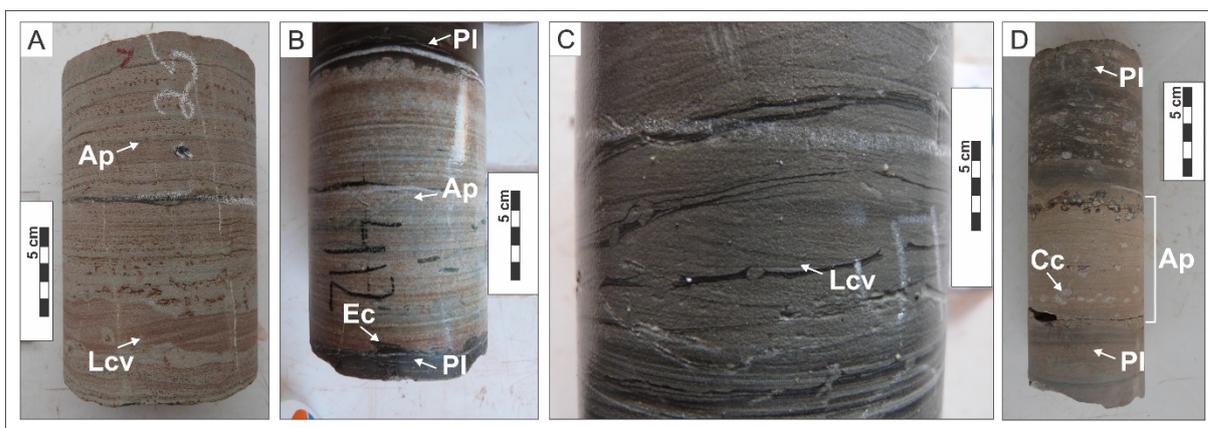


Figura 8 Fácies Ap. A) Arenito com laminação plano-paralela, localmente exibindo intercalações com laminação cruzada (Lcv); B) Contatos superior e inferior irregulares com a fácies PI, destacando as feições de sobrecarga, como estrutura em chama (Ec); C) níveis com laminação cruzada cavalgante (Lcv) individualizados por delgadas intercalações de pelito; D) Feições carbonáticas irregulares.

3.2.5 Arenito e Pelito com Laminação Heterolítica Inclinada (APhi)

A fácies Aphi é constituída por delgadas intercalações (principalmente milimétricas) de arenito bege e pelito cinza, depositados em sets inclinados, formando a laminação heterolítica inclinada. Estas laminações apresentam mergulhos que variam de 5 a 30° (Figuras 9A-C). As intercalações entre no pelito e o arenito formam pares, com ciclos granodecrescentes. O arenito é predominante, sendo representado por lâminas milimétricas até 1 centímetro, constituído por grãos de quartzo finos a médios (0,062 até 1,00 mm), bem selecionados, que variam de subarredondados a subangulosos. Em geral, essa fácies exhibe contatos superior e inferior bruscos com as fácies Pm e PI.

Interpretação

A fácies Aphi pode ser interpretada como produto de processos de suspensão e tração em barras de acreção lateral, com inclinação de baixo ângulo (Thomas *et al.*, 1987), que gera a laminação heterolítica inclinada. O desenvolvimento desta estrutura em ambiente fluvial tem sido relacionado a sazonalidade (enchentes e vazantes) dos rios na Bacia (Soares *et al.*,

2010; Rozo *et al.*, 2012; Gonçalves Jr., 2013).

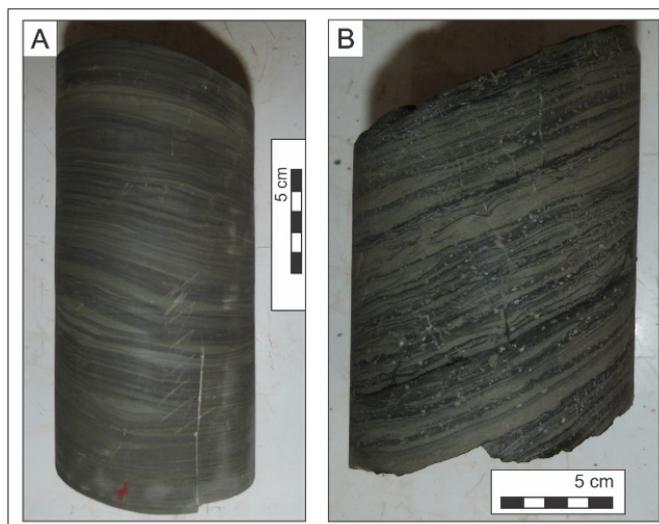


Figura 9 Fácies Aphi. A-B) Laminação heterolítica inclinada definida por intercalações milimétricas de arenitos e pelitos.

4 Associação de Fácies

Foram reconhecidas 2 associações de fácies, organizadas de acordo com a tabela 3, agrupadas em duas categorias principais, conforme sua natureza: I – deposicional fina (indeformada) e II – deposicional grossa (indeformada).

A associação I é representada pelo agrupamento de fácies: *Pl*, *Pm*, *Am*, *Ap* e *APhi*, onde predominam fácies indicativa de paleoambiente fluvial/lacustre. As fácies *Pl* e *Pm* caracterizadas por espessos pacotes de pelitos laminados e maciços indicam deposição por decantação em planície de inundação e/ou lagos, enquanto as fácies *APhi* e *Ap*, caracterizadas por espessas camadas de arenitos finos, maciços e com laminações plano-paralela e inclinadas, intercaladas pela fácies *Pl*, são indicativas de depósitos de canal e barras em pontal, característicos de rios meandrantés. Neste estilo fluvial, a barra em pontal caracteriza o elemento arquitetural de acreção lateral (Miall, 1992). Particularmente, os depósitos delgados das fácies *Ap* e *Am* que ocorrem intercalados as fácies pelíticas foram associados a ruptura de dique marginal, que desenvolveram *crevasse splay* inconfiados, conforme a classificação de Reineck & Singh (1973); Bristow *et al.* (1999); Elliot (1986); Gross *et al.* (2011).

A associação II, constituída pelas fácies grossas (*Cma* e *Cmf*) de orto e paraconglomerados (polimíticos e oligomíticos), é indicativa de depósitos de fluxos de detritos em leques aluviais.

Tabela 3 Resumo das associações de fácies sedimentares das unidades Superior e Inferior descritas no furo PBAT-15-43, da região de Autazes-AM (Amazônia Central).

UNIDADE	CARÁTER DAS FÁCIES	CONJUNTO DE FÁCIES	ASSOCIAÇÃO DE FÁCIES	OBSERVAÇÕES	INTERPRETAÇÃO
SUPERIOR	Fácies sedimentares finas	Pl, Pm	I	Planície de inundação	Ambiente Fluvial/Lacustre
		APhi, Ap, Pl		Canal fluvial e Barra de Pontal	
		Ap, Am		<i>Crevasse splay</i>	
INFERIOR	Fácies sedimentares grossas	Cma, Cmf	II	Fluxo de detritos	Leques aluviais

5 Palinologia

Das 35 amostras processadas do furo PBAT-15-43, 17 mostraram resultados palinológicos satisfatórios (cerca de 50%), sendo as 18 restantes estéreis. Todo o material estudado pertence litoestratigraficamente a Unidade Superior, a qual apresenta uma grande variedade litológica caracterizada por uma deposição predominantemente continental. As ocorrências dos espécimes são apresentadas na tabela 4, de acordo com o registro e qualidade do resíduo palinológico recuperado. Fotomicrografias de espécies selecionadas são apresentadas nas Figuras 10 a 12. As informações sobre proveniência dos espécimes ilustrados constam no Apêndice 1, de acordo com a unidade investigada.

5.1 Principais Características da Palinoflora

A Unidade Superior apresentou-se relativamente pobre em palinomorfos, e estes se encontram em razoável estágio de preservação com formas um tanto oxidadas, apesar de abundantes em alguns níveis. Desse modo, foi possível recuperar formas diagnósticas que permitiram o enquadramento no zoneamento proposto por Playford & Dino (2000b). A associação esporo-polínica identificada inclui 33 espécies (20 gêneros) de miósporos e algas do gênero *Botryococcus*.

A palinoflora recuperada, mesclada de elementos gondwânicos e euro-americanos, é dominada por grãos de pólen bissacados taeniados, principalmente dos gêneros *Lueckisporites* e *Corisaccites*, com as consistentes co-ocorrências dos gêneros *Hamiapollenites*, *Tornopollenites* e *Vittatina*. Os esporos com afinidades pteridófitas, se apresentam em frequências relativamente altas em alguns níveis da seção. Entretanto são pouco

diversificados, com predomínio dos gêneros *Punctatisporites*, *Verrucosisporites* e *Calamospora*. As formas monossacadas e bissacadas não estriadas (*Potonieisporites*, *Plicatipollenites* e *Limitisporites*) são constituintes menores da associação. Além disso, detectou-se a presença comum de algas (*Botryococcus*) indicativas de água doce e salobra. Não foram detectados componentes do paleomicroplankton marinho (acritarcos) na associação.

A palinoflora recuperada é essencialmente a mesma que a detectada por Playford & Dino (2000b) para a Formação Andirá e indicativa de idade Neopermiana. Igualmente apresenta grande semelhança com a associação presente na parte superior da Formação Pedra de Fogo da Bacia do Parnaíba (Dino *et al.*, 2002). Além disso, mostra estreita correlação com associações de idade Permiano Superior registradas em várias partes do mundo tais como: África (Jardiné, 1974; Broutin *et al.*, 1990); Oriente Médio (Broutin *et al.*, 1995) e Oeste da Europa (Visscher, 1973, 1974, 1980).

As espécies mais conspícuas da palinozona *Tornopollenites toreutos* (Playford & Dino, 2000b) são: *Tornopollenites toreutos*, *Hamiapollenites andiraensis*, *H. karoensis* e *Verrucosisporites insuetos*. No Brasil estas espécies só foram registradas, até o momento, com ocorrências bastante comuns no terço superior da Formação Pedra de Fogo (Bacia do Parnaíba – Dino *et al.*, 2002) e da Formação Andirá (Bacia do Amazonas – Playford & Dino, 2000b). Na Bacia do Paraná estas espécies estão virtualmente ausentes. Balarino (2014) criou a palinozona de associação *Tornopollenites toreutos* – *Reduviasporonites chalastus* (TC), reconhecida nos estratos da Formação Tunas (Claromecó Basin – Argentina). Esta palinozona apresenta essencialmente as mesmas espécies diagnósticas identificadas por Playford & Dino (2000b), e a autora traça uma correspondência temporal com as palinozonas: **Bacia do Paraná – Brasil** (possível correlação com a parte superior da palinozona de intervalo *Lueckisporites virkkiae* (Lv) de Souza & Marques – Toigo (2005). Ressalta-se aqui que Playford & Dino (2000b) consideram que a palinozona *Tornopollenites toreutos* situa-se estratigraficamente acima da palinozona (Lv). **Bacia do Paraná – Uruguai** (correlação com a porção basal da palinozona de associação *Striatoabieites anaverrucosus*–*Staurosaccites cordubensis* (AC) de Beri *et al.* (2011). **Bacia do Chaco-Paraná** (correspondência com a palinozona de associação *Striatites* (S) de Gutiérrez *et al.* (2003). **Bacias do Centro-Oeste – Argentina** (correlação com a parte superior da palinozona de associação *Lueckisporites-Weylandites* (LW) de Césari & Gutiérrez (2001). Para demais correspondências com palinozonas definidas em sequências do Permiano Superior ver Playford & Dino (2000b – fig.4).

Em termos de idade, todas estas palinozonas são consideradas, em função das espécies presentes como sendo de idade Guadalupiano – Lopingiano, ratificando assim a idade diagnosticada por Playford & Dino (2000b) para a Formação Andirá.

Em termos ambientais as evidências sedimentológicas e palinológicas indicam que o paleoambiente predominante durante a deposição da Unidade Superior era quente e seco. A abundância dos grãos de pólen bissacados-taeniados afins às coníferas indicam condições quentes em ambientes áridos a semi-áridos.

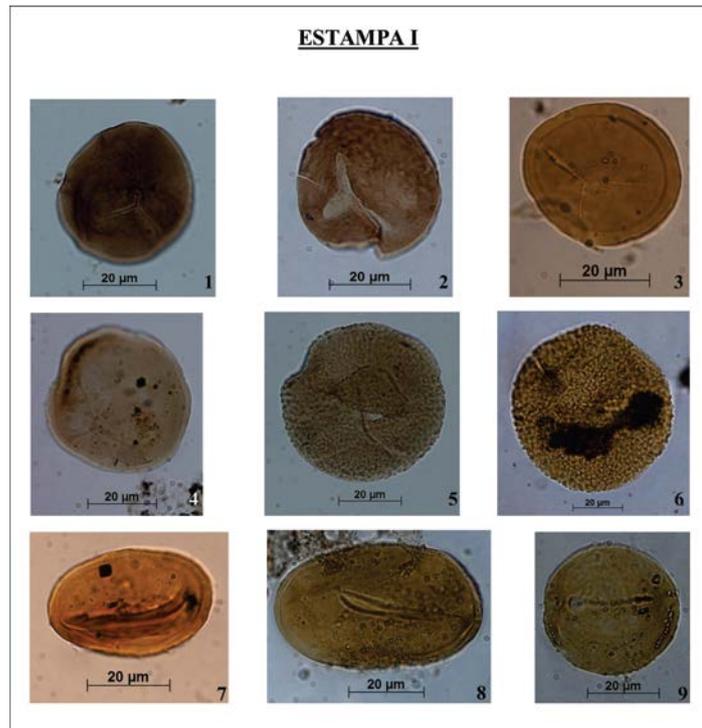


Figura 10 Fotomicrografia dos palinomorfos identificados nas amostras do furo PBAT-15-43. **1, 2, 3.** *Punctatisporites* sp. aff. *P. gretensis* Balme & Hennelly, 1956. 1, 2, VP, FM; 3, FP; **4.** *Punctatisporites* sp. Balme & Hennelly, 1956. VL; **5.** *Verrucosiporites insuetus* Playford & Dino, 2000. VP; **6.** *Verrucosiporites* sp. VL; **7, 8.** *Laevigatosporites vulgaris* (Ibrahim) Ibrahim, 1933. VP; **9.** *Laevigatosporites minor* Loose, 1934. VP. **Abreviações:** VP, vista proximal; VL, vista lateral; FM, foco mediano; FP, foco proximal.

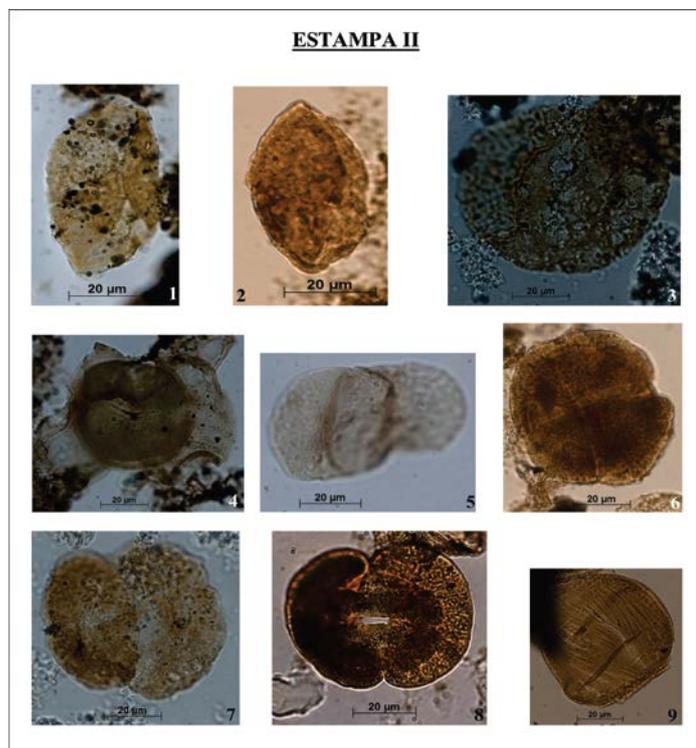


Figura 11 Fotomicrografia dos palinomorfos identificados nas amostras do furo PBAT-15-43. **1,** **2.** *Cycadopites* sp. cf. *C. follicularis* Wilson & Webster, 1946. 1, VD; 2, FM; **3.** *Plicatipollenites malabarensis* (R. Potonié & Sah) Foster, 1975. FM; **4.** *Limitisporites* sp. VP; **5.** *Pteruchipollenites* sp. FM; **6.** *Staurosaccites cordubensis* Archangelsky & Gamero, 1979 FM. **7.** *Corisaccites alutas* Venkatachala & Kar, 1966, FM; **8.** *Lueckisporites virkkiae*, R. Potonié & Klaus emend. Clarke, 1965. FM; **9.** *Vittatina* sp. aff. *V. fasciolata*, 1934 (Balme & Hennelly) Bharadwaj, 1962. VP. **Abreviações:** VD, vista distal; VP, vista proximal; FM, foco mediano.

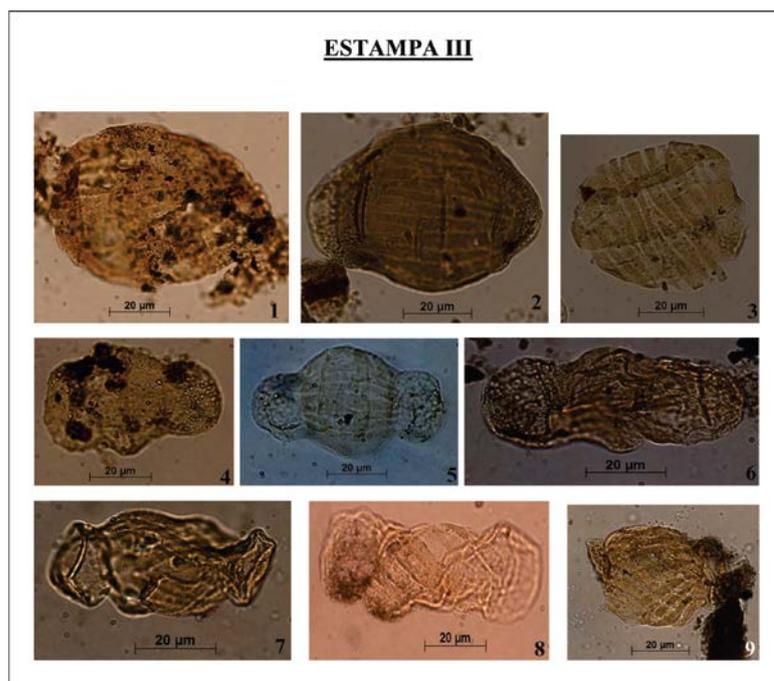


Figura 12 Fotomicrografia dos palinomorfos identificados nas amostras do furo PBAT-15-43. **1.** *Vittatina vittifera* (Luber) Samoilovich 1953. FM; **2.** *Vittatina subsaccata* Samoilovich, 1953. VP; **3.** *Vittatina costabilis* Wilson, 1962. FM; **4.** *Hamiapollenites karroensis* (Hart) Hart, 1964, FM; **5.** *Hamiapollenites andiraensis* Playford & Dino, 2000. FM; **6.** *Hamiapollenites* sp. cf. *H. fusiformis* Marques-Toigo emend. Archangelsky & Gamarro, 1979. FM; **7, 8, 9.** *Tornopollenites toreutos* Morgan, 1972. FM. **Abreviações:** VP, vista proximal; FM, foco mediano.

6 Modelo Depositional

As fácies sedimentares identificadas para as formações Andirá (Unidade Superior) e Arari (Unidade Inferior) no furo de sondagem PBAT-15-43 estudado, bem como a relação de contato entre elas, sugerem os processos de deposição e eventos relacionados abaixo.

A deposição das fácies grossas maciças (Cma e Cmf) da Formação Arari, pode ser associada a atuação de fluxos gravitacionais de detritos em sistemas de leques aluviais. Na Bacia do Amazonas, o desenvolvimento dos leques pode ser relacionado as fases de soerguimento e de continentalização, os quais estão associados à mudanças climáticas e a orogenia Tardi-Herciniana (Figura 13A). Esses processos induziram a regressão marinha e resultou no retrabalhamento de pacotes de arenitos, siltitos, halitas e anidritas cristaloblásticas da Formação Nova Olinda, que foram soerguidos nas bordas da bacia e redepositados nas áreas mais centrais (Szatmari *et al.*, 1975; Silva, 1996; Cunha *et al.*, 2007). A deposição foi contínua e resultou no empilhamento de camadas métricas, com variações no tamanho e quantidade de clastos, que definem um tênue padrão de estratos plano-paralelos. A ausência de estruturas internas pode ser resultante de transporte dos clastos sob alta viscosidade, em função do elevado conteúdo de matriz, comum em depósitos gravitacionais (Rossetti, 1999). Posteriormente, a bacia passou por um período de soerguimento, com erosão parcial do

sistema de leques e desenvolvimento de discordância (Figura 13B). Nova fase de subsidência na bacia foi marcada pela gradativa da conexão com o mar aberto e o estabelecimento de condições cada vez mais continentais, de clima árido, com a deposição de camadas detríticas da Formação Andirá (Figura 13C). Estes depósitos, carregados por águas continentais diluíram as salmouras bacinais, criando condições pseudo-marinhas (Szatmari *et al.*, 1975). As litofácies individualizadas no furo estudado, com predominância de pelitos (fácies Pm, Pl) e arenitos (fácies Am, Ap, APhi) subordinados, são indicativas de ambiente fluvial/lacustre, cujo material foi depositado por processos trativos e suspensivos em canal fluvial, planície de inundação (incluindo lagos) e diques marginais. A laminação heterolítica inclinada (fácies APhi) é indicativa de deposição de barras em pontal em sistema meandrante.

7 Discussões e Conclusões

No intervalo estudado do furo PBAT-15-43 foram definidas 2 conjuntos distintos de fácies sedimentares, que permitiram a individualização das unidades superior e inferior. A inferior é constituída por fácies grossas (Cma e Cmf), as quais foram associadas a deposição por fluxos gravitacionais em ambiente de leques aluviais, desenvolvidos durante a orogenia Tardi-Herciniana. A superior, composta por fácies finas (Pl, Pm, Am, Ap e APhi), é representativa de paleoambiente fluvial meandrante (canal, planície de inundação-lagos e *crevasse splay*).

Dados palinológicos da unidade Superior permitiram posicioná-la no Permiano Superior, sendo portanto, associada à Formação Andirá. Este dado corrobora com os estudos palinológicos sobre esta unidade, obtidos por Daemon & Contreiras (1971), Picarelli & Quadros (1992) e Playford & Dino (2000). Além disso, a presença de algas de água doce (a salobra) e a ausência de palinomorfos marinhos corroboram com o paleoambiente fluvial proposto neste estudo, bem como nos trabalhos anteriores de Caputo *et al.* (1972), Szatmari *et al.* (1975), Santos *et al.* (1975), Caputo (1984), Matsuda *et al.* (2004), Cunha *et al.* (2007) e Caputo (2014). Como não foi obtida idade para a unidade inferior, devido seu posicionamento estratigráfico e fácies sedimentares, ela foi associada neste estudo à Formação Arari, corroborando com os estudos estratigráficos de Szatmari *et al.* (1975), Matsuda *et al.* (2004), Cunha *et al.* (2007) e Caputo (2014).

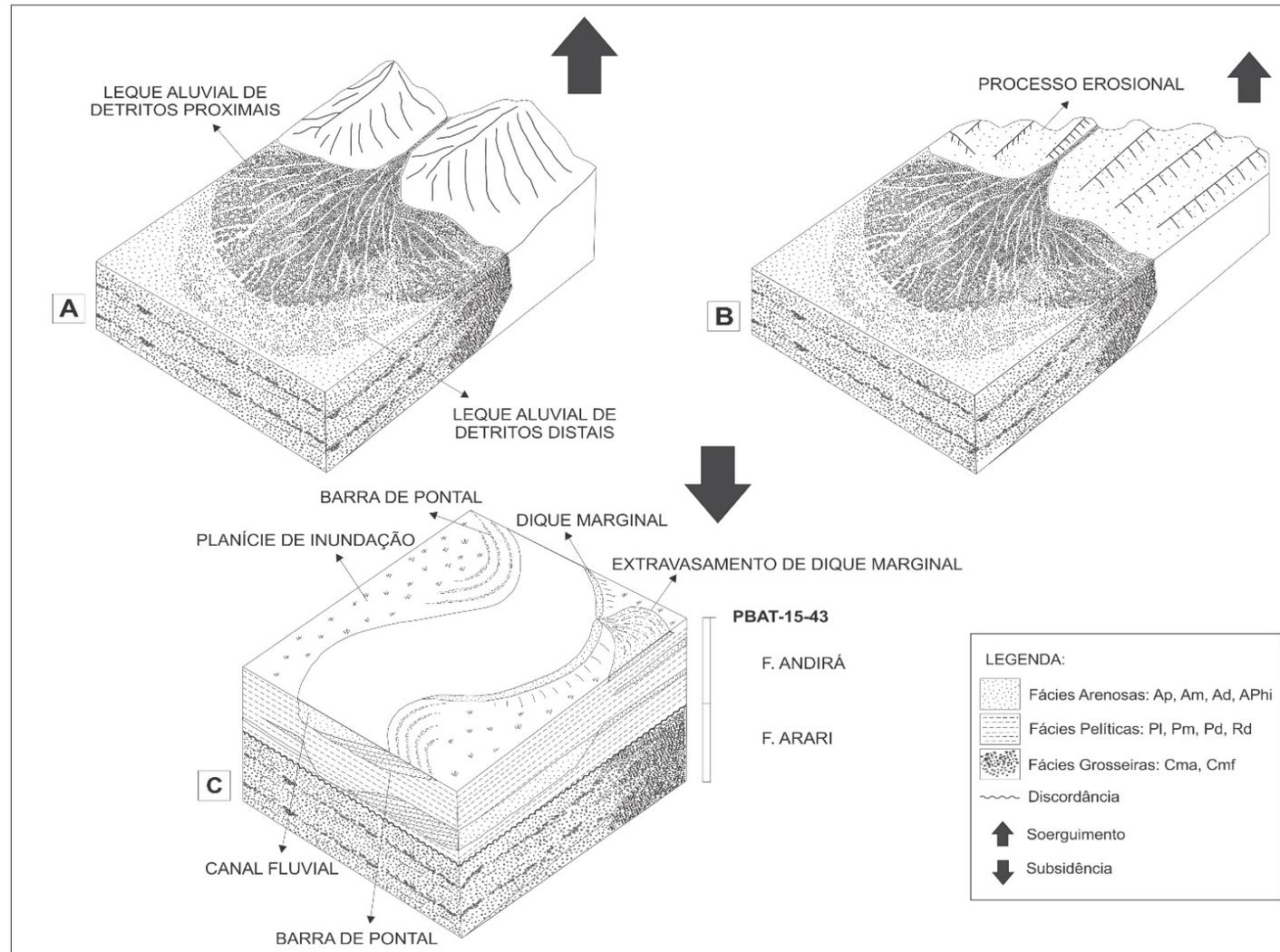


Figura 13 Bloco diagrama do modelo deposicional proposto para as formações Andirá e Arari, com base nos dados de litofácies e palinológicos obtidos no furo PBAT-15-43, da região de Autazes-AM. A) No Permiano, a bacia sofreu soerguimento com a orogenia tardi-hercíniana, que resultou na regressão marinha e deposição de leques aluviais da Formação Arari por meio de fluxos de detritos nas porções mais centrais da bacia; B) Novo soerguimento provocou erosão parcial dos leques com desenvolvimento de superfície erosiva; C) Nova fase de subsidência marcou o início da continentalização da bacia, com a implantação do sistema flúvio-lacustre e, conseqüentemente, deposição de sedimentos pelíticos e arenosos da Formação Andirá, com fácies características de ambientes de canal, planície de inundação e dique marginal, relacionado a um sistema fluvial meandrante.

8 Agradecimentos

O autor agradece ao CAPES pelo apoio financeiro e implementação da bolsa de estudo, assim como a Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e o Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO) pela infraestrutura oferecida. Em particular, a empresa Potássio do Brasil pela disponibilização dos testemunhos de sondagem e informações geológicas dos relatórios internos.

9 Referências

- Balarino, M.L. 2014. Permian palynostratigraphy of the Claromecó Basin, Argentina. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 38: 1-21.
- Beri, Á.; Gutiérrez, P.R.; Cernuschi, F. & Balarino, M.L. 2004. Palinoestratigrafía del Pérmico de Cuenca Paraná, Uruguay. *Actas del 11° Reunión de Paleobotánicos e Palinólogos*, Gramado, 29.
- Beri, Á.; Gutiérrez, P.R. & Balarino, M.L. 2011. Palynostratigraphy of the late Palaeozoic of Uruguay, Paraná Basin. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 167: 16–29.
- Bristow, C.S.; Skelly, R.L. & Ethridge, F.G. 1999. Crevasse splays from the aggrading sand-bed braided Niobara River, Nebraska: effect of base-level rise. *Sedimentology*, 46: 1029-1047.
- Bull, W.B. 1977. The alluvial fan environment. *Progress in Physical Geograph*, 1: 222-270.
- Caputo, M. V.; Rodrigues, R. & Vasconcelos, D. N. N. 1972. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém, 1972, *Anais*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 3: 35-46.
- Caputo, M. V. 1984. *Stratigraphy, tectonics, palaeoclimatology and palaeogeography of northern basins of Brasil*. University of California, Santa Barbara, Thesis (PhD), 586p.
- Caputo, M.V. 2014. Bacia do Amazonas, tectônica e magmatismo. *ResearchGate*. Preparado para a ANA, 151p.
- Collinson, J.D. 1996. *Alluvial sediments*. In: READING, H.G. Sedimentary environments: processes, fácies and stratigraphy. Blackwell Science. Oxford, p. 37-82.
- Cunha, P.R.C.; Gonzaga, F.G.; Coutinho, L.F.C. & Feijó, F.J. 1994. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8 (1): 47-55.
- Cunha, P.R.C.; Melo, J.H.G. & Silva, O.B. 2007. Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro, Brasil, *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15 (2): 227-251.
- Daemon, R.F. & Contreiras, C.J.A. 1971. Zoneamento palinológico da Bacia do Amazonas. São Paulo, *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia*, 3: 79-88.
- Elliott, T. 1986. *Deltas*. In: READING, H.G. (Ed.), *Sedimentary Environments and fácies*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, p. 113-154.
- Fambrini, G.L.; Almeida, R.P. & Fragoso-César, A.R.S. 2006. Estratigrafia e evolução paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã Ocidental, Rio Grande

- do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 36 (3): 550-565.
- Gonçalves Jr, E.S. 2013. *Terraços fluviais quaternários das regiões de Careiro-da-Várzea, Manaquiri, Careiro-Castanho e Autazes, Amazônia Central*. Universidade Federal do Amazonas, Dissertação de Mestrado, 127 p.
- Gross, M.; Piller, W.E.; Ramos, M.I. & Paz, J.D.S. 2011. Late Miocene sedimentary environments in south-western Amazonia (Solimões Formation; Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 169-181.
- Gutiérrez, P.R.; Archangelsky, S. & Césari, S.N. 2003. Contribución al conocimiento palinológico del Pérmico del pozo UTAL-La Estrella 1, Cuenca del Colorado, Plataforma argentina. In: 3° SIMPOSIO ARGENTINO DEL PALEOZOICO SUPERIOR, La Plata, Argentina, *Resúmenes*, 15.
- Kistler, P. 1954. Historical Résumé of the Amazon Basin. PETROBRAS/Renor, Belém. *Internal Report*,
- Lindholm, R.C. 1987. *A practical approach to sedimentology*. 1ª ed. London, Allen & Unwin. 37 p.
- Lowe, D.R. 1975. Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 22 (2):157-204.
- Matsuda, N.S.; Dino, R. & Wanderley Filho, J.R. 2004. Revisão litoestratigráfica do Grupo Tapajós, Carbonífero Médio - Permiano da Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 12 (2): 435-441.
- Miall, A.D. 1992. Alluvial deposits. In: WALKER, R.G., JAMES, N.P. (Eds.). *Facies Models. Response to Sea Level Change*. Geological Association of Canada, Ontario, p. 119-142.
- Miall, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analyses, and Petroleum Geology*. Springer Verlag, 582 p.
- Mills, P.C. 1983. Genesis and diagnostic value of soft-sediment deformation structures: a review. *Sedimentary Geology*, 35: 83-104
- Nichols, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. Library of Congress Catalog in Publication Data. 419 p.
- Phipps, D. & Playford, G. 1984. Laboratory techniques for extraction of palynomorphs from sediments. *Papers of Department of Geology*, University of Queensland, 11: 1-23.
- Picarelli, A.T. & Quadros, L.P. 1992. Bioestratigrafia do Carbonífero e Permiano das bacias do Amazonas, Solimões, Acre e Parnaíba, com base em fusulinídeos, Palinologia e conodontes. Rio de Janeiro. In: PETROBRAS/CENPES (*Relatório Interno*).
- Playford, G. & Dino, R. 2000a. Palynostratigraphy of upper Palaeozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil: part one. *Palaeontographica Abt. B.*, 255 (1-3): 1-46, pl. 1-13.
- Playford, G. & Dino, R. 2000b. Palynostratigraphy of upper Palaeozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil: part two. *Palaeontographica Abt. B.*, 255 (4-6): 87-145, pl. 1-14.
- Potássio do Brasil. 2014. *Relatório Final Positivo Único de Pesquisa – Sais de Potássio*, Setembro 2014, 286 p.

- Reineck, H.E. & Singh, I.B. 1973. *Depositional Sedimentary Environments*. New York, Springer-Verlag. 439 p.
- Reineck, H.E. & Singh, I.B. 1980. *Depositional Sedimentary Environments*. New York, Springer-Verlag. 551 p.
- Reis, N. J. & Ferreira, A.L. 2006. *Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas*. Rio de Janeiro: CPRM; CIAMA, 2006. Programa Geologia do Brasil. 125 p.
- Rozo, M. G.; Nogueira, A.C.R. & Truckenbrodt, W. 2012. The anastomosing pattern and the extensively distributed scroll bars in the middle Amazon River. *Journal of South American Earth Sciences*, 37: 1471-1488.
- Shultz, E.H. 1984. Subaerial debris-flow deposition in the Upper Paleozoic Cutler Formation, western Colorado. *Journal of Sedimentary Petrology*, 54: 759-772.
- Soares, E.A.A.; Tatum, S.H. & Riccomini, C. 2010a. OSL age determinations of pleistocene fluvial deposits in central Amazonia. *Academia Brasileira de Ciências*, 82 (3): 14-9.
- Szatmari, P.; Carvalho, R.S & Simões, I.A. 1975. Evaporitos na Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro, PETROBRAS. DEXPRO, p. 1281 (PETROBRAS. SIEX 103-5054).
- Thomas, R.G.; Smith, D.G.; Wood, J.M.; Visser, J.; Calverley-Range, E.A. & Koster, E.H. 1987. Inclined heterolithic stratification - terminology, description, interpretation and significance. *Sedimentary Geology*, 53: 123-179.
- Tucker, M.E. 2003. *Sedimentary rocks in the field*. England, John Wiley & Sons. 234 p.
- Visscher, H. 1973. The Upper Permian of Western Europe – a palynological approach to chronostratigraphy. In: LOGAN, A. & HILLS, L.V. (eds). *The Permian and Triassic Systems and their Mutual Boundary*. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs, 2, 200–219.
- Visscher, H. 1980. Aspects of a palynological characterisation of Late Permian and Early Triassic ‘standard’ units of chronostratigraphical classification in Europe. In: PROCEEDINGS OF THE IV INTERNATIONAL PALYNOLOGICAL CONFERENCE, 1976–77, Lucknow, India, 2. Birbal Sahni Institute, Lucknow, p. 236–244.
- Walker, R.G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: WALKER, R.G. & JAMES, N.P., (eds). *Facies Models - Response to sea Level Change*. Geological Association of Canada, p. 1-14.
- Williams, D.M. 1976. Clastic dykes from the Precambrian Porsangerfjord Group, North Norway. *Geological Magazine*, 113 (2): 169-176.
- Wood, G.D.; Gabriel, A.M. & Lawson, J.C. 1996. Palynological techniques-processing and microscopy. In: JANSONIUS, J., MCGREGOR, D.C. (eds.). *Palynology: Principles and Applications*, 1. American of Stratigraphic Palynologists Foundation, Dallas, Texas, p. 29-50.

Apêndice 1 Registro das espécies ilustradas da Formação Andirá recuperadas do furo PBAT-1543.

Espécies	Estampa / Figura	Profundidade (metros)	Número da Lâmina	England Finder
<i>Punctatisporites</i> sp. aff. <i>P. gretensis</i>	1/1	507,75	17098	C30/2
<i>Punctatisporites</i> sp. aff. <i>P. gretensis</i>	1/2	507,75	17098	F19/4
<i>Punctatisporites</i> sp. aff. <i>P. gretensis</i>	1/3	433,82	17083	Q43/1
<i>Punctatisporites</i> sp.	1/4	507,75	17098	M35
<i>Verrucosisporites insuetus</i>	1/5	502,20	17097	N32/4
<i>Verrucosisporites</i> sp.	1/6	419,42	17071	O37/2
<i>Laevigatosporites vulgaris</i>	1/7	419,42	17071	K38/1
<i>Laevigatosporites vulgaris</i>	1/8	433,82	17083	S42/3
<i>Laevigatosporites minor</i>	1/9	502,20	17097	F32/2
<i>Cycadopites</i> sp. cf. <i>C. follicularis</i>	2/1	502,20	17097	L37/1
<i>Cycadopites</i> sp.	2/2	507,75	17098	J32/3
<i>Plicatipollenites malabarensis</i>	2/3	507,75	17098	P32/1
<i>Limitisporites</i> sp.	2/4	461,40	17089	S27/3
<i>Pteruchipollenites</i> sp.	2/5	433,82	17083	R34/2
<i>Corisaccites alutas</i>	2/6	461,40	17089	B46/1
<i>Corisaccites alutas</i>	2/7	433,82	17083	K41/3
<i>Lueckisporites virkkiae</i>	2/8	502,20	17097	J45/2
<i>Vittatina</i> sp. aff. <i>V. fasciolata</i>	2/9	433,82	17083	G32
<i>Vittatina vittifera</i>	3/1	496,20	17096	L34/3
<i>Vittatina subsaccata</i>	3/2	461,40	17089	M21/3
<i>Vittatina costabilis</i>	3/3	507,75	17098	P46/4
<i>Hamiapollenites karroensis</i>	3/4	507,75	17098	R31/1
<i>Hamiapollenites andiraensis</i>	3/5	496,20	17096	L32
<i>Hamiapollenites</i> sp. cf. <i>H. fusiformis</i>	3/6	507,75	17098	R36/1
<i>Tornopollenites toreutos</i>	3/7	496,20	17096	C51/3
<i>Tornopollenites toreutos</i>	3/8	419,42	17071	P46
<i>Tornopollenites toreutos</i>	3/9	461,40	17089	Q21/1

CAPÍTULO IV

6 FÁCIES DEFORMADAS – UNIDADE SUPERIOR

No intervalo estudado do furo PBAT-15-43 foram individualizadas três litofácies, segundo a metodologia de Walker (1992, 2006) agrupadas na unidade Superior, compostas por Pelito Deformado – Pd, Arenito Deformado – Ad e Ritmito Deformado – Rd) (Tabela 1 e Figura 2).

Tabela 1: Resumo das fácies sedimentares deformadas da Unidade Superior.

Fácies	Litologia	Estruturas sin e pós-deposicionais	Outras Características	Contatos	Interpretação dos Processos	
Fácies Sedimentares Sin e Pós-deposicionais (Deformadas)	Pd	Pelito deformado, coloração cinza com tonalidade esverdeada	Laminação convoluta, estrutura em chama, <i>ball and pillow</i> , dique clástico e mistura de materiais	Falhas deslocando lâminas, gerando brechação	Contatos superior e inferior irregular marcado por feição de sobrecarga com as fácies Am e Pm	Sedimentação rápida gerando sobrecarga e/ou atividade sísmica
	Ad	Arenito muito fino a fino de coloração bege a rosado	Laminações convolutas e misturas de materiais	Falhas deslocando a laminação (gerando brechação) e preenchidas por carbonatos	Contatos superior e inferior irregular marcado por feições de sobrecarga com as fácies Pl e Ap	Sedimentação rápida gerando sobrecarga e/ou atividade sísmica
	Rd	Intercalações de arenito bege fino e pelito marrom	Laminação convoluta, <i>ball and pillow</i> , mistura de material e dique clástico	Falhas deslocando a laminação (gerando brechação)	Contatos superior e inferior marcado por feições de sobrecarga com as fácies Ap e Pm	Sedimentação rápida gerando sobrecarga e/ou atividade sísmica

6.1 Pelito Deformado (Pd)

Esta fácies é constituída predominantemente por pelito com delgadas intercalações de lâminas de areia muito fina, cuja associação definem estruturas de sobrecarga, como laminação convoluta, almofada e pseudonódulo (*ball and pillow*), dique clástico e mistura irregular de materiais (Figuras 13A-T). As laminações convolutas são formadas por microdobras anticlinais assimétricas e, por vezes, irregulares (Figuras 13A-I). Os pseudonódulos caracterizam-se por porções milimétricas de areia muito fina, na forma de

bolos concêntricos que penetram no pelito (Figuras 13H-L). Os diques clásticos, com até 10 cm de comprimento, não exibem estrutura interna e deformam a laminação ao redor (Figuras 13I, M-N). Misturas irregulares de arenito e pelito, de diversos tamanhos (Figuras 13F e L). Localmente, microfalhas deslocam e quebram as laminações, gerando porções brechadas, onde predominam intraclastos subangulosos a angulosos de arenitos e pelitos, de tamanhos variados (milimétricos a centimétricos) (Figuras 13N-T).

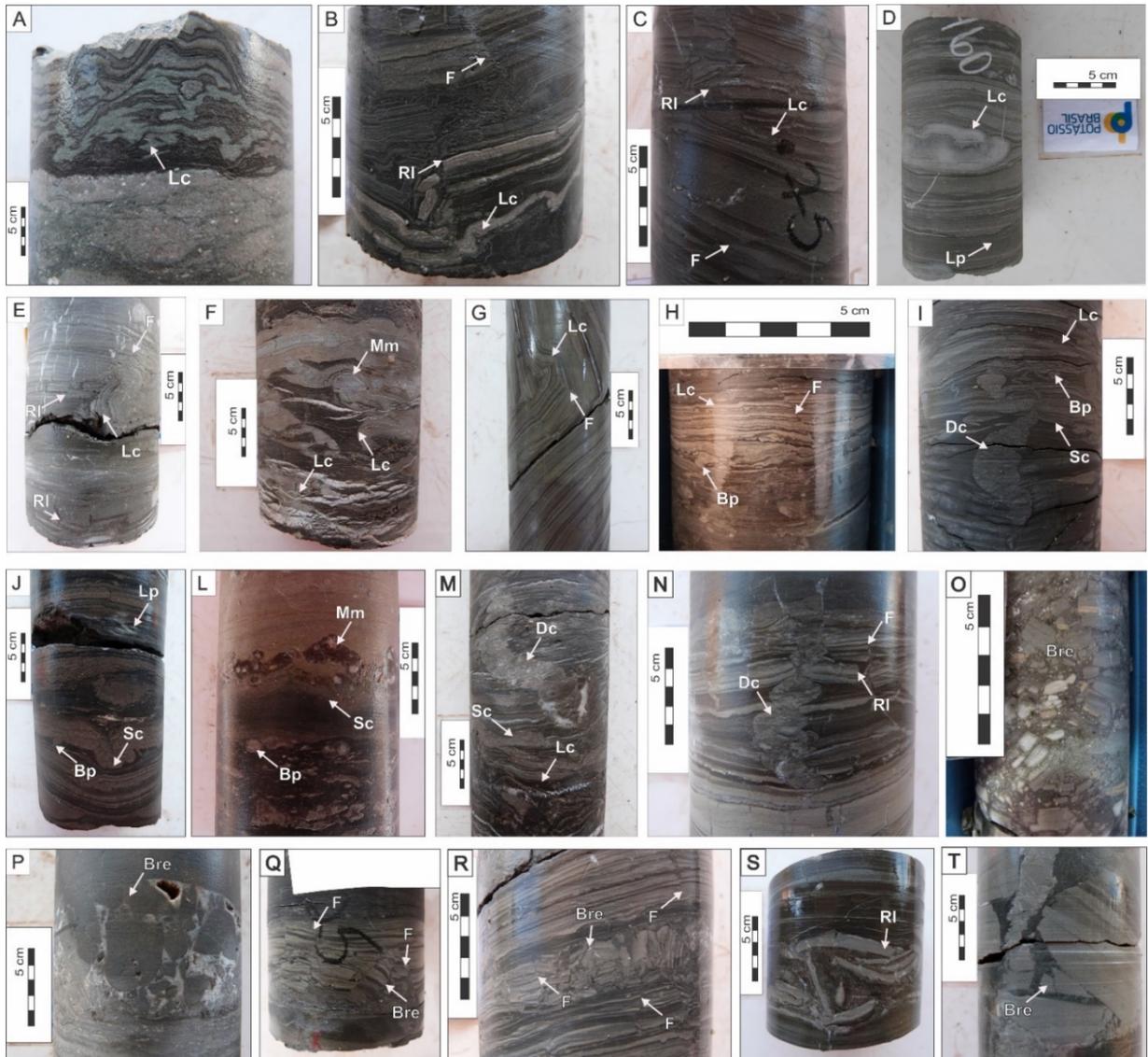


Figura 13: Fácies Pd. A – I) Laminações convolutas (Lc) com dobras assimétricas e irregulares; H – L) Feições de sobrecarga (Sc) e *ball and pillow* (Bp); I, M-N) Diques clásticos arenosos de formas irregulares (Dc); F-L) Misturas das litofácies arenito e pelito (Mm); N – T) Lâminas rompidas (RI) por microfalhas (F), gerando brechação (Bre).

6.2 Arenito Deformado (Ad)

Esta fácies, constituída predominantemente por arenito com intercalações de pelito, exhibe principalmente laminações convolutas (Figuras 14A e C). Associado ocorrem feições de

sobrecarga na interface arenito-pelito bem como porções irregulares (com cerca de 8 cm de diâmetro) de misturas entre as litofácies de arenitos e pelitos (Figura 14B). Localmente, ocorrem concentrações irregulares de anidrita, que variam de 1 a 8cm, que por vezes, mostram-se seccionadas por delgados diques clásticos arenosos (Figura 14B). Microfalhas, subverticais, quebram, deslocam e rotacionam os planos de laminação, gerando brechações (Figuras 14C e D). Planos de fraturas são também observados, preenchidos por carbonato (Figura 14D). Esta fácies exibe contatos superior e inferior marcados por feições de sobrecarga com as fácies Pl e Ap.

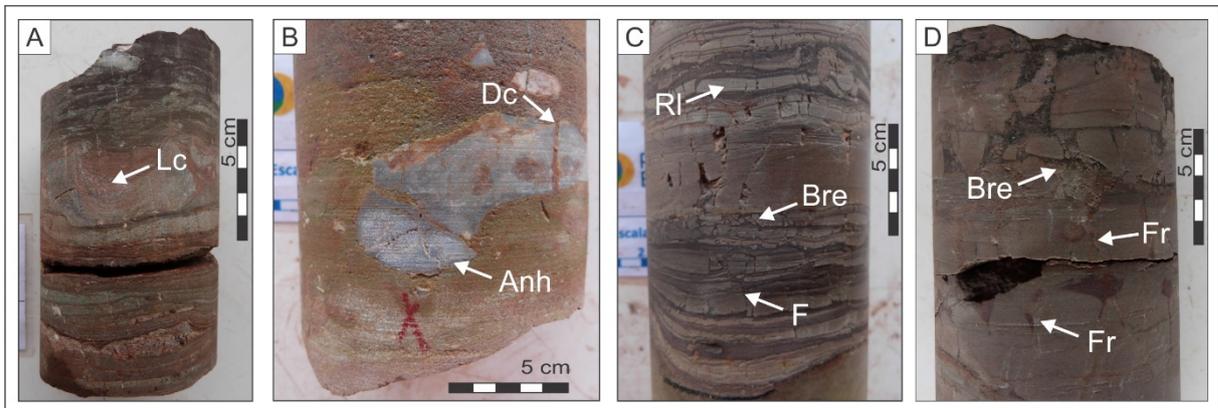


Figura 14: Fácies Ad. A e C) Arenito com laminações convolutas irregulares (Lc); B) Mistura das litofácies arenito-pelito e concentrações irregulares de anidrita dispersos (Anh), que localmente mostra-se seccionado por dique (Dc); C) Laminações rompidas (RI) e deslocadas por microfalhas (F) gerando brechação (Bre); D) Porção brechada (Bre) definida por laminas de arenito quebradas e rotacionadas por microfraturas (Fr), onde os planos mostram-se preenchidos por minerais carbonáticos.

6.3 Ritmito Deformado (Rd)

Nesta fácies, composta de intercalações delgadas de lâminas de arenito fino e pelito, ocorrem feições de sobrecarga, definida por afundamentos de lâminas de arenitos nos pelitos, além de feições de *ball and pillow*; porções irregulares de misturas de arenitos e pelitos, diques clásticos e microfalhas que deslocam as laminações (Figuras 15A-C). Em geral, ocorrem porções brechadas com clastos subangulosos de pelitos e arenitos. Esta fácies exibe contatos superior e inferior irregulares, marcados por feições de sobrecarga entre as fácies Ap e Pm.

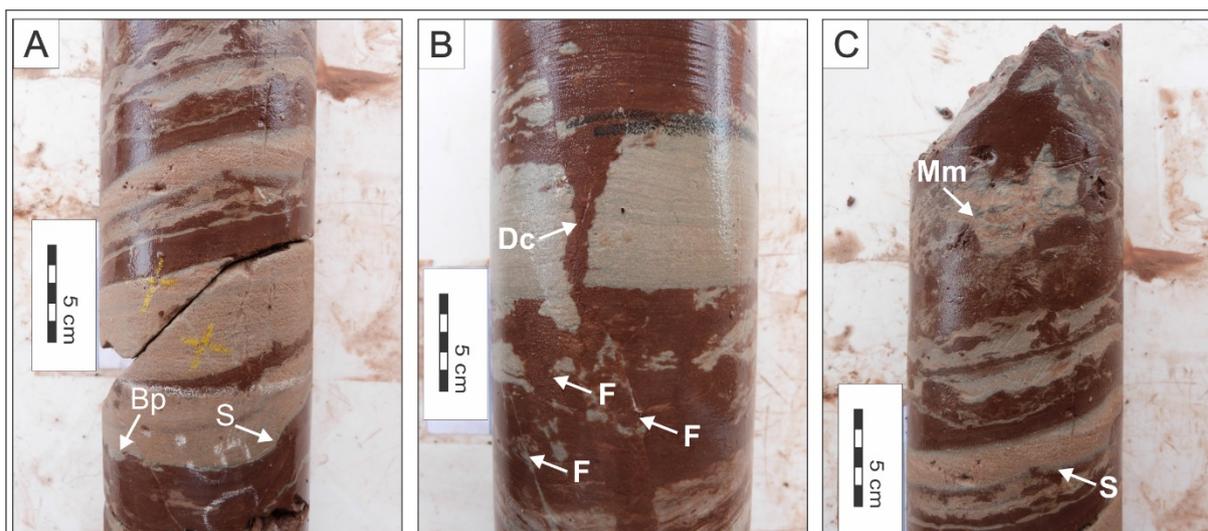


Figura 15: Fácies Rd. A) Feições de sobrecarga na interface arenito-pelito (S) e *ball and pillow* (Bp); B) Dique clástico (Dc) e planos de microfalhas (F) quebrando e rompendo as lâminas de arenito; C) Feições de sobrecarga (S) e misturas irregulares (Mm) de arenito e pelito.

Interpretação das Fácies Deformadas

Laminações convolutas, pseudonódulos (*ball and pillow*), diques clásticos e misturas de materiais definem as fácies deformadas *Pd*, *Ad* e *Rd* (Figuras 16 e 17). As laminações convolutas são interpretadas como sin-sedimentares em sistemas aquosos, muitas vezes desenvolvidas por influência da sobrecarga e intensa atividade gravitacional, que gera também pseudonódulos (*ball and pillow*) (Allen, 1977; Owen, 1987). Do mesmo modo, Lowe (1975) associa o desenvolvimento das feições de sobrecarga unicamente a instabilidade gravitacional, que deforma suavemente a laminação, sem produzir liquefação. Laminações convolutas e pseudonódulos, abundantes na Unidade Superior deste estudo, foram comparadas às classificações propostas por Allen (1977) e Owen (1987), conforme ilustrado nas Figuras 16A-F.

Diques clásticos e misturas irregulares de materiais são relacionados a processos de liquefação e fluidização, com escape de fluidos durante a compactação e consolidação dos sedimentos (Rossetti, 1999). Em geral, essas estruturas são associadas a deformação penecontemporânea e compreendem camadas sedimentares perturbadas, distorcidas ou deformadas no momento ou logo após a deposição dos sedimentos (Reineck & Singh, 1980). Geralmente, tais deformações são de caráter local, confinadas a uma camada única entre camadas não deformadas (Reineck & Singh, 1980). Diversos estudos (Lowe, 1975; Allen, 1984; Owen, 1987; Rossetti, 1999), relacionam às estruturas deformacionais em sedimentos inconsolidados a mudanças de pressão dos poros em função do escape instantâneo de fluidos durante eventos de fluidificação e liquefação. Da mesma forma, os estudos de Lowe (1975),

Allen (1984), Owen (1987), Lindholm (1987), Cojan & Thiry (1992), Rossetti (1999), Rossetti & Góes (1999), Moretti (1999), Rossetti & Santos Jr. (2003), Castro (2002), Fambrini *et al.* (2006), Chamani (2011), Soares *et al.* (2013), associam a gênese das estruturas deformacionais em sedimentos inconsolidados à atividade sísmica, particularmente à terremotos de magnitude média a alta ($m > 6.5$ Richter). Diques clásticos são estruturas relacionadas ao escape ascendente da água, desencadeados também por choques sísmicos (Tucker, 2003).

Laminações quebradas, rotacionadas e brechadas são associadas por Sims (1975), Sieh (1978), Williams (1976), Weaver (1976) e Mills (1983) a processos pós-deposicionais, onde a liquefação e/ou fluidização foram provocadas por choques sísmicos. A sequência de Seilacher (1969) mostra as fases de desenvolvimento de sismo (Figura 17A), as quais foram relacionadas as porções brechadas descritas na Unidade Superior deste estudo (Figuras 17B e C). O desenvolvimento de *ball and pillow* tem sido relacionado a processos de afundamento de camadas arenosas em movimentos descendentes, empilhados em matriz argilosa (Allen, 1977) (Figura 16A).

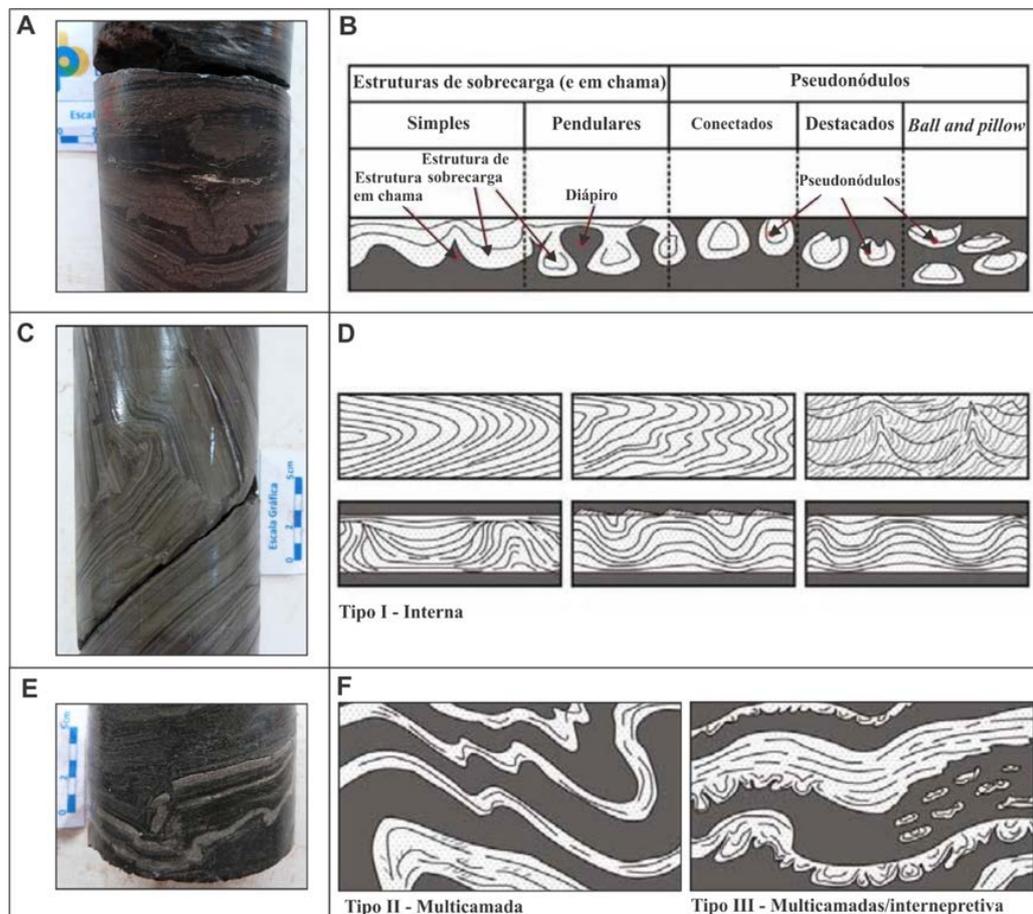


Figura 16 Associação das principais estruturas descritas na Unidade Superior. A-B) Feições de sobrecarga e sua comparação com as estruturas (simples e pendulares) da classificação de Owen (1987); C-D) Laminações convolutas e sua comparação com os tipos descritos na classificação de Allen (1977); E-F) Microdobras e sua comparação com as estruturas multicamada e interpenetrativa descritas por Allen (1977).

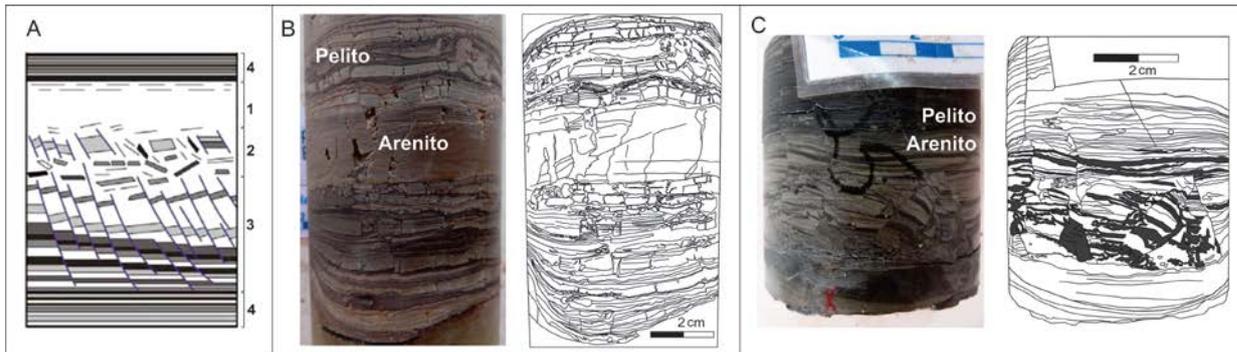


Figura 17: A) Sequência idealizada por Seilacher (1969) para o desenvolvimento de sismo: 1) Zona liquefeita (*soupy zone*); 2) Zona fragmentada (*rubble zone*); 3) Zona segmentada (*segmented zone*); 4) Sedimento não perturbado. Os Detalhes B e C mostram zonas fraturadas e brechadas, com rotação de lamina, que se assemelham as zonas 2 e 3 de Seilacher (1969).

7 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica foi realizada em três amostras da Formação Andirá (Unidade Superior) (Tabela 02) com base nas fórmulas de Folk & Ward (1957). A granulometria predominante é de areia muito grossa, com variação até grossa (amostras PB-03G e PB-04G) e grânulos (amostra PB-05G), que define uma seleção moderada (Figuras 18 A-C).

Tabela 2: Intervalos granulométricos das três amostras da Formação Andirá (Unidade Superior).

AMOSTRAS	Intervalos granulométricos (mm)									
	1	0,71	0,5	0,35	0,25	0,177	0,125	0,088	0,062	0,04
PB-03G	2,66	0,43	2,65	21,7	54,18	51,48	0,91	3,6	17,87	5,16
PB-04G	5,59	2,14	17,17	49,25	64,72	23,88	10,01	0,95	5,9	1,2
PB-05G	12,59	4,81	22,81	22,53	22,29	21,93	30,91	0,17	12,98	8,97

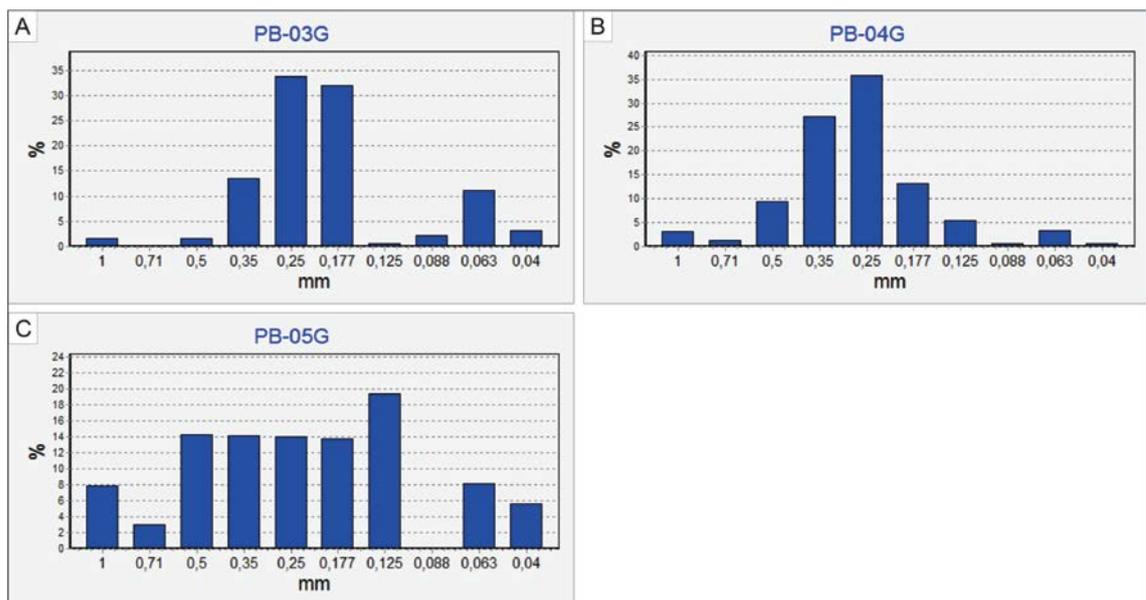


Figura 18: A-C) Histogramas de frequência das amostras PB-03G, PB-04G e PB-05 (Unidade Superior), com posicionamento estratigráfico indicado na Figura 4.

8 ANÁLISE DE MINERAIS PESADOS

Os arenitos da Unidade Superior contém uma assembleia mineralógica constituída por zircão, turmalina, granada, cianita, estaurolita, silimanita, topázio e monazita, conforme ilustrado na Figura 19. A seguir são descritas as principais características dos minerais pesados transparentes encontrados:

Zircão (Zr): Os grãos de zircão são incolores e amarelados, geralmente arredondados e, subordinadamente, ocorrem em formas prismáticas euedrais/subedrais. Caracterizam-se pelo relevo alto e birrefringência alta.

Turmalina (Tu): Predominam grãos de coloração verde-oliva e marrom, que variam de subarredondados a arredondados e, subordinadamente, prismáticos. Possui um relevo moderado, intenso pleocroísmo e birrefringência média.

Granada (Gr): Presente com certa abundância em todas as lâminas observadas, onde os grãos são incolores, levemente esverdeados, relevo forte, variando de prismáticos (com facetas) a subangulosos.

Cianita (Ci): Consiste de grãos incolores, raramente azulados, geralmente prismáticos, contendo partições perpendiculares ao alongamento e birrefringência moderada.

Sillimanita (Sl): Ocorre em grãos incolores, geralmente prismáticos (por vezes com bordas quebradas) a angulosos, exibindo aspecto fibroso. Birrefringência baixa a moderada.

Estaurolita (Es): Predominam grãos de coloração amarelada, por vezes, com tonalidades amarelo-avermelhada. Os grãos são geralmente irregulares, variando de subangulosos a angulosos, com raros grãos arredondados e baixa birrefringência.

Topázio (To): Os grãos são incolores, angulosos a sub angulosos. Possui um relevo baixo, apresenta pequenas indentações e de baixa birrefringência.

Monazita (Mo): Grãos de coloração amarelada, subarredondados. Possui relevo forte, pleocroísmo muito fraco nos tons de amarelo, extinção quase reta e birrefringência forte.

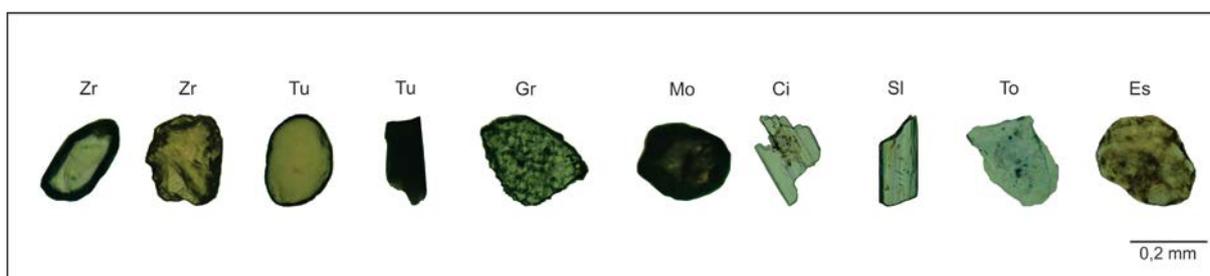


Figura 19: Assembleia de minerais pesados da Unidade Superior (Formação Andirá): Zircão – Zr (prismático e subarredondados), Turmalina – Tu (amarela a esverdeada), Granada – Gr, Monazita – Mo, Cianita – Ci, Silimanita – Sl, Topázio – To e Estaurolita – Es.

9 ANÁLISE POR DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Foram analisadas, por difração de raio x (rocha total), 22 amostras das unidades Inferior (Formação Arari) e Superior (Formação Andirá), distribuídas uniformemente no furo PBAT-15-43, conforme ilustrado na Figura 4. Na Unidade Inferior foram analisados a matriz e os clastos das fácies conglomeráticas, sendo que a mineralogia da matriz arenítica é constituída por quartzo, calcita, dolomita e rutilo (Figuras 20A, B, C - amostra PB 110Q), enquanto que os clastos são constituídos unicamente por anidrita (Anh) (Figura 20C - amostra PB 111Q). Os resultados da Unidade Superior indicam uma mineralogia composta principalmente por quartzo, calcita, dolomita, caulinita, ilita, feldspato potássico e rutilo para as fácies pelíticas (Figuras 21 A-F) e quartzo, caulinita e calcita para as fácies areníticas (Figuras 21 C, F - amostra PB 99Q).

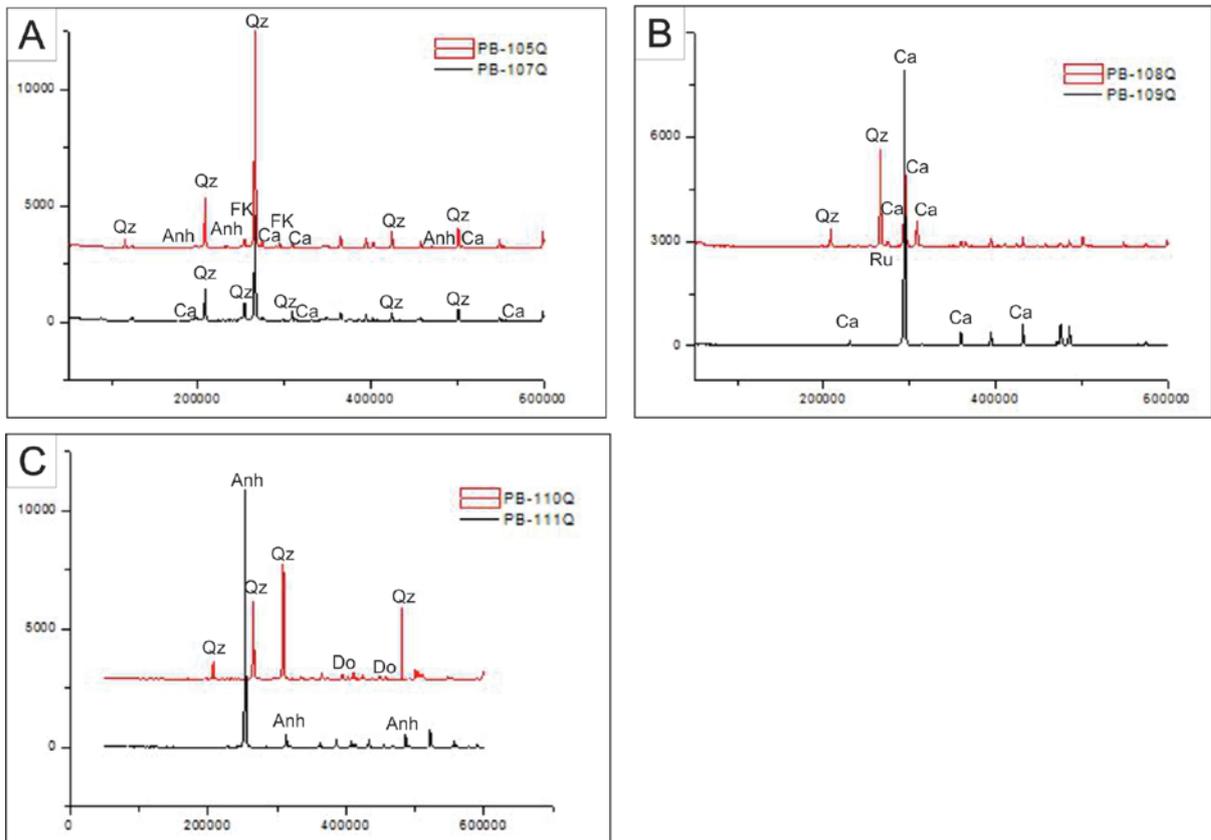


Figura 20: A-C) Difratoogramas de raios x da unidade inferior (Arari). A e B mostram a mineralogia da matriz (amostras PB-105Q, PB-107Q, PB-108Q, PB-109Q e PB-110Q), com: quartzo (Qz), calcita (Ca), dolomita (Do) e rutilo (Ru). O detalhe C mostra a mineralogia dos clastos desta unidade (amostra PB-111Q), constituídos unicamente por anidrita (Anh). O posicionamento das amostras é demonstrado na figura 4.

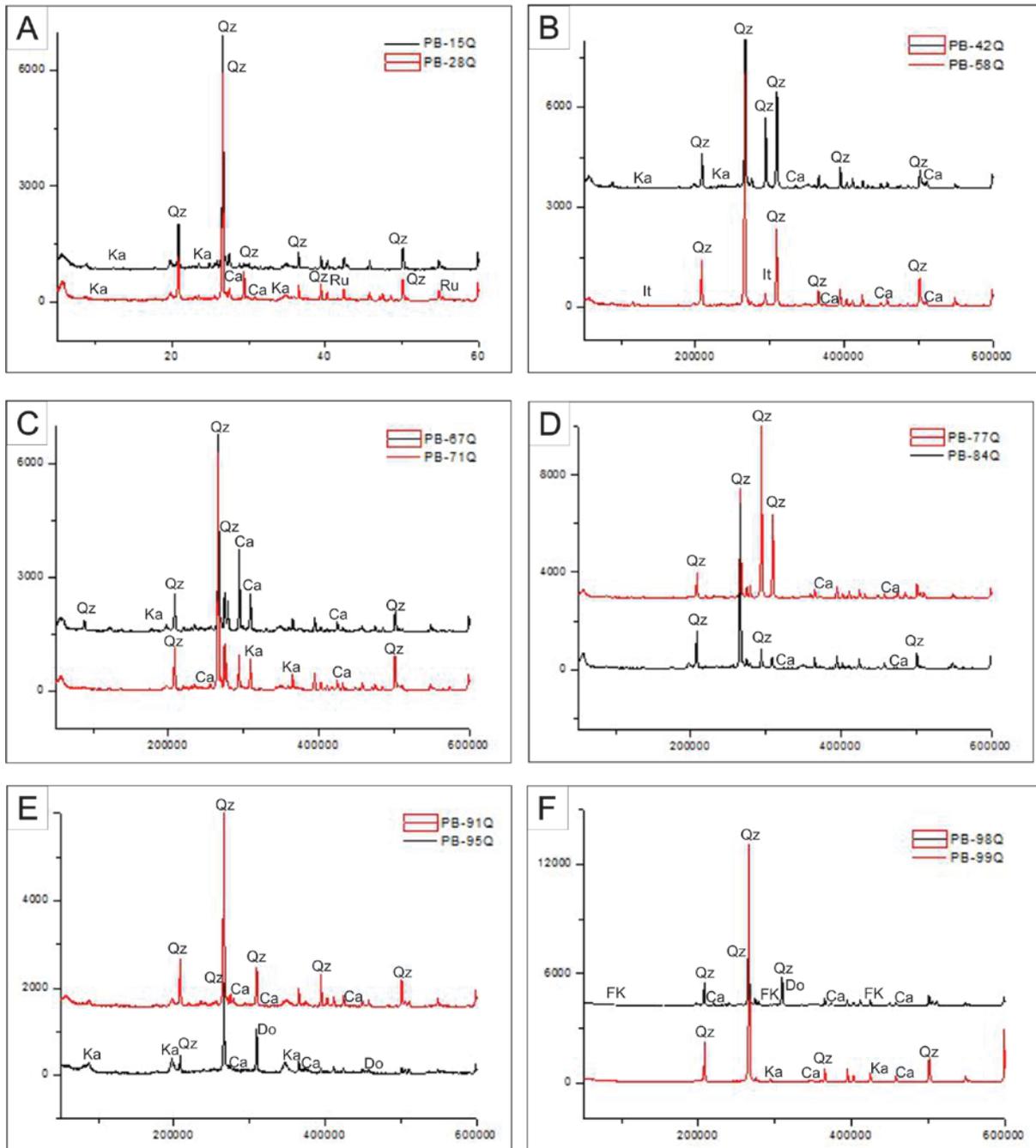


Figura 21: A-F) Difractogramas de raios x da unidade superior (Andirá) mostrando a mineralogia de pelitos e arenitos: Quartzo (Qz), calcita (Ca), dolomita (Do), caulinita (Ka), ilita (It), feldspato potássico (FK) e rutilo (Ru). O posicionamento das amostras é demonstrado na figura 4.

CAPÍTULO V – DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

No intervalo estudado do furo PBAT-15-43 foram definidas 3 conjuntos distintos de fácies sedimentares, que permitiram a individualização das unidades superior e inferior. A inferior é constituída por fácies grosseiras (Cma e Cmf), as quais foram associadas a deposição por fluxos gravitacionais em ambiente de leque aluvial durante a orogenia Tardi-Herciniana. A superior, composta por fácies finas (Pl, Pm, Am, Ap e Aphi), é representativa de paleoambiente fluvial meandrante (canal, planície de inundação-lagos e *crevasse splay*).

Durante a deposição da unidade superior, processos de deformação sin e pós-deposicionais, podem ter induzidos à liquefação e fluidização que deformaram trechos desta unidade, com desenvolvimento de laminações convolutas, *ball and pillow*, estruturas em chama, diques clásticos e misturas de materiais. Os possíveis mecanismos responsáveis pela desestabilização e deformação dos sedimentos seriam em função da rápida deposição do material sobreposto (sobrecarga) e/ou por choque sísmico. A atuação deste último pode ser corroborada pelos seguinte fatores: **a)** por ser um evento instantâneo, as estruturas geradas estão restritas a um único horizonte estratigráfico, **b)** processos de liquefação e fluidização são comumente desencadeados a partir de sismos e **c)** as estruturas de deformação descritas são de ambiente fluvial e não foram geradas a partir de deslizamentos em rampas.

A recorrência dos níveis deformados intraformacionais, aliada principalmente a presença de porções brechadas (geradas por microfalhas, rompimento e deslocamento de lâminas) podem ser indicativos de eventos de paleosismicidade (com magnitude > 6.5 Richter) que ocorreram na Bacia do Amazonas. Registos de atividades sísmicas com tais estruturas características tem sido descritos nos estudos de Lowe (1975), Allen (1984), Owen (1987), Lindholm (1987), Rossetti (1999), Rossetti & Góes (1999), Moretti (1999), Castro (2002), Fambrini *et al.* (2005), Chamani (2011) e Soares *et al.* (2013).

Dados palinológicos da unidade Superior permitiram posicioná-la no Permiano Superior, sendo portanto, associada à Formação Andirá. Este dado corrobora com os estudos palinológicos sobre esta unidade, obtidos por Daemon & Contreiras (1971), Picarelli & Quadros (1992) e Playford e Dino (2000). Além disso, a presença de algas de água doce (a salobra) e a ausência de palinomorfos marinhos corroboram com o paleoambiente fluvial proposto neste estudo, bem como nos trabalhos anteriores de Caputo *et al.* (1972), Szatmari (1975), Santos *et al.* (1975), Caputo (1984), Matsuda *et al.* (2004), Cunha *et al.* (2007) e Caputo (2014). Como não foi obtida idade para a unidade inferior, devido seu posicionamento

estratigráfico e fácies sedimentares, ela foi associada neste estudo à Formação Arari, corroborando com os estudos estratigráficos de Szatmari (1975), Cunha *et al.* (2007), Matsuda *et al.* (2004) e Caputo (2014).

A assembleia de minerais pesados metaestável (zircão, granada, turmalina, cianita, sillimanita, estaurolita, topázio e monazita) encontrada para a Formação Andirá, não pôde se comparada com nenhuma unidade do Grupo Tapajós, devido à falta de dados disponíveis. Entretanto, essa assembleia difere parcialmente da encontrada nas unidades Siluro-Devoninas da borda norte da Bacia do Amazonas, que exibem apenas zircão, turmalina, granada, rutilo e anatásio (possivelmente diagenético), conforme descrito por Santos (2012), Soares (2013) e Cuervo (2014). Além disso, mostra semelhança mineralógica com a assembleia descrita por Alves & Soares (2015) para a sequência sedimentar cretácea-neógena sobreposta, que exhibe zircão, turmalina, rutilo, cianita, epidoto, sillimanita, apatita, topázio, hornblenda e estaurolita.

Os dados geoquímicos de rocha total permitiram diferenciar a mineralogia das formações Arari e Andirá. A primeira, conglomerática, apresenta matriz com quartzo, calcita, dolomita e rutilo, com clastos exclusivamente de anidrita, enquanto a segunda apresenta nas fácies pelíticas e areníticas uma mineralogia composta por quartzo, calcita, dolomita, caulinita, ilita, feldspato potássico e rutilo. Os carbonatos identificados nas duas unidades podem ser associados à cimentação superimposta, já que ocorrem também como cristais dispersos e preenchendo planos de fraturas. Dados químicos (ICP-OES e ICP-MS – Espectrometria de Massa com plasma indutivamente acoplado) obtidos pela Potássio do Brasil (2014) para o intervalo salino da Formação Nova Olinda (sotoposto ao trecho estudado), mostram que o mesmo é constituído por halita, calcita e anidrita. Este dado corrobora com a mineralogia dos clastos de anidrita das fácies conglomeráticas da Formação Arari, sendo portanto, indicativo de área fonte para a mesma, durante a deposição dos leques aluviais.

CAPÍTULO VI – REFERÊNCIAS

- Allen, J.R.L. 1977. The plan shape of current ripples in relation to flow conditions. *Sedimentology*, 24: 53-62
- Allen, J.R.L. 1984. *Sedimentary Structures. Their Character and Physical Basis*. Elsevier, Amsterdam. 663 p (Developments in sedimentology, vol 30)
- Alves, L.E.R & Soares, E.A.A. 2015. *Análise de Minerais Pesados da Sequência Sedimentar Cretácea-Miocena Aflorante nas Regiões de Manaus e Presidente Figueiredo, Amazonas*. Universidade Federal do Amazonas, Programa de Iniciação Científica-PIBIC 2014.
- Balarino, M. L. 2014. Permian palynostratigraphy of the Claromecó Basin, Argentina. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 38: 1-21.
- Beri, Á.; Gutiérrez, P.R.; Cernuschi, F. & Balarino, M.L. 2004. Palinoestratigrafía del Pérmico de Cuenca Paraná, Uruguay. *Actas del 11º Reunión de Paleobotánicos e Palinólogos*, Gramado, 29.
- Beri, Á.; Gutiérrez, P.R. & Balarino, M.L. 2011. Palynostratigraphy of the late Palaeozoic of Uruguay, Paraná Basin. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 167: 16–29.
- Bristow, C.S.; Skelly, R.L. & Ethridge, F.G. 1999. Crevasse splays from the aggrading sand-bed braided Niobara River, Nebraska: effect of base-level rise. *Sedimentology* 46: 1029 e 1047.
- Bull, W.B. 1977. The aluvial fan environment. *Prog Phys Geogr* 1: 222-270
- Camargo, M.G. 2006. Sysgran: um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. *Res. Bras. Geoc.*, 36 (2): 371-378.
- Caputo, M. V.; Rodrigues, R. & Vasconcelos, D. N. N. 1972. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém, 1972, *Anais*. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 3: 35-46.
- Caputo, M. V. 1984. *Stratigraphy, tectonics, palaeoclimatology and palaeogeography of northern basins of Brasil*. University Califórnia, Santa Bárbara, Thesis (PhD), 586p.
- Caputo, M.V. 2014. Bacia do Amazonas, tectônica e magmatismo. Preparado para a ANA, 151p.
- Castro, M.R. 2002. Deformação sin-deposicional em depósitos costeiros e marinhos das formações Tombador e Caboclo, Chapada Diamantina, BA. *Revista Brasileira de Geociências*, 22: 291-294.
- Chamani, M.A.C. 2011. *Tectônica Intraplaca e Deformação Sinsedimentar Induzida por Abalos Sísmicos: O Lineamento Transbrasiliano e estruturas Relacionadas na Província Parnaíba, Brasil*. Universidade de São Paulo, Tese de Mestrado, 207p.

- Cojan, I. & Thiry, M. 1992. Seismically induced deformation structures in Oligocene shallow-marine and Aeolian oastal sands (Paris Basin). *Tectonophysics*, 206 (1-2): 79-89.
- Collinson, J.D. 1996. *Alluvial sediments*. In: READING, H.G. Sedimentary environments: processes, fácies and stratigraphy. Blackwell Science. Oxford, p. 37-82.
- Cunha, P.R.C.; Gonzaga, F.G.; Coutinho, L.F.C. & Feijó, F.J. 1994. Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 8 (1): 47-55.
- Cunha, P.R.C.; Melo, J.H.G. & Silva, O.B. 2007. Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro, Brasil, *Boletim de Geociências da Petrobras*, 15 (2): 227-251.
- Daemon, R.F. & Contreiras, C.J.A. 1971. Zoneamento palinológico da Bacia do Amazonas. São Paulo, *Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia*, 3: 79-88.
- Elliott, T. 1986. Deltas. In: READING, H.G. (Ed.), Sedimentary Environments and fácies. *Blackwell Scientific Publications*, Oxford, pp. 113e154.
- Fambrini, G.L.; Almeida, R.P. & Fragoso-César, A.R.S. 2006. Estratigrafia e evolução paleogeográfica do Grupo Santa Bárbara (Ediacarano) na Sub-Bacia Camaquã Ocidental, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 36 (3): 550-565.
- Gonçalves Júnior, E.S. 2013. *Terraços fluviais quaternários das regiões de Careiro-da-Várzea, Manauíri, Careiro-Castanho e Autazes, Amazônia Central*. Universidade Federal do Amazonas, Dissertação de Mestrado, 127 p.
- Gross, M.; Piller, W.E.; Ramos, M.I. & Paz, J.D.S. 2011. Late Miocene sedimentary environments in south-western Amazonia (Solimões Formation; Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 32: 169-181.
- Gutiérrez, P.R.; Archangelsky, S. & Césari, S.N. 2003. Contribución al conocimiento palinológico del Pérmico del pozo UTAL-La Estrella 1, Cuenca del Colorado, Plataforma argentina. In: 3° SIMPOSIO ARGENTINO DEL PALEOZOICO SUPERIOR, La Plata, Argentina, *Resúmenes*, 15.
- Kistler, P. Historical Résumé of the Amazon Basin. PETROBRAS/Renor, Belém. *Internal Report*, 1954.
- Lindholm, R.C. 1987. *A practical approach to sedimentology*. 1ª ed. London: Allen & Unwin. 37p.
- Lowe, D.R. 1975. Water escape structures in coarse-grained sediments. *Sedimentology*, 22(2):157-204.
- Mange, M.A. & Maurer, H.F.W. 1992. *Heavy Minerals in Colour*. London: Chapman & Hall, 147 p.
- Matsuda, N.S.; Dino, R.; Wanderley Filho, J.R., 2004. Revisão litoestratigráfica do Grupo Tapajós, Carbonífero Médio - Permiano da Bacia do Amazonas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 12 (2): 435-441.

Miall, A.D., 1992. Alluvial deposits. In: WALKER, R.G., JAMES, N.P. (Eds.), *Facies Models. Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada, Ontario*, pp. 119 e 142.

Miall, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analyses, and Petroleum Geology*. Springer Verlag, 582 p.

Mills, P.C. 1983. Genesis and diagnostic value of soft-sediment deformation structures: a review. *Sedimentary Geology*, 35: 83-104

Moretti, M. 2000. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in middle-late Pleistocene aeolian deposits (Apulian foreland, southern Italy). *Sedimentary Geology*, 135(1-4): 167-179.

Nichols, G. 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. Library of Congress Catalog in Publication Data. 419 p.

Owen, G. 1987. Deformation processes in unconsolidated sands. In M.E. Jones & R.M. Preston (eds.). *Deformation of Sediments and Sedimentary Rocks. Geological Society Special Publication*, 11-24. (*Geological Society Special Publication*, 29)

Pessoa, V.C.O. & Borghi, L. 2005. Análise Faciológica da Formação Itapecuru (Cretáceo, Bacia do Parnaíba) em Testemunhos de Sondagem. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, Salvador.

Pettijohn, F.J.; Potter, P.E. & Siever, R. 1987. *Sand and Sandstone*. Springer-Verlag. New York, 553 p.

Phipps, D. & Playford, G. 1984. Laboratory techniques for extraction of palynomorphs from sediments. *Papers of Department of Geology*, University of Queensland, vol. 11, pp. 1-23.

Picarelli, A.T. & Quadros, L.P. 1992. Bioestratigrafia do Carbonífero e Permiano das bacias do Amazonas, Solimões, Acre e Parnaíba, com base em fusulinídeos, Palinologia e conodontes. Rio de Janeiro. In: PETROBRAS/CENPES (*Relatório Interno*).

Playford, G. & Dino, R. 2000a. Palynostratigraphy of upper Palaeozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil: part one. *Palaeontographica Abt. B.*, 255 (1-3): 1-46, pl. 1-13.

Playford, G. & Dino, R. 2000b. Palynostratigraphy of upper Palaeozoic strata (Tapajós Group), Amazonas Basin, Brazil: part two. *Palaeontographica Abt. B.*, 255 (4-6): 87-145, pl. 1-14.

Potássio do Brasil. 2014. *Relatório Final Positivo Único de Pesquisa – Sais de Potássio*, Setembro 2014, 286p.

Powers, M.C.A. 1953. A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology*, 23:117-119.

Reineck, H.E. & Singh, I.B. 1973. *Depositional Sedimentary Environments*. Springer-Verlag,

New York. 439 pp.

Reineck, H.E. & Sing, I.B. 1980. *Depositional Sedimentary Environments*. New York, Springer-Verlag. 551 p.

Reis, N. J. & Ferreira, A.L. 2006. *Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas*. Rio de Janeiro: CPRM; CIAMA, 2006. Programa Geologia do Brasil. 125 p.

Rossetti, D.F. 1999. Soft-sediment deformation structures in late Albian to Cenomanian deposits, São Luís Basin, northern Brazil: evidence for palaeoseismicity. *Sedimentology*, 46(6): 1065-1081.

Rossetti, D.F. & Góes, A.M. 1999. Deciphering the sedimentological imprint of paleoseismic events: an example from the Aptian Codó Formation, northern Brazil. *Sedimentary Geology*, p. 137-156.

Rossetti, D.F. & Santos JR. A.E. 2003. Events of sediment deformation and mass failure in Upper Cretaceous estuarine deposits (Cametá Basin, northern Brazil) as evidence for seismic activity. *Sedimentary Geology*, 161(1-2): 107-130.

Rozo, M. G.; Nogueira, A.C.R. & Truckenbrodt, W. 2012. *Earth surface processes and landforms*, 37: 1471-1488.

Seilacher, A. 1969. Fault-graded beds interpreted as seismites. *Sedimentology*, 13:155-159.

Shultz, E.H. 1984. Subaerial debris-flow deposition in the Upper Paleozoic Cutler Formation, western Colorado. *J. Sediment Petrol*, 54: 759-772

Sieh, K.E. 1978. Prehistoric large earthquakes produced by slip on the San Andreas Fault at Pallet Creek, California. *Journal of Geophysical Research*, 83 (B8): 3907-3939

Silva, O.B. 1996. *Ciclicidade sedimentar no Pensilvaniano da Bacia do Amazonas e o controle dos ciclos de sedimentação na distribuição estratigráfica dos conodontes, fusulinídeos e palinóforos*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese (Doutorado), 331 p.

Sims, J.D. 1975. Determining earthquake recurrence intervals from deformational structures in young lacustrine sediments. *Tectonophysics*, 29: 141-152

Soares, E.A.A.; Tatumi, S.H. & Riccomini, C. 2010a. OSL age determinations of pleistocene fluvial deposits in central Amazonia. *Academia Brasileira de Ciências*, v.82, n.3 p.14-9.

Soares, J.L.; Nogueira, A.C. R.; Domingos, F. & Riccomini, C. 2013. Synsedimentary deformation and the paleoseismic record in Marinoan cap carbonate of the southern Amazon Craton, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 48: 58-72

Szatmari, P.; Carvalho, R.S & Simões, I.A., 1975. Evaporitos na Bacia do Amazonas. Rio de Janeiro, Petrobras. Dexp, 1281 (PETROBRAS. SIEX 103-5054).

Suguio, K. 1973. *Introdução à Sedimentologia*. São Paulo, Edgard Blucher. 317 p.

- Thomas, R.G.; Smith, D.G.; Wood, J.M.; Visser, J.; Calverley-Range, E.A. & Koster, E.H. 1987. Inclined heterolithic stratification - terminology, description, interpretation and significance. *Sedimentary Geology*, 53: 123-179.
- Tucker, M.E. 2003. *Sedimentary rocks in the field*. John Wiley & sons. England, 2003. 234 p.
- Visscher, H. 1973. The Upper Permian of Western Europe – a palynological approach to chronostratigraphy. In: Logan, A. & Hills, L.V. (eds) The Permian and Triassic Systems and their Mutual Boundary. *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoirs*, 2, 200–219.
- Visscher, H. 1980. Aspects of a palynological characterisation of Late Permian and Early Triassic ‘standard’ units of chronostratigraphical classification in Europe. In: PROCEEDINGS OF THE IV INTERNATIONAL PALYNOLOGICAL CONFERENCE, 1976–77, Lucknow, India, 2. Birbal Sahni Institute, Lucknow, p. 236–244.
- Walker, R.G. 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: WALKER, R.G. & JAMES, N.P., (eds). Facies Models - Response to sea Level Change. *Geological Association of Canada*, p. 1-14.
- Weaver, J.D. 1976. Seismically-induced load structures in the basal Coal Measures, South Wales. South Wales. *Geological Magazine*, 113 (6): 535-543
- Williams, D.M. 1976. Clastic dykes from the Precambrian Porsangerfjord Group, North Norway. *Geological Magazine*, 113 (2): 169-176
- Wood, G.D.; Gabriel, A.M. & Lawson, J.C. 1996. Palynological techniques e processing and microscopy. In: JANSONIUS, J., MCGREGOR, D.C. (Eds.), 1996. *Palynology: Principles and Applications*, vol. 1. *American of Stratigraphic Palynologists Foundation*, Dallas, Texas, pp. 29-50.