

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

CARMEM NÁTALY AMORIM FRANCO

FÁCIES SEDIMENTARES DOS DEPÓSITOS GLACIOMARINHOS  
AFLORENTES NOS RIOS URUBU, UATUMÃ E JATAPU, BORDA NORTE  
DA BACIA DO AMAZONAS

MANAUS/AM  
2025

CARMEM NÁTALY AMORIM FRANCO

FÁCIES SEDIMENTARES DOS DEPÓSITOS GLACIOMARINHOS  
AFLORENTES NOS RIOS URUBU, UATUMÃ E JATAPU, BORDA NORTE  
DA BACIA DO AMAZONAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação  
em Geociências (PPGGEO) da Universidade Federal  
do Amazonas (UFAM) como requisito para obtenção do  
título de Mestre em Geociências.

ORIENTADOR: PROF. DR. EMÍLIO ALBERTO AMARAL SOARES

MANAUS/AM

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

- 
- F825f      Franco, Carmem Nátaly Amorim  
              Fácies sedimentares dos depósitos glaciomarinheiros aflorantes nos rios  
              Urubu, Uatumã e Jatapu, borda norte da Bacia do Amazonas / Carmem  
              Nátaly Amorim Franco. - 2025.  
              123 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Emílio Alberto Amaral Soares.  
              Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa  
              de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, 2025.
1. Bacia do Amazonas. 2. Paleozoico. 3. Depósitos glaciomarinheiros. 4.  
              Palinologia. 5. Glaciação Siluro-Devoniana. I. Soares, Emílio Alberto  
              Amaral. II. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-  
              Graduação em Geociências. III. Título
-

CARMEM NÁTALY AMORIM FRANCO

FÁCIES SEDIMENTARES DOS DEPÓSITOS GLACIOMARINHOS  
AFLORENTES NOS RIOS URUBU, UATUMÃ E JATAPU, BORDA NORTE  
DA BACIA DO 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.

Aprovada em: 13 de junho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 **EMILIO ALBERTO AMARAL SOARES**  
Data: 17/06/2025 11:27:08-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

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

Documento assinado digitalmente  
 **FABIO LUIZ WANKLER**  
Data: 13/06/2025 23:04:12-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Fábio Luiz Wankler, Membro.  
Universidade Federal de Roraima, UFRR

Documento assinado digitalmente  
 **JACKSON DOUGLAS SILVA DA PAZ**  
Data: 16/06/2025 16:55:38-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jackson Douglas Silva da Paz, Membro.  
Universidade Federal de Roraima, UFRR

## **AGRADECIMENTOS**

A todas as pessoas que contribuíram, com conhecimento, apoio e incentivo, para a concretização deste trabalho:

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM), por meio do Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO), e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pelo apoio institucional e financeiro.

Ao meu orientador, Emílio Soares, pelos ensinamentos, orientação e paciência durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Mayara Fraeda, Rosemary Silveira, Luis Castillo, Rodolfo Dino, Luzia Antonioli e Lucindo Fernandes, pelas sugestões e colaboração na interpretação de dados específicos.

Aos colegas Rogério Oliveira, Marco Antônio e Tiago Brelaz, pelo indispensável apoio nos trabalhos de campo.

Aos laboratórios da UFAM, da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) e do Serviço Geológico do Brasil (SBG/AM), pelo suporte técnico e pela contribuição na aplicação de métodos utilizados nesta pesquisa.

Às amigas do mestrado, Isabela, Márcia, Vivian, Cíntia, Lorena e Thainá, pelas confidências, conselhos e companheirismo ao longo desta caminhada acadêmica.

Aos meus pais, Ednamar e Socorro, por serem a minha base de amor, dedicação e incentivo incondicional. Ao meu namorado, Victor Kim, pelo acolhimento e compreensão nos momentos mais árduos. E a toda minha família, por sempre torcerem pelo meu sucesso.

Muito obrigada!

Como sei pouco, e sou pouco,  
faço o pouco que me cabe  
me dando por inteiro.

*Thiago de Mello*

## RESUMO

A Bacia do Amazonas exibe um significativo registro sedimentar paleozoico, em parte aflorante nas bordas norte e sul. Nos últimos anos, estudos sedimentológicos e estratigráficos têm se intensificado na borda norte da bacia, especialmente nos municípios de Presidente Figueiredo, Rio Preto da Eva e Urucará (AM), onde foram definidas fácies sedimentares marinhas e glaciais. O presente estudo integra dados sedimentológicos, palinoestratigráficos, mineralógicos e microtexturais de afloramentos nos rios Urubu, Uatumã e Jatapu, com o objetivo de definir critérios de correlação. Os resultados obtidos permitiram a identificação de fácies sedimentares características de paleoambiente marinho (*shoreface* superior-inferior e *foreshore*), intercaladas com depósitos glaciais associados à sedimentação de morenas terminais e em lagoas subglaciais-proglaciais nas formações Nhamundá e Manacapuru. As fácies reconhecidas incluem arenito com estratificação cruzada tabular (Act), arenito com estratificação plano-paralela bioturbado por *Cruziana* (Apbc), arenito com estratificação plano-paralela bioturbado por *Skolithos* (Apbs), arenito com estratificação plano-paralela (Ap), pelito laminado (Pl), além de diamictitos grosseiros polimíticos (Dpp) e oligomíticos (Dpo) e pelito laminado com *dropstones* (Pl<sub>d</sub>). Os depósitos glaciais foram identificados em 05 locais de ocorrência, sendo relacionados ao evento glacial do Siluriano Inferior (Landoveriano-Wenlockiano), bem como a um novo evento glacial posicionado no intervalo Siluriano Superior-Devoniano Inferior (Pridoli ao Lochkoviano). A presença de clastos facetados, *dropstones* e microtexturas diagnósticas (como estrias paralelas) reforça a atuação de processos glaciais durante o Siluro-Devoniano na Bacia do Amazonas. Portanto, a integração dos dados geológicos-palinológicos deste estudo com trabalhos regionais permitiu a elaboração do mapa geológico da área estudada, com a definição de 06 subfaixas das formações Autás Mirim, Nhamundá, Manacapuru, Ererê, Barreirinhas e Itaituba, orientadas na direção E-W.

**Palavras-chaves:** Bacia do Amazonas; Paleozoico; Depósitos glaciomarinheiros; Palinologia; Glaciação Siluro-Devoniana.

## ABSTRACT

The Amazon Basin has a significant Paleozoic sedimentary record, partly exposed on the northern and southern edges. In recent years, sedimentological and stratigraphic studies have intensified on the northern edge of the basin, especially in the municipalities of Presidente Figueiredo, Rio Preto da Eva, and Urucará (AM), where marine and glacial sedimentary facies have been defined. The present study integrates sedimentological, palynostratigraphic, mineralogical, and microtextural data from outcrops in the Urubu, Uatumã, and Jatapu rivers, with the aim of defining correlation criteria. The results obtained allowed the identification of sedimentary facies characteristic of marine paleoenvironments (upper-lower shoreface and foreshore), intercalated with glacial deposits associated with the sedimentation of terminal moraines and subglacial-proglacial lagoons in the Nhamundá and Manacapuru formations. The recognized facies include sandstone with tabular cross-stratification (Act), sandstone with plane-parallel stratification bioturbated by *Cruziana* (Apbc), sandstone with plane-parallel stratification bioturbated by *Skolithos* (Apbs), sandstone with plane-parallel stratification (Ap), laminated pelite (Pl), as well as coarse polymictic (Dpp) and oligomictic (Dpo) diamictites and laminated pelite with dropstones (Pl<sub>d</sub>). Glacial deposits were identified in five locations, related to the Early Silurian (Llandovery-Wenlock) glacial event, as well as a new glacial event positioned in the Late Silurian-Early Devonian (Pridoli to Lochkovian) interval. The presence of faceted clasts, dropstones, and diagnostic microtextures (such as parallel striations) reinforces the action of glacial processes during the Silurian-Devonian in the Amazon Basin. Therefore, the integration of the geological-palynological data from this study with regional studies allowed the geological map of the studied area to be drawn up, with the definition of six sub-ranges of the Autás Mirim, Nhamundá, Manacapuru, Ererê, Barreirinhas, and Itaituba formations, oriented in an E-W direction.

**Keywords:** Amazon Basin; Paleozoic; Glaciomarine deposits; Palynology; Silurian-Devonian glaciation.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> – Mapa do Estado do Amazonas com a localização da área de estudo e indicação dos locais estudados, principalmente nos trechos das rodovias (BR-174 e AM-240) e rios (Urubu, Uatumã e Jatapu) (Detalhe A). O Detalhe B mostra o trecho do rio Urubu e BR-174 com maior concentração de pontos estudados.....                                                                                                                                                                                                                    | 16 |
| <b>Figura 2</b> – A) Separação granulométrica utilizando agitador de peneiras. B) Funis para separação de minerais pesados com líquido denso. C) Lâminas de minerais pesados.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 19 |
| <b>Figura 3</b> – Mapa geológico mostrando faixas aflorantes das sequências sedimentares paleozoicas das bordas norte e sul da bacia do Amazonas, além da sequência cretácea-terciária na porção central da bacia. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 22 |
| <b>Figura 4</b> – Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 25 |
| <b>Figura 5</b> – Mapa de localização da seção geológica A-A' (Modificado de). B) Correlação dos principais perfis estratigráficos das formações Nhamundá e Manacapuru, com destaque para o posicionamento das amostras de palinologia e individualização das biozonas B/V e C/VI, conforme indicado na figura 20.....                                                                                                                                                                                                                         | 30 |
| <b>Figura 6</b> – Seções panorâmicas mostrando a continuidade lateral das camadas de pelito laminado (Fácies Pl) na margem do Rio Urubu (pontos DEM-18, 28 e 48).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 32 |
| <b>Figura 7</b> – Seção colunar (ponto DEM-33) mostrando a predominância de pelitos da fácies Pl com intercalações delgadas de arenitos com estratificação plano-paralela incipiente. A-B) Intercalações de arenitos no pelito laminado, com indicação dos limites das camadas de pelitos indicadas por setas e linhas tracejadas.....                                                                                                                                                                                                         | 33 |
| <b>Figura 8</b> – A) Camada de arenito com estratificação cruzada microhummocky (H) (ponto DEM-62) mostrando laminação ondulada com comprimento de onda centimétrico (linha amarela). B) Camada de arenito mostrando estratificação cruzada microhummocky preservando na estrutura tipo swaley (Sw) (linha amarela). ....                                                                                                                                                                                                                      | 34 |
| <b>Figura 9</b> – A) Seção panorâmica e colunar (ponto DEM-62) do afloramento da fácies Pl com destaque para as intercalações de delgadas camadas de arenitos com estratificação cruzada <i>microhummocky</i> . B) Detalhe de icnofósseis tubulares horizontais ( <i>Cruziana</i> ). C) Detalhe da camada de arenito fino a muito fino, maciço.....                                                                                                                                                                                            | 35 |
| <b>Figura 10</b> – Seção panorâmica e colunar (ponto DEM-40 - Cachoeira Natal). A) Sucessão de camadas de arenitos das fácies Ap, Act e Apbc, sobrepostas por pelitos da fácies Pl. B) Relação de contato brusco entre as fácies Ap e Pl. C) Detalhe da camada de arenito com estratificação cruzada tabular incipiente (linhas vermelhas). D) Detalhe das marcas onduladas simétricas de crista reta (linhas vermelhas). E-F) Vista em planta de icnofósseis horizontais tubulares ( <i>Cruziana</i> ) no topo de set da fácies Ap e Act..... | 37 |
| <b>Figura 11</b> – A) Afloramento no rio Urubu da fácies Apbs (Ponto DEM-41). B) Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado. C) Visão em planta das cavidades arredondadas dos skolithos no arenito. D) Detalhe de marcas onduladas simétricas no topo das camadas (setas amarelas).....                                                                                                                                                                                                                                             | 39 |
| <b>Figura 12</b> – Perfil colunar do ponto CN-21. A-B) Afloramento no rio Uatumã (Cachoeira do Boto) da fácies Apbs. C) Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado com detalhes das cavidades arredondadas dos skolithos. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 40 |
| <b>Figura 13</b> – Perfil colunar do ponto DEM-34, com destaque nos detalhes do acamamento planar da fácies Ap com sets de 30 cm. B e C) Detalhe das camadas de arenito com estratificação plano-paralela incipiente. D) Vista superior da camada de arenito com estratificação plano-paralela e bioturbação por por skolithos (Ponto DEM-41).....                                                                                                                                                                                             | 41 |
| <b>Figura 14</b> – Fotomicrografia da fácies Ap (Pontos DEM-33 e 40). A) Textura do quartzo-arenito, com grãos de quartzo bem selecionados, predominantemente monocristalino (Qm), com grão de turmalina (seta branca) e predominância de contatos longitudinais (seta vermelha) (10x-NX). B) Grãos de quartzo monocristalino e policristalino (Qp), além de plagioclásio (Pl) com                                                                                                                                                             |    |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| contatos longitudinais e suturados (seta azul) (10x-NX). C) Grãos de quartzos monocristalinos e plaquetas de muscovita levemente deformada (Ms) (10x-NX). D) Detalhe do cimento ferruginoso (Cfg) entre os grãos de quartzo. Sigla: NX – nicóis cruzados. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 42  |
| <b>Figura 15</b> – Representação gráfica dos percentuais de minerais pesados transparentes presentes nas fácies foreshore-shoreface (Act, Pl e Ap).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 43  |
| <b>Figura 16.</b> Fotomicrografia da assembleia de minerais pesados das fácies foreshore-shoreface das formações Manacapuru e Nhamundá com grãos de zircão subangulosos a arredondados (A), grãos de turmalina arredondados (B), grãos de anatásio angulosos (C), grãos de rutilo angulosos (D), grão de silimanita subarredondados a subangulosos (E), grão de hornblenda anguloso (F) e grão de epídoto subarredondado a subanguloso (G).....                                                                                                                                                                                                                                      | 45  |
| <b>Figura 17</b> – Representação gráfica do grau de arredondamento das fácies Act, Ap e Pl. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 46  |
| <b>Figura 18</b> – Fotomicrografia de quitinozoários identificados neste estudo. <b>1.</b> Linochitina ex. gr. erratica, 05-EF:G42-4; <b>2.</b> Linochitina ex. gr. erratica, apertural view, 05-EF:G42-4, 100X; <b>3.</b> Linochitina sp. A, 05-EF: G42-4; <b>4.</b> Conochitina packycephala, 05-EF:034-3; <b>5.</b> Ancyrochitina gutnica, 07-EF:R60; <b>6.</b> Ancyrochitina cf. oliveirae, 01-EF:W34; <b>7.</b> Ancyrochitina sp. D, 30-EF:S36; <b>8.</b> Angochitina echinata, 09-EF:O35-4; <b>9.</b> Angochitina filosa, 06-EF:F52-2; <b>10.</b> Angochitina mourai, 06-EF:H49-2; <b>11.</b> Angochitina strigosa, 09-EF:L43-4; <b>12.</b> Angochitina sp. 1, 08-EF:X50. .... | 106 |
| <b>Figura 19</b> – Fotomicrografia de quitinozoários identificados neste estudo. <b>1.</b> Angochitina sp. 2, 08-EF:W44; <b>2.</b> Cingulachitina ervensis, 30-EF:F43-2; <b>3.</b> Cingulachitina serrata, 30-EF: P19-3; <b>4.</b> Cingulachitina sp., 08-EF:E57-1; <b>5.</b> Conochitina tuba, 09-EF:W55-2; <b>6.</b> Desmochitina cartesiana, 30-EF:Q33; <b>7.</b> Euconochitina gordonensis, 20-EF:L50-4; <b>8.</b> Euconochitina sp. nov, 30-EF:F44; <b>9.</b> Fungochitina sp. A, 08-EF:X41-2; <b>10.</b> Ramochitina bjornsundquisti, 09-EF:D50-3; <b>11.</b> Ramochitina autasmirimense; <b>12.</b> Rhabdochitina conocephala, 30-EF:L28.....                                 | 107 |
| <b>Figura 20</b> – Diagrama mostrando as distribuições de quitinozoários na seção de afloramento investigada (região de Presidente Figueiredo).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 108 |
| <b>Figura 21</b> – Mapa geológico da região dos rios Urubu, Uatumã e Jatapu, com destaque para as faixas sedimentares paleozoicas, de direção geral E-W, com limites estratigráficos estabelecidos pelos estudos de fácies sedimentares e palinologia. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 109 |
| <b>Figura 22</b> – A) Perfil estratigráfico do poço 2MNST-001 AM, com dados litológicos e geofísicos (Potencial Espontâneo - SP, Caliper - CAL, Resistividade - RSN/RLN). B) Modelo tridimensional das unidades paleozoicas e mesozoica no trecho entre Manaus e Presidente Figueiredo. C) Mapa geológico com a individualização das faixas sedimentares aflorantes na região de Presidente Figueiredo. ....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 112 |
| <b>Figura 23</b> – Mapas geológicos mostrando a delimitação das subfaixas sedimentares paleozoicas aflorantes nas bordas norte (A, deste estudo) e sul (B, Matsuda et al., 2010) da Bacia do Amazonas. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 115 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                      |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Tabela 1</b> – Descrição das fácies sedimentares marinhas e interpretação dos processos deposicionais. ....                                                                                                                       | 28  |
| <b>Tabela 2</b> – Frequência absoluta de minerais pesados transparentes nas fácies Act, Pl e Ap. Zr=Zircão, Tu=Turmalina, Ru=Rutilo, An=Anatásio, Sil=Silimanita, Ep=Epídoto, Hb=Hornblenda, N=Número total de grãos. ....           | 43  |
| <b>Tabela 3</b> – Frequência relativa dos tipos de grão de zircão das fácies estudadas. NZr= Número de contagem de zircão por lâminas.....                                                                                           | 46  |
| <b>Tabela 4</b> – Relação de ocorrência de espécimes identificadas nas amostras do rio Uatumã e Urubu. Descrição em cooperação com a Profa. Dra. Rosemary Silveira da UFAM e Profs. Drs. Rodolfo Dino e Luiza Antonioli da UERJ..... | 105 |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                                                                     | <b>13</b> |
| <b>2 OBJETIVOS .....</b>                                                                                                                      | <b>15</b> |
| 2.1 Objetivo geral .....                                                                                                                      | 15        |
| 2.2 Objetivos específicos.....                                                                                                                | 15        |
| <b>3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....</b>                                                                                                            | <b>16</b> |
| <b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                                                                            | <b>17</b> |
| 4.1 Levantamento de dados de campo.....                                                                                                       | 17        |
| 4.2 Produtos de sensores remotos e confecção do mapa geológico .....                                                                          | 17        |
| 4.3 Análise faciológica .....                                                                                                                 | 18        |
| 4.4 Separação de minerais pesados, confecção de lâminas de grãos e descrição petrográfica                                                     | 18        |
| 4.5 Confecção de lâminas delgadas e descrição petrográfica.....                                                                               | 19        |
| 4.6 Datação palinológica .....                                                                                                                | 19        |
| 4.7 Modelo tridimensional.....                                                                                                                | 20        |
| <b>5 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL .....</b>                                                                                                    | <b>22</b> |
| 5.1 Bacia do Amazonas .....                                                                                                                   | 22        |
| 5.2 Contexto estratigráfico dos municípios de Presidente Figueiredo, Rio Preto da Eva e<br>Urucará, borda norte da Bacia do Amazonas .....    | 26        |
| <b>6 RESULTADOS.....</b>                                                                                                                      | <b>28</b> |
| 6.1 Fácies sedimentares Siluro-Devonianas .....                                                                                               | 28        |
| 6.1.1 Depósitos de <i>Shoreface</i> Inferior .....                                                                                            | 30        |
| 6.1.1.1 Pelito laminado (Pl).....                                                                                                             | 31        |
| 6.1.2 Depósitos de <i>Shoreface</i> Superior.....                                                                                             | 36        |
| 6.1.2.1 Arenito com estratificação cruzada tabular (Act) .....                                                                                | 36        |
| 6.1.2.2 Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado por <i>Cruziana</i> (Apbc) .....                                                 | 37        |
| 6.1.3 Depósitos de <i>Foreshore</i> .....                                                                                                     | 38        |
| 6.1.3.1 Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado por <i>Skolithos</i> (Apbs).....                                                 | 38        |
| 6.1.3.2 Arenito com estratificação plano-paralela (Ap).....                                                                                   | 40        |
| 6.1.4 Minerais pesados .....                                                                                                                  | 42        |
| 6.1.4.1 Tipologia do zircão .....                                                                                                             | 45        |
| 6.2. Depósitos glaciais.....                                                                                                                  | 47        |
| 6.2.1 New occurrences of glacial deposits in the Presidente Figueiredo region, northern edge<br>of the Amazon Basin (Artigo submetido).....   | 47        |
| 6.2.2 Análise microtextural de depósitos glaciais da Formação Nhamundá, Siluriano da Bacia<br>do Amazonas (Capítulo de livro submetido) ..... | 89        |
| 6.3 Palinologia.....                                                                                                                          | 104       |
| 6.4 Unidades litoestratigráficas paleozoicas da borda norte da bacia .....                                                                    | 108       |

|                                                                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.1 Correlação estratigráfica de dados de superfície e subsuperfície .....                                 | 111        |
| <b>7 DISCUSSÃO .....</b>                                                                                     | <b>113</b> |
| <b>8 CONCLUSÃO.....</b>                                                                                      | <b>116</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                                                                      | <b>117</b> |
| <b>ANEXO A – Mapa geológico das faixas sedimentares paleozoicas da borda norte da Bacia do Amazonas.....</b> | <b>123</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A borda norte da Bacia do Amazonas apresenta um registro sedimentar paleozoico expressivo. Entretanto, o mapeamento geológico nesta porção da bacia é limitado, em função da dificuldade de acesso, da densa cobertura de vegetação e solo. Isso impossibilitam o posicionamento estratigráfico e a correlação das unidades sedimentares.

Apesar dessas limitações, estudos geológicos e paleontológicos pontuais realizados em áreas acessíveis desta borda, como na região de Presidente Figueiredo (AM), permitiram a delimitação preliminar de faixas sedimentares aflorantes pertencentes aos grupos Trombetas, Urupadi, Curuá e Tapajós (Lange, 1967; Reis *et al.*, 2006; Souza; Nogueira, 2009). No Grupo Trombetas, destacam-se as formações Nhamundá e Manacapuru, onde foram reconhecidas fácies sedimentares marinhas e glaciais (Soares, 1998; Soares *et al.*, 2005; Souza; Nogueira, 2009; Riker *et al.*, 2016; Cuervo *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2019). Particularmente, estudos palinológicos complementares realizados em pelitos aflorantes nos rios Urubu, Uatumã e Abacate definiram idades entre o Ludloviano e o Frasniano, além de evidências de glaciação durante o Llandoveryano-Wenlockiano, especificamente para a Formação Nhamundá (Melo, 1997; Melo; Steemans, 1997; Grahn; Melo, 2003; Steemans *et al.*, 2008).

Devido à escassez de estudos faciológicos e palinológicos sistemáticos na borda norte, os mapas geológicos disponíveis para essa região não apresentam uma delimitação detalhada das faixas aflorantes, com enfoque para a área de ocorrência geral do Grupo Trombetas, conforme enfatizado no mapa geológico do estado do Amazonas por Riker *et al.* (2016). Em contrapartida, a borda sul da bacia (região de Itaituba e Uruará no Pará) apresenta maior detalhamento cartográfico das unidades paleozoicas aflorantes, com definição das formações Pitinga, Maecuru, Ererê, Barreirinha, Curiri, Monte Alegre, Itaituba e Nova Olinda, dispostas em faixas alongadas na direção geral NE-SW (Vasquez *et al.*, 2008; Matsuda *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2015).

Nesse contexto, torna-se fundamental ampliar o conhecimento palinoestratigráfico da borda norte da Bacia do Amazonas, com ênfase na caracterização e delimitação de depósitos glaciomarinheiros. Portanto, este estudo enfatiza a delimitação cartográfica das faixas sedimentares paleozoicas na região de Presidente Figueiredo e adjacências, bem como as áreas de ocorrência de depósitos glaciais aflorantes. Particularmente, o estudo desses depósitos amplia trabalhos palinoestratigráficos e faciológicos regionais, como os de Soares *et al.* (2005) e Cuervo *et al.* (2018), visando à caracterização dos depósitos glaciomarinheiros do Grupo Trombetas, aflorantes nos rios Urubu, Uatumã e Jatapu.

Portanto, este estudo enfatiza a análise faciológica dos depósitos glaciomarinhos, apresentados no capítulo 6, que individualizaram as fácies de *foreshore-shoreface* (item 6.1) e glaciomarinhas (item 6.2.1), bem como as microtexturas superficiais em grãos de quartzo (item 6.2.2), que são indicativas dos eventos glaciais Siluro-Devonianos na borda norte da Bacia do Amazonas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Este trabalho visa investigar os depósitos sedimentares marinhos e glaciais da borda norte da Bacia do Amazonas por meio do estudo multiescalar das unidades sedimentares aflorantes nos rios Urubu, Uatumã e Jatapu, borda norte da Bacia do Amazonas.

### **2.2 Objetivos específicos**

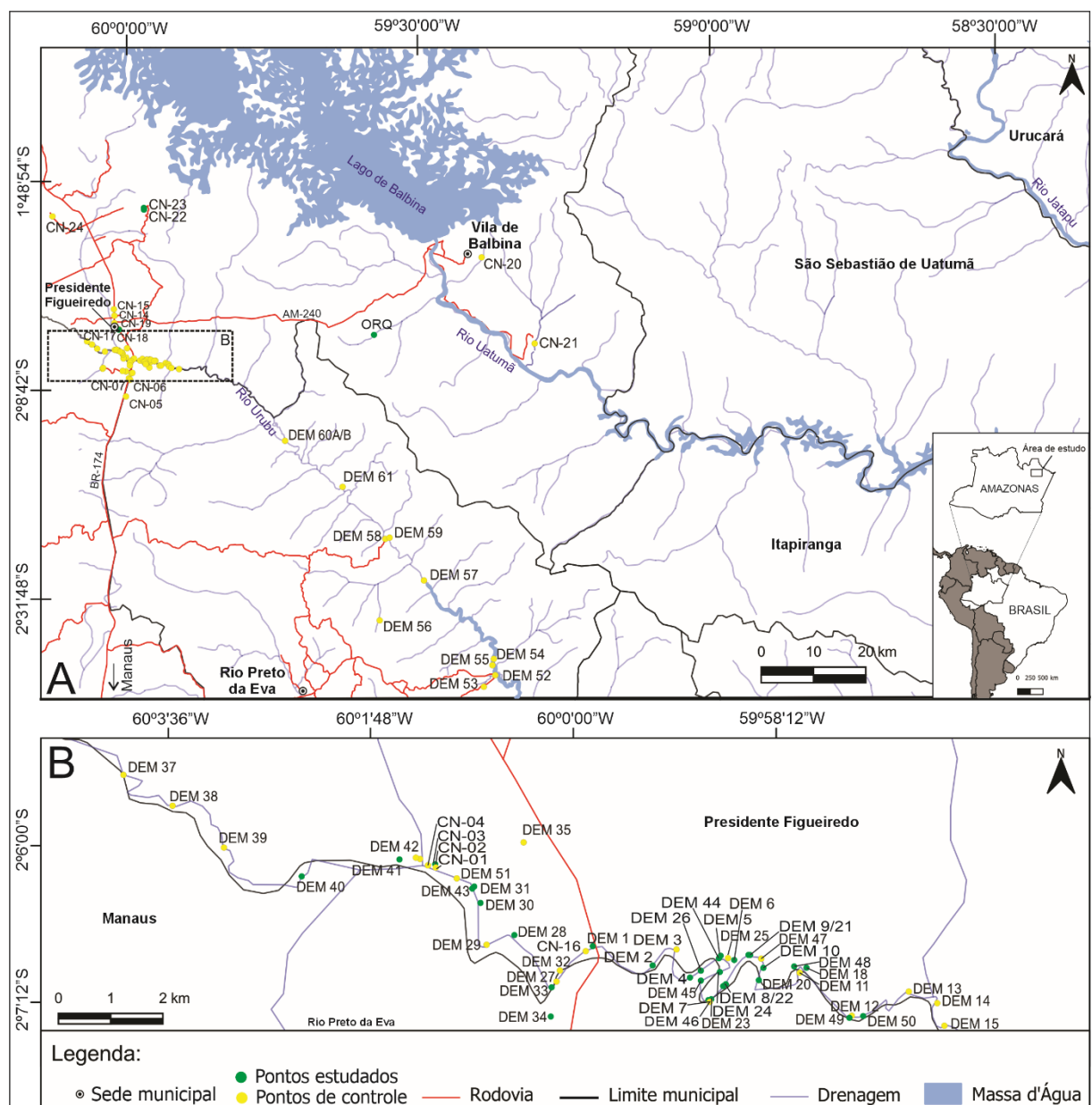
O presente trabalho teve os seguintes objetivos específicos:

- Estabelecer uma correlação espaço temporal das unidades sedimentares paleozoicas por meio da análise de fácies, auxiliada por dados palinológicos, microtexturais e geoquímicos;
- Propor um modelo deposicional para as unidades sedimentares por meio da integração de dados morfológicos, sedimentológicos, estratigráficos e palinológicos;
- Produzir mapa geológico atualizado da área estudada de ocorrência na borda norte da Bacia Amazonas a partir da integração de dados de mapeamento geológico de campo deste estudo com dados geológicos e paleontológicos de estudos anteriores.

### 3 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área de estudo localiza-se nos limites dos municípios de Presidente Figueiredo, Rio Preto da Eva e Urucará, norte do Estado do Amazonas, distante cerca de 100 km a nordeste de Manaus (Figura 1). O acesso principal foi por via terrestre ao longo das rodovias BR-174 (Manaus - Boa Vista) e AM-240 (Presidente Figueiredo - Vila de Balbina), além de deslocamento por via fluvial ao longo dos rios Urubu, Uatumã e Jatapu.

**Figura 1** – Mapa do Estado do Amazonas com a localização da área de estudo e indicação dos locais estudados, principalmente nos trechos das rodovias (BR-174 e AM-240) e rios (Urubu, Uatumã e Jatapu) (Detalhe A). O Detalhe B mostra o trecho do rio Urubu e BR-174 com maior concentração de pontos estudados.



Fonte: IBGE (2020).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste trabalho foi estruturada em sete etapas distintas: (1) Levantamento de dados de campo; (2) Análise de produtos de sensores remotos e confecção do mapa geológico; (3) Análise faciológica; (4) Separação de minerais pesados, confecção de lâminas de grãos e descrição petrográfica; (5) Confecção de lâminas delgadas e descrição petrográfica; (6) Datação palinológica e (7) Modelamento tridimensional com base em dados sísmicos.

### 4.1 Levantamento de dados de campo

Nesse estudo foram realizados trabalhos de campos, com a descrição de afloramentos e coleta sistemática de amostras em afloramentos ao longo dos rios Urubu e Uatumã, além de rodovias (BR-174 e AM-240) e ramais secundários. Os trabalhos de campo ocorreram entre 2015-2017 (siglas DEM, UT e ORQ) e em 2023 (sigla CN), e as amostras coletadas foram devidamente armazenadas no Laboratório de Sedimentologia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

### 4.2 Produtos de sensores remotos e confecção do mapa geológico

Para confecção do mapa geológico utilizou-se dados raster ALOS PALSAR, imagens aerogeofísicas do Projeto Aerogeofísico Pitinga (CPRM, 2007) e dados vetoriais de drenagem, rodovias e limites municipais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (Ano 2020), além de dados geológicos extraídos dos mapas do Serviço Geológico do Brasil - SGB (Ano 2016). As imagens ajudaram na identificação das principais unidades geológicas aflorantes e vias de acesso da região.

O mapa geológico das faixas sedimentares paleozoicas, na escala 1:900.000, foi confeccionado no *software* QGIS (versão 2023), por meio da integração de dados gerais extraídos de artigos de palinologia (Grahm; Melo, 2003; Steemans *et al.*, 2008), geocronologia (Riker *et al.*, 2016) e de fácies sedimentares (Soares *et al.*, 2005; Cuervo *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2019; Sousa *et al.*, 2021). Neste estudo, foram integrados dados de mapeamento geológico dos estudos de Soares (2013) no rio Uatumã e Alves (2014) no rio Jatapu, para auxiliar na delimitação das faixas paleozoicas que integram o mapa geológico (Anexo A).

### 4.3 Análise faciológica

A análise de fácies sedimentares seguiu a metodologia proposta por Walker (1992) e Miall (2000; 2013), onde foram determinadas a litologia, espessura, textura, estruturas sedimentares, tipo de contato, tamanho de grão, conteúdo da matriz e icnofósseis dos afloramentos visitados nos trabalhos de campo. Estas informações possibilitaram a associação de fácies cogenéticas para a determinação do ambiente deposicional, representadas em bloco diagrama através de um modelo 3D deposicional. A nomenclatura de fácies emprega o código de Miall (1977), a letra inicial denota a granulometria e as letras minúsculas significam as estruturas sedimentares.

Na análise individual dos afloramentos foram elaboradas seções panorâmicas, a partir de composições e superposições parciais de fotografias, seguindo a metodologia de Wisevich (1991) e Arnot *et al.* (1997). Nas seções colunares foram representadas graficamente a sucessão vertical dos litotipos, as estruturas, as relações de contato entre as camadas e os locais de coleta das amostras (Suguio, 1973). Dados petrográficos auxiliaram na descrição textural de algumas fácies sedimentares.

### 4.4 Separação de minerais pesados, confecção de lâminas de grãos e descrição petrográfica

A separação dos minerais pesados foi realizada em 9 amostras de arenitos e diamictitos, onde o concentrado final foi utilizado para a confecção das lâminas de grãos. A separação granulométrica das amostras foi efetuada através do peneiramento a seco, utilizando um conjunto de peneiras acopladas a um agitador mecânico (Figura 2A), no qual foi utilizado o intervalo de areia muito fina (0,125-0,062 mm), que corresponde a fração com maior quantidade e diversidade de minerais pesados, segundo Mange e Maurer (1992). Os intervalos coletados foram submetidos a separação gravimétrica por meio do líquido denso bromofórmio (densidade 2.89g/ml) em sistema acoplado de funil de vidro e béquer (Figura 2B). Posteriormente, os concentrados de minerais pesados foram submetidos a um ímã de mão para separação dos minerais ferro-magnesianos e utilizado a solução de ácido oxálico ( $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ ) para a retirada de impurezas sobre os grãos, como argila, silte e/ou películas ferruginosas. As lâminas de grãos foram confeccionadas com a resina não birrefringente (bálsamo do Canadá, índice de refração = 1.538) na chapa aquecedora (temperatura de 150°C) e, em seguida, recoberto com lamínulas de vidro (Figura 2C). As lâminas foram descritas com o auxílio do microscópio petrográfico Feldmann Wild Leitz do Laboratório de Microscopia do Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO/UFAM).

**Figura 2** – A) Separação granulométrica utilizando agitador de peneiras. B) Funis para separação de minerais pesados com líquido denso. C) Lâminas de minerais pesados.



**Fonte:** Autoria própria.

Os minerais pesados foram identificados por meio de suas características ópticas (forma, cor, pleocroísmo, clivagem, entre outras), seguindo a metodologia de Mange e Maurer (1992) e Coutinho e Coimbra (2005). Na análise quantitativa, foram contados de 100 a 300 grãos por lâmina para determinar a frequência de ocorrência dos minerais pesados (transparentes, não opacos e não micáceos), pelo método de contagem das linhas transversais de Galehouse (1969). Na análise da tipologia de zircão, que utilizou classificação de Powers (1953) e Pupin (1980), foram individualizadas famílias dos grãos de zircão pelas características ópticas similares (forma e grau de arredondamento), que podem fornecer informações sobre a possível área-fonte dos grãos.

#### 4.5 Confeção de lâminas delgadas e descrição petrográfica

Foram confeccionadas 14 lâminas delgadas nos laboratórios de laminação do Serviço Geológico do Brasil (SGB/AM) e da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), referentes a amostras de arenitos e diamictitos (siglas DEM-21, DEM-33, DEM-40, DEM-43, DEM-44, DEM-51, CN-03, CN-23 e ORQ 4 e 7). A descrição das lâminas delgadas seguiu a metodologia de Pettijonh *et al.* (1987), que classifica a rocha sedimentar com base na identificação dos constituintes do arcabouço, como tipos de grãos, matriz, cimento e poros. Na descrição foi utilizado o microscópio óptico *Feldmann Wild Leitz* com luz polarizada transmitida do Laboratório de Microscopia (PPGGEO/UFAM).

#### 4.6 Datação palinológica

Para análise palinológica foram selecionadas 30 amostras pelíticas no rio Urubu (sigla DEM), rio Uatumã e AM-240 (siglas UT e ORQ), no entanto, apenas 23 amostras tiveram resultados satisfatórios e o restante estéril. As amostras foram desagregadas mecanicamente e submetidas à ação de ácido clorídrico (HCl 32%), para remoção de carbonatos, posteriormente utilizado ácido fluorídrico (HF 40%) na remoção dos silicatos e, em seguida, ácido clorídrico diluído (HCl 10%) para remoção de fluorsilicatos formados no procedimento anterior. O material foi peneirado com uma malha de 200  $\mu\text{m}$  e o produto foi submetido à ação de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) e clorato de potássio ( $\text{KClO}_3$ ), em seguida sendo adicionado cloreto de zinco ( $\text{ZnCl}_2$ ) para separação do material pesado do mais leve (flotação). O produto final foi, então, peneirado em malha de 10  $\mu\text{m}$  e preparado em lâmina delgada para análise, conforme a metodologia descrita por Antonioli *et al.* (2020). O procedimento foi realizado no Laboratório de Palinomacerais do Departamento de Estratigrafia e Paleontologia (DEPA) da Faculdade de Geologia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), sob a coordenação do Prof. Dr. Rodolfo Dino e Profa. Dra. Luzia Antonioli, com a colaboração da Profa. Dra. Rosemery Silveira do Departamento de Geociências (UFAM).

#### 4.7 Modelo tridimensional

O modelo tridimensional foi elaborado a partir da integração de dados de superfície (mapeamento geológico) e geofísico de subsuperfície (duas linhas sísmicas e poço estratigráfico). Os dados de subsuperfície foram obtidos do Banco de Dados de Informações Petrolíferas da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP/SGB (Ano 2022). Esses dados correspondem a duas linhas sísmicas migradas (95 km) post-empilhadas em tempo, dispostas ao longo do trecho Manaus-Presidente Figueiredo, além de um poço com perfis geofísicos (Potencial Espontâneo, Caliper, Resistividade profunda e rasa). A informação de superfície tem como referência o afloramento da Formação Manacapuru, situado na ponte sobre o rio Urubu (km 99 da BR-174). Foi possível correlacionar os dados dos afloramentos com os do poço, por meio das unidades sedimentares identificadas.

A modelagem tridimensional foi realizada por meio da interpretação das linhas sísmicas seguindo os horizontes-chave (nos poços) em subsuperfície, seguindo o mergulho das camadas, até suas exposições na borda norte da Bacia do Amazonas. Esses horizontes foram interpolados para gerar as superfícies contínuas, que se integram aos dados do poço, com base na sequência estratigráfica definida previamente na coluna estratigráfica regional. O modelo 3D foi desenvolvido utilizando o *software Opendtect* (2022), que resultou na disposição espacial das

unidades segundo a ordem estratigráfica estabelecida.

## 5 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

### 5.1 Bacia do Amazonas

A Bacia do Amazonas apresenta uma área de 500.000km<sup>2</sup> na porção norte do Brasil, abrangendo parte dos estados do Amazonas, Pará e Amapá (Matsuda *et al.*, 2010; Vasquez *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2023). A bacia, inserida no Cráton Amazônico, sendo limitada pelo Escudo das Guianas ao norte, pelo Escudo Brasileiro ao sul, pelo Arco de Purus a oeste e pelo Arco de Gurupá a leste (Figura 3). A instalação da bacia está relacionada aos lineamentos NE-SW e E-W, gerados pelos movimentos tectônicos do megacontinente Gondwana durante o Paleozoico e pela instalação de sistemas de falhas normais e de transferência na geração de arcos e discordâncias regionais (Wanderley Filho, 1991).

**Figura 3** – Mapa geológico mostrando faixas aflorantes das sequências sedimentares paleozoicas das bordas norte e sul da bacia do Amazonas, além da sequência cretácea-terciária na porção central da bacia.



**Fonte:** Matsuda *et al.* (2010).

O preenchimento sedimentar da bacia compreende as megassequências paleozoica e mesozoico-cenozoica, que atinge espessuras de aproximadamente 5.000 m (Cunha *et al.*, 2007), conforme ilustrado na Figura 4. A megassequência paleozoica aflora em faixas alongadas de direção leste-oeste, nas bordas norte e sul da bacia, sendo encoberta pela faixa mesozoica-cenozoica na porção central (Wanderley Filho *et al.*, 2005).

A megassequência paleozoica, teria sido formada por incursões marinhas advindas de leste a oeste e suas unidades foram subdivididas em quatro sequências de segunda ordem:

Ordovício-Devoniana, Devono-Tournaisiana, Neoviseana e Pensilvaniano-Permiana, características dos paleoambientes marinho, transicional e continental, depositadas em ciclos transgressivos-regressivos (Cunha *et al.*, 2007).

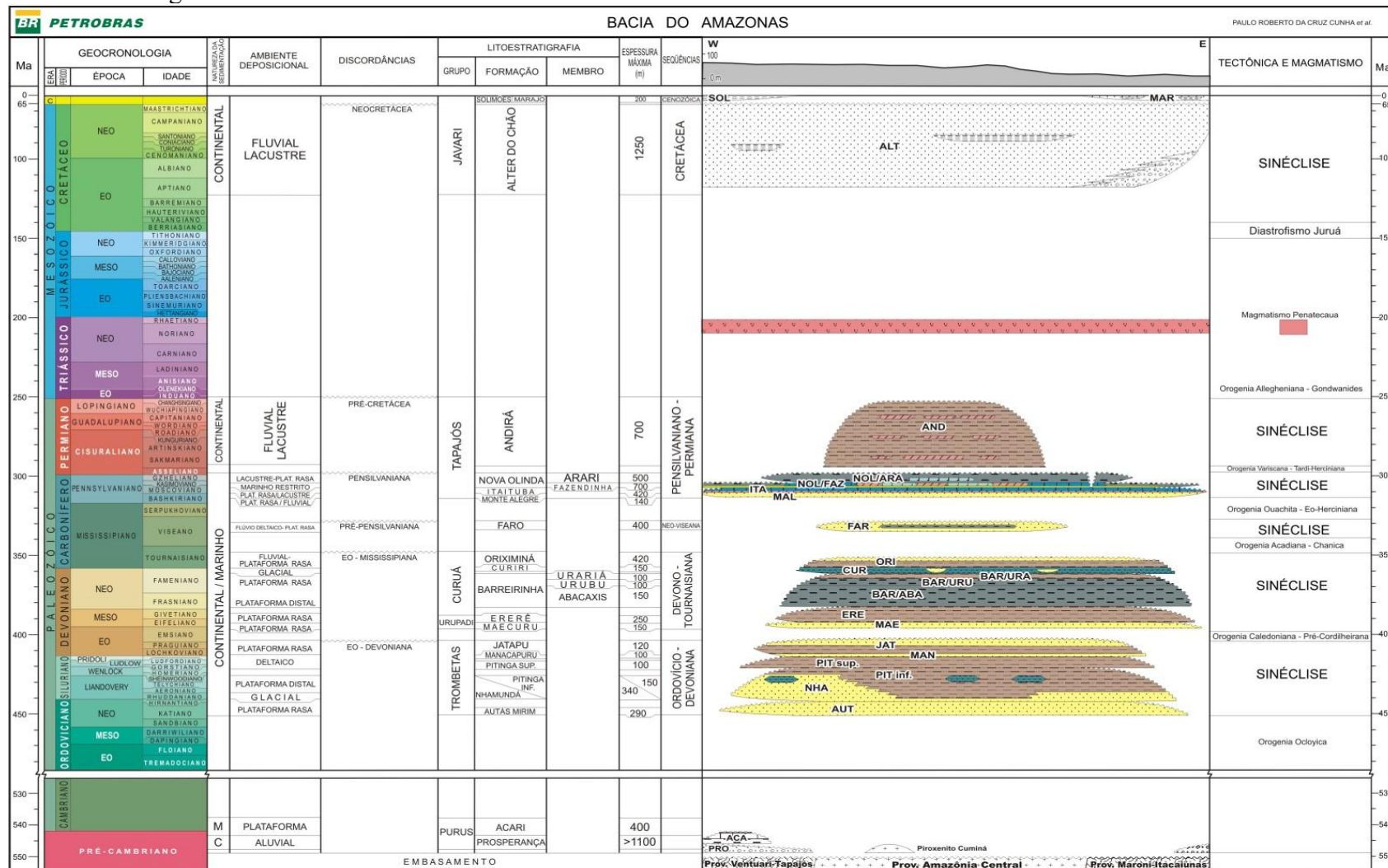
A Sequência Ordovício-Devoniana, registra o estágio inicial de preenchimento da bacia, representada pelo Grupo Trombetas, subdividido nas formações Autás Mirim, Nhamundá, Pitinga, Manacapuru e Jatapu, compostas por sedimentos marinhos e glaciais (Cunha *et al.*, 2007). A Sequência Devono-Tournaisiana, representa estágio deposicional marinho com incursões glaciais, dos Grupos Urupadi (formações Maecuru e Ererê) e Curuá (formações Barreirinha, Curiri e Oriximiná), compostas por sedimentos marinhos e glaciais. A Sequência Neoviseana é composta apenas pela Formação Faro, caracterizada por sedimentos flúvio-deltaicos e litorâneos com influência de tempestades (Cunha *et al.*, 2007). Por fim, a Sequência Pensilvaniano-Permiana registra um novo ciclo deposicional transgressivo-regressivo na bacia, após um hiato temporal de cerca de 15 Ma, representada pelo Grupo Tapajós (formações Monte Alegre, Itaituba, Nova Olinda e Andirá), compostas por depósitos eólicos, lagunares, marinhos/inframaré e planícies de *sabkha*.

Em trechos da região de Itaituba e Uruará na borda sul, o detalhamento geológico (Matsuda *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2015) definiu faixas de sequências paleozoicas aflorantes, como Ordovicio-Devoniana (Formação Pitinga), Devoniana-Tournaisiana (formações Maecuru, Ererê, Barreirinha e Curiri) e Pensilvaniana-Permiana (formações Monte Alegre e Itaituba). Já na borda norte, o detalhamento geológico-palinológico é menos expressivo, com a definição das faixas aflorantes referentes às sequências Ordovicio-Devoniana (formações Autás Mirim, Nhamundá, Pitinga e Manacapuru), Devoniana-Tournaisiana (formações Ererê e Barreirinha) e Pensilvaniana-Permiana (Formação Itaituba) (Riker *et al.*, 2016; Vasquez *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2023).

A sedimentação da megassequência Mesozoico-Cenozoica advém do relaxamento dos esforços compressivos relacionados ao Diastrofismo Juruá (Cunha *et al.*, 2007; Reis *et al.*, 2016), sendo composta pelas sequências cretácea e terciária, representadas pelas formações Alter do Chão e Solimões do Grupo Javari. A Formação Alter do Chão é constituída de arenitos, pelitos e conglomerados característicos de um paleoambiente fluvio-deltaico-lacustre (Cunha *et al.*, 2007; Nogueira *et al.*, 1997; Dino *et al.*, 1999), enquanto a Formação Solimões é constituída principalmente por pelitos com níveis fossilíferos associados ao paleoambiente deltaico-lacustre, individualizadas por contato discordante melhor definido na porção oeste da bacia (Cunha *et al.*, 2007). Depósitos neógenos foram identificados em afloramentos da porção oeste da Bacia do Amazonas, sob a denominação de Formação Novo Remanso (Rozo *et al.*,

2005; Rozo *et al.*, 2012), constituída predominantemente por arenitos, pelitos e conglomerados subordinados, que são características de um paleosistema fluvial meandrante, sendo delimitada na base e no topo por superfícies de descontinuidades, que por vezes apresentam desenvolvimento de paleossolos lateríticos (Dino *et al.*, 2012; Soares *et al.*, 2015).

Figura 4 – Carta estratigráfica da Bacia do Amazonas.



Fonte: Cunha et al. (2007).

## 5.2 Contexto estratigráfico dos municípios de Presidente Figueiredo, Rio Preto da Eva e Urucará, borda norte da Bacia do Amazonas

No trecho da borda norte, que abrange a área dos municípios de Presidente Figueiredo, Rio Preto da Eva e Urucará, o contexto geológico aflorante compreende unidades do embasamento cristalino Paleoproterozoico e da sequência sedimentar Proterozoica-cenozoica. As rochas do embasamento estão inseridas no contexto das províncias geocronológicas Ventuari-Tapajós (Tassinari; Macambira, 1999) e Tapajós-Parima (Santos *et al.*, 2006), sendo representadas por rochas vulcânicas (dacitos, andesitos e riolitos) do Grupo Iricoumé e por rochas graníticas (granodiorito, sienito, monzogranito e tonalitos) das Suítes Intrusivas Água Branca e Mapuera (Reis *et al.*, 2006; Souza; Nogueira, 2009).

A sequência sedimentar proterozoica é marcada por faixa estreita e alongada de rochas siliciclásticas (conglomerados, arenitos e pelitos) da Formação Prosperança (Grupo Purus) (Souza; Nogueira, 2009; Barbosa; Nogueira, 2011). Entretanto, estudos geocronológicos atuais nesses depósitos, com base em datação U/Pb de zircões detriticos, permitiram sua associação com a Formação Autás Mirim, com posicionamento no intervalo entre o Cambriano (486-541 Ma) ao Ordoviciano Superior, sendo representada por arenitos e pelitos característicos de ambiente estuarino (Riker *et al.*, 2016).

As unidades sedimentares paleozoicas desta região compõem uma faixa continua, de direção geral E-W, representadas pelas formações Autás Mirim, Nhamundá, Pitinga e Manacapuru do Grupo Trombetas (Caputo, 1984, Cunha *et al.*, 1994; Cunha *et al.*, 2007; Soares *et al.*, 2005; Reis *et al.*, 2006; Riker *et al.*, 2016; Cuervo *et al.*, 2018), sendo delimitada ao sul pela sequência mesozoica-cenozoica (Souza; Nogueira, 2009). Entretanto, estudos faciológicos, estratigráficos e palinológicos nessas unidades ainda são escassos e pontuais, com destaque para os trabalhos voltados aos afloramentos da porção sul do município de Presidente Figueiredo (incluindo a Vila de Balbina), onde Soares *et al.* (2005) definiram fácies sedimentares não deformadas, características de ambiente marinho raso (*foreshore-shoreface*) e fácies deformadas associadas a ambiente glacial. Nesta região, Cuervo *et al.* (2018) também identificaram afloramentos característicos dos paleoambientes de *foreshore* e *shoreface*, além de nova fácies de diamictito grosseiro, contendo seixos facetados e estriados, a qual foi englobada na zona glacial definida para a Formação Nhamundá, que se estende por cerca de 80 km. Localmente, depósitos sedimentares de rochas carbonáticas da Formação Itaituba foram definidos na área do Rio Jatapu, sendo associado ao paleoambiente marinho raso em plataforma carbonática do tipo em rampa.

Em geral, o posicionamento estratigráfico das unidades paleozoicas aflorante na borda norte da Bacia do Amazonas teve como base os estudos palinológicos de Melo (1997) e Melo e Steemans (1997), que identificaram palinomorfos do Landoveriano-Wenlockiano nos folhelhos da Formação Nhamundá. Além disso, Grahn e Melo (2003) e Steemans *et al.* (2008), caracterizaram assembleias de palinomorfos indicativas do Ludloviano ao Frasniano em afloramentos das formações Manacapuru (Eolochkoviana), Ererê (Neoeifeliana-Eogivetiana) e Barreirinha (Fransniana), ao longo dos rios Urubu, Uatumã e Abacate. Particularmente, em afloramento da Formação Manacapuru do Rio Urubu, Rocha *et al.* (2019) identificaram assembleia de quitinozoários de idade Lochkoviana Inferior que, associada a dados faciológicos, permitiu caracterizar para esta formação um paleoambiente de *offshore* inserido em uma plataforma marinha rasa e influenciada por ondas de tempestades.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Fácies sedimentares Siluro-Devonianas

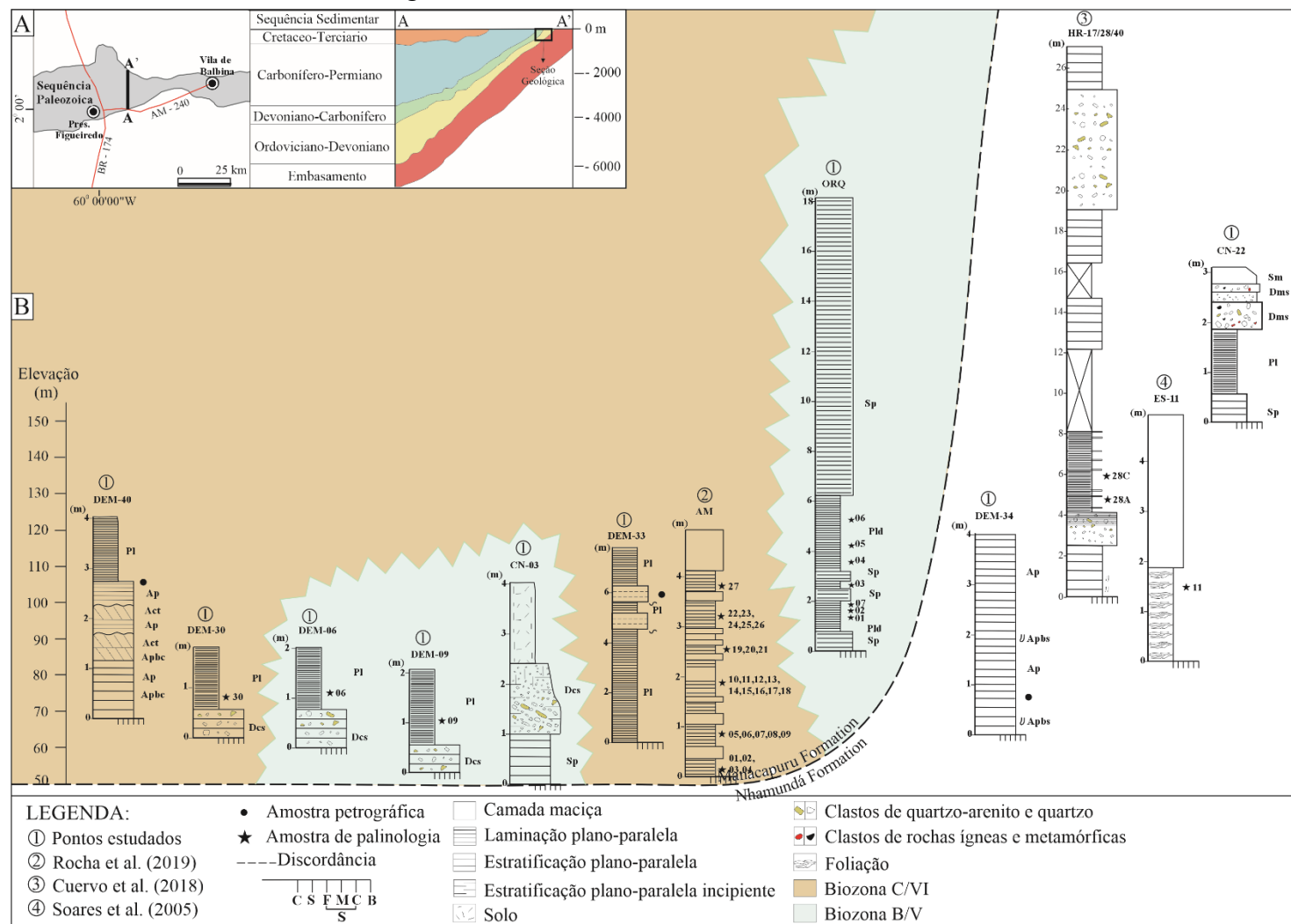
Nos afloramentos estudados das formações Nhamundá e Manacapuru foram identificadas 05 fácies sedimentares distintas, relacionadas aos paleoambientes de *shoreface* Inferior - Superior e *foreshore* (Tabela 1), as quais exibem intercalações esparsas de depósitos glaciais (verificar item 6.2). Foram integrados nove perfis estratigráficos deste estudo (siglas DEM, CN e ORQ) com perfis previamente publicados nos trabalhos regionais de Soares et al. (2005) (sigla ES-11), Cuervo et al. (2018) (sigla HR) e Rocha et al. (2019) (sigla AM), com a definição do limite discordante entre essas formações (Figura 5).

**Tabela 1** – Descrição das fácies sedimentares marinhas e interpretação dos processos deposicionais.

| Ambiente           | Fácies Sedimentares                                                              | Descrição                                                                                                                                                | Processos                                                                                                                                                         |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Shoreface Inferior | Pelito laminado (Pl)                                                             | Pelito de composição siltico-argiloso, cinza a marrom, exibindo laminação plano-paralela.                                                                | Decantação de material fino em ambiente de baixa energia, com alternância de períodos com a ação de fluxo trativo durante eventos de ondas de tempestade.         |
| Shoreface Superior | Arenito com estratificação cruzada tabular (Act)                                 | Arenito médio, bege, com estratificação cruzada tabular. Ocorre em <i>sets</i> de até 10 cm, com marcas onduladas simétricas no topo das camadas.        | Migração de dunas subaquosas com crista reta em regime de fluxo inferior.                                                                                         |
|                    | Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado por <i>Cruziana</i> (Apbc)  | Arenito fino a médio, bege a marrom, com estratificação plano-paralela bioturbado por icnofóssil horizontal <i>Cruziana</i> .                            | Fluxo oscilatório de grande intensidade em uma única direção preferencial com bioturbação horizontalizada de organismos de zona de energia relativamente elevada. |
| Foreshore          | Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado por <i>Skolithos</i> (Apbs) | Arenito fino a médio, bege a esbranquiçado, com estratificação plano-paralela, dispostos em <i>sets</i> de 10 a 20 cm, bioturbado por <i>Skolithos</i> . | Fluxo oscilatório de grande intensidade em uma única direção preferencial com bioturbação verticalizada de organismos de zona de energia relativamente elevada.   |

|  |                                                |                                                                                                                                                                         |                                                                                                                 |
|--|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Arenito com estratificação plano-paralela (Ap) | Arenito fino a médio, bege, em sets entre 3,0 e 4,0 cm e <i>cosets</i> de até 4,0 m com ampla extensão lateral. Localmente, apresenta marca ondulada no topo da camada. | Ação de fluxo e refluxo da água na praia, principalmente em zona de espraiamento de onda ( <i>wave swash</i> ). |
|--|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

**Figura 5** – Mapa de localização da seção geológica A-A'. B) Correlação dos principais perfis estratigráficos das formações Nhamundá e Manacapuru, com destaque para o posicionamento das amostras para minerais pesados, lâminas delgadas e palinologia, seguindo a individualização das biozonas B/V e C/VI, conforme indicado na figura 20.



**Fonte:** Soares et al. (2005), Cuervo et al. (2018), Rocha et al. (2019) e Gonzaga et al. (2000).

### 6.1.1 Depósitos de *Shoreface* Inferior

#### 6.1.1.1 Pelito laminado (Pl)

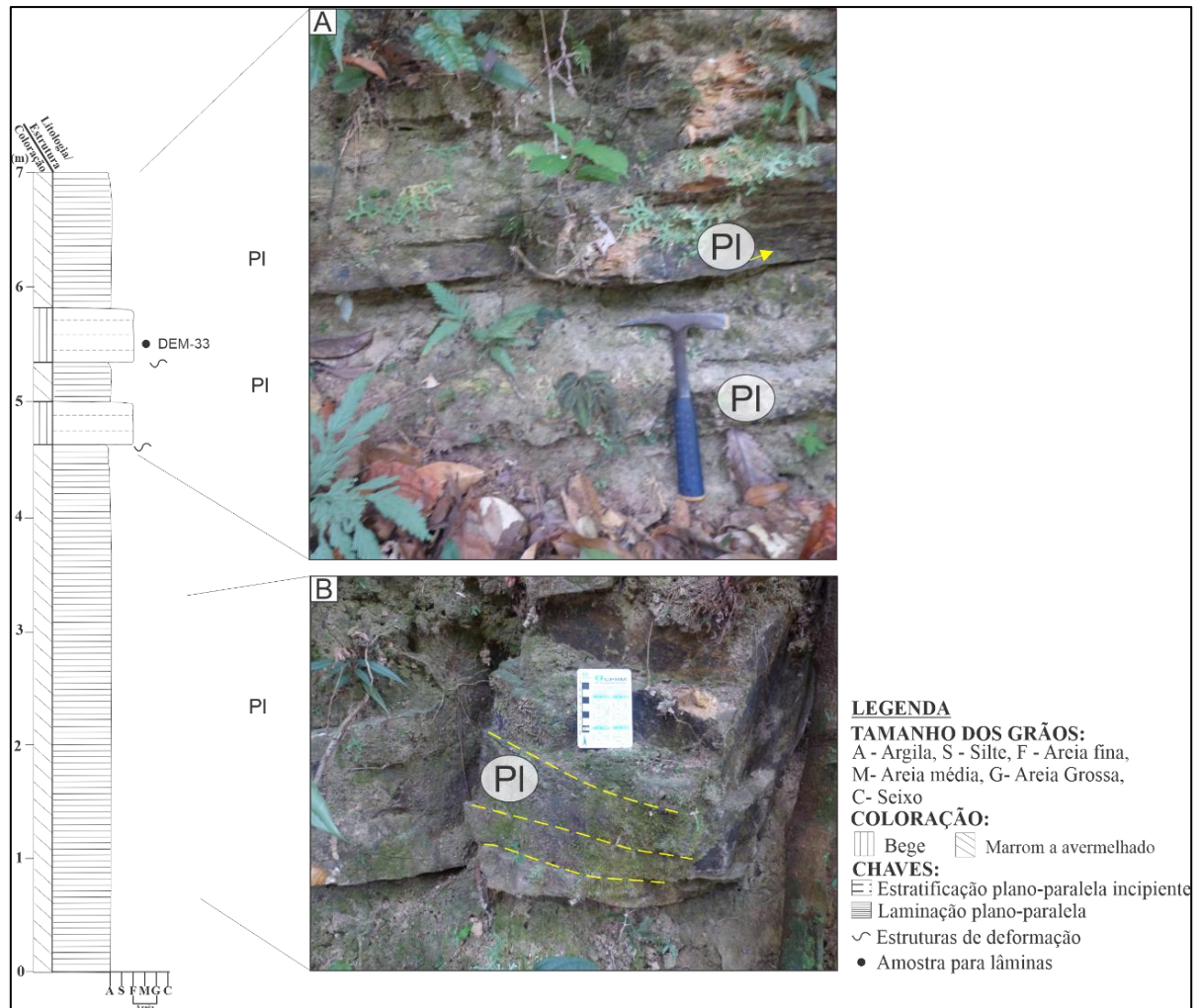
Pelito de composição siltico-argilosa, coloração cinza médio a marrom, com laminação plano-paralela. Ocorre em camadas com espessuras decimétricas a centimétricas (50 cm a 1 m), com intercalações delgadas de camadas de arenito fino a muito fino, em espessura entre 7 cm até 20 cm, com laminação plano-paralela (Figuras 6, 7, 9 e 10) e com estratificação cruzada *microhummocky* e *swaley*, preservando a laminação côncava e convexa nas camadas, e com comprimento de onda de 3 a 5,6 cm (Figuras 8 e 9). Na base das camadas de arenito observa-se feições de afundamento no pelito sotoposto (estrutura de sobrecarga) com laminação convoluta. Restritamente, a fácies Pl também apresenta intercalações de delgadas camadas de arenito maciço com bioturbação horizontal (Figura 10) e depósitos glaciais intraformacionais, representados por diamictito polimítico (verificar item 6.2.1 – Fig. 3) e pelito com dropstone (verificar item 6.2.1 – Fig. 9).

**Figura 6** – Seções panorâmicas mostrando a continuidade lateral das camadas de pelito laminado (Fácies PI) na margem do Rio Urubu (pontos DEM-18, 28 e 48).



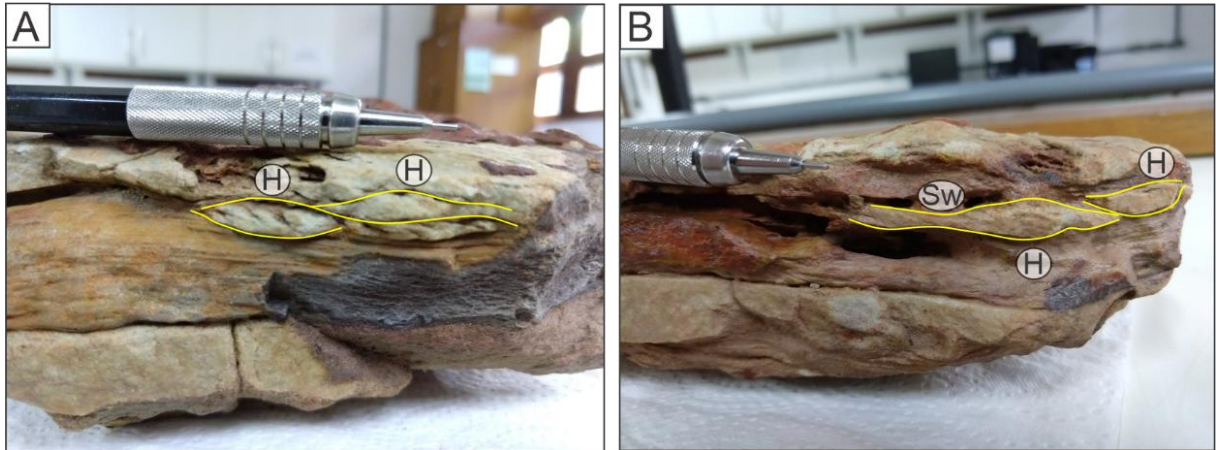
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 7** – Seção colunar (ponto DEM-33) mostrando a predominância de pelitos da fácies PI com intercalações delgadas de arenitos com estratificação plano-paralela incipiente. A-B) Intercalações de arenitos no pelito laminado, com indicação dos limites das camadas de pelitos indicadas por setas e linhas tracejadas.



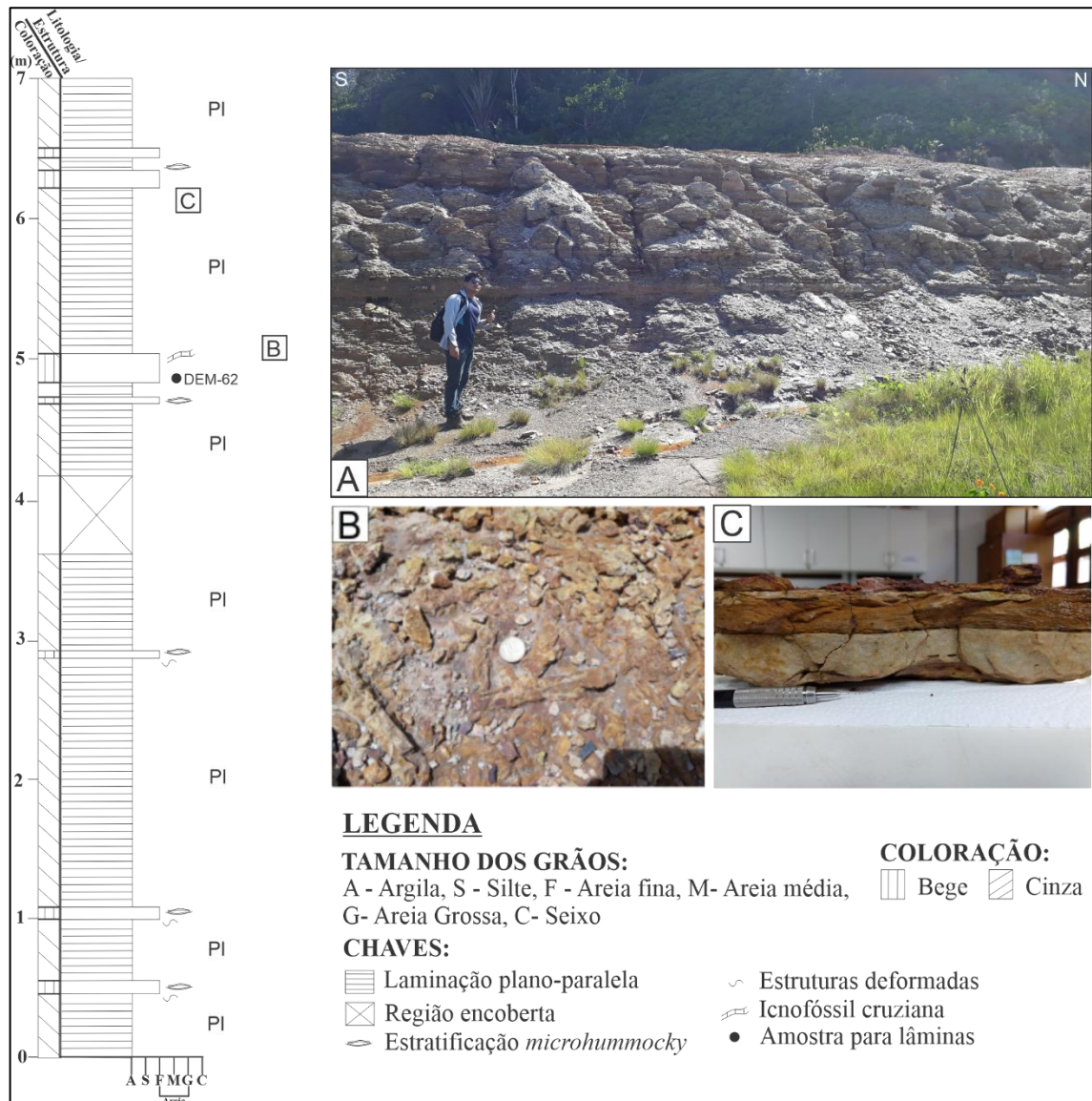
**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 8** – A) Camada de arenito com estratificação cruzada *microhummocky* (H) (ponto DEM-62) mostrando laminação ondulada com comprimento de onda centimétrico (linha amarela). B) Camada de arenito mostrando estratificação cruzada *microhummocky* preservando na estrutura tipo *swaley* (Sw) (linha amarela).



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 9** – A) Seção panorâmica e colunar (ponto DEM-62) do afloramento da fácies PI com destaque para as intercalações de delgadas camadas de arenitos com estratificação cruzada *microhummocky*. B) Detalhe de icnofósseis tubulares horizontais (*Cruziana*). C) Detalhe da camada de arenito fino a muito fino, maciço.



**Fonte:** Autoria própria.

### Interpretação

A fácies PI resulta da deposição de sedimentos por meio de suspensão, em condições de baixa energia (Miall, 2013). As intercalações de camadas de arenitos com estratificação cruzada *microhummocky* resultam do fluxo oscilatório de grande intensidade típica de ondas de tempestades e as feições de sobrecarga observada na base das camadas estão relacionadas ao afundamento por densidade das camadas de areia (Walker; Plint, 1992; Miall, 2000; Tucker,

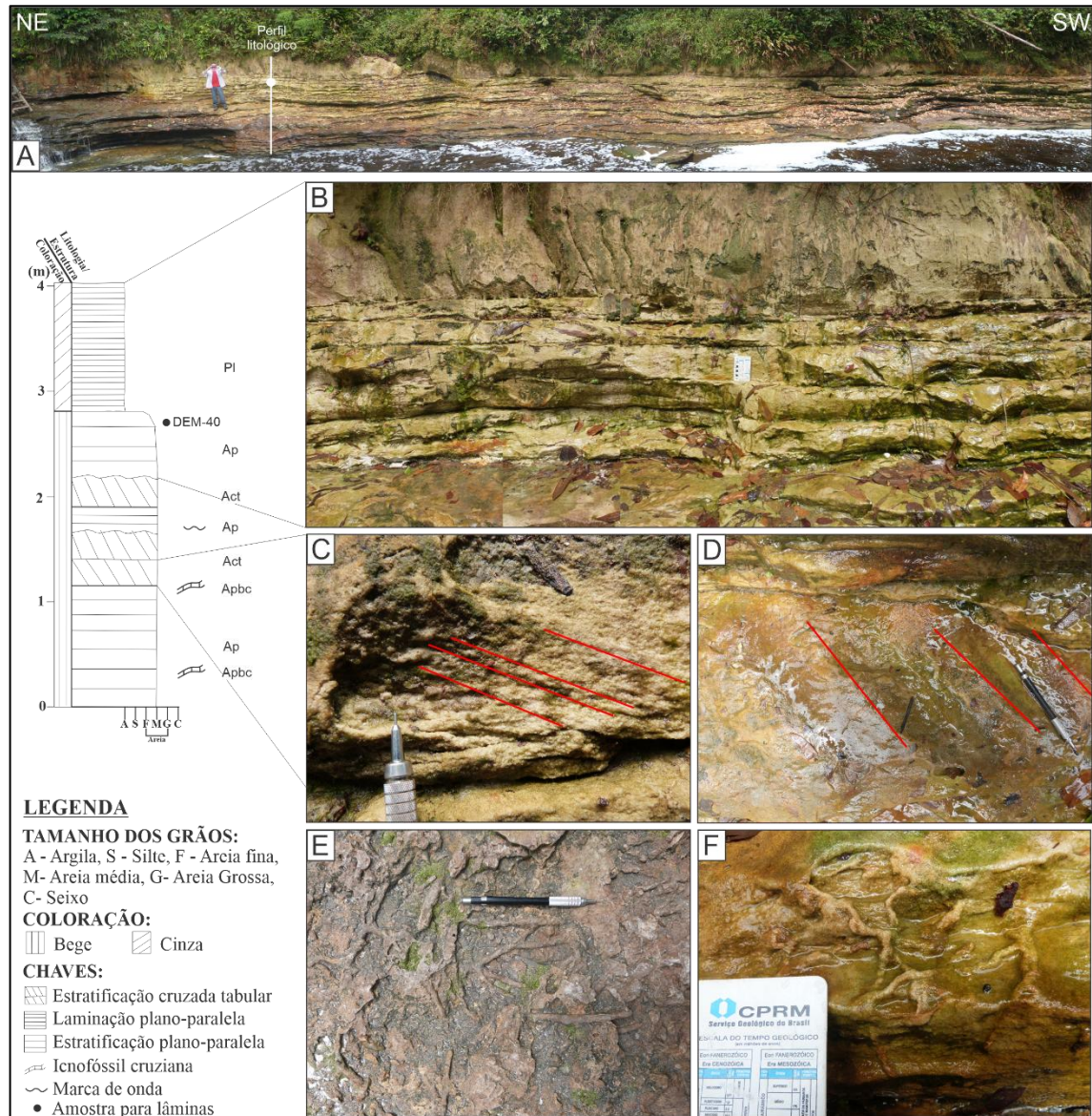
2003). Fácies sedimentares compostas por intercalações de pelitos e arenitos (com *microhummocky*) ocorrem em ambientes de baixa energia, com ocorrências esporádicas de ondas de tempestades, associadas ao ambiente de *shoreface* inferior, segundo interpretação de Plint (2010) e Nichols (2009). O arenito maciço bioturbado por icnofóssil horizontal (*Cruziana*) é resultante da atividade de escavação de organismos vermiformes ao longo da interface areia-lama em zonas de baixa energia (Buatois; Mangano, 2011; MacEachern; Pemberton, 1992).

### **6.1.2 Depósitos de *Shoreface* Superior**

#### **6.1.2.1 Arenito com estratificação cruzada tabular (Act)**

Arenito médio, bege, bem selecionado, com estratificação cruzada tabular incipiente (Figura 10A-B). Ocorre em *sets* tabulares com espessura de 20 a 30 cm e continuidade lateral de até 5 m (Figura 10C). Restritamente, ocorrem marcas onduladas simétricas no topo dos *sets*, com comprimento de onda variando de 5 a 10 cm e 3 cm de altura (Figura 10D). Esta fácies mostra-se intercalada com as fácies Pl, Ap e Apbc (Figura 10).

**Figura 10** – Seção panorâmica e colunar (ponto DEM-40 - Cachoeira Natal). A) Sucessão de camadas de arenitos das fácies Ap, Act e Apbc, sobrepostas por pelitos da fácies Pl. B) Relação de contato brusco entre as fácies Ap e Pl. C) Detalhe da camada de arenito com estratificação cruzada tabular incipiente (linhas vermelhas). D) Detalhe das marcas onduladas simétricas de crista reta (linhas vermelhas). E-F) Vista em planta de icnofósseis horizontais tubulares (*Cruziana*) no topo de set da fácies Ap e Act.



Fonte: Autoria própria.

#### 6.1.2.2 Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado por *Cruziana* (Apbc)

Arenito fino a médio, bege, bem selecionado, com estratificação plano-paralela exibindo feições tubulares horizontais de bioturbação por icnofósseis (*Cruziana*). Ocorre em camadas centimétricas (5 a 10 cm) intercalada aos arenitos da fácies Act (Figura 10E-F). Os icnofósseis estão dispostos na forma de tubos horizontalizados, por vezes, ramificados, com dimensões

variando de 1,0 a 3,0 cm de diâmetro que se estendem por aproximadamente 5 cm.

## **Interpretação**

Fácies de arenito com estratificação plano-paralela resulta do fluxo oscilatório de grande intensidade em uma única direção preferencial, onde a bioturbação de organismos de zona de energia relativamente elevada com tocas horizontalizadas. O icnofóssil da fácies Apbc foi interpretado como pertencente à icnofácies *Cruziana*, onde os tubos horizontais são resultantes da atividade de escavação de organismos vermiformes ao longo da interface areia-lama (Buatois; Mangano, 2011).

A fácies Act resulta da migração de forma de leito 2D sob fluxo unidirecional e regime de fluxo inferior (Miall, 2000). Marca ondulada com crista reta gera laminações cruzadas que mergulham na mesma direção do fluxo e são produzidas por correntes bidirecionais (Miall, 2000; Walker, 1992).

### **6.1.3 Depósitos de *Foreshore***

#### **6.1.3.1 Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado por *Skolithos* (Apbs)**

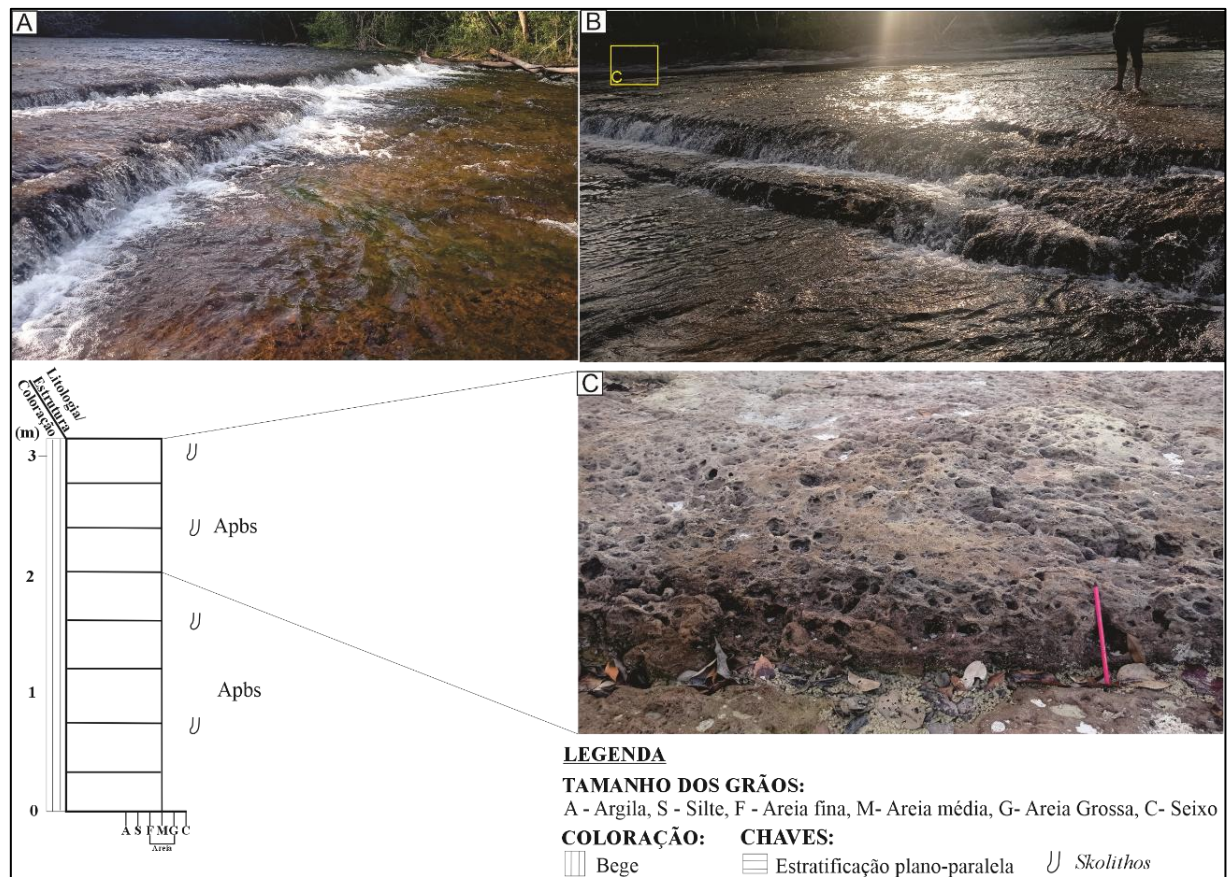
Arenito fino a médio, bege, bem selecionado, com estratificação plano-paralela incipiente com bioturbação por *skolithos* (Figura 11A-B, 12C e 13D). Os icnofósseis são caracterizados como tubos verticais com diâmetro de 0,5 a 1,0 cm e comprimento de até 5 cm. As cavidades são preenchidas pelo mesmo material arenoso que o envolve (Figura 11C). Por vezes, apresenta nos topos dos sets pequenas marcas onduladas simétricas com comprimento de onda variando de 5 a 10 cm e cerca de 3 cm de altura (Figura 11D).

**Figura 11** – A) Afloramento no rio Urubu da fácies Apbs (Ponto DEM-41). B) Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado. C) Visão em planta das cavidades arredondadas dos *skolithos* no arenito. D) Detalhe de marcas onduladas simétricas no topo das camadas (setas amarelas).



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 12** – Perfil colunar do ponto CN-21. A-B) Afloramento no rio Uatumã (Cachoeira do Boto) da fácies Apbs. C) Arenito com estratificação plano-paralela bioturbado com detalhes das cavidades arredondadas dos *skolithos*.

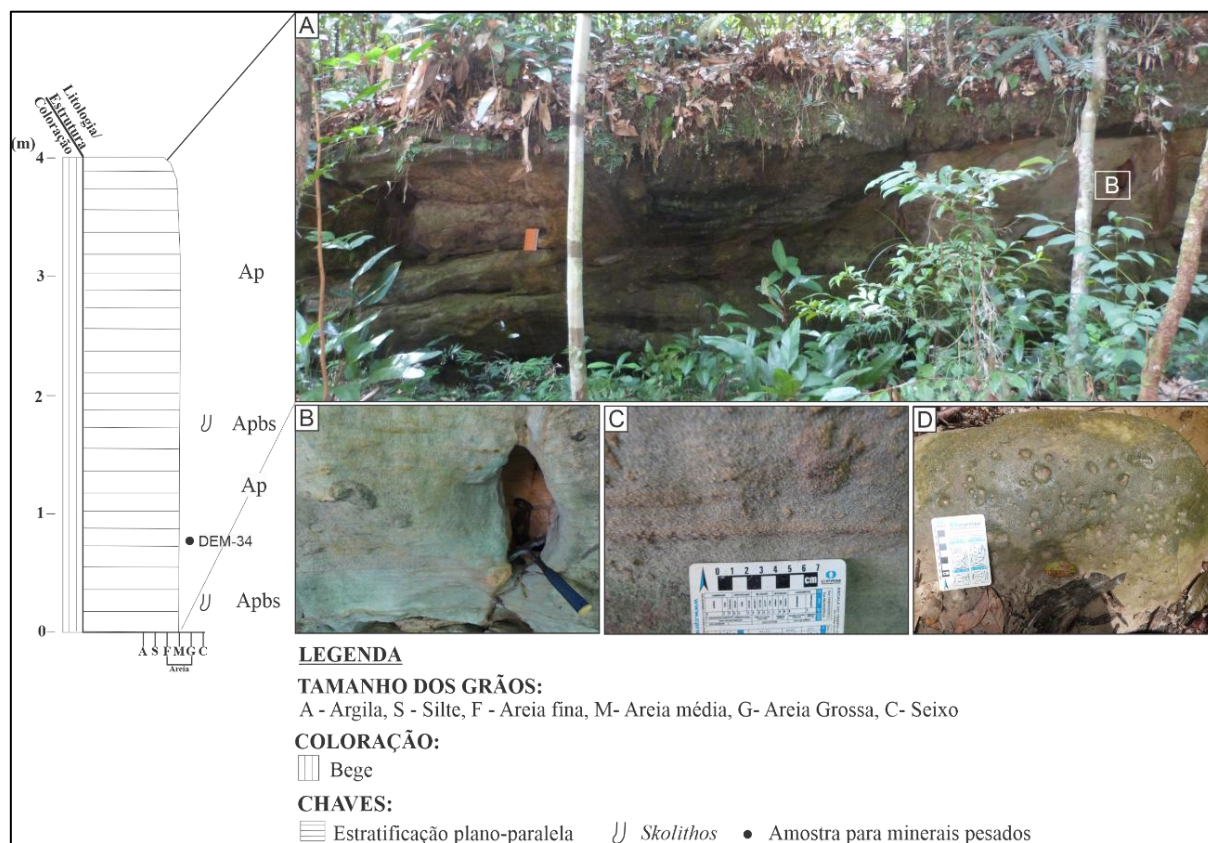


**Fonte:** Autoria própria.

### 6.1.3.2 Arenito com estratificação plano-paralela (Ap)

Arenito fino a médio, bege, bem selecionado, com estratificação plano-paralela, por vezes incipientes. Apresentam-se em *sets* de espessura entre 3,0 a 40 cm, formando *cosets* de 4,0 m (Figura 13). Em geral, essa fácies está intercalada com as fácies Pl e Apbs (Figuras 10 e 13), além dos diamictitos polimítico e oligomítico (verificar item 6.2.1 – Fig. 3 e 6) e pelito com *dropstone* (verificar item 6.2.1 – Fig. 9).

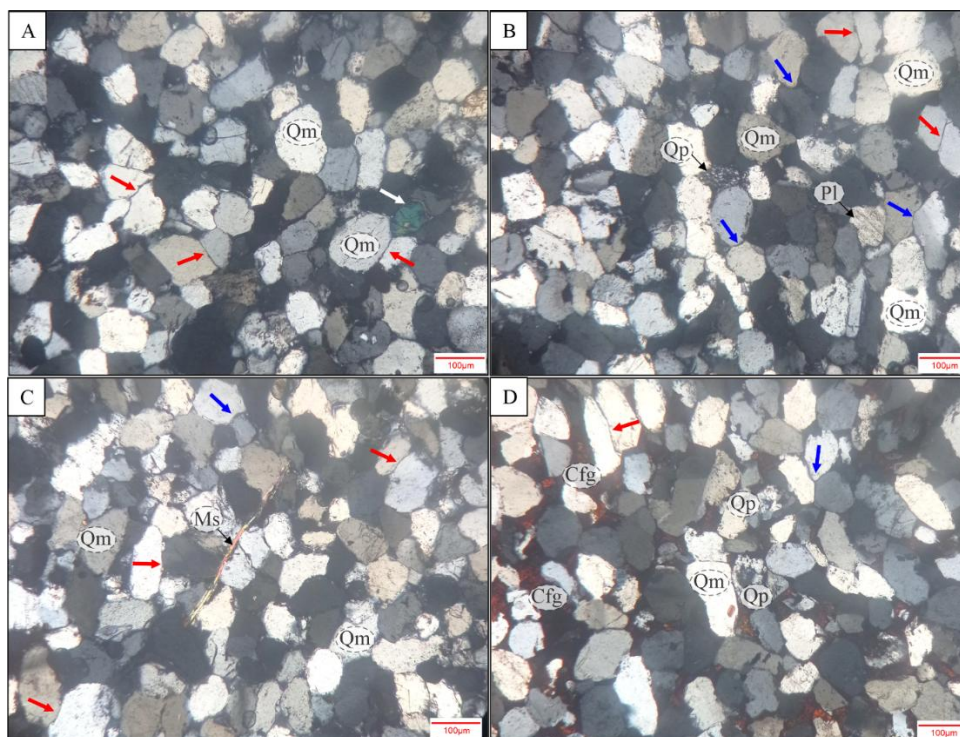
**Figura 13** – Perfil colunar do ponto DEM-34, com destaque nos detalhes do acamamento planar da fácies Ap com sets de 30 cm. B e C) Detalhe das camadas de arenito com estratificação plano-paralela incipiente. D) Vista superior da camada de arenito com estratificação plano-paralela e bioturbação por por *skolithos* (Ponto DEM-41).



**Fonte:** Autoria própria.

Internamente, o arenito é constituído principalmente por grãos de quartzo (quartzo-arenito) de granulometria fina, com grãos variando de subarredondados a angulosos (Figura 14A). No arcabouço, predominam grãos de quartzo monocristalino e policristalino, e em menor proporção, grãos de turmalina (Figura 14A) e plagioclásio (albita) com resquícios da geminação polissintética (Figura 14B). Apresenta predominância de contatos longitudinais e suturado (Figura 14A-B-C), além de plaquetas de muscovita e cimento de óxido-hidróxido de ferro (Figuras 14C-D).

**Figura 14** – Fotomicrografia da fácies Ap (Pontos DEM-33 e 40). A) Textura do quartzo-arenito, com grãos de quartzo bem selecionados, predominantemente monocristalino (Qm), com grão de turmalina (seta branca) e predominância de contatos longitudinais (seta vermelha) (10x-NX). B) Grãos de quartzo monocristalino e policristalino (Qp), além de plagioclásio (Pl) com contatos longitudinais e suturados (seta azul) (10x-NX). C) Grãos de quartzos monocristalinos e plaquetas de muscovita levemente deformada (Ms) (10x-NX). D) Detalhe do cimento ferruginoso (Cfg) entre os grãos de quartzo. Sigla: NX – nicóis cruzados.



Fonte: Autoria própria.

### Interpretação

A fácies Ap se forma sob condições de regime de fluxo superior, na transição de fluxo subcrítico para o supercrítico, com componente unidirecional gerando acamamento plano-paralelo (Miall, 1977; Miall, 2013). A deposição dos sedimentos arenosos finos a médios em condições de alta energia que definem a estratificação plano-paralela possibilitou a ocupação do substrato por organismos vermeformes (*Skolithos*) que produziram tubos verticais nas camadas (Buatois; Mángano, 2011). O icnofóssil associado aos organismos que habitavam pequenas tocas cilíndricas verticalizadas é um indicador de paleoambientes marinhos de zonas rasa a proximal (Seilacher, 1967; Buatois; Mángano, 2011; Knaust *et al.*, 2018).

#### 6.1.4 Minerais pesados

Foi analisada a assembleia de minerais pesados transparentes de 7 amostras de arenitos das fácies de *foreshore-shoreface* (Ap, Act, Pl) das formações Nhamundá e Manacapuru. Em

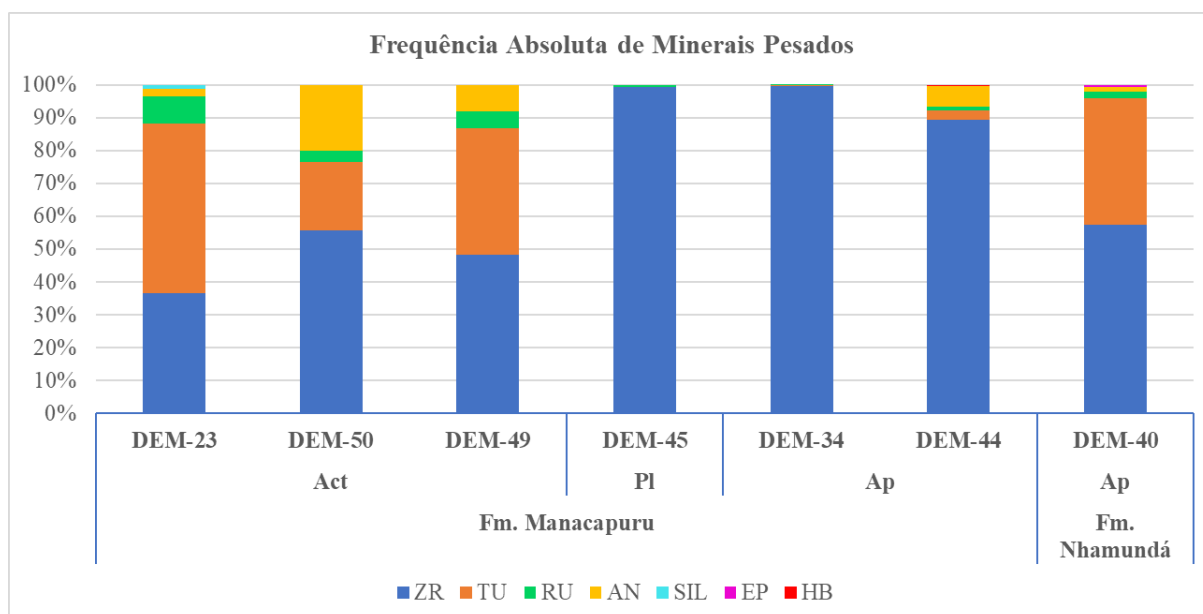
geral, a assembleia é composta por grãos de zircão, turmalina, rutilo, anatásio, silimanita, epídoto e hornblenda (Tabela 2). O zircão tem a maior representatividade em todas as fácies, principalmente na Pl e Ap (pontos DEM-45 e 34), seguido da turmalina que ocorre em sua maioria nas fácies de Act e Ap (pontos DEM-23, 50, 49 e 40), do anatásio representado principalmente nas fácies Act e Ap e, localmente, o rutilo na fácies Act. Os demais minerais (silimanita, hornblenda e epídoto) estão ausentes ou ocorrem como traços (<1%) (Figura 15).

**Tabela 2** – Frequência absoluta de minerais pesados transparentes nas fácies Act, Pl e Ap. Zr=Zircão, Tu=Turmalina, Ru=Rutilo, An=Anatásio, Sil=Silimanita, Ep=Epídoto, Hb=Hornblenda, N=Número total de grãos.

| Formação   | Fácies | Amostra | Zr   | Tu  | Ru | An | Sil | Ep | Hb | N    |
|------------|--------|---------|------|-----|----|----|-----|----|----|------|
| Manacapuru | Act    | DEM-23  | 31   | 44  | 7  | 2  | 1   | 0  | 0  | 85   |
|            |        | DEM-50  | 111  | 41  | 7  | 40 | 0   | 0  | 0  | 199  |
|            |        | DEM-49  | 162  | 130 | 17 | 27 | 0   | 0  | 0  | 336  |
|            | Pl     | DEM-45  | 620  | 0   | 4  | 0  | 0   | 0  | 0  | 624  |
|            | Ap     | DEM-34  | 1291 | 2   | 2  | 0  | 0   | 0  | 0  | 1295 |
|            |        | DEM-44  | 292  | 10  | 3  | 21 | 0   | 0  | 1  | 327  |
| Nhamundá   | Ap     | DEM-40  | 84   | 56  | 3  | 2  | 0   | 1  | 0  | 146  |

**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 15** – Representação gráfica dos percentuais de minerais pesados transparentes presentes nas fácies *foreshore-shoreface* (Act, Pl e Ap).



**Fonte:** Autoria própria.

Os grãos de zircão predominam na maioria das lâminas analisadas, com frequência variando entre 36,47% a 99,69%. Em geral, os grãos são incolores, exibem zoneamento interno

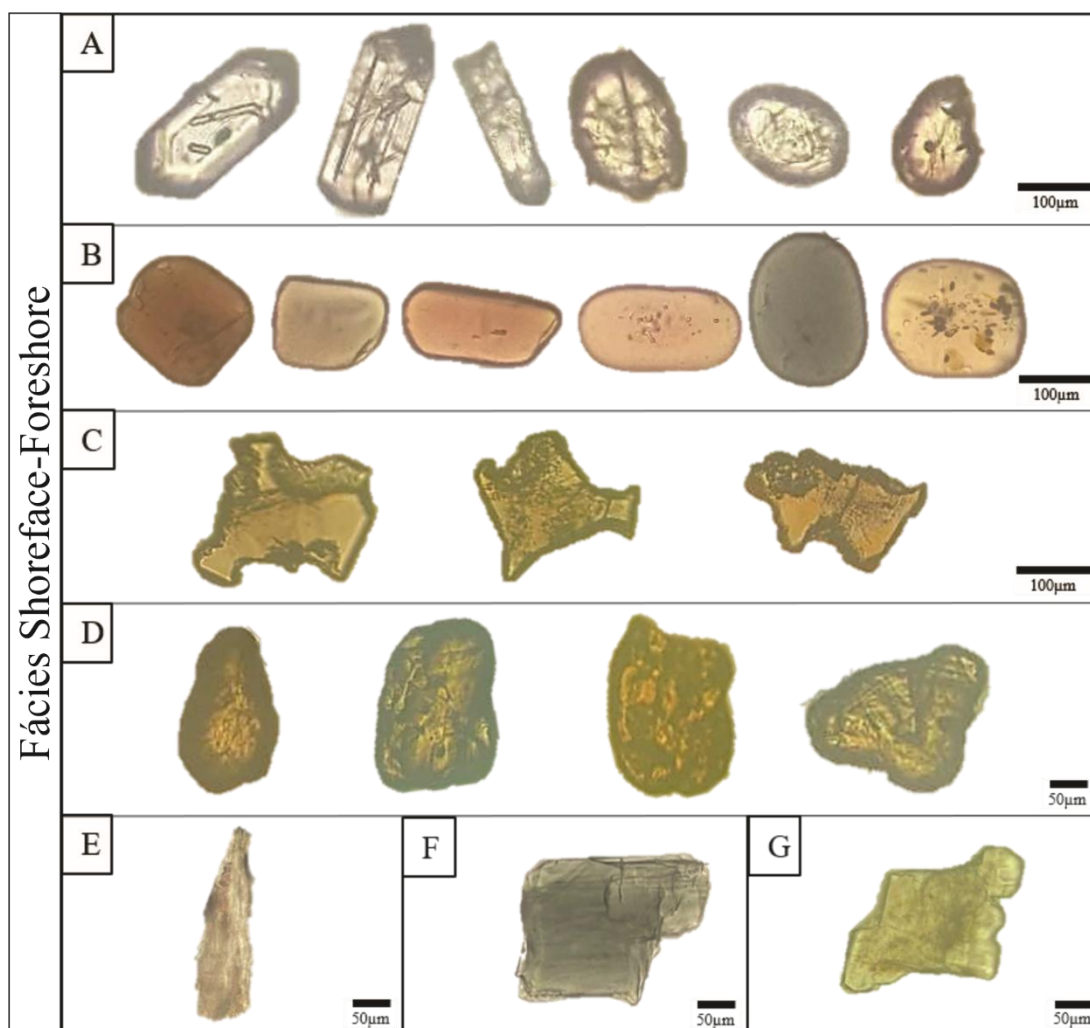
e inclusões. Foram identificados 4 tipos distintos de grãos de zircão: **a)** grãos com hábito euédrico e terminações bipiramidais, angulosos, **b)** grãos alongados, arredondados e com baixa esfericidade, **c)** grãos equigranulares, arredondados com esfericidade baixa a alta e **d)** grãos equigranulares, angulosos a subangulosos com alta esfericidade (Figuras 16A).

Os grãos de turmalina apresentam frequência variando entre 2,17% e 38,69%, exibem coloração amarela, marrom e azul com inclusões. Foram identificados 3 tipos de grãos: **a)** grãos arredondados de alta esfericidade, **b)** grãos subarredondados a arredondados com baixa esfericidade e **c)** grãos subarredondados a arredondados com alta esfericidade (Figuras 16B).

Os grãos de anatásio apresentam frequência entre 2,17% e 20,10%, coloração incolor e amarelado, com relevo alto (quase isotrópicos), angulosos com algumas faces retas (Figuras 16C). Os grãos de rutilo apresentam percentual que varia entre 0,15% e 5,06%, coloração marrom-alaranjada, birrefringência elevada, sendo predominantemente subarredondados a subangulosos com alta esfericidade (Figuras 16D).

Os grãos de silimanita, hornblenda e epídoto são angulosos e correspondem a <1% do total nas amostras, sendo considerados traços. Como características principais, o primeiro possui clivagem evidente e forma alongada (Figura 16E), enquanto o segundo exibe coloração esverdeada (Figura 16F) e por último, o grão de epídoto apresenta coloração amarelada (Figura 16G).

**Figura 16.** Fotomicrografia da assembleia de minerais pesados das fácies *foreshore-shoreface* das formações Manacapuru e Nhamundá com grãos de zircão subangulosos a arredondados (A), grãos de turmalina arredondados (B), grãos de anatásio angulosos (C), grãos de rutilo angulosos (D), grão de silimanita subarredondados a subangulosos (E), grão de hornblenda anguloso (F) e grão de epídoto subarredondado a subanguloso (G).



**Fonte:** Autoria própria.

#### 6.1.4.1 Tipologia do zircão

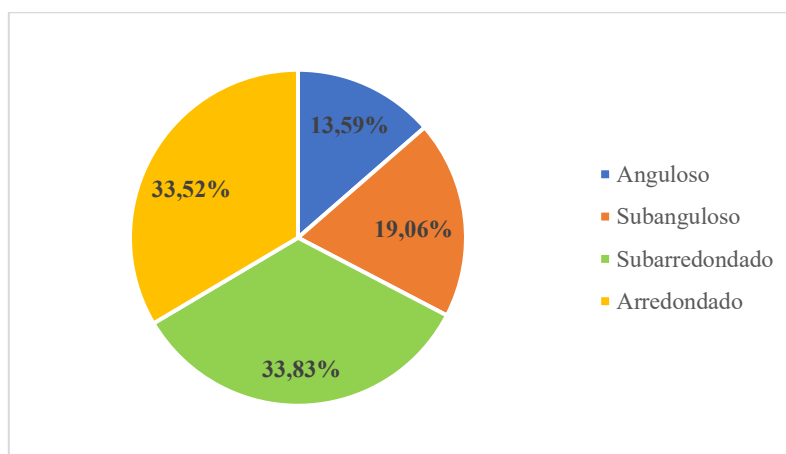
O zircão tem sido utilizado na análise de tipologia devido a abundância na assembleia de minerais pesados, além da dureza e resistência ao intemperismo (Suguio, 2003). A análise morfológica dos grãos considerou o grau de arredondamento, segundo a tabela de Powers (1953) (Tabela 3). Nas fácies de *foreshore-shoreface* (Act, Ap e Pl) predominam os grãos subarredondados (33,83%) e arredondados (33,52%), em relação aos angulosos e subangulosos (13-19%) (Figura 17).

**Tabela 3** – Frequência relativa dos tipos de grão de zircão das fácies estudadas. NZr= Número de contagem de zircão por lâminas

|                            | Fácies | Amostra | Anguloso | Subanguloso | Subarredondado | Arredondado | NZr |
|----------------------------|--------|---------|----------|-------------|----------------|-------------|-----|
| <i>Shoreface-foreshore</i> | Act    | DEM-23  | 5        | 6           | 12             | 8           | 31  |
|                            |        | DEM-50  | 9        | 36          | 51             | 15          | 111 |
|                            |        | DEM-49  | 14       | 66          | 49             | 33          | 162 |
|                            | Ap     | DEM-34  | 65       | 43          | 95             | 97          | 300 |
|                            |        | DEM-44  | 34       | 23          | 96             | 139         | 292 |
|                            | Pl     | DEM-45  | 28       | 62          | 113            | 97          | 300 |
|                            | Total  |         | 155      | 236         | 416            | 389         |     |

**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 17** – Representação gráfica do grau de arredondamento das fácies Act, Ap e Pl.



**Fonte:** Autoria própria.

## Interpretação

Os minerais pesados das fácies de *foreshore-shoreface* das formações Nhamundá e Manacapuru, com predomínio de grãos ultraestáveis (zircão, turmalina, rutilo e anatásio) e pouco instáveis (hornblenda, epídoto e silimanita), onde prevalece grãos de zircão subarredondados a arredondados, podem ser associados a sedimentos submetidos a vários ciclos de retrabalhamento sedimentar.

Segundo Mange e Maurer (1992), o zircão pode ocorrer como mineral acessório em rochas ígneas (ácidas e intermediárias), assim como cristal herdado em rochas metamórficas e sedimentares. Os grãos de turmalina, hornblenda e epídoto indicam proveniência de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares, enquanto a silimanita e o rutilo são encontrados principalmente em rochas metamórficas de alto grau. Em particular, os grãos de anatásio podem ser de fontes ígneas, metamórficas, ou mesmo, ser formado durante a diagênese.

6.2. Depósitos glaciais

O estudo dos depósitos glaciais foi subdivido na análise palinoestratigráfica de afloramentos (ver item 6.2.1) e na análise microtextural de grãos de quartzo (ver item 6.2.2).

6.2.1 New occurrences of glacial deposits in the Presidente Figueiredo region, northern edge of the Amazon Basin (Artigo submetido)

Os depósitos glaciais ocorrem intercalados com as fácies sedimentares marinhas (*foreshore-shoreface*), aflorantes na borda norte da bacia, cujo resultado foi submetido à revista *Journal of South American Earth Sciences*.

Journal of South American Earth Sciences  
NEW OCCURRENCES OF GLACIAL DEPOSITS IN THE PRESIDENTE FIGUEIREDO REGION, NORTHERN EDGE OF THE AMAZON BASIN  
--Manuscript Draft--

|                       |                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Manuscript Number:    |                                                                                                                                                                                                                           |
| Article Type:         | Research Paper                                                                                                                                                                                                            |
| Section/Category:     | Stratigraphy and sedimentology                                                                                                                                                                                            |
| Keywords:             | Amazon Basin; Silurian-Devonian glaciation; Glaciogenic deposits; Depositional paleoenvironment; Palynology                                                                                                               |
| Corresponding Author: | Carmem Nátaly Amorim Franco<br>Federal University of Amazonas<br>BRAZIL                                                                                                                                                   |
| First Author:         | Carmem Nátaly Amorim Franco                                                                                                                                                                                               |
| Order of Authors:     | Carmem Nátaly Amorim Franco<br>Emílio Alberto Amaral Soares<br>Rosemary Rocha da Silveira<br>Rodolfo Dino<br>Luzia Antonioli<br>Mayara Fraeda Barbosa Teixeira<br>Rogério Oliveira Barbosa<br>Marco Antônio Lima da Silva |

em Journal of South American Earth Sciences Carmem Franco

Home Main Menu Submit a Manuscript About Help

← Revisions Being Processed for Author

Page: 1 of 1 (1 total revisions being processed)

Results per page 10

| Action                                                         | Manuscript Number  | Title                                                                                                      | Date Submission Began | Status Date  | Current Status |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|----------------|
| <a href="#">View Submission</a><br><a href="#">Send E-mail</a> | SAMES-D-25-00306R1 | NEW OCCURRENCES OF GLACIAL DEPOSITS IN THE PRESIDENTE FIGUEIREDO REGION, NORTHERN EDGE OF THE AMAZON BASIN | Jun 30, 2025          | Jul 09, 2025 | Under Review   |

# NEW OCCURRENCES OF GLACIAL DEPOSITS IN THE PRESIDENTE FIGUEIREDO REGION, NORTHERN EDGE OF THE AMAZON BASIN

Carmem Nátaly Amorim Franco <sup>a</sup>, Emílio Alberto Amaral Soares <sup>a</sup>, Rosemary Rocha da Silveira <sup>b</sup>, Rodolfo Dino <sup>c</sup>, Luzia Antonioli <sup>c</sup>, Mayara Fraeda Barbosa Teixeira <sup>a</sup>, Rogério Oliveira Barbosa <sup>d</sup>, Marco Antônio Lima da Silva <sup>e</sup>

<sup>a</sup> *Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Av. Gal. Rodrigo O. J. Ramos, 3000, 69077-000, Manaus (AM), Brazil*

<sup>b</sup> *Departamento de Geociências, Universidade Federal do Amazonas, Av. Gal. Rodrigo O. J. Ramos, 3000, 69077-000, Manaus (AM), Brazil*

<sup>c</sup> *Departamento de Estratigrafia e Paleontologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, 20550-900, Rio de Janeiro-RJ, Brazil*

<sup>d</sup> *Grupo de pesquisa Geologia Sedimentar da Amazônia, Av. Gal. Rodrigo O. J. Ramos, 3000, 69077-000, Manaus (AM), Brazil*

<sup>e</sup> *Secretaria Municipal de Cultura do Município de Presidente Figueiredo – SEMCULTE, Amazonas (AM), Brasil*

*E-mail addresses: [carm.nataly@gmail.com](mailto:carm.nataly@gmail.com) (C.N.A. Franco), [esoes@ufam.edu.br](mailto:esoes@ufam.edu.br) (E.A.A. Soares), [rrsilveira@ufam.edu.br](mailto:rrsilveira@ufam.edu.br) (R.R. Silveira), [dinouerj@gmail.com.br](mailto:dinouerj@gmail.com.br) (R. Dino), [luantonioli7@gmail.com](mailto:luantonioli7@gmail.com) (L. Antonioli), [mayarafraeda@ufam.edu.br](mailto:mayarafraeda@ufam.edu.br) (M.F.B. Teixeira), [ieo2@hotmail.com](mailto:ieo2@hotmail.com) (R.O. Barbosa), [cavernamarco@gmail.com](mailto:cavernamarco@gmail.com) (M.A.L. Silva).*

## ABSTRACT

The Paleozoic sedimentary sequence outcropping in the municipality of Presidente Figueiredo, on the northern edge of the Amazon Basin, is bounded to the north by the Paleoproterozoic crystalline basement and to the south by the Cretaceous–Neogene sedimentary cover. Within this sequence, new records of glacial deposits occur interbedded with shoreface–foreshore sedimentary facies of the Nhamundá and Manacapuru formations (Trombetas Group). The formation of these deposits is primarily linked to the sedimentation of terminal moraines and deposition in lakes. They consist mainly of coarse diamictites that contain clasts from igneous, sedimentary, and metamorphic rocks. These materials were deposited as glaciers moved over marine sedimentary rocks and the underlying crystalline basement. This study highlights the unprecedented record of dropstones embedded in laminated pelite deposited in proglacial lakes from the release of clasts from the base of icebergs. The glacial deposits studied were associated with two events: one positioned in the Early Silurian (Llandovery–Wenlock) based on palynology, and the other corresponding to a newly identified glacial event in this study, placed in the Late Silurian–Early Devonian (Early Pridoli to Early Lochkovian), based on chitinozoans (*Angochitina filosa*, *Angochitina strigosa*, *Angochitina* sp. D, and *Lagenochitina cf. navícula*). In addition to the glaciotectonic deformation identified in some diamictite outcroppings in the Presidente Figueiredo region, the presence of faceted clasts and dropstones also stands out as strong evidence of Silurian–Devonian glacial activity in the Amazon Basin.

Keywords: Amazon Basin, Silurian-Devonian glaciation, Glaciogenic deposits, Depositional paleoenvironment, Palynology

## 1. Introduction

Intracratonic basins in Western Gondwana show records of global climate change and Phanerozoic geodynamic evolution (Assis et al., 2019). In the Amazon Basin, these records are part of the Paleozoic sedimentary megasequence, subdivided into the Ordovician-Devonian, Devonian-Tournaisian, Neovisean, and Pennsylvanian-Permian sequences (Cunha et al., 2007).

In recent decades, the Ordovician-Devonian sequence, the focus of this study, has undergone significant revisions in the lithostratigraphic context due to new facies and palynological data, particularly in outcrops on the northern and southern edges of the basin. The Trombetas Group represents this stratigraphic sequence and comprises the Autás-Mirim, Nhamundá, Pitinga, Manacapuru, and Jatapu formations, which record transgressive-regressive cycles and reflect variations in paleoenvironmental and paleoclimatic conditions within the basin (Cunha et al., 2007). In this group, Caputo and Vasconcelos (1971), Carozzi et al. (1973), Caputo and Crowell (1985), Grahn (1992), and Grahn and Paris (1992) defined the Early Silurian glacial event based on borehole evidence from the Nhamundá Formation in the central portion of the Amazon Basin. Early Silurian glacial deposits were identified in outcrops of this formation on the northern edge of the basin (municipality of Presidente Figueiredo), interspersed with marine facies (shoreface-foreshore) (Melo, 1997; Melo and Steemans 1997; Soares, 1998; Nogueira et al., 1999; Soares et al., 2005; Cuervo et al., 2018).

Therefore, the present study emphasizes the use of facies and palynological data obtained from outcrops in this region to identify new occurrences of glacial deposits, which occur intercalated with the foreshore-shoreface facies of the Nhamundá and Manacapuru formations. The deposits are mainly represented by coarse diamictites related to terminal moraine deposits, as well as pelite deposits with dropstones, whose genesis is related to sedimentation in proglacial lagoons. Data from palynomorphs (regional and from this study), which mainly include chitinozoans, enabled the association of the studied deposits with two glacial events, positioned in the Early Silurian and Late Silurian-Early Devonian periods. The first was assigned to the Nhamundá Formation and correlated with the Early Silurian glacial event defined in previous studies (Caputo and Crowell, 1985; Soares et al., 2005; Cuervo et al., 2018), whereas the second was associated with the Manacapuru Formation and has no known correlative glacial event recorded in the stratigraphy of the Amazon Basin.

## **2. Material and methods**

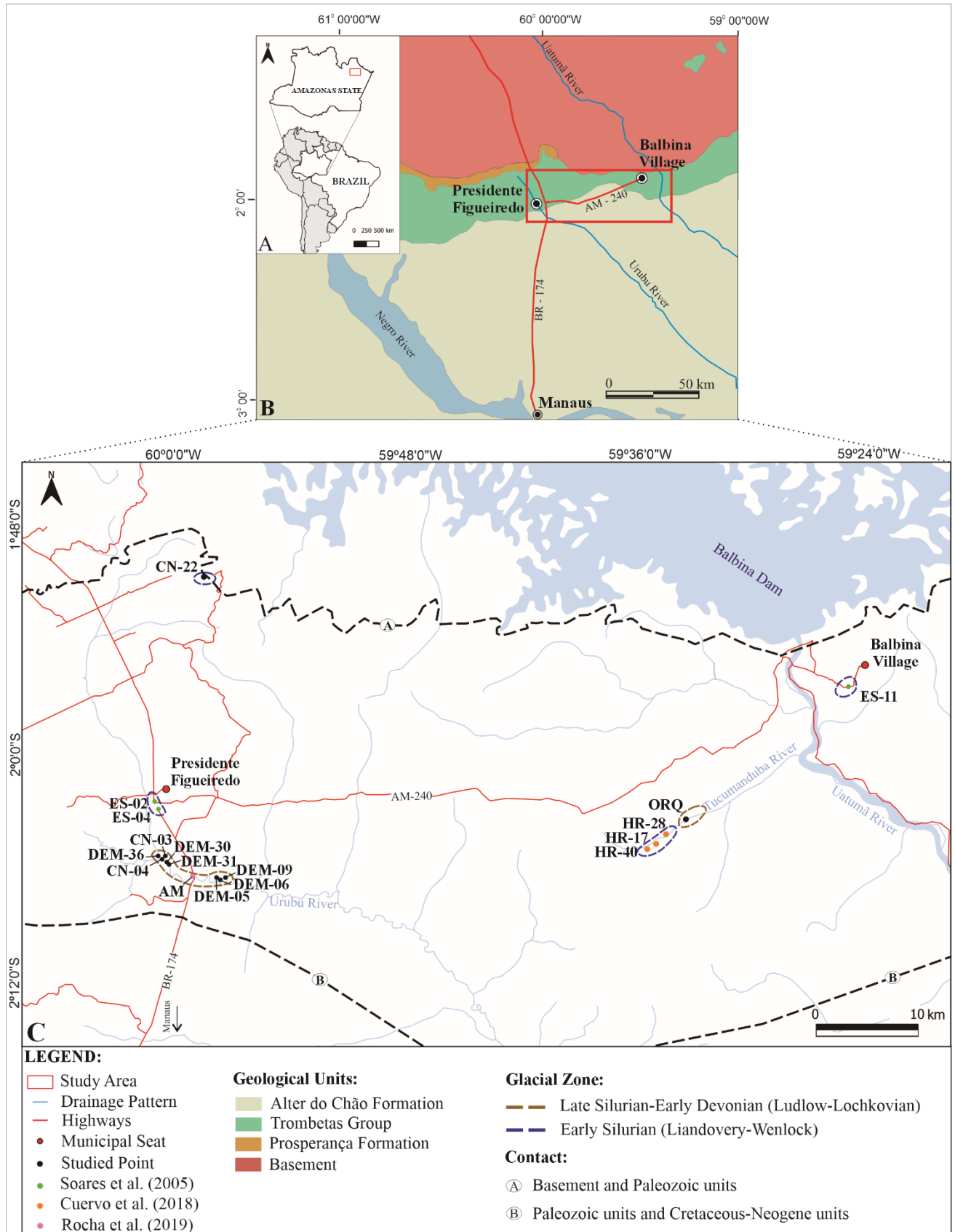
Ten outcrops along the Urubu and Uatumã rivers (municipality of Presidente Figueiredo) were studied using panoramic and columnar sections, following the methodology of Wilzevic (1991) and Suguio (1973). However, the study of sedimentary facies, combined with the irregular spatial distribution of outcrops and dense vegetation and soil cover, hinders stratigraphic correlation in the Amazon.

Sedimentary facies were identified primarily based on lithology, sedimentary structures, geometry, and textural attributes, aiming to interpret depositional processes and facies associations, following the facies analysis approach of Walker (1992) and Miall (1997, 2000). Petrographic and diagenetic studies were conducted on thin sections of lithified rock samples to assess their mineralogical and textural characteristics. Unconsolidated sand samples were sieved to isolate the 0.125–0.062 mm grain-size fraction for heavy mineral analysis. Heavy mineral concentrates were obtained using dense liquid separation and mounted on grain slides for qualitative and quantitative examination, following the methodology of Mange and Maurer (1992). The sedimentological and petrographic analyses were conducted in the laboratories of the Geosciences Department at the Federal University of Amazonas (UFAM) and the Geological Service of Brazil (SBG) in Manaus. Dark pelite samples were processed for palynological analysis at the Palynomaceral Laboratory of the Geology Faculty, State University of Rio de Janeiro (UERJ), following the methodology described by Antonioli et al. (2020). The identification of chitinozoans was based on the taxonomic frameworks established

by Grahn and Melo (2003), Azevedo-Soares and Grahn (2005), Paris et al. (1999), and Paris (2006).

### **3. Study area**

The study area is located in the northeast of the state of Amazonas, on the southern border of the municipality of Presidente Figueiredo, around 100 km north of Manaus. Access was made by land along highways BR-174 (Manaus - Boa Vista) and AM-240 (Presidente Figueiredo - Vila de Balbina) and partly by river along the Urubu and Uatumã rivers (Fig. 1). The map indicates the locations analyzed in this study (acronyms DEM, CN and ORQ), as well as the studies by Soares et al. (2005) (acronym ES), Cuervo et al. (2018) (acronym HR) and Rocha et al. (2019) (acronym AM), which helped to define the six zones of glacial occurrence.



DEM, CN and ORQ), as well as the outcrops studied by Soares et al. (2005) (acronym ES), Cuervo et al. (2018) (acronym HR) and Rocha et al. (2019) (acronym AM) which helped define the glacial zones (dashed lines). Source: Vector data obtained from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (Year 2020, <https://portaldemapas.ibge.gov.br>) and geological limits extracted from the database of the Geological Survey of Brazil (Reis et al., 2016).

#### 4. Geological context

The Amazon Basin covers an area of approximately 500,000 km<sup>2</sup> in the northern portion of Brazil, encompassing part of the states of Amazonas, Pará, and Amapá. It is part of the Amazon Craton and is bounded by the Guiana Shield to the north, the Brazilian Shield to the south, the Purus Arc to the west, and the Gurupá Arc to the east (Vasquez et al., 2008; Matsuda et al., 2010; Silva et al., 2015; Silva et al., 2023). The development of the basin is associated with NE–SW and E–W lineaments formed by tectonic movements related to the Gondwana megacontinent during the Paleozoic, as well as by the emplacement of normal and transfer fault systems responsible for the formation of regional arcs and unconformities (Wanderley Filho, 1991). The sedimentary fill comprises the Paleozoic and Mesozoic-Cenozoic megasequences, which reach a thickness of approximately 5.000 m (Cunha et al., 2007).

The Paleozoic megasequence has four second-order sequences, deposited in transgressive-regressive cycles. The Ordovician-Devonian sequence represents the initial stage of filling. It is composed of the Trombetas Group, subdivided into the Autás-Mirim, Nhamundá, Pitinga, Manacapuru, and Jatapu Formations, represented by continental, marine, and glacial deposits. The Devonian-Tournaisian sequence represents a marine depositional stage characterized by glacial incursions of the Urupadi (Maecuru and Ererê Formations) and Curuá (Barreirinha, Curiri, and Oriximiná Formations) Groups, which are composed of both marine and glacial sediments. The Neovisean sequence comprises the Faro Formation, characterized by fluvial-deltaic and coastal deposits. Finally, the Pennsylvanian-Permian sequence records a new transgressive-regressive depositional cycle in the basin, after a hiatus of around 15 million years. This interval is represented by the Tapajós Group, which comprises the Monte Alegre, Itaituba, Nova Olinda, and Andirá formations, encompassing aeolian, lagoonal, marine/inframarine, and sabkha plain deposits. The sedimentation of the Mesozoic–Cenozoic megasequence is attributed to the relaxation of compressive forces associated with the Juruá Diastrophism (Cunha et al., 2007; Reis et al., 2016), and consists of Cretaceous and Tertiary sequences represented by the Alter do Chão and Solimões formations of the Javari Group. Neogene deposits identified in the western portion of the Amazon Basin are classified as the

Novo Remanso Formation (Dino et al., 2012; Soares et al., 2015).

#### ***4.1. Glaciations in the Amazon Basin***

The migration of ice centers through Gondwana began in the Late Ordovician and lasted until the beginning of the Late Permian, according to the paleogeographic configuration of Caputo and Crowell (1985). In Brazil, glaciogenic deposits from this time interval were defined in the Early Silurian, Late Devonian, and Early to Middle Mississippian periods, in various intracratonic basins, such as the Amazon, Solimões, Paraná, and Paranaíba (Caputo and Crowell, 1985; Caputo et al., 2008). However, the first two glaciations stand out for their significant changes in sedimentary facies in the world geological record and their wide distribution in basin records, especially in the Amazon Basin.

The Ordovician-Silurian glacial period lasted approximately 35 million years (Finnegan et al., 2011), with Gondwana positioned over the South Pole and characterized by low atmospheric CO<sub>2</sub> content. This period was marked by changes in the configuration of continental masses and shifts in climatic conditions, ultimately contributing to the Hirnantian Glaciation. During the Silurian, the slow post-glacial warming was reflected in the melting of the polar ice caps in North Africa and South America, resulting in marine transgressions and the deposition of glaciogenic sediments in South America (Torsvik and Cocks, 2013). According to Caputo and Crowell (1985), records of Ordovician glaciation are found predominantly in the Tindouf (Bani Formation) and Taoudeni (Tichit Group) basins in Africa, as well as glacial evidence in the Tabuk (Saudi Arabia), Tubeiliya (Jordan), and Tamadjert (Central Sahara) formations (Caputo and Crowell, 1985; Hambrey, 1985; Turner et al., 2005).

Silurian glaciation was first inferred in South Africa (Table Mountain Group), while in South America (Fig. 2), Silurian strata have been identified in Peru (San Gaban Formation) and Bolivia (Cancañiri Formation) (Assine et al., 1998; Díaz-Martínez and Grahn, 2007), and are particularly well represented in Brazil, within the Amazon (Nhamundá Formation), Paraná (Iapó and Vila Maria formations), and Paranaíba (Ipu Formation) basins. During the Siluro-Devonian transition, shallow seas emerged in northwestern Gondwana (Bolivia, Brazil, the Falkland Islands, South Africa, and Australia) (Ludwig, 1964; Caputo, 1984; Caputo and Crowell, 1985; Grahn and Caputo, 1992; Cunha et al., 1994). In the Late Devonian, glaciation lasted approximately 0.1 million years (Streel et al., 2000). It may have resulted from the significant increase in terrestrial plant biomass from the Middle Devonian to the Early Carboniferous. In addition, the higher rate of burial of organic matter during the main pulses of marine transgression contributed to the reduction in atmospheric CO<sub>2</sub> levels during this period

(Streel et al., 2000).

Records of Devonian glaciations (Fig. 2) primarily come from South America and have been documented in several basins: the Amazon (Curiri Formation), Solimões (Jaraqui Formation), and Parnaíba (Pimenteira, Cabeças, and Longá formations) (Rocha Campos, 1981; Caputo, 1984, 1985; Loboziak et al., 2000; Caputo and Crowell, 1985; Caputo et al., 2008). Additionally, evidence has been found in Peru (Ccatcca Formation) and Bolivia (Cumaná Formation) (Díaz-Martínez, 1994; Díaz-Martínez, 2004; Díaz-Martínez and Isaacson, 1994). Glacial events from this period have also been recorded in Africa, specifically in the Accra, Karoo, and Central basins (Caputo and Crowell, 1985). Significant faunal extinctions have been linked to these glacial events, including the mass extinction during and after the Hirnantian glaciation at the Ordovician-Silurian boundary, as well as the Famenian extinction associated with the Late Devonian glaciation (Finnegan et al., 2011; Torsvik and Cocks, 2013).

Four significant glacial events have been identified in the stratigraphy of the Amazon Basin, primarily through the analysis of boreholes. The main occurrences are located in the Silurian and Devonian periods (Rodrigues et al., 1971; Carozzi et al., 1973; Caputo, 1984; Grahn and Caputo, 1992; Cunha et al., 1994; Caputo et al., 2008), which is the primary focus of this study. Glacial records from the Late Ordovician and Early Silurian were identified in boreholes from the Nhamundá Formation by Caputo and Vasconcelos (1971), Caputo et al. (1972), Carozzi et al. (1973), Caputo and Crowell (1985) e Grahn and Paris (1992), highlighting three diamictite horizons defined by Rocha-Campos (1981), which contain various clasts (rhyolite, quartzite and sandstone) supported by a sandy-silty-clay matrix (Caputo and Crowell, 1985). In recent decades, deformed glacial diamictites (containing sandstone and granite blocks and clasts), positioned in the Early Silurian, have been described in outcrops of the Nhamundá Formation on the northern edge of the Amazon Basin (Presidente Figueiredo region) by Soares (1998) and Soares et al. (2005). In this region, coarse diamictites, containing faceted and striated pebbles of sandstones and quartz, were placed by palynology in the Early Silurian (Middle-Late Llandovery) (Cuervo et al., 2018).

In addition to these occurrences, glacial diamictites positioned in the Late Devonian (Famennian) have been identified in boreholes and outcrops on the northern and southern edges of the basin, and are attributed to the Curiri Formation (Curuá Group; Caputo and Vasconcellos, 1971; Caputo, 1984; 1985; Caputo and Crowell, 1985; Caputo et al., 2008). Internally, the diamictites are massive, containing faceted and striated clasts of quartzite, quartz, shale, siderite, diabase, gneiss, rhyolite, and granite immersed in a silty-clay matrix (Caputo, 1984), as well as clasts of elongated and deformed sandstones (Caputo et al., 2008).



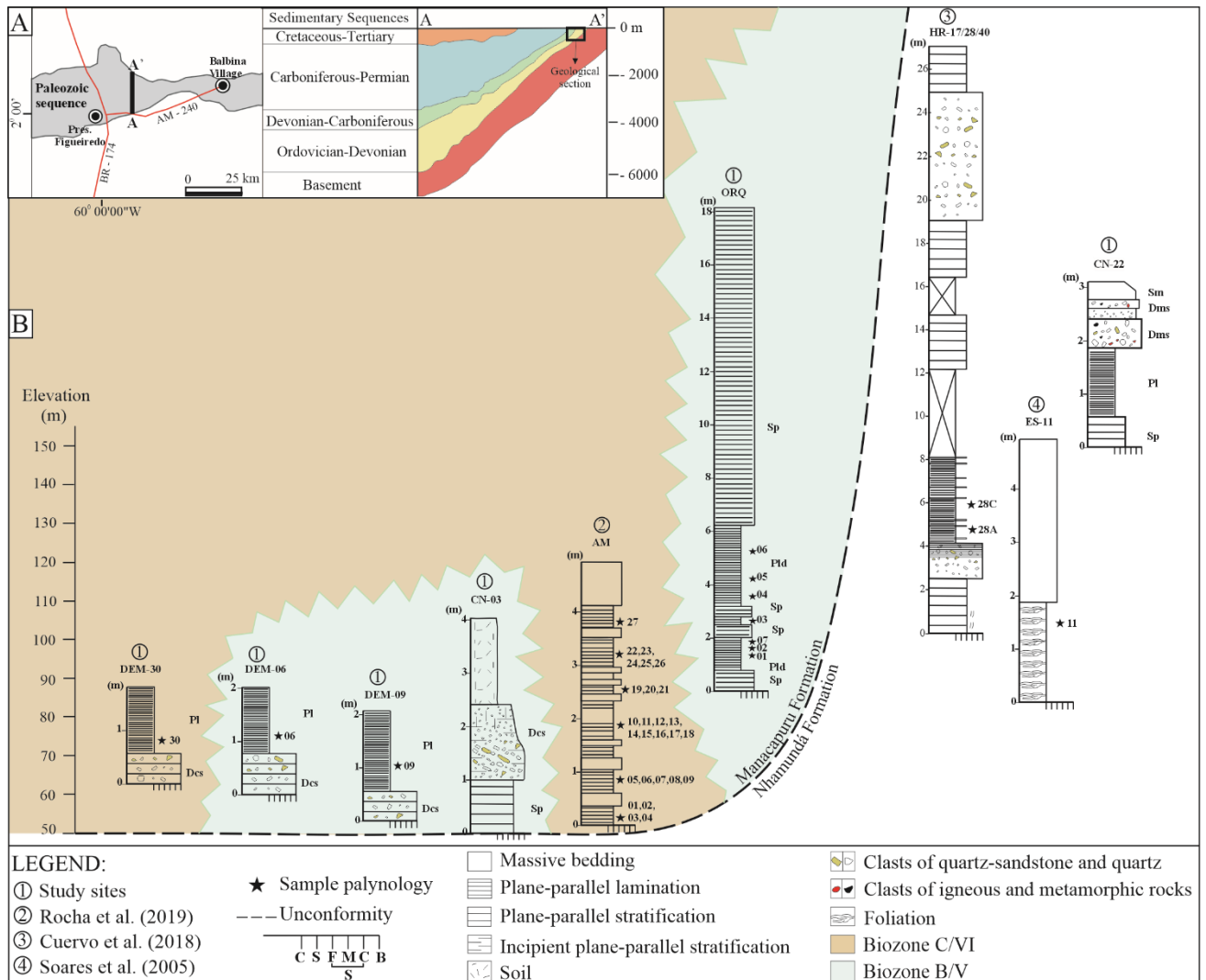
**Fig. 2.** Silurian and Devonian glacial deposits identified in South America. Occurrence of

glacial diamictites identified in outcrops in the Presidente Figueiredo region by: 1) Soares (1998), 2) Nogueira et al. (1999), 3) Soares et al. (2005), and 4) Cuervo et al. (2018). Map modified from Assine and Vesely (2008) and Cuervo et al. (2018).

## **5. Sedimentary facies and paleoenvironment**

In the Presidente Figueiredo region, on the northern edge of the Amazon Basin, the description of 06 sedimentary facies in the Nhamundá and Manacapuru formations allowed the definition of stratigraphic correlation criteria, as shown in Fig. 3. Six stratigraphic profiles from this study (abbreviations DEM, CN and ORQ) were integrated with profiles previously published in the regional works of Soares et al. (2005) (abbreviation ES), Cuervo et al. (2018) (abbreviation HR) and Rocha et al. (2019) (abbreviation AM), with the definition of the discordant limit between these formations.

The profiles in this study feature intraformational glacial deposits characterized by three distinct facies: diamictite with matrix support and plane-parallel bedding (Dms), diamictite with clast support and plane-parallel bedding (Dcs), and laminated pelite containing dropstones (Pld). These deposits are intercalated with foreshore and shoreface facies. The foreshore deposits are primarily composed of quartz sandstones with plane-parallel bedding (Sp facies). In contrast, the shoreface deposits consist mainly of pelite with plane-parallel lamination (Pl facies) and massive quartz sandstone (Sm facies).



**Fig. 3.** A) Location map of geological section A-A' (Modified from Soares et al., 2005 and Gonzaga et al., 2000). B) Correlation of the main stratigraphic profiles of the Nhamundá and Manacapuru formations, highlighting the positioning of palynology samples and individualization of biozones B/V and C/VI, as illustrated in Fig. 12.

**Table 1.** Description of glacial sedimentary facies and interpretation of depositional processes.

| Facies Code | Facies                                                             | Facies characteristics                                                                                                                                                                                                                                            | Interpretation                                                                                      |
|-------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dms         | Diamictite with matrix-supported and plane-parallel stratification | Supported matrix of sandy-clay composition, poorly sorted, containing clasts of lithic fragments (igneous, sedimentary, and metamorphic), as well as quartz, which vary from subangular to rounded. In general, it shows incipient plane-parallel stratification. | Cohesive debris flows with a high sediment/water concentration (Eyles et al., 1983; Einsele, 2000). |
| Dcs         | Diamictite with clast-supported and plane-                         | At the base, the diamictite shows supported clasts composed of quartz-sandstone (mainly) and quartz, ranging from angular to                                                                                                                                      | Non-cohesive and subaqueous gravitational flows                                                     |

|     |                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                             |
|-----|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | parallel stratification                      | subrounded, slightly imbricated, poorly sorted, immersed in a medium to coarse sandy matrix. Towards the top, the diamictite grades into a matrix supported by scattered quartz granules, as well as pelite clasts and clast molds, sometimes with well-defined facets (angular to subrounded). In general, it shows incipient plane-parallel stratification. | (Eyles et al., 1983; Einsele, 2000).                                                                                                                        |
| Pld | Laminated pelite with dropstones             | Pelite with plane-parallel lamination, whose lamination planes involve subrounded to rounded (sometimes elongated), centimetric to decimetric clasts, of arenitic-clay composition. It exhibits mild deformation on the lamination planes that encircle the dropstones.                                                                                       | Deposition by suspension of fine sediment, with dropstones due to the melting of floating ice floes in a low-energy environment (Thomas and Connell, 1985). |
| Pl  | Laminated pelite                             | Reddish pelite of silty-clayey composition, with planar-parallel lamination. It occurs in layers up to 2 meters thick, interbedded with thin layers (up to 20 cm) of sandstone with microhummocky cross-stratification and sandstone with planar-parallel stratification.                                                                                     | Decantation of fine material in a low-energy environment, alternating with periods of tractional flow during storm wave events (Miall, 1996; Tucker, 2003). |
| Sp  | Sandstone with plane-parallel stratification | Beige to reddish quartz sandstone with planar-parallel stratification, well sorted, with fine to medium, subrounded to rounded grains. It occurs in individual layers (up to 20 cm thick), grouped into cosets up to 1.0 meters thick.                                                                                                                        | Action of wave swash and backwash on the beach, mainly in the swash zone (Nichols, 2009).                                                                   |
| Sm  | Massive sandstone                            | Whitish quartz sandstone, fine to medium-grained, poorly sorted, with predominantly subrounded grains. It occurs in centimeter-thick layers.                                                                                                                                                                                                                  | Rapid deposition without sufficient time for the development of sedimentary structures (Miall, 1996).                                                       |

### ***5.1. Diamictite with matrix-supported and plane-parallel stratification (Dms)***

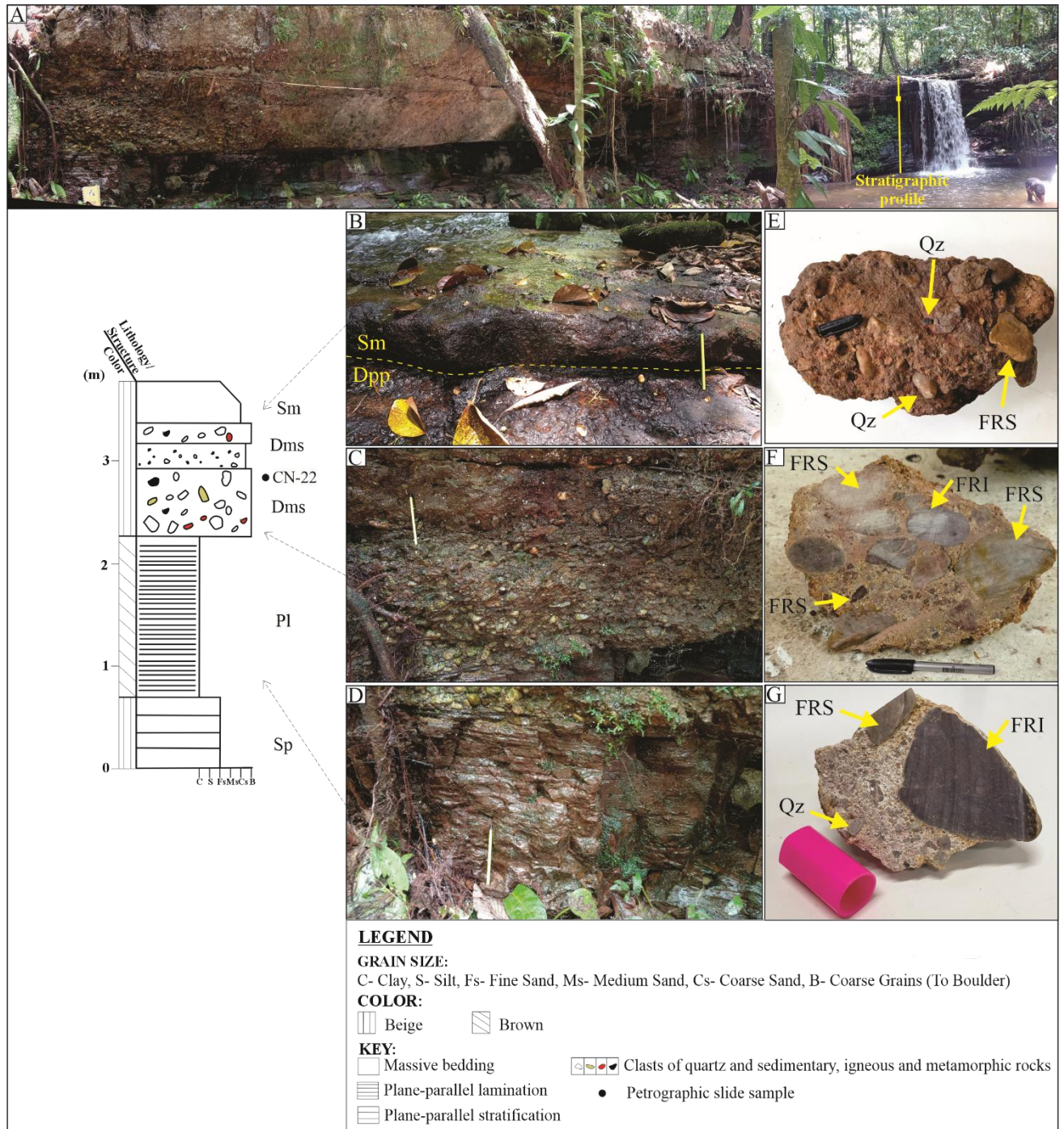
The Dms diamictite facies occur in continuous tabular layers extending for tens of meters, with thicknesses ranging from 20 to 95 cm. These layers are intercalated with marine facies (Sm, Pl, and Sp) (Fig. 4A-B). Generally, the rock exhibits a gray to beige coloration and displays a massive internal structure, occasionally featuring plane-parallel stratification (Fig. 4C).

The material features a supported matrix containing sparse clasts of igneous (including quartz), sedimentary, and metamorphic lithic fragments. These fragments vary in size, ranging from 4.5 to 8.5 cm, and are generally subrounded to rounded in shape, all embedded within a sand-clay matrix (Fig. 4E-F). Quartz clasts are abundant and display a whitish to smoky

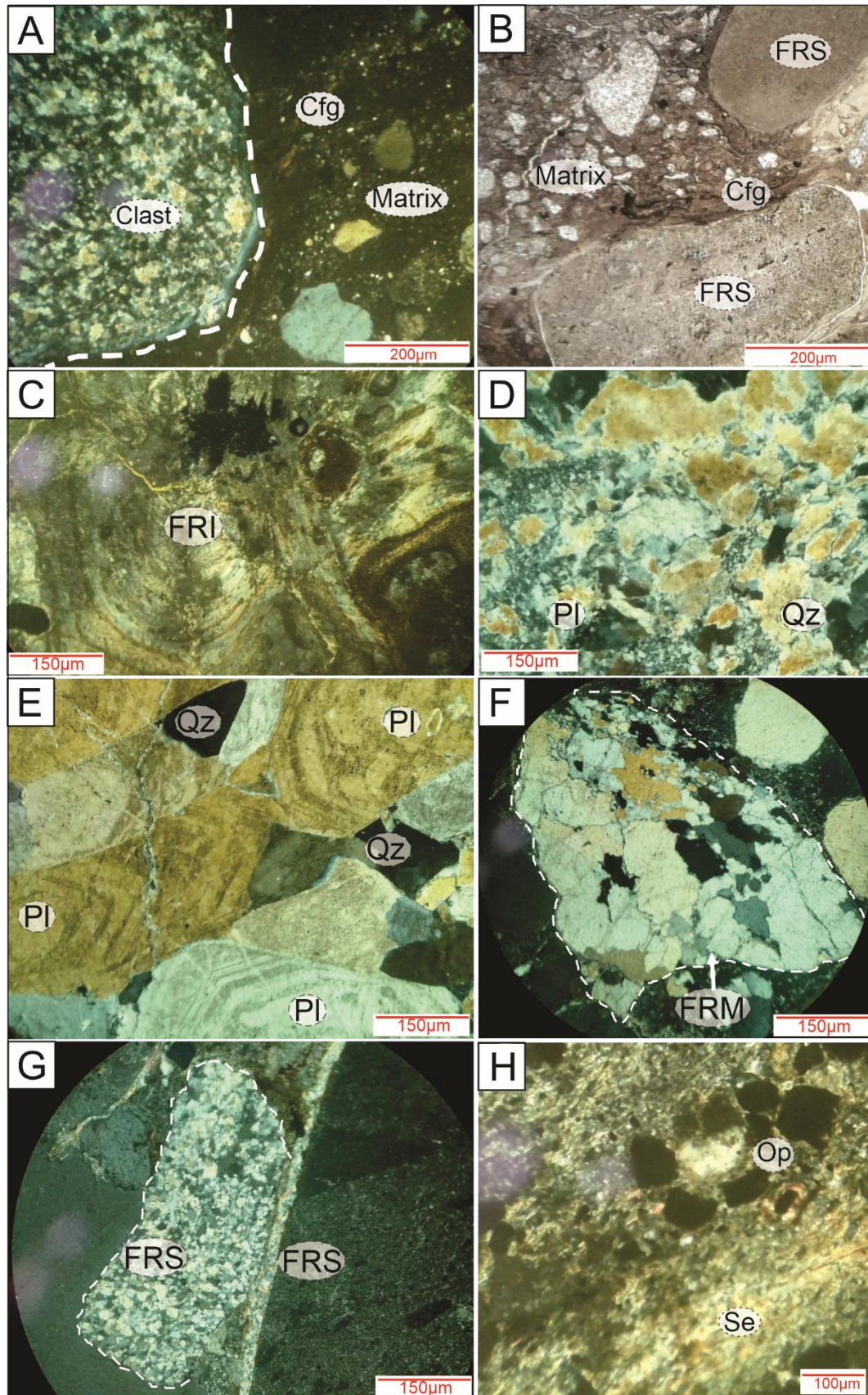
coloration. The igneous clasts, which are gray to black (Fig. 4G), are identified as porphyritic microgranite. This includes quartz porphyries ranging from 12 to 30 mm in size, characterized by undulating extinction, along with euhedral plagioclase exhibiting polysynthetic twinning (and zoning), and K-feldspar showing early signs of tartan twinning. These components are set within a fine matrix with a quartz-feldspathic composition (Fig. 5D-E).

The matrix of the Dms facies is sandy-clayey and poorly sorted. It comprises grains and granules that range from medium to coarse, primarily composed of quartz (both monocrystalline and polycrystalline), as well as subangular to subrounded lithic fragments originating from sedimentary, igneous, and metamorphic rocks (Fig. 5A-B). The sedimentary rock grains include brown pelite and whitish quartz sandstone, which features subrounded to rounded quartz grains (Fig. 5B and G). The extrusive volcanic rock (igneous) fragments consist of a combination of fiamme and ash with a fluid texture (Fig. 5C). The metamorphic rock fragments are mainly composed of quartz crystals that display undulating extinction and form subgrains. These subgrains are likely stretched along the direction of the rock's preferential orientation, suggesting they may be quartzite (as shown in Fig. 5F).

Additionally, there are scattered subrounded grains of opaque minerals and titanite. In the framework of the rock, iron oxide-hydroxide cements and sericite fill the intergranular spaces (Fig. 5H).



**Fig. 4.** A) Columnar and panoramic section showing layers of the Dms facies intercalated with the Pl and Sm facies (point CN-22). B) Detail of the intercalation of the massive sandstone (Sm) facies with diamictite (Dms). C) Dms diamictite with clasts of varying size and composition. D) Laminated pelite layer of the Pl facies. E-G) Detail of the Dms diamictite with rounded to subrounded quartz pebbles (Qz) and igneous (FRI) and sedimentary (FRS) lithic fragments, immersed in a sandstone matrix. Location of the point in Fig. 1 and stratigraphic setting in Fig. 3.



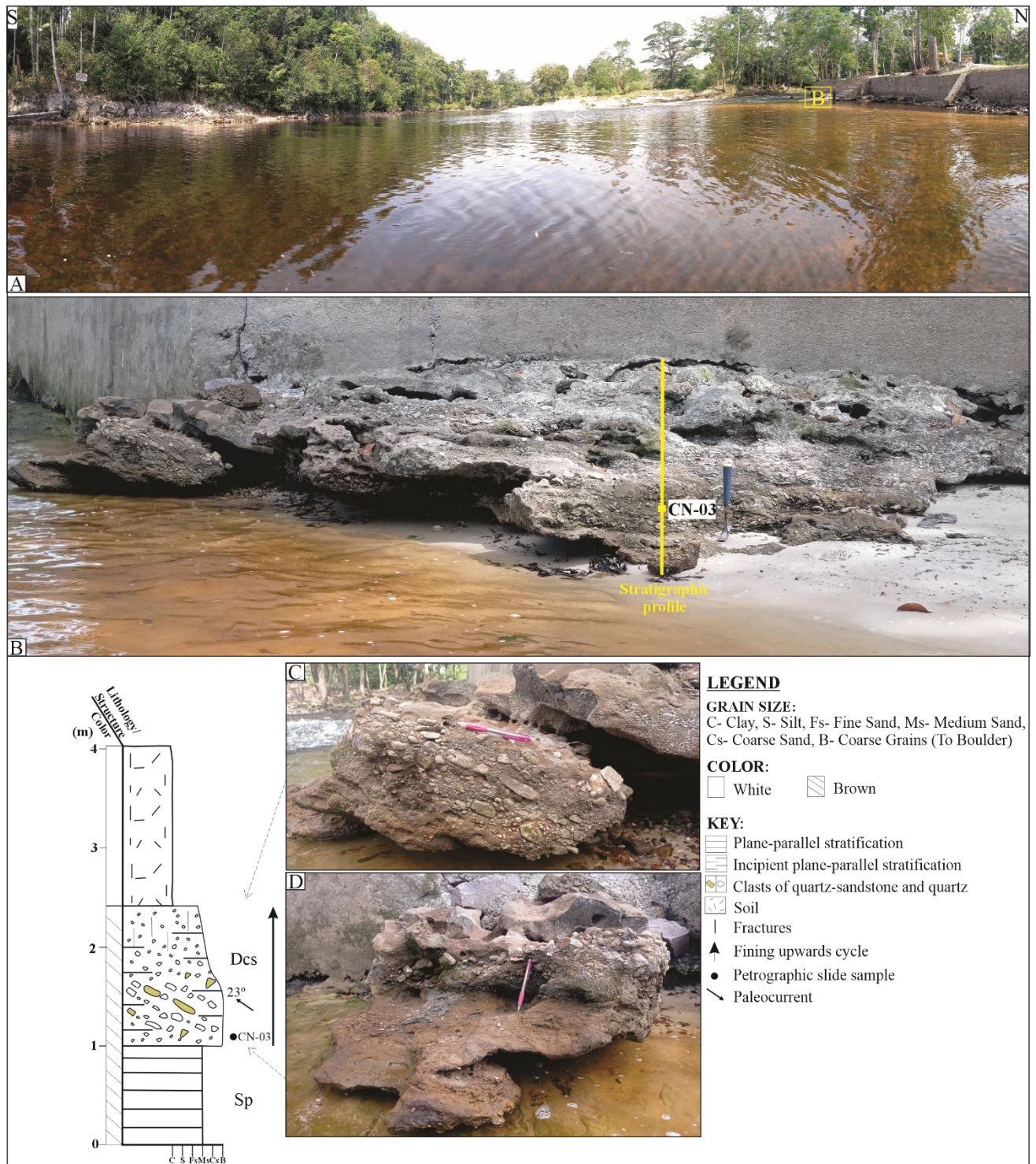
**Fig. 5.** Photomicrographs of the Dms facies matrix. A) Sandy matrix with ferruginous cement (Cf) containing quartz-sandstone granules and quartz grains (2.5x-NX). B) Sand-clay matrix framework with ferruginous cement and containing granules (pelitic rock) and dispersed grains (FRS) (2.5x N//). C) Internal texture of the volcanic rock fragment grain (FRI) (5x-NX). D)

Internal texture of microgranite clast with porphyritic texture and fine felsic matrix (5x-NX). E) Internal texture of the granite clast with quartz and plagioclase porphyries with polysynthetic twinning (zoning) (5x-NX). F) Grain of metamorphic rock fragment (FRM) containing internally oriented quartz crystals (5x-NX). G) Contact between quartz-sandstone (left) and pelite (right) grains (5x-NX). H) Sand-clay matrix containing grains of dispersed opaque minerals (Op) and portions with a concentration of sericite cement (Se) filling intergranular spaces (20x-NX). N// – parallel nicols; NX – crossed nicols.

## ***5.2. Diamictite clast-supported and plane-parallel stratification (Dcs)***

The Dcs diamictite facies is characterized by tabular layers that can reach thicknesses of up to 1.5 meters, extending laterally for several tens of meters. Generally, it presents a reddish-brown color and displays an upward granodecrecent trend. The texture is clast-supported at the base, transitioning to a matrix-supported texture towards the top (Fig. 6). In the basal section, the clasts are primarily composed of quartz sandstone and quartz, with diameters of up to 15 cm, and are sometimes imbricated, indicating a paleocurrent direction of 23° NW. These clasts are typically subrounded to angular and occasionally exhibit faceting, with rectangular shapes (Fig. 7A-C) and triangular shapes (Fig. 7D). In the upper section, the clasts become more scattered, ranging in diameter from 3 to 14 cm, and vary from rounded to subrounded in shape. They are predominantly composed of brown (oxidized) pelite (Fig. 7E). Additionally, an important feature within the Dcs facies is the presence of unfilled molds representing both rounded and angular clasts, which have rectilinear facets and a triangular, flatiron shape (Fig. 7F).

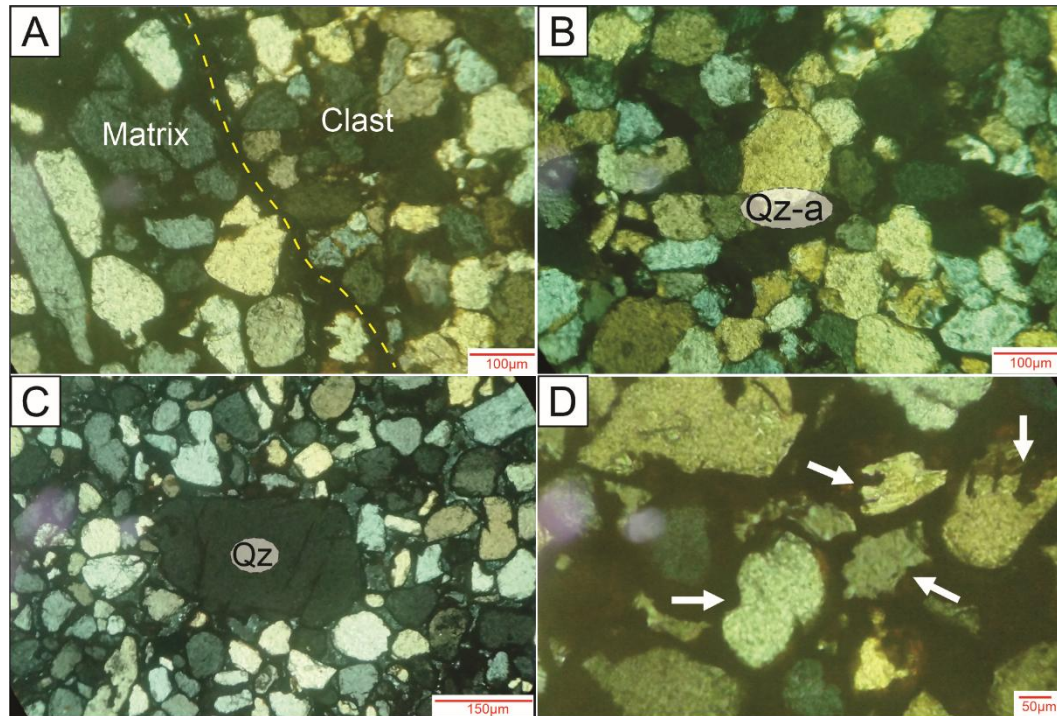
The Dcs facies exhibits a poorly sorted sandstone matrix, composed predominantly of fine to coarse-grained quartz, subangular to rounded, and also contains scattered quartz and quartz-sandstone granules (Fig. 8A-B). It is surrounded by ferruginous cement that fills the intergranular porosity. Quartz grains are predominantly monocrystalline (Fig. 8C), with polycrystalline grains occurring less frequently. Some grains exhibit surface corrosion features, including indentations and serrations, filled with ferruginous cement (Fig. 8D). The heavy mineral assemblage identified in the Dcs facies is primarily composed of zircon and tourmaline, with a limited occurrence of idiomorphic anatase (Table 2).



**Fig. 6. A-B)** Panoramic section in the Urubu River (point CN-03) indicating the location of the columnar section referring to the Dcs facies, which shows supported clast at the base and supported matrix at the top, indicative of ascending granodecrescence. **C)** Coarse diamictite with incipient plane-parallel stratification and imbricated clasts (quartz-sandstone and quartz). **D)** Diamictite with clasts (quartz-sandstone and quartz) up to 15cm in diameter, surrounded by a fine to coarse sandstone matrix. Location of the point in Fig. 1 and stratigraphic setting in Fig. 3.



**Fig. 7.** Textural aspect of the Dcs facies containing angular (faceted) to subrounded blocks and clasts of varying shapes and sizes, with no defined orientation (sites CN-04, DEM-31, and DEM-36). A) Poorly sorted diamictite with clasts supported by quartz-sandstone, predominantly angular and of varying sizes. B-C Diamictite with quartz-sandstone and quartz-supported clasts, angular to subangular, sometimes with (rectangular) facets. D) Diamictite with faceted (triangular) clasts immersed in a sandy matrix. E) Preserved clast of reddish-brown pelite (oxidized), rounded. F) Faceted clast mold (flatiron shape). Qz-a: quartz-sandstone; Qz: quartz; Ag: mudstone.



**Fig. 8.** A) Photomicrograph showing the contact between the sandy matrix (ferruginous cement) and the clast (quartz-sandstone) (10x-NX). B) Internal texture of the quartz-sandstone clast (Qz-a) in detail A, with a predominance of monocrystalline quartz grains (10x-NX). C) Detail of the quartz grains in the matrix surrounding the quartz granules in the framework (10x-NX). D) Monocrystalline quartz grains from the matrix surrounded by ferruginous cement, showing corrosion features (indentations on the surface of the grains) indicated by white arrows (20x-NX). NX – crossed nicols.

**Table 2.** Absolute frequency of transparent heavy minerals in the Dcs facies. Zr=Zircon, Tur=Tourmaline, An=Anatase, N=Total number of grains.

| Facies | Sample | Zr  | Tur | An | N   |
|--------|--------|-----|-----|----|-----|
| Dcs    | DEM-36 | 44  | 1   | 1  | 46  |
|        | DEM-51 | 821 | 15  | 3  | 839 |

### 5.3. Interpretation of the diamictite facies (Dms and Dcs)

The coarse diamictites (Dms and Dcs facies), found in the Presidente Figueiredo region, are thought to have formed from the deposition of terminal moraines. These moraines were created during periods of glacial advance and retreat in the Amazon Basin during the Silurian-Devonian periods. Cuervo et al. (2018) also identified related deposits of terminal and/or supraglacial moraines in this area, which they attributed to transportation by viscous fluids containing mixed debris. During moraine deposition, ice carries debris of various shapes and sizes and deposits it at the front of the glacier as it retreats (Assine and Vesely, 2008; Nichols, 2009).

The Dcs and Dms facies are distinguished by their types of diamictites: clast-supported and matrix-supported, respectively. These formations result from the release of debris from the

glacier's base due to the pressure exerted by the flow of meltwater. Clast-supported diamictite can form through high-density, viscous, laminar flows during cohesive debris flows. In contrast, matrix-supported diamictite is typically deposited via low-resistance, non-cohesive viscous flow, which can be either laminar or turbulent, as noted by Miall (1977) and Einsele (2000). Coarse diamictites, similar to those in the Dcs facies, accumulate in areas dominated by episodic traction currents. This creates an upward granodecrecent trend, characterized by planar stratification and clast imbrication, as described by Eyles and Eyles (1992). The deposition of this facies may be associated with fluvio-glacial channels that form in the glacier's frontal region, where debris is transported through underground tunnels. This interpretation aligns with the findings of Cuervo et al. (2018) regarding the sedimentation of coarse diamictites in the Presidente Figueiredo region.

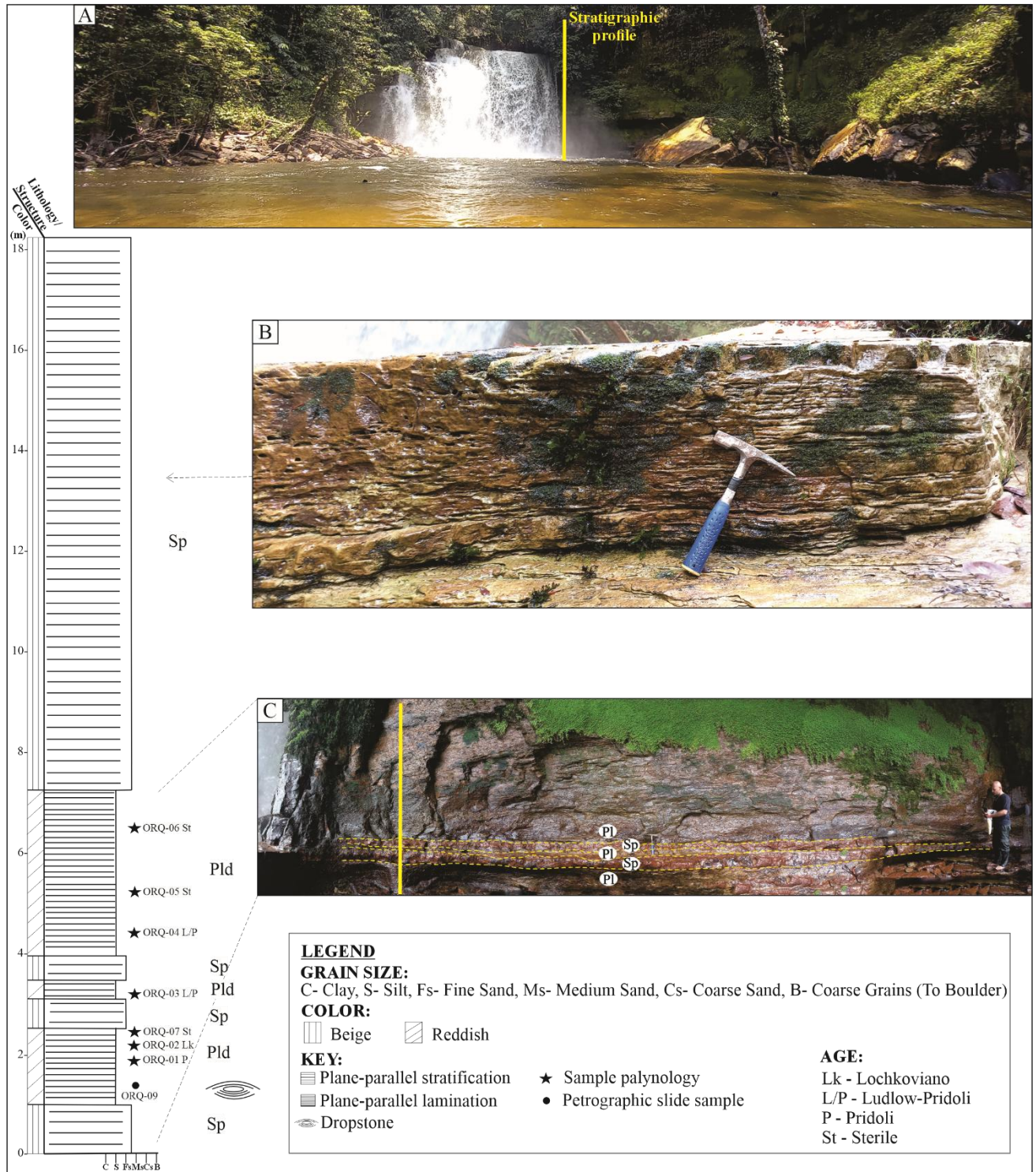
Furthermore, the presence of both angular (faceted) and rounded clasts within the Dcs and Dms facies indicates different transportation mechanisms during deposition. The angular clasts may have been dragged at the glacier's base, while the rounded clasts likely rolled along the bottom of intermittent fluvio-glacial channels. The occurrence of faceted and rounded clasts in glacial deposits has been documented in the Amazon Basin (Brazil) by Cuervo et al. (2018) and in the Taoudeni Basin (West Africa) by Eyles and Eyles (1992).

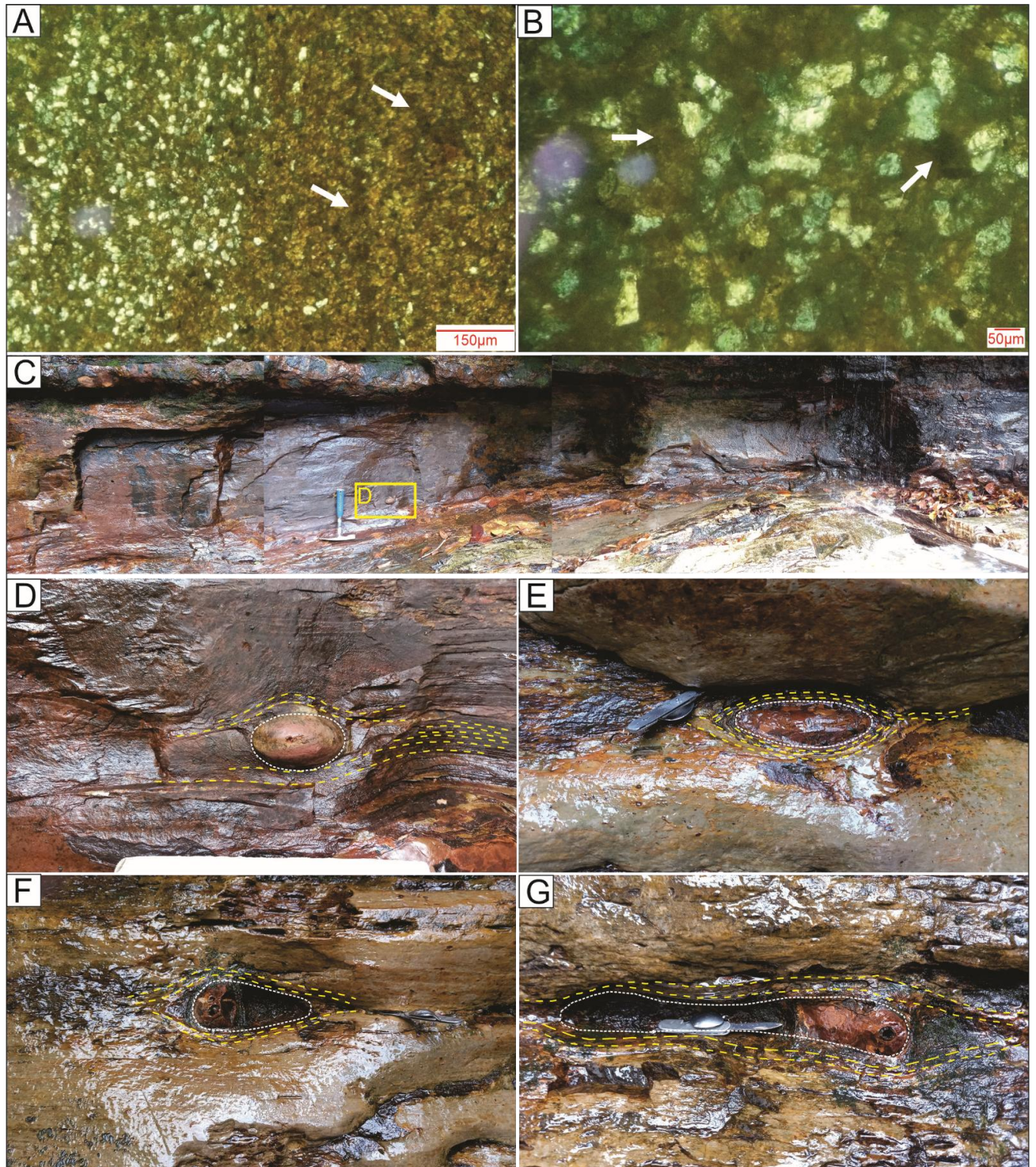
The abundance of predominantly angular clasts of sedimentary rock (quartz sandstone) in the Dcs facies indicates a provenance related to the reworking of older sedimentary rocks, probably from the Autás-Mirim Formation, the basal unit of the Trombetas Group, which crops out extensively along the northern edge of the basin. Notably, faceted clasts with triangular and bullet-like shapes are present within this facies, which can be attributed to the intense abrasion of sediments that occurred at the base of the glacier during ice displacement. This interpretation aligns with findings from correlated glacial deposits in both the Paraná (Assine and Vesely, 2008) and Amazon basins (Cuervo et al., 2018). Additionally, the polymictic composition of the Dms facies, which is characterized by clasts of various types—such as sedimentary rocks (pelite and sandstone), igneous rocks (granite and pumice), metamorphic rocks (quartzite), and veins (quartz-pegmatite)—along with the geographical location of the studied outcrop near the northern edge of the basin, suggests that the glacier moved across diverse source areas. These sources are associated with both the crystalline basement and the subjacent sedimentary deposits.

#### ***5.4. Laminated pelite with dropstones (Pld)***

The Pld facies is characterized by a reddish color and a predominantly silty-clay

composition. It occurs in layers ranging from decimetric to metric thickness (15 cm to 2 m) and can extend laterally for tens of meters. Typically, it is interspersed with planar layers of the Sp facies (Fig. 9). Internally, the Pld facies exhibits plane-parallel lamination, which gently encloses randomly arranged clasts. These clasts vary from very fine sandstone (with subrounded to angular grains) to sandy-silty-clay (Fig. 10A, B, and C). They are recognized for their reddish color, attributed to the presence of ferruginous cement, and range from subrounded to rounded, with some being elongated. The diameter of these clasts varies between 8 and 13 cm (Fig. 10D-G).





**Fig. 10.** A) Photomicrograph showing the internal granulometric variation of the clasts, from very fine sandstone (left) to sandy-silty-clay (right) containing ferruginous cement (white arrow). B) Photomicrograph of the internal texture of the sandstone clast of the Pld facies, showing the closed framework with subrounded to angular grains surrounded by ferruginous cement (white arrow). C) Laminated pelite (Pld facies) with dispersed clast (detail D). D to E) Detail of rounded and/or flattened sandstone clasts, gently contoured by lamination planes. F to G) Elongated clasts contoured by lamination.

#### 5.4.1. Interpretation

Dropstones from the Pld facies are often associated with transport by floating ice floes, known as ice-rafting (Bennett et al., 1996; Assine and Vesely, 2008), particularly in proglacial lakes. The texture of the clasts, including their size, shape, and surface striations, is influenced by how the glacier transports the debris (Gilbert, 1990). In some deposits, dropstones display facets and striations (Araújo and Nogueira, 2019; Rodríguez-López et al., 2024), whereas others may exhibit rounding without any distinct surface features, such as striations or grooves (Santos et al., 2012). As ice floes disintegrate at the edges of glaciers, they create icebergs that move with currents and release debris from their bases as they melt. This debris can vary in size, typically from pebbles to boulders, and falls onto fine sediment in a low-energy environment, causing disturbances in the lamination planes. The absence of current indicators in this setting, as indicated by the laminated planes surrounding the clasts, suggests that the debris fell vertically, having detached from the glacier's base (Thomas and Connell, 1985).

### ***5.5. Laminated pelite (Pl)***

Silt-clayey pelite, reddish to brown, with planar-parallel lamination. It occurs in centimeter-to-meter-thick layers (50 cm to 2 m), interbedded with thin layers (7 cm to 20 cm thick) of fine to very fine sandstone, exhibiting planar-parallel lamination and micro-hummocky cross-stratification (Fig. 3 – profiles DEM-30, DEM-06, DEM-09, ORQ, and CN-22). In general, glacial facies (Dcs and Dms) and marine facies (Sp) (Fig. 4) are associated with these facies.

### ***5.6. Sandstone with plane-parallel stratification (Sp)***

Fine to medium-grained, well-sorted beige sandstone with incipient plane-parallel stratification. It occurs in sets with thicknesses ranging from 3.0 to 40 cm, forming cosets of up to 4.0 m (Fig. 3 – profiles CN-03, ORQ, and CN-22). In general, this facies occurs intercalated with the Pl, Dcs, and Pld facies (Fig. 4, 6, and 9).

### ***5.7. Massive sandstone (Sm)***

Whitish, fine to medium-grained sandstone, poorly sorted, with fine to coarse quartz grains, predominantly subrounded, with a massive appearance. It occurs in centimetric layers, standing delimited at the base by the Dms facies (Fig. 4).

### ***5.8. Interpretation of shoreface-foreshore facies***

The Pl facies results from the deposition of sediments by suspension under low-energy conditions (Miall, 1996). The interbedding of sandstone layers with micro-hummocky cross-

stratification is a result of high-intensity oscillatory flow, typical of storm waves (Miall, 2000; Tucker, 2003).

The Sp facies can be interpreted as a product of underwater currents under upper flow regime conditions during the transition from subcritical to supercritical flow, with a unidirectional component that generates planar-parallel bedding (Miall, 1996; Miall, 1997).

The deposition of the Sm facies may be associated with rapid sedimentation during flood events (Collinson, 1996; Miall, 1996), where primary sedimentary structures are typically obliterated in areas with high sediment accumulation rates (Miall, 1996).

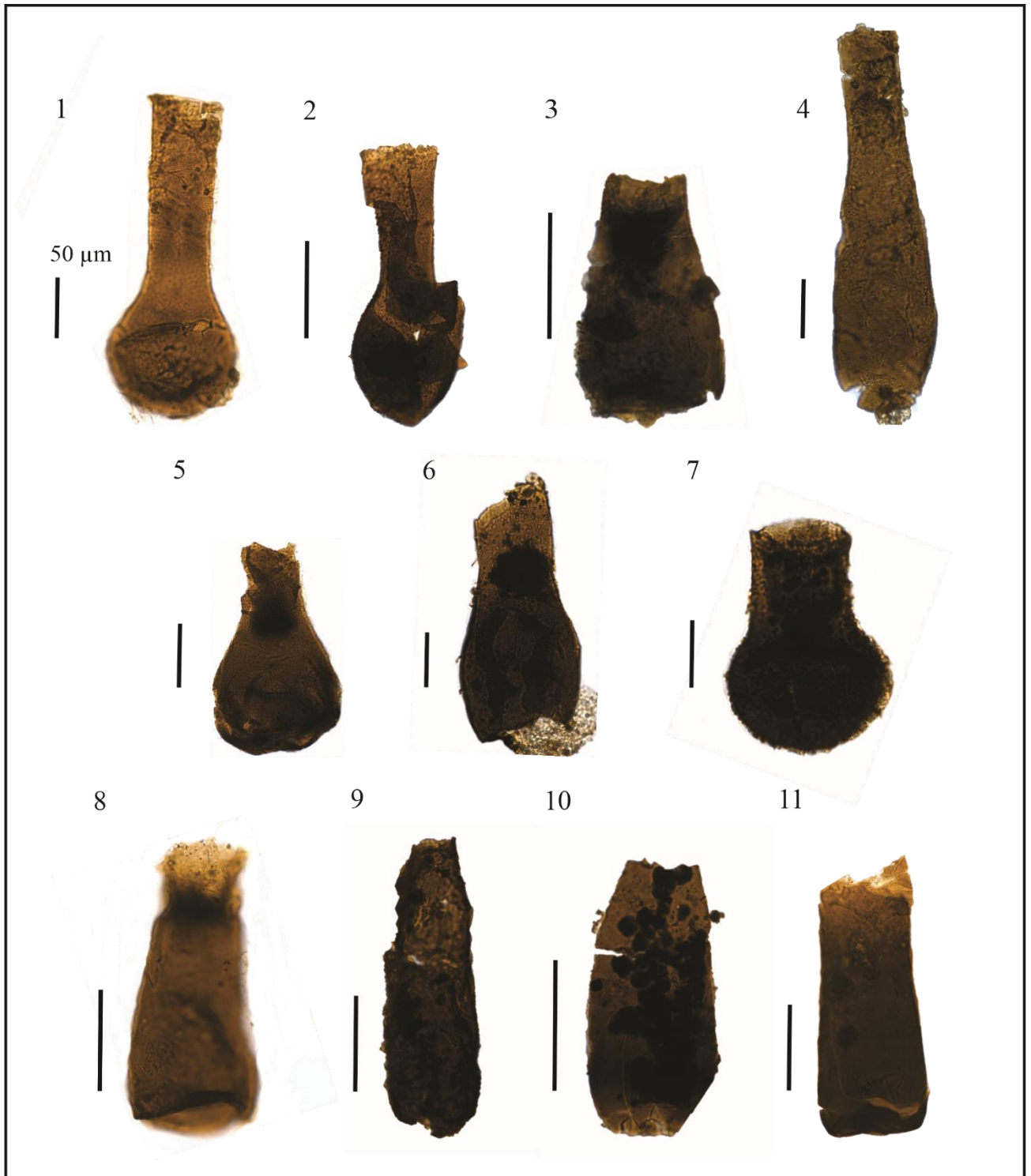
## 6. Palynology and age of Manacapuru Formation

The analysis of nine palynological samples (five with the acronym ORQ and four with the acronym DEM) yielded satisfactory results for chitinozoa, with varying concentrations and degrees of preservation, as shown in Table 3. The locations of the studied points are shown in Fig. 1, while the positioning of the palynological samples is presented in the stratigraphic profiles of Fig. 3.

For this survey, the recovered chitinozoans were examined. Most appear torn or corroded, with only a few being well-preserved. This analysis identified 68 chitinozoan specimens across the examined stratigraphic levels. The forms were individualized according to the ages and stratigraphic units associated with the Amazon Basin. Analysis of the palynological material enabled the identification of 8 genera and 19 species, including *Angochitina equinata*, *Angochitina filosa*, *Angochitina strigosa*, *Angochitina* cf. *mourai*, *Angochitina* sp. 1, *Angochitina* sp. 2, *Angochitina* sp. 3, *Ancyrochitina gutnica*, and *Ancyrochitina* sp. D, *Cingulachitina ervensis*, *Cingulatichitina serrata*, *Conochitina packycephala*, *Conochitina tuba*, *Conochitina* sp.1, *Desmochitina cortesiana*, *Euconochitina gordoensis*, *Lagenochitina* cf. *navicula* e *Rhabdochitina conocephala* (Fig. 11).

**Table 3.** Occurrence list of chitinozoan in 16 slides derived from 9 hand samples from Presidente Figueiredo.

| TAXA                                                | SAMPLES |    |    |    |    |     |    |    |    |
|-----------------------------------------------------|---------|----|----|----|----|-----|----|----|----|
|                                                     | ORQ     |    |    |    |    | DEM |    |    |    |
|                                                     | 01      | 02 | 03 | 04 | 05 | 05  | 06 | 09 | 30 |
| <i>Angochitina equinata</i>                         | X       |    |    |    |    | X   | X  | X  | X  |
| <i>Angochitina filosa</i>                           |         |    |    |    |    |     | X  | X  |    |
| <i>Angochitina strigosa</i>                         | X       | X  |    |    |    |     |    |    | X  |
| <i>Angochitina</i> cf. <i>mourai</i>                |         |    |    |    |    | X   |    |    |    |
| <i>Angochitina</i> sp.1                             |         | X  | X  | X  | X  | X   | X  | X  | X  |
| <i>Angochitina</i> sp.2                             |         | X  |    |    |    |     | X  |    |    |
| <i>Angochitina</i> sp. 3                            |         |    |    | X  |    |     |    |    |    |
| <i>Ancyrochitina gutnica</i>                        |         | X  |    |    |    |     |    |    |    |
| <i>Ancyrochitina</i> sp. D                          |         | X  |    |    |    |     |    |    | X  |
| <i>Cingulachitina ervensis</i>                      |         |    |    |    |    |     |    |    | X  |
| <i>Cingulachitina serrata</i>                       |         | X  |    |    |    | X   | X  |    |    |
| <i>Conochitina packycephala</i>                     |         |    | X  |    |    | X   |    |    |    |
| <i>Conochitina tuba</i>                             |         |    | X  |    |    |     |    | X  |    |
| <i>Conochitina</i> sp. 1                            | X       | X  |    |    |    |     |    |    | X  |
| <i>Euconochitina gordoensis</i>                     |         |    |    | X  |    |     |    |    | X  |
| <i>Desmochitina cortesiana</i>                      |         |    |    |    |    |     |    |    | X  |
| <i>Lagenochitina</i> cf. <i>navicula</i>            |         |    |    |    |    |     |    |    | X  |
| <i>Rhabdochitina conocephala</i>                    |         |    |    |    |    |     |    |    |    |
| <i>Ramochitina</i> <i>bjornsundiquisti</i> (rework) |         |    | X  |    |    |     | X  | X  |    |
| <i>Linochitina</i> cf. <i>erratica</i> (rework)     |         |    |    |    |    | X   |    |    | X  |



**Fig. 11.** Photomicrographs of chitinozoans identified in this study. **1.** *Ancyrochitina* sp. D (Grahn and Melo, 2003), DEM-30-EF: S36; **2.** *Angochitina strigosa* (Boumendjel, 2002), ORQ1A-EF: H54; **3.** *Cingulachitina serrata* (Taugoudeau and Jekhowsky, 1960), ORQ2C-EF: P47; **4.** *Conochitina packycephala* (Eisenack, 1964), ORQ05-EF: 034-3; **5.** *Angochitina echinata* (Eisenack, 1931), DEM09-EF: O35-4; **6.** *Angochitina filosa* (Eisenack, 1955), DEM - EF:F52-2; **7.** *Angochitina mourai* (Schweineberg, 1987) DEM06-EF: H49-2; **8.** *Cingulochitina ervensis* (Paris, 1979), DEM30-EF: F43-2; **9.** *Conochitina tuba* (Eisenack, 1932), ORQ3C-EF: H50-3; **10.** *Euconochitina gordoensis* (Cramer, 1964), ORQ4B-EF: S39; **11.** *Rhabdochitina conocephala* (Eisenack, 1934), DEM30-EF: L28.

The biostratigraphic positioning is based on analyses supported by the studies of Grahn and Melo (2003), Grahn (2005), Azevedo-Soares and Grahn (2005), and Azevedo-Soares (2009). Overall, the findings exhibit a partial correspondence with the data presented by these authors. While many forms range from the Silurian to the Devonian periods, the association identified in this study pertains specifically to biozone C (Grahn and Melo, 2003; Grahn, 2005), which aligns with biozone VI as defined by Azevedo-Soares (2009).

According to Grahn and Melo (2003) and Grahn (2005), biozone C is characterized by the most distinctive forms of the chitinozoans *Eisenachitina* cf. *E. bohémica*, *Lagenochitina navicula*, *Pterochitina megavelata*, and *Angochitina* sp. B. The presence of *Ancyrochitina* sp. D, *Angochitina filosa* and *Lagenochitina* cf. *navicula* place the biozone in the Early Lochkovian interval. For Azevedo-Soares (2009), biozone VI, in the same interval mentioned above, features *Angochitina* cf. *brevis*, *Ancyrochitina fragilis*, *Ancyrochitina regularis*, *Margachitina catenaria*, and the first occurrence of *Angochitina* cf. *Sphaerochitina densibaculata*. For the author, the forms *Angochitina filosa*, *Angochitina strigosa*, *Pterochitina* sp. A, *Ancyrochitina* sp. D, *Eisenachitina* cf. *E. bohémica* is also typical of this interval.

Although most of the chitinozoans recognized in this research have been reported in Late Silurian deposits, the presence of *Angochitina* sp. D, *Angochitina filosa*, *Angochitina strigosa*, and *Lagenochitina* cf. *navicula* (according to Grahn and Melo, 2003, and Azevedo-Soares, 2009) place them in the Early Lochkovian (Fig. 12).

Regardless of the nomenclature adopted for the biozone recognized in this work, it displays a distribution of chitinozoan associations characteristic of the upper portion of the Manacapuru Formation. There are reworked forms from the Silurian, such as *Ramochitina bjornsondquisti* and *Linochitina* cf. *erratica*.

| SILURIAN                                      | DEVONIAN         | CRONO                              |                                |
|-----------------------------------------------|------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Early Pridoli                                 | Early Lochkovian |                                    |                                |
|                                               |                  | <i>Angochitina echinata</i>        | Species reported in this study |
|                                               |                  | <i>Angochitina mourai</i>          |                                |
|                                               |                  | <i>Angochitina strigosa</i>        |                                |
|                                               |                  | <i>Cingulochitina serrata</i>      |                                |
|                                               |                  | <i>Cingulochitina ervensis</i>     |                                |
|                                               |                  | <i>Conochitina packycephala</i>    |                                |
|                                               |                  | <i>Conochitina tuba</i>            |                                |
|                                               |                  | <i>Desmochitina corsiana</i>       |                                |
|                                               |                  | <i>Euconochitina gordoensis</i>    |                                |
|                                               |                  | <i>Fungochitina</i> sp. A          |                                |
|                                               |                  | <i>Ramochitina bjornsundquisti</i> |                                |
|                                               |                  | <i>Rhabdochitina conopephala</i>   |                                |
|                                               |                  | <i>Ancyrochitina gutnica</i>       |                                |
|                                               |                  | <i>Angochitina filosa</i>          |                                |
|                                               |                  | <i>Ancyrochitina</i> sp. D         |                                |
|                                               |                  | <i>Lagenochitina navicula</i>      |                                |
| B / V                                         | C / VI           | Biozones                           |                                |
| Grahn and Melo (2003) / Azevedo-Soares (2009) |                  | Autors                             |                                |
| Manacapuru                                    |                  | Formation                          |                                |

**Fig. 12.** Diagram showing chitinozoan ranges of the Lochkovian in the investigated outcrop section (in Presidente Figueiredo region, Amazonas).

Although the behavior of chitinozoans is unknown, those found in the Paleozoic sedimentary layers studied in the Amazon Basin were likely subjected to low temperatures, probably related to the glacial events described in this basin during the Silurian and Devonian periods. In particular, the chitinozoans from the layers positioned in the Early Lochkovian seem to have been more affected by the low temperature, since there is a significant reduction in the diversity of the forms documented, when compared to the records of Grahn and Melo (2003) and Azevedo-Soares (2009), for this part of the Amazon.

## 7. Discussion

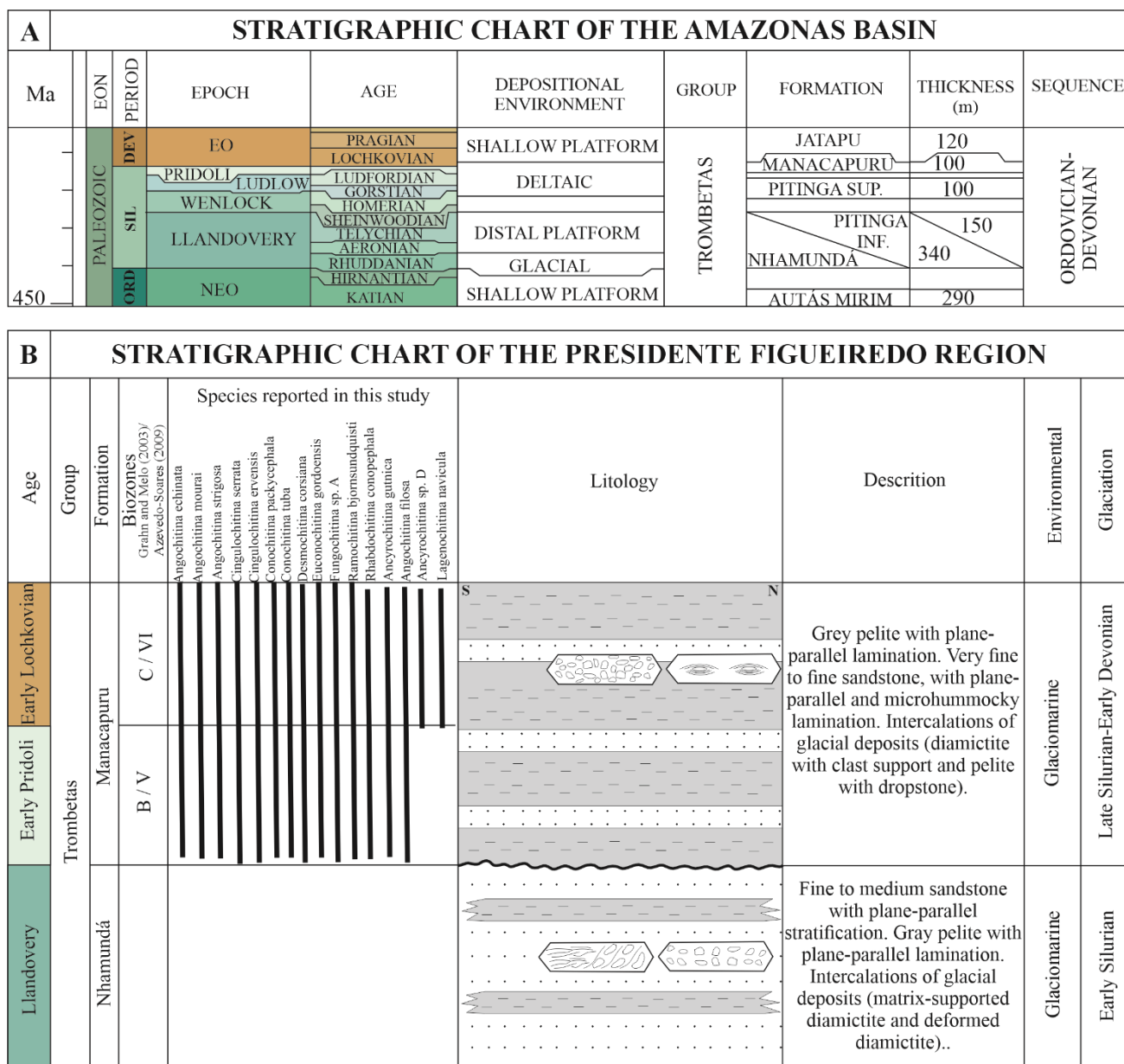
### 7.1. Palynostratigraphy

Palynostratigraphic data from the glaciomarine deposits on the northern edge of the Amazon Basin have allowed us to associate the studied diamictite deposits with two distinct glacial events. The most prominent deposits in the area, which correspond to the Dcs and Pld facies, are dated to the Late Silurian to Early Devonian interval. Based on the presence of diagnostic

forms of chitinozoans in this study, chitinozoans such as *Angochitina echinata* and *Angochitina* sp.1 were recognized in the Dcs facies, which is placed in the Pridoli and Lochkovian intervals. While the Pld facies, in particular, identified for the first time in the Presidente Figueiredo region, has the presence of *Angochitina* sp. D, *Angochitina filosa*, *Angochitina strigosa*, and *Lagenochitina* cf. *navicula*, which are positioned in the Early Lochkovian. Other evidence of this glacial event is the dropstones of the Pld facies, commonly used as diagnostic criteria for glacial episodes in the geological record, being mainly related to the glacial-lacustrine environment (Thomas and Connell, 1985; Petri et al., 2019; Rodríguez-López et al., 2024; Da Rosa et al., 2024). Therefore, the Early Lochkovian glacial event may be unprecedented in the stratigraphy of the Amazon Basin and other Brazilian intracratonic basins, according to the correlation of glacial deposits proposed by Caputo et al. (2008).

Due to their proximity, the occurrence of diamictite (Dms facies) studied in the Presidente Figueiredo region was associated with the Early Silurian glacial deposits already identified in the area. In particular, these diamictites were correlated to the oligomictic glacial deposits (with sandstone clasts and rare granite clasts) outcropping between the municipal seat of Presidente Figueiredo and the Vila de Balbina, positioned by palynology in the Llandovery-Wenlock (Melo, 1997; Melo and Steemans 1997; Soares, 1998; Nogueira et al., 1999; Soares et al., 2005; Cuervo et al., 2018). The diamictites of the Dms facies can also be correlated with the levels of **polymict** diamictites in the Nhamundá Formation, as identified in a borehole in the Amazon Basin by Carozzi et al. (1973). Silurian glacial events have also been identified in the Paraná (Iapó, Vila Maria and Furnas formations), Parnaíba (Ipu and Cabeças formations) and Jatobá (Tacarutu Formation) basins, as well as glacial records in the Cancañiri (Bolivia), San Gaban (Peru) and Mecoyita (Argentina) formations (Caputo and Crowell, 1985; Grahn and Caputo, 1992; Barrera et al., 2020).

The integration of palynological and sedimentary facies data from the Ordovician-Devonian sequence (Fig. 13A) allowed the elaboration of the stratigraphic chart of the Presidente Figueiredo region, with emphasis on the two associated glacial events (Fig. 13B). The data also allowed the definition of six discontinuous glacial zones (up to 10 km long) located between the municipal seat of Presidente Figueiredo and the village of Balbina (Fig. 1). The segmentation of these zones was determined based on the irregular grouping of outcrops, which are approximately 40 km apart, along with new occurrences identified in this study. This approach differs from the extensive continuous glacial zone (up to 80 km long) previously proposed for the region by Cuervo et al. (2018).



**Fig. 13.** A) Stratigraphic chart of the Ordovician-Devonian sequence of the Amazonas Basin (Modified from Cunha et al., 2007). B) Proposed stratigraphic chart for the Nhamundá e Manacapuru formations outcropping in the Presidente Figueiredo region, northern edge of the Amazon Basin. Highlight for the individualization of two glacial events, positioned in the Early Silurian and Late Silurian-Early Devonian.

## 7.2. Depositional model

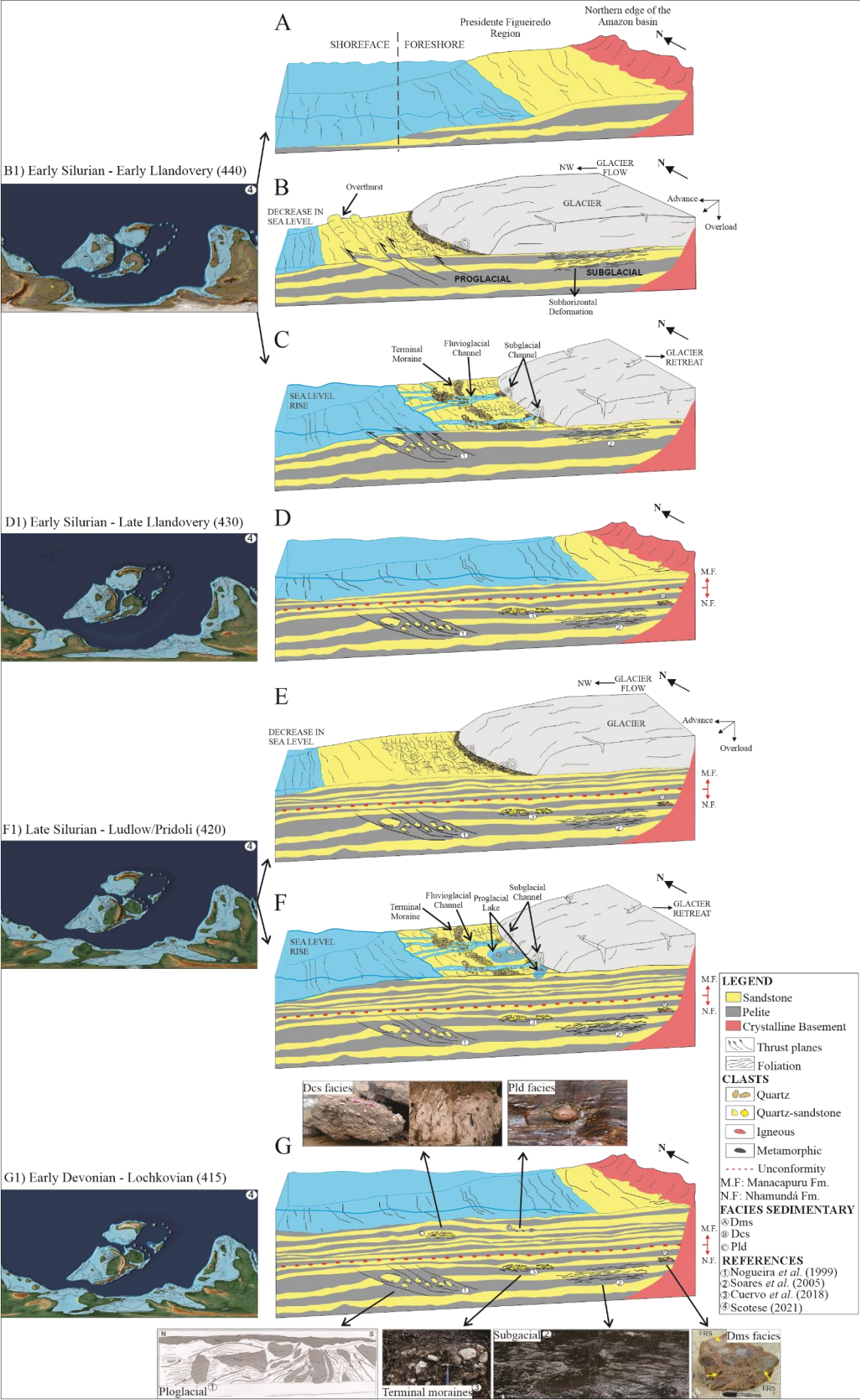
The depositional model proposed for the outcropping Paleozoic glaciomarine deposits in the Presidente Figueiredo region, on the northern edge of the Amazon Basin, was based on unpublished faciological and palynological data obtained in this work and regional geological

studies (Soares, 1998; Nogueira et al., 1999; Soares et al., 2005), which were integrated with depositional models proposed in various glaciotectonic studies (Carto and Eyles, 2012; Cuervo et al., 2018; Barrera et al., 2020; Nogueira et al., 2022). In general, the stages of evolution proposed in the depositional model (Fig. 14) follow the paleogeographic configuration outlined in Scotese's study (2021), where Gondwana was centered near the South Pole, as illustrated below.

In the Early Silurian period (Early Llandovery), the Nhamundá Formation experienced the deposition of sandstones and pelites that represent both lower and upper shoreface and foreshore environments (Fig. 14A). This deposition reflects a transgressive record along the northern edge of the basin, which is bounded by the igneous and metamorphic rocks of the crystalline basement (Cunha et al., 2007). During the Silurian glaciation, sea levels dropped, leading to the deformation of underlying geological layers due to the movement of glaciers in both subglacial and proglacial zones. This is evident from the records of diamictites mixed with foreshore and shoreface deposits, as highlighted in studies by Soares (1998), Nogueira et al. (1999), and Soares et al. (2005) (see Fig. 14B-C). In particular, during the glacial retreat, predominantly coarse terminal moraines were deposited, defined by Cuervo et al. (2018) in the Presidente Figueiredo region, which are correlated to the Dms facies identified in this study (Fig. 14C), whose genesis was associated with the flow of debris and transportation through underground channels and tunnels in the proglacial-subglacial zone. Despite the abundance of sedimentary rock clasts in the Dms facies, their presence, together with igneous-metamorphic clasts, suggests that the glacier reworked the underlying rocks (basement of crystalline and sedimentary rocks) during the Early Silurian glacial event. Following this event, a new marine transgression commenced in the Late Llandovery-Ludlow (Haq and Schutter, 2008), which facilitated the initial deposition of the Manacapuru Formation. The deposits of this formation, outcropping in the Presidente Figueiredo region, are represented by shoreface sandstones and pelites (Sm and Pl), which discordantly overlie the glaciomarine deposits of the Nhamundá Formation (Fig. 14D). Locally, an exposure of pelites (with sandstone intercalations) from the Manacapuru Formation in the Urubu River was associated with an offshore deposit and positioned based on chitinozoans in the Early Lochkovian (Rocha et al., 2019).

Unprecedented palynological data from this study, based on chitinozoans, enabled the diamictites of the Dcs facies to be dated from the Late Silurian (Ludlow/Pridoli) to the Early Devonian (Lochkovian), with the unprecedented definition of a new glacial event in the Amazon Basin. The lowering of the sea level associated with this event led to the deposition of terminal moraines (facies Dcs) in the proglacial zone, characterized by the accumulation of

coarse debris transported by underground tunnels that evolved into fluvial-glacial channels (Fig. 14E-F). In this facies, the abundance of quartz-sandstone clasts and blocks indicates reworking by ice of the underlying sedimentary deposits (probably from the Autás-Mirim and Nhamundá formations), located in a more internal portion of the basin. The assembly of ultra-stable heavy minerals (zircon and tourmaline) present in the Dcs facies is indicative of a high degree of reworking in the shallow marine environment, as well as a proximal source area attributed to the crystalline basement on the northern edge of the basin. In particular, the presence of idiomorphic anatase grains in this facies is interpreted as being of diagenetic origin, as suggested in studies by Mange and Maurer (1992), Mendes and Truckenbrodt (2009), and Cuervo et al. (2018). The lowering of sea level associated with this glacial event also favored the development of proglacial lagoons (Fig. 14E-F), where the melting of icebergs enabled the release of clasts from their bases, which were deposited on the muddy bed, giving rise to sedimentation of the Pld facies (Fig. 14F). Subsequently, the continuous rise in sea level in the Early Devonian (Lochkovian) continued the shoreface sedimentation of the Manacapuru Formation, which expansively covered the overlying glacial deposits (Dcs and Pld facies) (Fig. 14G).



**Fig. 14.** Proposed depositional model for the Siluro-Devonian glaciomarine deposits in the Presidente Figueiredo region, northern edge of the Amazon Basin. A) Sedimentation of the shoreface-foreshore facies of the Nhamundá Formation driven by marine transgression. B-C) Variation in sea level due to the advance and retreat of glaciers in the Early Silurian caused deformation of the underlying strata and deposition of terminal moraines (Dms facies) of the Nhamundá Formation. D) New marine transgression in the Late Silurian enabled the sedimentation of the shoreface and offshore facies of the Manacapuru Formation, which covered the underlying glacial deposits. E-F) Implementation of a new glacial event in the Late Silurian-Early Devonian allowed the deposition of terminal moraines (Dcs facies) and sedimentation in proglacial lagoons (Pld facies) as a result of the glacial advance trend. G) Rising sea levels in the Lochkovian allowed the sedimentation of the shoreface facies of the Manacapuru Formation and the covering of glacial deposits (Dcs and Pld facies). The stages of evolution of the diagram block were based on the glaciotectonic models defined in the studies by Nogueira et al. (1999), Soares et al. (2005), Carto and Eyles (2012), Cuervo et al. (2018), Barrera et al. (2020), and Nogueira et al. (2022). The sedimentation stages were integrated into the paleogeographic models of Scotese (2021).

## 8. Conclusions

This study records new outcrops of glacial deposits in the Nhamundá and Manacapuru formations (Trombetas Group) on the northern edge of the Amazon Basin. They are mainly represented by Dms, Dcs, and Pld facies, which occur intercalated with the foreshore-shoreface deposits.

The Dcs and Dms facies are interpreted as terminal moraines, deposited by debris flows in fluvial-glacial channels developed in the subglacial–proglacial zone. The Dcs facies is the most expressive and is part of the outcropping glacial zone, located approximately 30 km from the northern edge of the basin, containing mainly sedimentary rock clasts. At the same time, the Dms occurs punctually in the extreme north of the basin and stands out for its variety of igneous, sedimentary, and metamorphic clasts. The diversity of clasts is indicative of glacier displacement over distinct source areas on the northern edge of the basin, which includes intrabasinal reworking of Paleozoic sedimentary deposits (probably from the Autás-Mirim Formation) as well as the external contribution of igneous and metamorphic rocks from the Paleoproterozoic crystalline basement. As diagnostic evidence of the glacial event, dropstones in fine sediments of proglacial lagoons (Pld facies) stand out, whose genesis is associated with the detachment of clasts from the base of icebergs after melting.

The geographical positioning of the diamictites of the Dms facies, in the area of occurrence of the deformed glacial deposits (Llandovery-Wenlock) of the Nhamundá Formation, studied by Melo (1997) and Soares et al. (2005), allowed them to be correlated with the glacial event of the Early Silurian, defined by Caputo and Crowell (1985) for the Amazon Basin. On the

other hand, the unprecedented palynostratigraphic positioning of the Dcs and Pld glacial facies in the Late Silurian-Early Devonian (Pridoli-Lochkovian) allowed them to be inserted into the Manacapuru Formation, and this insertion enabled the inference of a new glacial phase in this period, which remains uncorrelated in the Amazon Basin.

In defining the glacial deposits studied, the presence of faceted clasts and dropstones is fundamental for elucidating the glacial events that influenced the sedimentation of the Nhamundá and Manacapuru formations in the Amazon Basin.

### **Acknowledgments**

The authors would like to thank FAPEAM (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas) (Resolution No. 002/2023 – POSGRAD 2023/2024) for the implementation of the scholarship, and CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel) for supporting by the Asymmetry Reduction Program in Postgraduate Studies (PRAPG – Call No. 14/2023), as well as the Postgraduate Program in Geosciences (PPGGEO/UFAM) for the infrastructure provided. I would also like to acknowledge the Thin Section Laboratory of the Geological Survey of Brazil (SGB/AM) and the Palynomacerals Laboratory (UERJ) for their technical support provided throughout the research.

### **References**

- Antonioli, L., Dino, R., Portela, H.A., Amaral, P.F., 2020. New method of rock samples preparation for palynological and palynofaciological analysis. *Anuário do Instituto de Geociências* 43 (1), 339-345. [https://doi.org/10.11137/2020\\_1\\_339\\_345](https://doi.org/10.11137/2020_1_339_345).
- Araújo, R., Nogueira, A., 2019. Serra Sul diamictite of the Carajás Basin (Brazil): A Paleoproterozoic glaciation on the Amazonian craton. *Geology*, 47 (12), 1166-1170. <https://doi.org/10.1130/G46923.1>
- Assine, M.L., Alvarenga, C.J.S., Perinotto, J.A., 1998. Formação Iapó: Glaciação Continental no Limite Ordoviciano/Siluriano da Bacia do Paraná. *Rev. Bras. Geociências* 28, 51–60.
- Assine, M.L., Vesely, F.F., 2008. Ambientes Glaciais. In: Silva, A.J.C.da, Aragão, M.A.N.F.de, Magalhães, A.J.C. (Eds.), *Ambientes de sedimentação siliciclástica do Brasil*, São Paulo, 24–51.
- Assis, A.P., Porto, A.L., Schmitt, R.S., Linol, B., Medeiros, S.R., Martins, F.C., Silva, D.S., 2019. The Ordovician-Silurian tectono-stratigraphic evolution and paleogeography of eastern Parnaíba Basin, NE Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 95, 102241. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102241>.
- Azevedo-Soares, H.L.C., 2009. The Trombetas Group chitinozoans of the Amazon Basin, Northern Brazil. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.* 253 (1), 133-143.
- Azevedo-Soares H.L.C. and Grahn Y. 2005. The Silurian–Devonian boundary in the Amazon

Basin, northern Brazil. *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 236 (1-2), 79-94.

Barrera, I.A.R., Nogueira, A.C.R., Bandeira, J., 2020. The Silurian glaciation in the eastern Parnaíba Basin, Brazil: paleoenvironment, sequence stratigraphy and insights for the evolution and paleogeography of West Gondwana. *Sedim. Geol.* 406, 105714. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105714>.

Bennett, M.R., Doyle, P., Mather, A.E., 1996. Dropstones: their origin and significance. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 121 (3-4), 331–339. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0031-0182(95)00071-2).

Caputo, M.V., 1984. Glaciação neodevoniana no continente gondwana ocidental. In: *Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia*, Rio de Janeiro, 725–740.

Caputo, M.V., 1985. Late Devonian glaciation in South America. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 51 (1-4), 291-317. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(85\)90090-2](https://doi.org/10.1016/0031-0182(85)90090-2)

Caputo, M.V., Crowell, J.C., 1985. Migration of glacial centers across Gondwana during Paleozoic Era. *Bull. Geol. Soc. Am.* 96 (8), 1020-1036. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<1020:MOGCAG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<1020:MOGCAG>2.0.CO;2).

Caputo, M.V., Vasconcelos, E.P., 1971. Possibilidades de hidrocarbonetos no Arco Purus. *Petróleo Brasileiro, S. A. Internal Report, Sistema de Informação e Exploração* (130-5164), 1-21.

Caputo, M.V., Rodrigues, R., Vasconcellos, D.N., 1972. Nomenclatura Estratigráfica da Bacia do Amazonas: historico e Atualização. In: *26 Congresso Brasileiro de Geologia*, Belém, vol. 3. pp. 35–46.

Caputo, M.V., Melo, J.H.G., StreeL, M., Isbell, J.L., 2008. Late Devonian and Early Carboniferous glacial records of South America. *Geol. Soc. Am., Spec. Pap.*, pp. 161-173. [https://doi.org/10.1130/2008.2441\(11\)](https://doi.org/10.1130/2008.2441(11)).

Carozzi, A.V., Pamplona, H.R.P., Castro, J.C., de Contreiras, C.J.A., 1973. Ambientes Depositionais e Evolução Tecto-sedimentar da Seção clástica Paleozoica da Bacia do Médio Amazonas. In: *Anais do XXVII, Congresso Brasileiro de Geologia*, Aracaju, 279–314.

Carto, S. L., Eyles, N., 2012. Sedimentology of the Neoproterozoic (c. 580 Ma) Squantum ‘Tillite’, Boston Basin, USA: Mass flow deposition in a deep-water arc basin lacking direct glacial influence. *Sediment. Geol.* 269, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2012.03.011>.

Collinson, J.D., 1996. Alluvial sediments. In: Reading, H.G. (Ed.), *Sedimentary Environments: Processes, Facies, Stratigraphy*, 3rd ed. Blackwell Science, Oxford, pp. 37–82.

Cuervo, H.D.R., Soares, E.A.A., Caputo, M.V; Dino, R., 2018. Sedimentology and stratigraphy of new outcrops of Silurian glaciomarine strata in the Presidente Figueiredo region, northwestern margin of the Amazonas Basin. *J. S. Am. Earth Sci.* 85, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.04.023>.

Cunha, P.R.C., Gonzaga F.G., Coutinho L.F.C., Feijó, F.J., 1994. Bacia do Amazonas. *Bol. Geoc. Petrobras*, Rio de Janeiro 8, 47–55.

Cunha, P.R.C., Melo, J.H.G., Silva, O.B., 2007. Bacia do Amazonas. Bol. Geoc. Petrobras, Rio de Janeiro 15, 227–251.

da Rosa, E.M., Isbell, J.L., Vesely, F., Sedorko, D., Garcia, A., McNall, N., 2024. Reassessing the late Paleozoic glacial sedimentation in western Paraná Basin, Brazil: A record of a slope and glaciated outer shelf setting in the Aquidauana Formation. *Sediment. Geol.* 466, 106640. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2024.106640>.

Díaz-Martínez, E., 1994. La Formación Cumaná del Altiplano de Bolivia: un modelo de sedimentación Glaciomarina del Devónico Superior. *Revista Técnica de YPF* 15, 357–372.

Díaz-Martínez, E., 2004. La glaciación del Devónico superior em Sudamérica: estado del conocimiento y perspectivas. XII Congreso Peruano de Geología, Resúmenes Extendidos. Sociedad Geológica del Perú, Publicación Especial 6, 440–443.

Días-Martínez, E., Grahn, Y., 2007. Early silurian glaciation along the western margin of Gondwana (Peru, Bolivia and northern Argentina): palaeogeographic and geodynamic setting. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 245, 62–81. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2006.02.018>.

Díaz-Martínez, E., Isaacson, P.E., 1994. Late devonian glacially-influenced marine sedimentation in western Gondwana: the Cumaná Formation, altiplano, Bolivia. In: In: Beauchamp, B., Embry, A.F., Glass, D. (Eds.), Carboniferous to Jurassic Pangea. *Can. Soc. Pet. Geol. Mem.*, vol. 17. pp. 511–522.

Dino, R., Soares, E.A.A., Antonioli, L., Riccomini, C., Nogueira, A.C.R., 2012. Palynostratigraphy and sedimentary facies of Middle Miocene fluvial deposits of the Amazonas Basin, Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.* 34, 61–80. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.11.008>.

Einsele, G., 2000. Sedimentary Basins: Evolution, Facies, and Sediment Budgets. Springer-Verlag, Heidelberg, 792 p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-04029-4>

Eyles, N., Eyles, C.H., Miall, A.D., 1983. Lithofacies types and vertical profile models; an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictite sequences. *Sedimentology*, 30 (3), 393–410. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1983.tb00679.x>.

Eyles, N., Eyles, C.H., 1992. Glacial depositional systems. In: Walker, R.G., James, N.P. (Eds.), *Facies Models: Response to Sea-level Change*. Geological Association of Canada, Toronto, pp. 73–100.

Finnegan, S., Bergmann, K., Eiler, J.M., Jones, D.S., Fike, D.A., Eisenman, I., Hughes, N.C., Tripathi, A.K., Fisher, W.W., 2011. The magnitude and duration of Late Ordovician to Early Silurian glaciation. *Science* 331 (6019), 903–906. <https://doi.org/10.1126/science.1200803>.

Gilbert, R., 1990. Rafting in glaciomarine environments. In: Dowdeswell, J.A., Scourse, J.D. (Eds.), *Glaciomarine Environments: Processes and Sediments*. Geological Society Special Publications, pp. 105–120. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1990.053.01.0>.

Grahn, C.Y., 1992. Revision of silurian and devonian strata of Brazil. *Palinology* 16, 35–61. <https://doi.org/10.1080/01916122.1992.9989406>.

- Grahn, Y., 2005. Silurian and Early Devonian chitinozoan taxonomy and biostratigraphy of the Trombetas Group, Amazonas Basin, northern Brazil. *Bull. Geosci.* 80 (4), 245-276.
- Grahn, C.Y., Melo, J.H.G., 2003. Silurian-Devonian chitinozoan biostratigraphy along the Urubu, Uatumã and Abacate rivers in the western part of the Amazonas Basin, northern Brazil. *Bull. Geosci.* 78 (4), 373-391.
- Grahn, C.Y., Caputo, M.V., 1992. Early silurian glaciations in Brazil. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.* 99, 9–15. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(92\)90003-N](https://doi.org/10.1016/0031-0182(92)90003-N).
- Grahn, C.Y., Paris, F., 1992. Age and correlation of the Trombetas Group, Amazonas Basin, Brazil. *Rev. Micropaléon.* 35, 197-209.
- Hambrey, M.J., 1985. The late Ordovician-early Silurian glacial period. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 5, 273–289. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(85\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0031-0182(85)90089-6)
- Haq, B.U., Schutter, S.R., 2008. A chronology of Paleozoic sea-level changes. *Science.* 322, 64–68. <https://doi.org/10.1126/science.1161648>.
- Loboziak, S., Caputo, M.V., Melo, J.H.G., 2000. Middle Devonian-Tournaisian miospore biostratigraphy in the southwestern outcrop belt of the Parnaíba Basin, North-Central Brazil. *Rev. Micropaleontol.* 43, 301–318.
- Ludwig, G., 1964. Divisão estratigráfico-faciológica do Paleozoico da Bacia Amazônica. PETROBRAS, Ciência Técnica Petróleo, Seção: Exploração de petróleo. 1, 1-72.
- Mange, M. A., Maurer, H.F.W., 1922. *Heavy Minerals in Colour*. Chapman and Hall, London (147 pp.).
- Matsuda, N.S., Winter, W.R., Wanderley Filho, J.R., Cacela, A.S.M., 2010. Roteiro geológico - O Paleozoico da borda sul da Bacia do Amazonas, Rio Tapajós - Estado do Pará. *Boletim de Geociências da Petrobras.* 18 (1), 123–152.
- Melo, J.H.G., 1997. Resultados de solicitação de análise palinológica em amostras de Superfície da Região da Represa Balbina (AM), Bacia do Amazonas. Petrobras internal report, 1–7.
- Melo, J.H.G., Steemans, P., 1997. Resultados de Investigações palinoestratigráficas em amostras de Superfície da Região de Presidente Figueiredo (AM), Bacia do Amazonas. Petrobras Internal Report, 1-12.
- Mendes, A.C., Truckenbrodt, W., 2009. Proveniência de arenitos albianos (Grupo Itapecuru), borda leste da bacia de São Luís-Grajaú, Maranhão, usando análise de minerais pesados e química mineral. *Bol. Mus. Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais* Belém 4, 57–74.
- Miall, A.D., 1996. *The Geology of Fluvial Deposits*. Springer-Verlag, Berlin, 581.
- Miall, A.D., 1997. *The Geology of Stratigraphy Sequence*. Springer-Verlag, Berlin, 433. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03380-7>.
- Miall, A.D., 2000. *Principles of Sedimentary Basin Analysis*. 3rd and Enlarged Edition, Springer-Verlag, Berlin, 616. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-03999-1>.

Nichols, G., 2009. *Sedimentology and stratigraphy*. Wiley-Blackwell.

Nogueira, A.C.R., Truckenbrodt, W., Soares, E.A.A., 1999. O icnogênero *Arthropycus* de depósitos sublitorâneos da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior) da Bacia do Amazonas, região de Presidente Figueiredo. *Rev. Bras. Geociências* 29, 135–140.

Nogueira, A.C.R., Góes, A.M., Bandeira, J., Barrera, I.A.R., Medeiros, R.S.P., Santos, R.F., Silva, P.A., Soares, J.L., 2022. Evidências de antigas glaciações no sertão nordestino. *Revista da Academia de Ciências do Piauí*, 3 (3). <https://doi.org/10.29327/261865.3.3-9>

Paris, F., Grahn, Y., Nestor, V., Lakova, I., 1999. A revised chitinozoan classification. *Journal of Paleontology*, 73 (4), 549-570. <https://doi.org/10.1017/S0022336000032388>.

Paris, F., 2006. Chitinozoans: A Fascinating and Mysterious Microfossil Group. *Rapport interne de l'université de Rennes I, France*, pp. 1–81.

Petri, S., Pérez-Aguilar, A., Chahud, A., Ezaki, S., Góes, A. M., Hiruma, S. T., Souza, P.A.D. 2019. Grupo Itararé na região de Itu, estado de São Paulo: intensos processos glaciais erosivos e deposicionais. *Rev. Inst. Geol.* 40 (3), 27-48.

Reis, N.J., Almeida, M.E., Riker, S.L., Ferreira, A.L., 2006. *Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas Programa Geologia do Brasil (mapas geológicos estaduais, escala 1: 1.000.000)*. Manaus: CIAMA/CPRM.

Rocha, P.F., Silveira, R.R., Barbosa, R.C.M., 2019. Age and palaeoenvironments of the Manacapuru Formation, Presidente Figueiredo (AM) region, Lochkovian of the Amazonas Basin. *Brazil. J. Geol.* 49 (4), 1-12. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201920180130>.

Rocha-Campos, A.C., 1981. Late ordovician (?)–early silurian Trombetas formation, Amazonas basin, Brazil. In: Hambrey, M.J., Harland, W.B. (Eds.), *Earth's Pre-pleistocene Glacial Record*. Cambridge University Press, England, pp. 896–898.

Rodrigues, R., Vasconcelos, D.N.N., Caputo, M.V., 1971. *Sedimentologia das Formações pré-pensilvanianas da Bacia Amazônica*. Petrobrás DEPEX/SEDPC. 130–4050. Belém, 1-84.

Rodríguez-López, J.P., Liesa, C.L., Luzón, A., Muñoz, A., Mayayo, M.J., Murton, J.B., Soria, A.R., 2024. Ice-rafted dropstones at midlatitudes in the Cretaceous of continental Iberia. *Geology*, 52 (1), 33-38. <https://doi.org/10.1130/G51725.1>.

Santos, P.R., Rocha-Campos, A.C., Canuto, J.R., 1992. Estruturas de arrasto de ice-bergs em ritmitos do Subgrupo Itararé (Neo-Paleozóico), Trombudo Central, SC. *Boletim IGUSP*. 23 pp. 1–18. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v23i0p1-18>

Scotese, C.R., 2021. An Atlas of Phanerozoic Paleogeographic Maps: The Seas Come In and the Seas Go Out. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 49 (1), 679–728. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-081320-064052>.

Silva, P.A.S., Afonso, J.W.L., Soares, J.L., Nogueira, A.C.R., 2015. Depósitos de plataforma mista, Neocarbonífero da Bacia do Amazonas, região de Uruará, estado do Pará. *Geol. USP. Série Científica* 15 (2), 79-98. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v15i2p79-98>.

Silva, Y.A., Oliveira, G.C.C.A., De Oliveira, R.S., Scheffler S.M., 2023. Nova Ocorrência de

Crinoidea no Pensilvaniano da Formação Itaituba, Pedreira Caltarém, Norte da Bacia do Amazonas. *Rev. Brazil. Paleontol.* 26 (1), 21-34. <https://doi.org/10.4072/rbp.2023.1.03>.

Soares, E.A.A., 1998. Fácies Litorâneas e Feições Glaciais da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior) na Região de Presidente Figueiredo-AM, Bacia do Amazonas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, Belém.

Soares, E.A.A., Truckenbrodt, W., Nogueira, A.C.R., 2005. Fácies Litorâneas e Subglaciais da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior), Região de Presidente Figueiredo, Bacia do Amazonas. *Boletim do Museu Emílio Göeldi* 1, 89–116.

Soares, E.A.A., Dino, R., Soares, D.P., Antonioli, L., Silva, M.A.L., 2015. New sedimentological and palynological data from surface Miocene strata in the central Amazonas Basin area. *Brazilian J. Geol.* 45, (3), 337-357. <https://doi.org/10.1590/2317-488920150030283>.

Streel, M., Caputo, M.V., Loboziak, S., Melo, J.H.G., 2000. Late Frasnian-Famennian climates based on palynomorph analysis and the question of Late Devonian glaciations. *Earth Sci. Rev.* 52, 121–173. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00026-X)

Suguio, K., 1973. Introdução à Sedimentologia. Edgard Blücher, São Paulo, p. 318.

Thomas, G.S.P., Connell, R.J., 1985. Iceberg drop, dump, and grounding structures from Pleistocene glacio-lacustrine sediments, Scotland. *J. Sediment. Petrol.* 55, (2), 243-249. <https://doi.org/10.1306/212F8689-2B24-11D7-8648000102C1865D>.

Torsvik, T.H., Cocks, L.R.M., 2013. Gondwana from top to base in space and time. *Gondwana Research*, 24, (3-4), 999-1030. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.06.012>.

Tucker, M.E., 2003. *Sedimentary Rocks in the Field* Third Edition. England, p. 234.

Turner, B.R., Makhlof, I.M., Armstrong, H.A., 2005. Late Ordovician (Ashgillian) glacial deposits in southern Jordan. *Sedimentary Geol.*, 181, 73–91. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.08.004>

Vasquez, M.L., Rosa Costa, L.T., Silva, C.M.G., Klein, E.L., 2008. Compartimentação tectônica. In: Vasquez M.L., Rosa Costa L.T. (eds.). *Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará*. Escala 1:1.000.000. Belém: Mineral Resources Research Company, p.39-112.

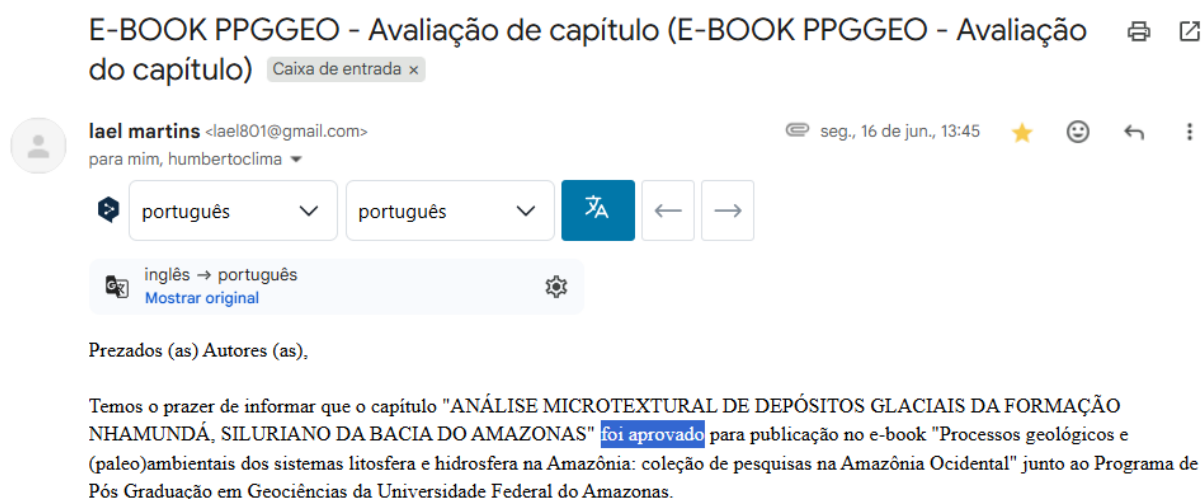
Walker, R.G., 1992. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: Walker, R.G., James, N.P. (Eds.), *Facies Models - Response to Sea Level Change*. Geological Association of Canada, Toronto, 1–14.

Wanderley Filho, J.R., Costa, J.B.S., 1991. Contribuição à evolução estrutural da Bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento. In: *Simpósio de Geologia da Amazônia*, 3, Belém, Resumo expandido, p. 244-259,

Wizevich, M.C., 1991. Photomosaics of outcrops: useful photographic techniques. In: Miall, A.D., Tyler, N. (Eds.), *The Three-Dimensional Facies Architecture of Terrigenous Clastic Sediments and its Implications for Hydrocarbon Discovery and Recovery*. SEMP, Concepts in Sedimentology and Paleontology, vol.3, pp. 22-24. <https://doi.org/10.2110/csp.91.03.0022>.

### 6.2.2 Análise microtextural de depósitos glaciais da Formação Nhamundá, Siluriano da Bacia do Amazonas (Capítulo de livro)

As microtexturas superficiais de depósitos glaciogênicos estudados anteriormente por Soares et al. (2005) foram analisados e incluídos nesta dissertação, cujo resultado foi submetido e aprovado como capítulo de livro no e-book (PPGGEO/UFAM) intitulado "Processos geológicos e (paleo)ambientais dos sistemas litosfera e hidrosfera na Amazônia: coletânea de pesquisas na Amazônia Ocidental".



# ANÁLISE MICROTTEXTURAL DE DEPÓSITOS GLACIAIS DA FORMAÇÃO NHAMUNDÁ, SILURIANO DA BACIA DO AMAZONAS

Carmem Nátylly Amorim Franco<sup>1</sup>; Emílio Alberto Amaral Soares<sup>2</sup>; Carlos Alejandro Salazar<sup>3</sup>

## RESUMO

A integração de dados estruturais (afloramentos) e microtexturais (MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura) obtidos de depósitos glaciogênicos da Formação Nhamundá, se mostrou uma ferramenta eficaz na definição da deformação glacioteclônica siluriana da Bacia do Amazonas. A análise microtextural de grãos de quartzo forneceu informações qualitativas relacionadas aos processos sedimentares e reconstituição paleoambiental. Os depósitos estudados são constituídos de arenitos e diamictitos que exibem registros da deformação glacioteclônica, definida por planos de foliação e cavalgamentos (subhorizontais e subverticais) relacionados aos ambientes proglacial e subglacial. Nesses depósitos são escassos estudos sobre a microtextura superficial dos grãos, que podem dar suporte as interpretações dos processos deformacionais atuantes. Nesse contexto, o presente estudo definiu 8 padrões de microtexturas superficiais, de origem mecânica e química. As mecânicas são definidas como planos de fratura, superfície de clivagem, sulcos retos e curvados, arco graduado, *V-shapes* e estrias paralelas, enquanto as químicas são *triangular etch pits* e depressões profundas. Esse conjunto de microtexturas pode ser associado aos padrões descritos em ambiente glacial, onde os sedimentos são transportados e depositados por correntes de água de degelo e/ou por fluxos gravitacionais. Essas feições são também associadas a processos glaciais relacionados a tensão de cisalhamento no contato entre grãos, bem como modificações causadas pelo esmagamento e moagem. Particularmente, a microtextura de estrias paralelas é representativa do ambiente glacial, enquanto as microtexturas de superfície de clivagem, *V-shapes*, depressões profundas e sulcos (retos e curvados) podem ocorrer no ambiente glacial, fluvial e marinho. As microtexturas de arco graduado, planos de fraturas e *triangular etch pits* são representativas do ambiente marinho e podem indicar retrabalhamento dos depósitos de *foreshore/shoreface* da Formação Nhamundá.

**PALAVRAS-CHAVE:** Glacioteclônica; Textura Superficial; Ambiente Glacial; Bacia do Amazonas; Siluriano.

## ABSTRACT

The integration of structural (outcrops) and microtextural (SEM – Scanning Electron Microscopy) data obtained from glaciogenic deposits of the Nhamundá Formation proved to be an effective tool in defining the Silurian glacioteclonic deformation of the Amazon Basin. The microtextural analysis of quartz grains provided qualitative information related to sedimentary processes and paleoenvironmental reconstruction. The deposits studied are composed of sandstones and diamictites that present records of glacioteclonic deformation, defined by foliation planes and thrusts (subhorizontal and subvertical) related to proglacial and subglacial environments. These deposits are scarce studies on the surface microtexture of the grains, which can support the interpretations of the acting deformation processes. In this context, the present study defines 8 surface microtexture patterns, of mechanical and chemical origin. Mechanical features are defined as fracture planes, cleavage surfaces, straight and curved grooves, graduated arcs, *V-shapes* and parallel striations, while chemical features are *triangular etch pits* and deep troughs. This set of microtextures can be associated with the patterns described in

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas. [carm.nataly@gmail.com](mailto:carm.nataly@gmail.com)

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas. [casoares@ufam.edu.br](mailto:casoares@ufam.edu.br)

<sup>3</sup> Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas. [csalazar@ufam.edu.br](mailto:csalazar@ufam.edu.br)

glacial environments, where sediments are transported and deposited by ice-water currents and/or gravitational flows. These features are also associated with glacial processes related to shear stress at the contact between grains, as well as modifications caused by crushing and grinding. In particular, a microtexture of parallel striations is representative of the glacial environment, while microtextures of cleavage surfaces, V-shapes, deep troughs and straight and curved grooves can occur in glacial, fluvial and marine environments. As graded-arc microtextures, fracture planes and triangular etch pits are representative of the marine environment and may indicate reworking of the foreshore/shoreface deposits of the Nhamundá Formation.

**KEYWORDS:** Glaciotectonic; Surface Texture; Glacial Environment; Amazon Basin; Silurian.

## 1. INTRODUÇÃO

A análise de microtexturas superficiais de grãos de quartzo por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) tem sido amplamente aplicada na caracterização de depósitos glaciogênicos (Whalley & Krinsley, 1974; Whalley & Langway, 1978; Mahaney, 1995; Mahaney, 2002; Strand et al., 2003; Vos et al., 2014; Kalińska et al., 2022) e registram evidências dos processos deposicionais e condições ambientais dos depósitos (Immonen, 2013). Particularmente, no ambiente glacial o conjunto de microfeições, como estrias paralelas, fraturas conchoidais, sulcos retos e curvos e bordas de abrasão são frequentemente associadas à dinâmica do gelo (Trucker, 1991; Mahaney, 2002; Van Hoesen and Orndorff, 2004; Damiani et al., 2006; Hart, 2006; Mathur et al., 2009; Vós et al., 2014). O uso do quartzo na análise se destaca devido à sua alta resistência em relação a outros minerais e à sua ampla ocorrência em ambientes sedimentares (Vos et al., 2014).

No arcabouço estratigráfico da Bacia do Amazonas, depósitos glaciais têm sido identificados principalmente na Formação Nhamundá (Siluriano) por meio de testemunhos de sondagens (Carozzi et al., 1973; Caputo & Crowell, 1985; Grahn & Paris, 1992), sendo constituídos por diamictitos de textura heterogênea, que contém seixos diversos imersos em matriz siltico-argilosa. Nas últimas décadas, depósitos glaciogênicos correlatos foram também identificados em afloramentos na borda norte da bacia (município de Presidente Figueiredo), por Soares (1998), Nogueira et al. (1999), Soares et al. (2005) e Cuervo et al. (2018), constituídos principalmente de diamictitos, por vezes, com deformação glacioteclônica, como planos de foliação, de cavalgamento e descolamento. Os diamictitos, posicionados por palinologia no Llandoveryano-Wenlockiano, ocorrem como camadas intraformacionais intercaladas aos depósitos de *shoreface-foreshore* da Formação Nhamundá (Melo, 1997; Melo & Steemans, 1997; Cuervo et al., 2018).

Portanto, o presente estudo é parte integrante do estudo de Barbosa (2018), e utiliza de forma inédita as microtexturas superficiais na caracterização da deformação glacioteclônica siluriana impressa em alguns níveis de diamictitos da região de Presidente Figueiredo (Figura 1), conforme estudo de Soares et al. (2005). Foram identificadas microtexturas características de ambiente glacial, bem como microtexturas associadas ao ambiente marinho, que caracterizam a sedimentação glacio-marinha da Formação Nhamundá.

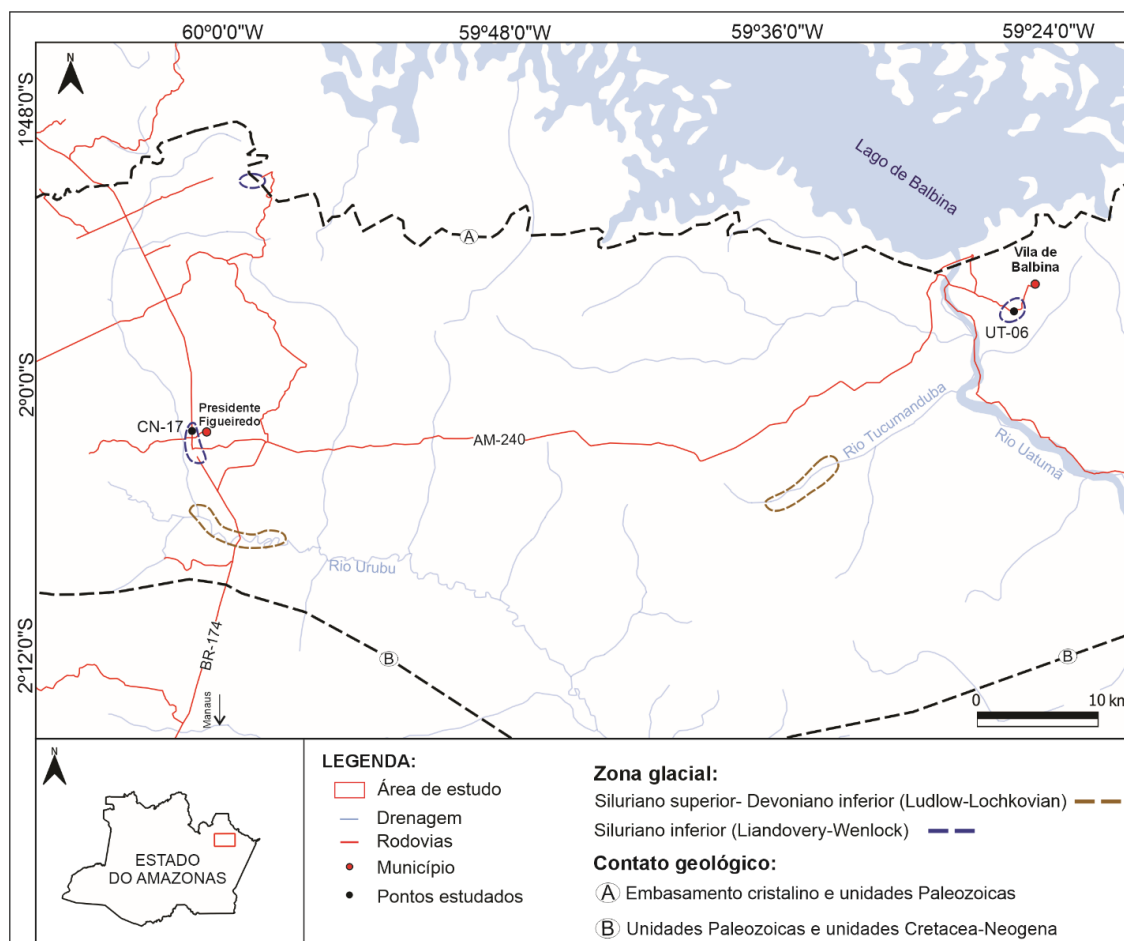


Figura 1. A) Mapa com a localização dos afloramentos e zonas glaciais analisados (linhas tracejadas) definidas na região sul do município de Presidente Figueiredo (Amazonas). Fonte: Dados vetoriais obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (Ano 2020, <https://portaldemaps.ibge.gov.br>) e limite geológico extraído do banco de dados do Serviço Geológico do Brasil (Riker et al., 2016).

## 2. DEPÓSITOS GLACIO-MARINHOS DA FORMAÇÃO NHAMUNDÁ

Na borda norte da Bacia do Amazonas, o contexto geológico aflorante compreende a faixa sedimentar paleozoica contínua, de direção geral E-W, representadas pelas formações Autás Mirim, Nhamundá e Manacapuru do Grupo Trombetas (Riker et al., 2016), sendo delimitada a norte, pelas rochas do embasamento cristalino e a sul, pela cobertura sedimentar cretácea-neógena (Souza & Nogueira, 2009).

A Formação Nhamundá é a unidade mais expressiva, com espessura aflorante de aproximadamente 30 km. Esta formação tem sido estudada principalmente a partir de furos de sondagem, sendo representativa de ambiente litorâneo com influência glacial (Rodrigues et al. 1971; Carozzi et al. 1973; Caputo & Sad 1974; Caputo & Crowell 1985; Grahn, 1992; Grahn & Paris 1992). Carozzi et al. (1973) identificaram nesta formação fácies fluviais que gradam para litorâneas (*shoreface*), além de fácies glaciais, representadas por níveis de diamictitos grosseiros, contendo clastos arredondados ou angulares, de riolito, quartzito e arenito suportados por matriz argilo-siltico-arenosa (Caputo & Crowell, 1985).

Nas últimas décadas, afloramentos da Formação Nhamundá têm sido estudados na porção sul do município de Presidente Figueiredo (incluindo a Vila de Balbina) por Soares et al. (2005), onde foram individualizadas fácies sedimentares não deformadas e deformadas. As fácies não deformadas compreendem arenitos que exibem estratificação plano-paralela, estratificação cruzada tabular, estratificação cruzada *hummocky*, laminação cruzada cavalgante

com *Arthropycus alleghaniensis*, marcas onduladas, além de aspecto maciço com bioturbação (*Skolithos*), representativas de ambiente marinho raso de *foreshore-shoreface*. A fácies deformada ocorre em camadas intraformacionais, sendo constituídas por diamictitos mal selecionados, contendo blocos e clastos de quartzo-arenitos envolvidos por matriz fina (siltico-argilosa) associadas a ambiente glacial. Como estruturas de deformação, esta fácies exibe planos de foliação, de cavalgamento e descolamento, os quais foram gerados por deformação de origem glacial, em ambientes subglacial e progracial (Soares et al. 2005). Em estudo recente, Cuervo et al. (2018) identificaram nesta região novas ocorrências de diamictito grosseiro contendo seixos facetados e estriados, intercalados com depósitos de *foreshore* e *shoreface*. Dados palinológicos de Melo (1997) e Melo & Steemans (1997), permitiram posicionar a Formação Nhamundá no Landoveriano-Wenlockiano.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho de campo foi realizado nas rodovias BR-174 (Manaus - Boa Vista) e AM-240 (Presidente Figueiredo – Vila de Balbina), em setembro de 2023. As amostras (pontos UT-06 e CN-17) foram coletadas em afloramentos representativos dos depósitos glacio-marinhos deformados, seguindo a individualização faciológica de Soares et al. (2005).

Conforme metodologia de Suguio (1973), duas amostras foram pesadas, lavadas e colocadas em estufa para secagem (Figura 2 A). A separação granulométrica foi efetuada através do peneiramento a seco, utilizando um conjunto de peneiras acopladas a um agitador mecânico (Figura 2 B), onde foi analisada apenas a fração de areia fina (0,250-0,125mm) que permite minimizar os efeitos das variações do tamanho do grão em relação ao formato e textura, conforme enfatizado por Reymont (1968). Para obtenção das imagens dos grãos pelo método de elétrons secundários foram selecionadas quantidades variadas de grãos de quartzo fixados aleatoriamente aos *stubs* por meio de fita de carbono. Posteriormente, os grãos foram metalizados com ouro no aparelho *Smart Coater* por 2 min (Figura 2 C), visando o aumento da capacidade de condução de elétrons na superfície dos grãos e, em seguida, colocados no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para capturar as imagens da superfície dos grãos (Figura 2 D). As análises de MEV foram realizadas no Centro Multiusuário para Análise de Fenômenos Biomédicos (CMABio) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA).

Na identificação das microtexturas superficiais foram utilizados o *Atlas of Sand Grain Surface Textures and Applications* (Mahaney, 2002) e artigos especializados (Strand et al., 2003; Costa et al. 2014; Kalińska et al., 2022), que ilustram as principais texturas superficiais relacionadas ao ambiente glacial. Foram analisados aproximadamente 20 a 25 grãos por amostra, seguindo a metodologia de Vos et al. (2014), que enfatiza essa quantidade como suficiente para determinar a variabilidade microtextural e a análise semiquantitativa. Seguindo a metodologia citada, a frequência de ocorrência foi dividida em quatro classes: abundante ( $\geq 75\%$ ), comum (50–75%), esparsa (5–50%) e não observado (0%).

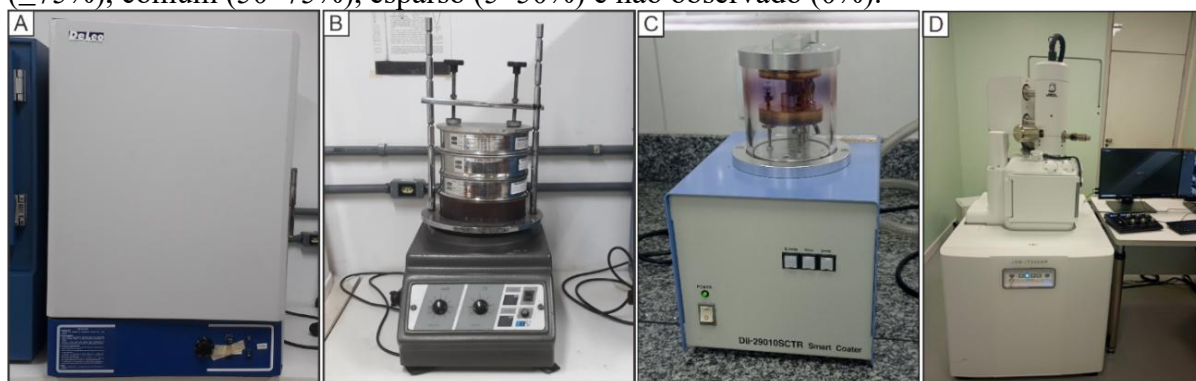


Figura 2. A) Estufa utilizada na secagem das amostras. B) Processo de peneiramento com o agitador mecânico. C) Aparelho *Smater Coater* utilizado na metalização de materiais não condutores. D) Aparelho de Microscópio Eletrônico de Varredura.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, foram analisados grãos de quartzo (pontos UT-06 e CN-17) pertencentes a depósitos glaciais deformados, constituídos pelas fácies de diamictito foliado (Df) e arenito foliado (Af), individualizadas por Soares et al. (2005). A Df é composta por diamictito grosso contendo lentes e blocos de arenito imersos em matriz siltico-arenosa esbranquiçada (Figura 3) e exibe estruturas de deformação, como planos de foliação sub-horizontal e planos de cavalgamento de baixo ângulo, além de dobras em *chevron* e recumbentes. Internamente, as lentes de arenito mostram-se estriadas e boudinadas, concordantes com os planos de foliação (Soares et al., 2005). A fácies Af é composta por quartzo-arenito fino, esbranquiçado, com grãos arredondados e internamente exibe planos de foliação levemente ondulados e retilíneos, além de planos de cavalgamento bem definidos (Figura 4).

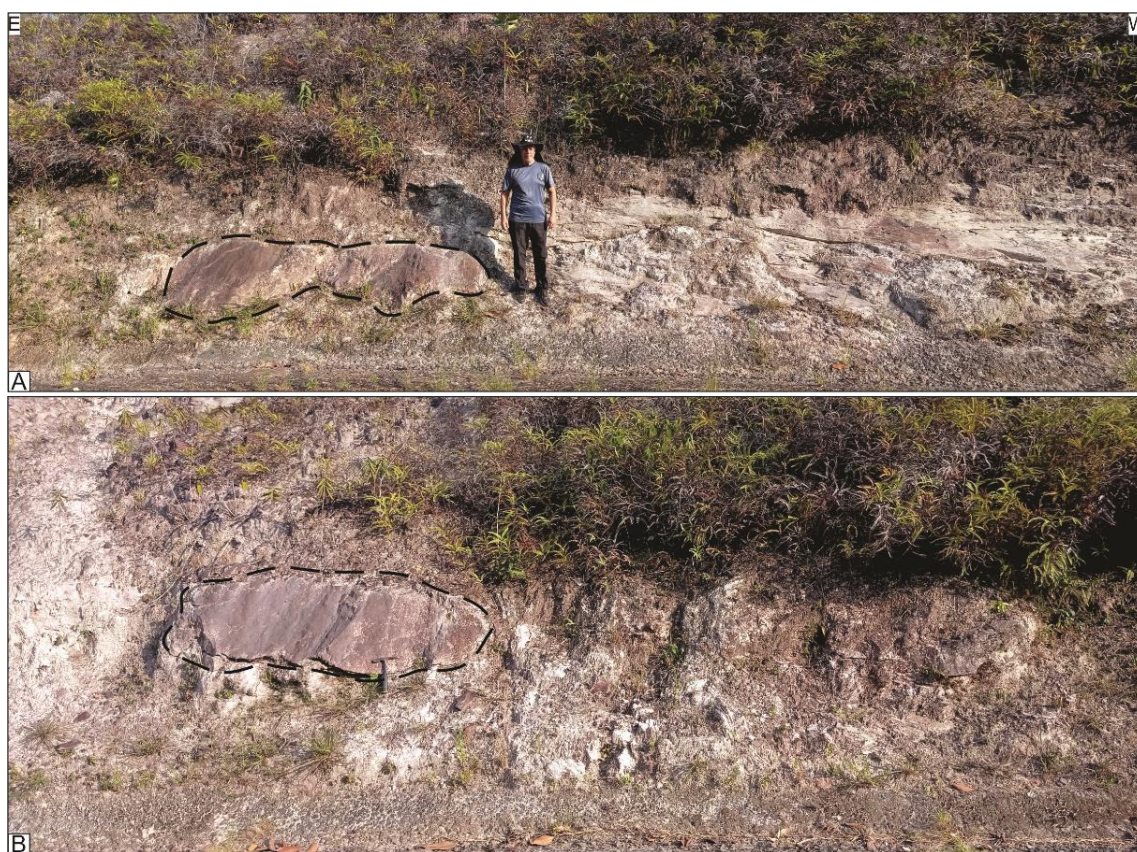


Figura 3. Afloramento da fácies Df (ponto UT-06 do estudo de Soares et al., 2005). A-B) Blocos de arenitos (linha tracejada preta) imerso em matriz siltico-arenosa. Identificação do ponto na Figura 1.

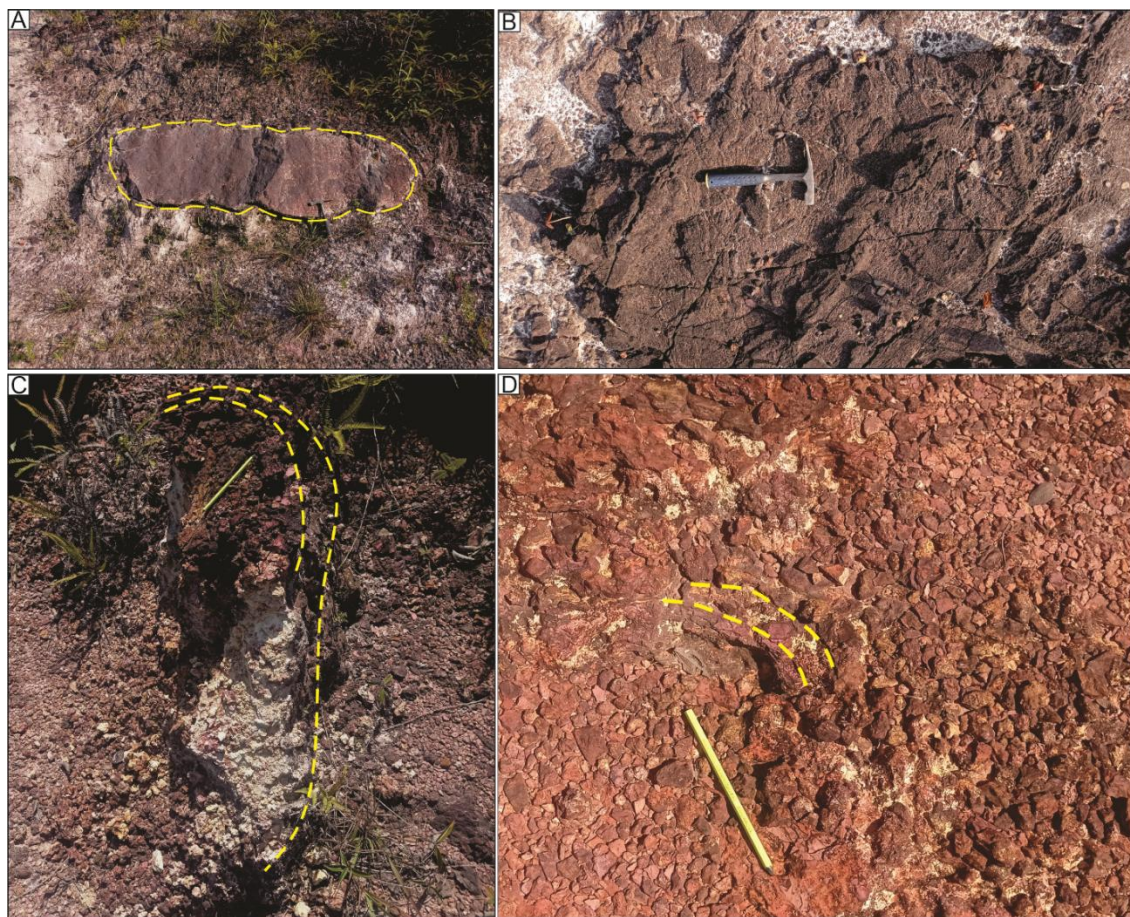


Figura 4. Afloramento da fácies Af. A-B) Planos de foliação marcados por finos níveis silicosos (ponto UT-06). C-D) Detalhes da deformação interna (fraturamento e dobramento incipiente) associados a glaciotectônica (ponto CN-17). Identificação do ponto na Figura 1.

Nas fácies Af e Df, os grãos de quartzo são predominantemente angulosos a subarredondados, com baixa esfericidade (Figura 6 A). Na superfície desses grãos, foram identificadas oito microtexturas distintas, predominando as de origem mecânica (75%), e em menor proporção as de origem química (25%). As mecânicas incluem arco graduado, estrias paralelas, *v-shapes*, planos de fratura, superfície de clivagem, sulcos retos e curvados. Arco graduado ocorre de maneira comum a esparsa, e se caracteriza por apresentar arcos concêntricos e semicirculares (Figura 6 B-C-D e 7 A-C). As estrias paralelas aparecem esparsamente como marcas lineares na superfície dos grãos, associadas às superfícies dos arcos graduados (Figura 6 D e 7 B-C-D-G). As *v-shapes* (Figuras 6 H-I e 7 E-F-H-I) são abundantes a ausentes, apresentam formato em “V” com variações de tamanho e estão associadas aos planos de fratura. Esses planos ocorrem de forma esparsa (Figuras 6 G) a abundante (Figuras 7 E-F), por vezes associados as estrias paralelas e *v-shapes*. As superfícies de clivagem são comuns a esparsas, apresentando padrões de quebra planares que se desenvolvem preferencialmente paralelos aos planos de clivagem (Figura 7 B e H). Os sulcos retos e curvados aparecem esparsamente como rasgos na superfície dos grãos (Figura 6 B-E-F e 7 D) e geralmente ocorrem associados aos planos de fratura.

A microtextura química identificada é a *triangular etch pits* que ocorre abundantemente na amostra UT-06. Essa estrutura exibe um padrão triangular com variações de tamanho e está frequentemente associada a *V-shapes* e aos planos de fratura (Figura 7 I). Além disso, como microtextura de origem química/mecânica foram identificadas as depressões profundas, que se caracterizam por cavidades irregulares que exibem estrias paralelas nas paredes internas (Figura 7 B).

Em geral, foram observadas diferenças quanto a frequência de ocorrência das microtexturas nos ambientes subglacial e proglacial. A maior frequência se destaca no depósito subglacial (UT-06) com abundancia de feições de planos de fratura, superfície de clivagem, sulcos retos e curvados, arco graduado, *V-shaped marks*, depressões profundas, estrias paralelas e *triangular etch pits*. Em contraste, no depósito proglacial (CN-17) ocorre com menor frequência as microtexturas de planos de fratura, superfície de clivagem, sulcos retos e curvados, arco graduado e estrias paralelas (Figura 5).

|                                                                         | Amostras MEV | Planos de fratura | Superfície de clivagem | Sulcos retos e curvados | Arco graduado | V-shaped marks | Depressões profundas | Estrias paralelas | Triangular etch pits |
|-------------------------------------------------------------------------|--------------|-------------------|------------------------|-------------------------|---------------|----------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| UT-06                                                                   | ●            | ▲                 | ●                      | ●                       | ■             | ●              | ●                    | ■                 |                      |
| CN-17                                                                   | ●            | ●                 | ●                      | ▲                       | ×             | ×              | ●                    | ×                 |                      |
| Frequência (%):                                                         |              |                   |                        |                         |               |                |                      |                   |                      |
| ■ Abundante (>75) ▲ Comum (50-75) ● Esparsos (5-50) × Não observado (0) |              |                   |                        |                         |               |                |                      |                   |                      |

Figura 5. Frequência de ocorrência de microtexturas identificadas na superfície dos grãos de quartzo.

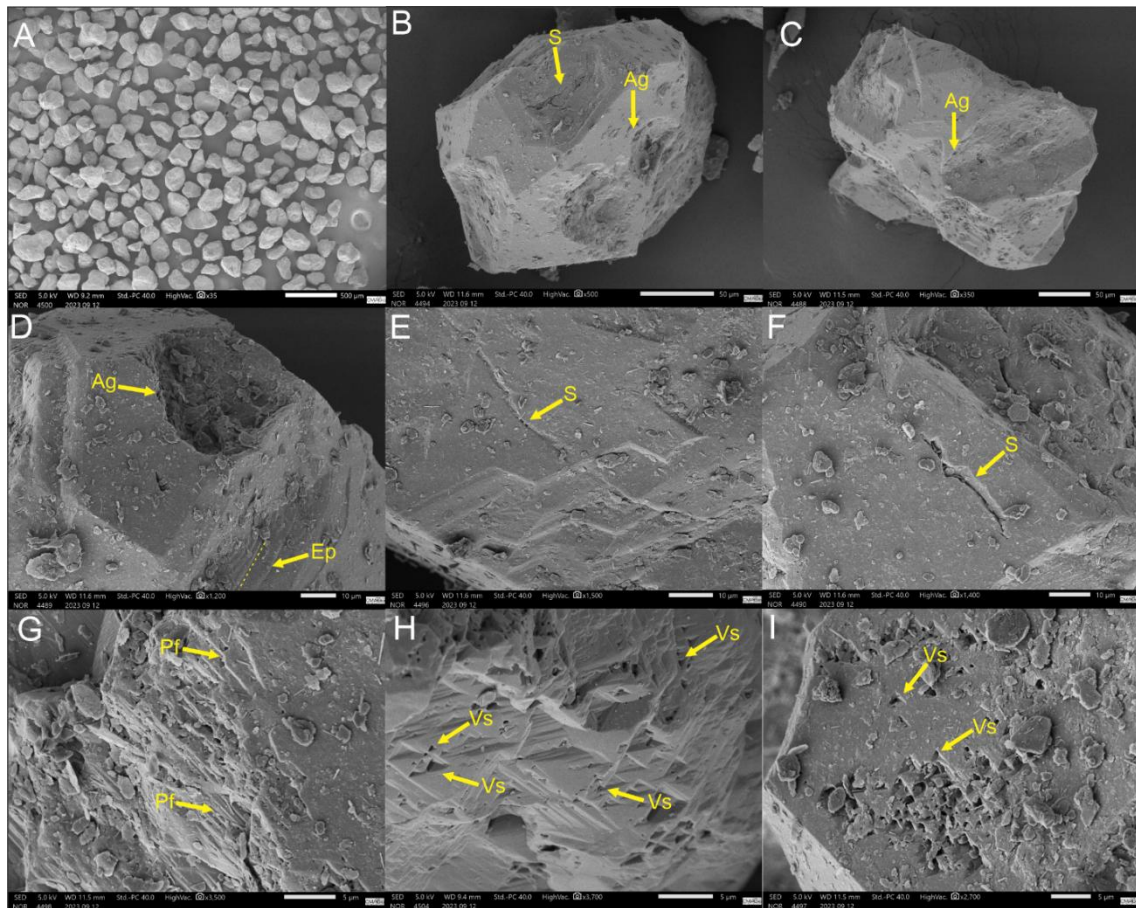


Figura 6. A) Fotomicrografia de grãos de quartzo angulosos a arredondados do ponto CN-17. B) Grão com microtextura do tipo arco graduado (Ag) e sulco curvado (S). C) Grãos de quartzo com microtextura do tipo arco graduado. D) Detalhe de arco graduado e estria paralela (Ep). E-F) Detalhes de sulco reto-curvado (S). G) Planos de fraturas paralelos (Pf) na superfície do grão. H-I) *Triangular etch pits* (Te) e *V-shapes* (Vs).

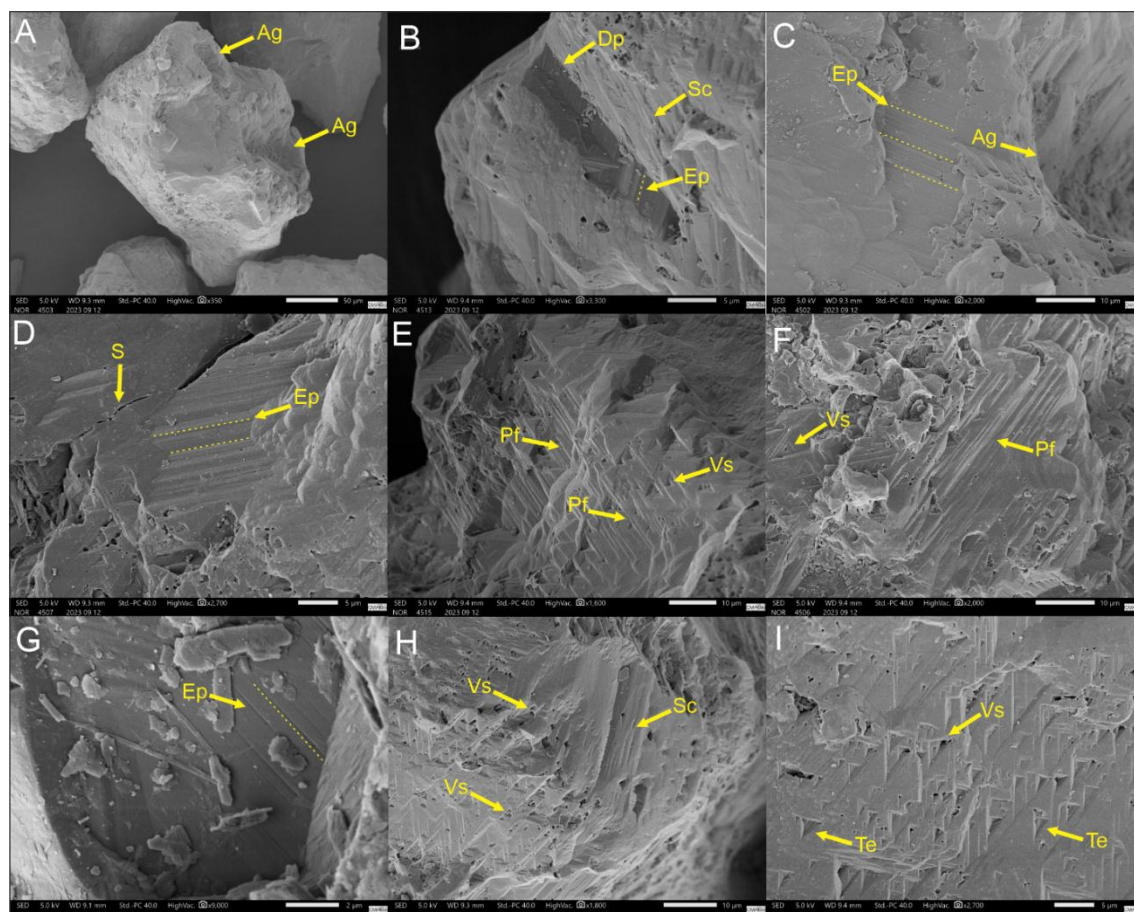


Figura 7. Fotomicrografias de grãos de quartzo angulosos do ponto UT-06. A) Grão com microtextura de arco graduado (Ag). B) Detalhe de depressão profunda (Dp) com estrias paralelas (Ep) e superfície de clivagem (Sc). C) Detalhe do arco graduado com estrias paralelas. D) Estrias na superfície do grão e sulco curvado (S). E-F) Planos de fraturas (Pf) na superfície do grão relacionadas a *V-shape* (Vs). G) Detalhe de estrias paralelas retilíneas. H) *V-shapes* e superfície de clivagem. I) *V-shapes* e *triangular etch pits* (Te) em planos de fratura.

Diversos estudos (Tucker, 1991; Mahaney & Kalm, 2000; Mahaney, 2002; Voz et al., 2014) enfatizam que as microtexturas superficiais são indicativas de ambientes geológicos específicos e que servem para identificar as condições sob as quais os grãos foram modificados. Segundo Mahaney (2002), os grãos de depósitos glaciais apresentam maior variedade de microtexturas quando comparados com grãos modificados por outros agentes geológicos, onde a superfície dos grãos de quartzo fornece um legado dos sucessivos ciclos sedimentares. Particularmente, essas microtexturas são evidentes no ambiente glacial em função da movimentação das geleiras e dos processos de colapso, onde o deslizamento produz esforços de cisalhamento basal e altas taxas de deformação (Mahaney, 2002). Nesse ambiente, são comuns as feições de origem mecânica, desenvolvidas pelo impacto e abrasão de grãos oriundos da porção basal da geleira, como contornos angulares, relevos altos, fraturas conchoidais, estrias paralelas, sulcos retos e curvos e depressões profundas (Mahaney, 2002; Strand et al., 2003; Kirshner & Anderson, 2011; Deane, 2010; Immonen, 2013).

Os depósitos estudados exibem um conjunto abundante de microtexturas que são associadas ao ambiente glacial, com destaque principalmente para as estrias paralelas que são diagnósticas do deslocamento de geleiras, além das microtexturas de superfície de clivagem, *V-shapes*, depressões profundas e sulcos (retos e curvos), que podem ocorrer tanto no ambiente glacial quanto no fluvial e marinho, conforme enfatizado em diversos estudos (Mahaney et al.,

1996; Mahaney, 2002; Voz et al., 2014; Keiser et al., 2015). Feições de microtexturas nos depósitos glaciogênicos da Formação Nhamundá foram preliminarmente definidos por Barbosa (2018) (Figura 8 A), que associou as feições de estrias-ranhuras, *v-shapes*, fraturas paralelas e conchoidais, sulcos e calhas profundas a deslizamentos basais das geleiras, ocasionados por processos de colapso e esforços cisalhantes (Figura 8 B-C-D). Além disso, estudos petrográficos definiram nas fácies Af e Df intenso fraturamento dos grãos de quartzo e orientação dos minerais micáceos, característicos das deformações glacioteclônicas (Soares et al., 2005; Barbosa, 2018) (Figura 8 E).

Quanto as microtexturas menos abundantes, como arco graduado, planos de fraturas e *triangular etch pits* encontradas em alguns grãos, as mesmas podem ser associadas ao ambiente marinho (Voz et al., 2014; Kalińska et al., 2022). Provavelmente, as feições de arco graduado e planos de fraturas podem ser reliquias dos depósitos de *shoreface/foreshore* da Formação Nhamundá, retrabalhadas por processos glaciais no Siluriano. Particularmente, a microtextura *triangular etch pits* está associada à dissolução intraestratal, durante a diagênese, pela migração de fluidos intersticiais alcalinos (Mahaney, 2002; Vos et al., 2014).

A interpretação paleoambiental definida para os diamictitos da Formação Nhamundá sugere transporte curto e rápida deposição, característicos de ambientes glaciais (Soares et al. 2005; Cuervo et al. 2018). Essas características se refletem nas microtexturas em função da predominância de grãos angulosos a subarredondados, definidos nas fácies Af e Df. Em geral, as microtexturas identificadas na fácies Df podem ser associadas a zona subglacial, onde a deposição ocorre durante o avanço e recuo do gelo (Assine & Vesely, 2008), enquanto as microtexturas da fácies Af são relacionadas a zona proglacial, onde os sedimentos transportados pela geleira são retrabalhados por correntes de água de degelo e fluxos gravitacionais (Powell & Molnia, 1989).

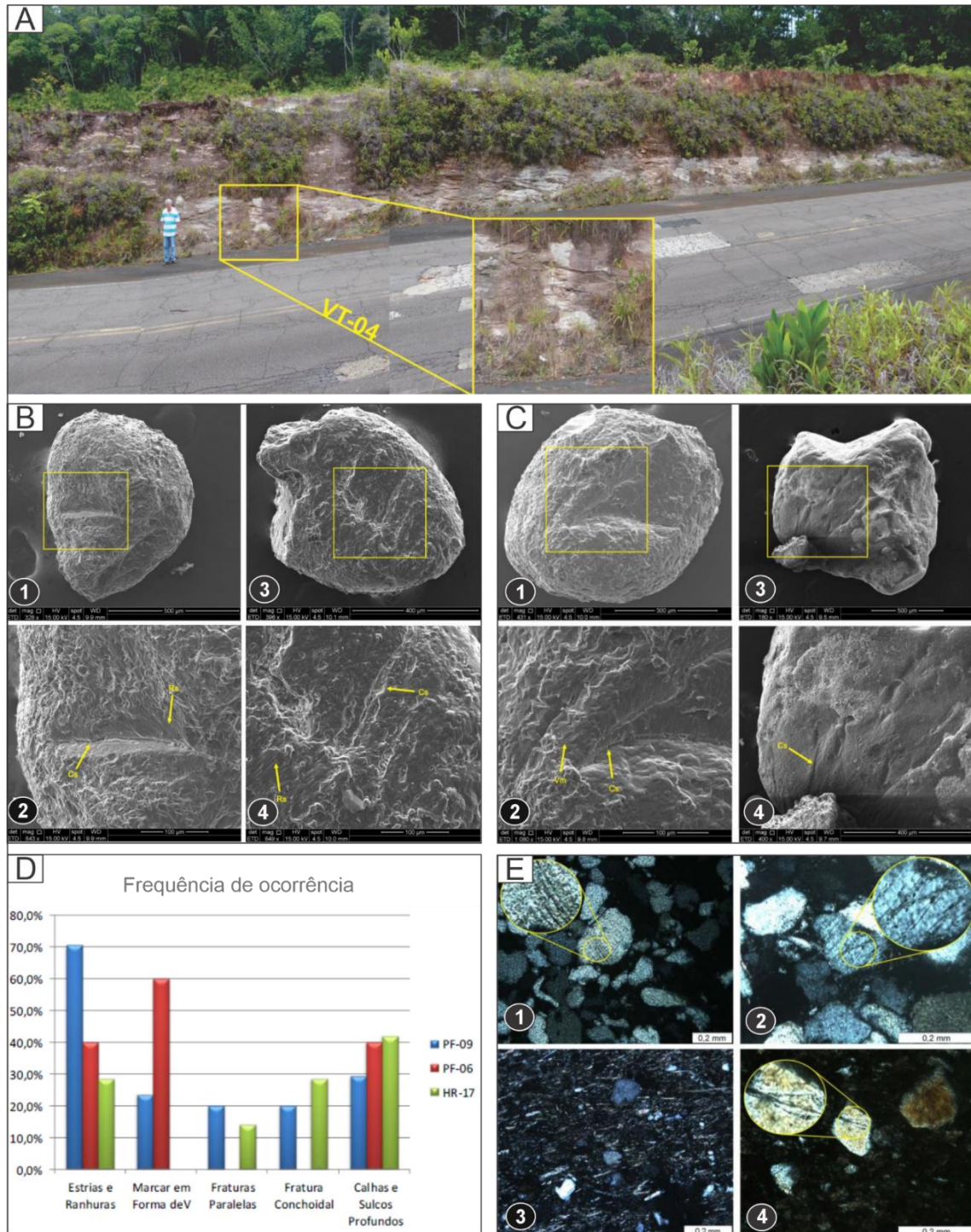


Figura 8. Microtexturas superficiais dos depósitos glaciogênicos da Formação Nhamundá definidas no estudo de Barbosa (2018). Seção panorâmica dos diamictitos deformados (A) onde foram definidas as microtexturas de calha profunda ou sulco alongado (Cs) com estrias (Rs) (B 1 e 2), além de feições de ranhuras (Rs) e múltiplas calhas (Cs) paralelas (B 3 e 4). Foram também definidas microtexturas de calhas profundas e marcas em forma de V (Vm) (C 1 e 2), além de feições de múltiplas calhas ou sulcos paralelos a subparalelos (C 3 e 4). Frequência de ocorrência das principais microtexturas encontradas (D). Dados petrográficos mostrando grãos de quartzo fraturados (E 1, 2 e 4) e detalhe da matriz do diamictito com orientação de plaquetas de mica e grãos de quartzo (E 3).

#### 4. CONCLUSÃO

O estudo de microtexturas superficiais em grãos de quartzo se mostrou uma ferramenta promissora para a interpretação de processos glaciectônicos da Formação Nhamundá na Bacia do Amazonas. Nos depósitos foram identificadas microtexturas diversas, como estrias paralelas, *v-shapes*, superfície de clivagem, depressões profundas e sulcos retos e curvados que fornecem evidências diretas da ação mecânica do gelo durante o evento glacial siluriano da bacia. Além disso, a presença de microtexturas como arco graduado, *triangular etch pits* e planos de fratura são indicativas do retrabalhamento pelo gelo dos depósitos de *foreshore/shoreface* da Formação Nhamundá. O predomínio de grãos angulosos nos diamictitos reforça a interpretação do transporte curto e rápida deposição, característicos do paleoambiente glacial. Nesse contexto, as microtexturas encontradas nos depósitos glaciais silurianos da Formação Nhamundá puderam ser identificadas em diversos depósitos glaciais modernos de diferentes regiões do mundo, como Estados Unidos, Índia, Islândia e Tunísia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem: (i) à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) por meio do programa POSGRAD 2024, coordenado pelo Prof. Dr. Carlos Alejandro Salazar; (ii) à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do programa de redução de assimetrias nos programas de pós-graduação (PRAPG-edital 14/2023 CAPES-Processo 88881.909702/2023-01), coordenado pelo Prof. Dr. Carlos Alejandro Salazar; (iii) ao financiamento fornecido pelo Projeto 001/2020–FAPESP-FAPEAM “Contribuição ao Conhecimento Geológico, Arqueológico e Biológico do Arquipélago de Mariuá, Médio Rio Negro-AM” e pelo Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGGEO/UFAM); e (iv) aos revisores pelas contribuições ao texto final.

## REFERÊNCIAS

- Assine, M.L., Vesely, F.F. (2008). Ambientes Glaciais. In Silva A.J.C.L.P., Aragão M.A.N.F., Magalhães A.J.C. (org.). *Ambientes de Sedimentação Siliciclástica do Brasil*. Beca, p. 24-51.
- Barbosa, R. O. (2018). Análise microtextural de depósitos glaciogênicos paleozóicos aflorantes da região de Presidente Figueiredo, Bacia do Amazonas (Trabalho de iniciação científica). Universidade Federal do Amazonas.
- Caputo, M. V., & Crowell, J. C. (1985). Migration of glacial centers across Gondwana during Paleozoic Era. *Geological Society of America Bulletin*, 96(8), 1020–1036. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96<1020:MOGCAG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96<1020:MOGCAG>2.0.CO;2)
- Caputo, M.V., & Sad, R.E. (1974). *Geologia do Baixo Rio Negro e trecho da BR-174*. (Relatório Interno 675-A). PETROBRAS.
- Carozzi, A. V., Pamplona, H. R. P., Castro, J. C. de., & Contreiras, C. J. A. (1973). Ambientes deposicionais e evolução tecto-sedimentar da seção clástica paleozoica da bacia do Médio Amazonas. In *27º Congresso Brasileiro de Geologia* (pp. 279-314). Aracaju.
- Costa, P., Andrade, C., & Freitas, M. D. C. (2014). Análise microtextural: princípios, procedimentos e caracterização micromorfológica de grãos de quartzo. *Proveniência de materiais geológicos: abordagens sobre o Quaternário de Portugal*, 19-36.
- Cuervo, H. D. R., Soares, E. A. A., Caputo, M. V., & Dino, R. (2018). Sedimentology and stratigraphy of new outcrops of Silurian glaciomarine strata in the Presidente Figueiredo region,

northwestern margin of the Amazonas Basin. *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 43–56. <https://doi.org/10.1016/J.JSAMES.2018.04.023>

Damiani, D., Giorgetti, G., & Turbanti, I.M. (2006). Clay mineral fluctuations and surface textural analysis of quartz grains in Pliocene–Quaternary marine sediments from Wilkes Land continental rise (East-Antarctica): paleoenvironmental significance. *Marine Geology*, 226(3-4), 281–295. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.11.002>

Deane, S. M. (2010). *Quartz grain microtextures and sediment provenance: using scanning electron microscopy to characterize tropical highland sediments from Costa Rica and the Dominican Republic* (Master's thesis). University of Tennessee. [Trace: Tennessee Research and Creative Exchange]. [https://trace.tennessee.edu/utk\\_gradthes/618](https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/618)

Grahn, Y. (1992). Revision of silurian and devonian strata of Brazil. *Palynology*, 16(1), 35–61. <https://doi.org/10.1080/01916122.1992.9989406>

Grahn, Y., & Paris, F. (1992). Age and correlation of the Trombetas Group, Amazonas Basin, Brazil. *Revue de Micropaléontologie*, 35(3), 197-209.

Hart, J. K. (2006). An investigation of subglacial processes at the microscale from Briksdalsbreen, Norway. *Sedimentology*, 53(1), 125-146. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-3091.2005.00758.x>.

Immonen, N. (2013). Surface microtextures of ice-rafted quartz grains revealing glacial ice in the Cenozoic Arctic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 374, 293-302. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.02.003>

Kalińska, E., Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M., Rečs, A., & Ješkins, J. (2022). Does glacial environment produce glacial mineral grains? Pro-and supra-glacial Icelandic sediments in microtextural study. *Quaternary International*, 617, 101-111. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.03.029>

Keiser, L., Soreghan, G. S., & Kowalewski, M. (2015). Use of Quartz Microtextural Analysis To Assess Possible Proglacial Deposition For the Pennsylvanian–Permian Cutler Formation (Colorado, U.S.A.). *Journal of Sedimentary Research*, 85(11), 1310–1322. <https://doi.org/10.2110/JSR.2015.81>

Kirshner, A. E., Anderson, J. B., & Wellner, J. S. (2011). Cenozoic glacial history of the northern Antarctic Peninsula: a micromorphological investigation of quartz sand grains. *Tectonic, climatic, and cryospheric evolution of the Antarctic Peninsula*, 63, 153-165. <https://doi.org/10.1029/2010SP001046>

Mahaney, W. C. (1995). Glacial crushing, weathering and diagenetic histories of quartz grains inferred from scanning electron microscopy. *Glacial Environments–Processes, Sediments and Landforms: London, Pergamon*, 487-506.

Mahaney, W. C. (2002). *Atlas of Sand Grain Surface Textures and Applications*. New York, Oxford University Press, 237p.

Mahaney, W. C., & Kalm, V. (2000). Comparative scanning electron microscopy study of oriented till blocks, glacial grains and Devonian sands in Estonia and Latvia. *Boreas*, 29(1), 35-51. <https://doi.org/10.1111/j.1502-3885.2000.tb01199.x>

- Mahaney, W. C., Claridge, G., & Campbell, I. (1996). Microtextures on quartz grains in tills from Antarctica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 121(1-2), 89-103. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(95\)00069-0](https://doi.org/10.1016/0031-0182(95)00069-0)
- Mathur, A. K., Mishra, V. P., & Singh, J. (2009). Study of quartz grain surface texture by electron microscopy—a tool in evaluating palaeoglacial sediments in Uttarakhand. *Current science*, 1377-1382. <http://www.jstor.org/stable/24105377>
- Melo, J. H. G. (1997). Resultados de solicitação de análise Palinológica em amostras de Superfície da Região da Represa Balbina (AM), Bacia do Amazonas. *Comunicação Técnica SEBIPE* 10, 97.
- Melo, J. H. G., & Steemans, P. (1997). *Resultados de investigações palinoestratigráficas em Amostras de superfície de região de Presidente Figueiredo (AM), Bacia do Amazonas*. Rio de Janeiro, Belgium: Petrobras/CENPES. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/172009>
- Nogueira, A. C. R., Truckenbrodt, W., & Soares, E. A. A. (1999). O icnogênero *Arthropycus* de depósitos sublitorâneos da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior) da Bacia do Amazonas, região de Presidente Figueiredo. *Brazilian Journal of Geology*, 29(2), 135-140. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.199929135140>
- Powell, R. D., & Molnia, B. F. (1989). Glacimarine sedimentary processes, facies and morphology of the south-southeast Alaska shelf and fjords. *Marine Geology*, 85(2-4), 359-390. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90160-6](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90160-6)
- Reyment, R. A. (1968). *The Use of Geostatistics: Scientific Method in Analysis of Sediments*. (J. C. Griffiths). McGraw-Hill. *Science*, 159(3812), 295-295. <https://doi.org/10.1126/science.159.3812.295.a>
- Riker, S. R. L., Lima, F. J. D. C., Motta, M. B., & Silva, D. P. B. (2016). Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus, Estado do Amazonas, escala de integração 1: 500.000. *Manaus: CPRM*.
- Rodrigues, R., Vasconcelos, D. N. N., & Caputo, M. V. (1971). Sedimentologia das formações pré-pensilvanianas da Bacia do Amazonas. *Belém, Brasil, Petrobrás/Renor. Relatório Interno*.
- Soares, E. A. A. (1998). *Fácies litorâneas e feições glaciais da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior) na região de Presidente Figueiredo—AM, Bacia do Amazonas* (Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, 98p).
- Soares, E. A. A., Truckenbrodt, W., & Nogueira, A. C. R. (2005). fácies litorâneas e subglaciais da Formação Nhamundá (Siluriano inferior), região de Presidente Figueiredo, Bacia do Amazonas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 2, 105-132.
- Souza, V., & Nogueira, A. C. R. (2009). Seção geológica Manaus—Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo. *Revista Brasileira de Geociências*, 39(1), 17.
- Strand, K., Passchier, S., & Näsi, J. (2003). Implications of quartz grain microtextures for onset Eocene/Oligocene glaciation in Prydz Bay, ODP Site 1166, Antarctica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 198(1-2), 101-111. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00396-1](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00396-1)

- Suguio, K. (1973). *Introdução à Sedimentologia*. São Paulo, Edgard Blucher. 317 p.
- Tucker, M. E. (1991). *Sedimentary petrology. An introduction to the origin of sedimentary rocks*, (2<sup>a</sup> ed.). Londres, Blackwell Scientific Publications. 260p.
- Van Hoesen, J. G., & Orndorff, R. L. (2004). A comparative SEM study on the micromorphology of glacial and nonglacial clasts with varying age and lithology. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41(9), 1123-1139. <https://doi.org/10.1139/e04-056>
- Vos, K., Vandenberghe, N., & Elsen, J. (2014). Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation. *Earth-Science Reviews*, 128, 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.013>
- Whalley, W. B., & Krinsley, D. H. (1974). A scanning electron microscope study of surface textures of quartz grains from glacial environments. *Sedimentology*, 21(1), 87-105. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1974.tb01783.x>
- Whalley, W. B., & Langway Jr, C. C. (1980). A scanning electron microscope examination of subglacial quartz grains from Camp Century core, Greenland—a preliminary study. *Journal of Glaciology*, 25(91), 125-132. <https://doi.org/10.3189/S0022143000010340>

### 6.3 Palinologia

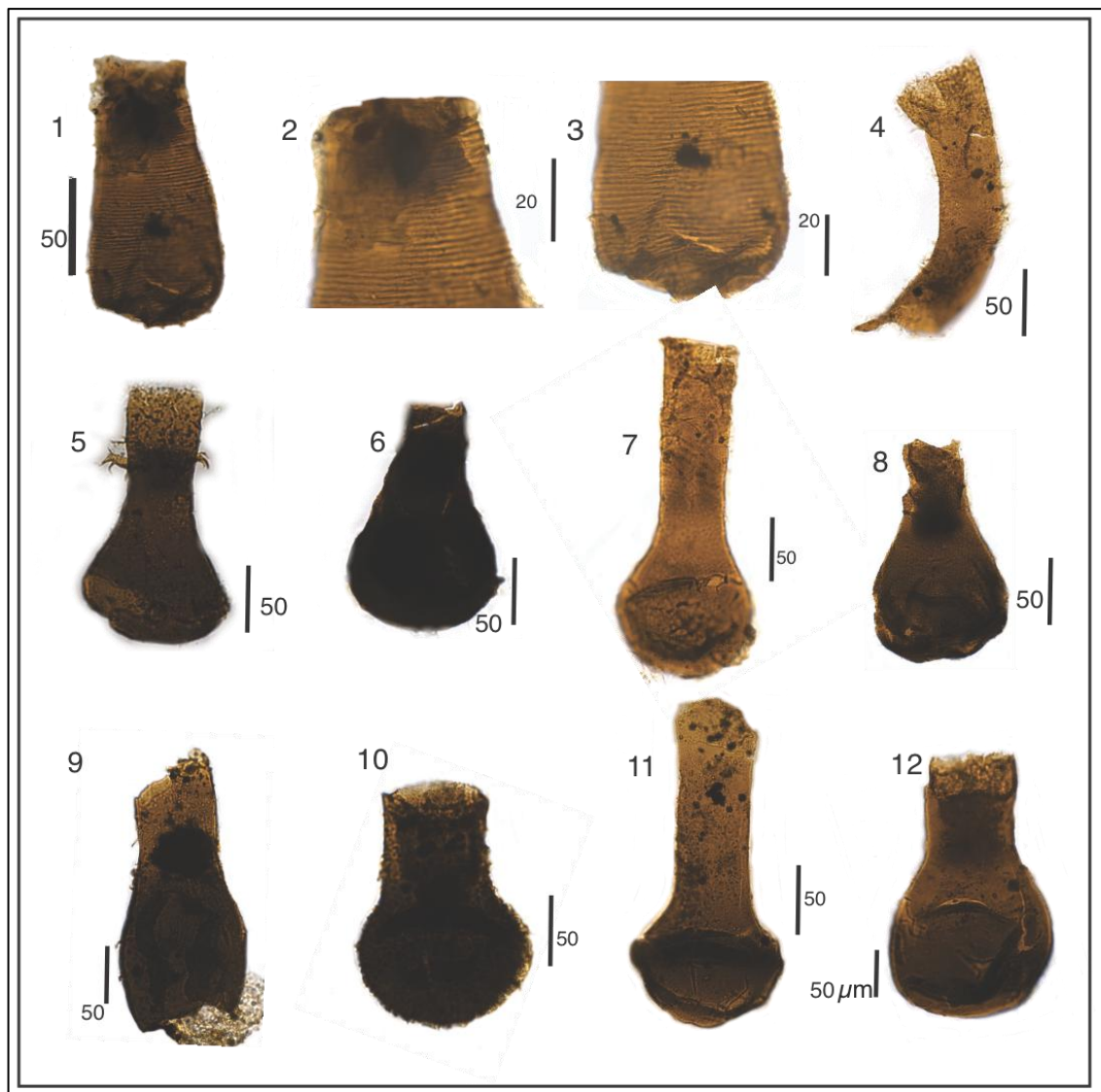
Foram analisadas 23 amostras palinológicas de trechos dos rios Uatumã e Urubu (siglas exibidas na Tabela 4), as quais apresentaram resultados satisfatórios para quitinozoários, com diferentes concentrações e graus de preservação. Os dados em geral (parcialmente discutidos no item 6.2.1) subsidiaram principalmente a delimitação das faixas sedimentares marinhas e glaciais posicionadas no Siluriano Inferior e no intervalo Siluriano Superior-Devoniano Inferior (formações Nhamundá e Manacapuru). Parte das associações palinológicas identificadas também subsidiaram o posicionamento estratigráfico da Formação Ererê.

Para este levantamento foram lidos exclusivamente os quitinozoários recuperados que aparecem majoritariamente rasgados ou corroídos, mas que também ocorre a recuperação de organismos bem preservados. Para esse estudo foram analisados 127 espécimes de quitinozoários sendo reconhecidos ao longo dos níveis estratigráficos examinados. A pesquisa dos quitinozoários permitiu identificar 10 gêneros e 23 espécies: *Ancyrochitina gutnica*, *Ancyrochitina oliveirae*, *Ancyrochitina* sp. D, *Angochitina echinata*, *Angochitina filosa*, *Angochitina mourai*, *Angochitina strigosa*, *Angochitina* sp. 1, *Angochitina* sp. 2, *Cingulachitina ervensis*, *Cingulachitina serrata*, *Cingulachitina* sp., *Conochitina* cf. *pachycephala*, *Conochitina tuba*, *Desmochitina cortesiana*, *Euconochitina gordonensis*, *Euconochitina* sp., *Fungochitina* sp. A, *Linochitina* ex.gr. *erratica*, *Ramochitina bjornsundquisti*, *Ramochitina autasmirimensis* e *Rhabdochitina conocephala* (Figuras 18 e 19).

**Tabela 4** – Relação de ocorrência de espécimes identificadas nas amostras do rio Uatumã e Urubu. Descrição em cooperação com a Profa. Dra. Rosemary Silveira da UFAM e Profs. Drs. Rodolfo Dino e Luiza Antonioli da UERJ.

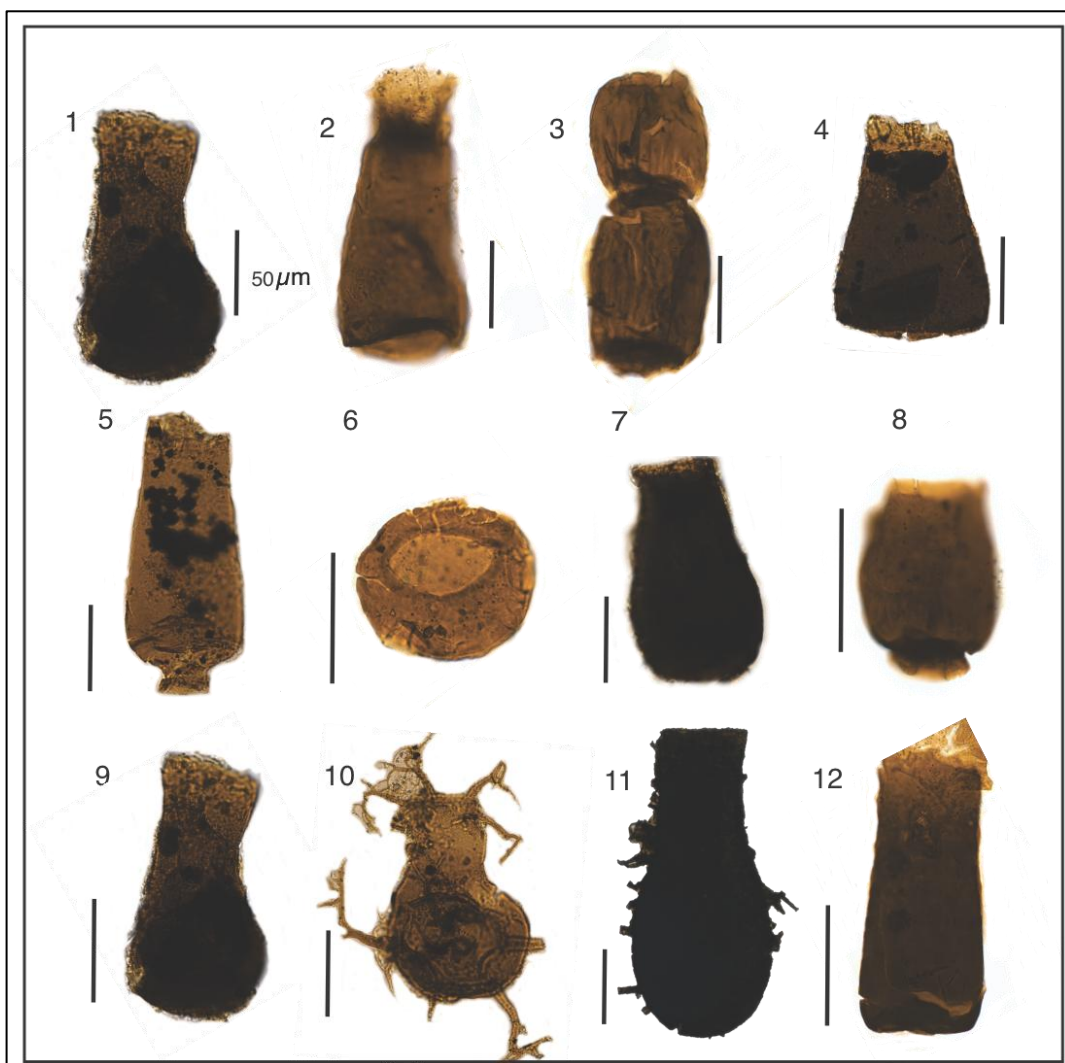
| Táxons                                     | Amostras |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------------------|----------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                            | DEM      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | ORQ |    |    |    |    | UT |    | HR |
|                                            | 1        | 2 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 20 | 22 | 24 | 26 | 30 | 1A | 2C  | 3A | 4B | 5A | 2B | 2C | 56 |    |
| <i>Ancyrochitina gutnica</i>               |          |   |   |   |   | X |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Ancyrochitina</i> cf. <i>oliveirae</i>  | X        |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Ancyrochitina</i> cf. sp. D             |          |   |   |   |   | X |   |   |    |    |    |    |    | X  |    | X   |    |    |    |    |    | X  |    |
| <i>Angochitina echinata</i>                | X        |   | X | X | X | X | X | X | X  | X  |    |    |    | X  | X  |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Angochitina filosa</i>                  |          |   |   |   | X |   |   | X |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Angochitina mourai</i>                  |          |   |   | X | X |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Angochitina strigosa</i>                |          |   |   |   | X |   |   | X |    |    |    |    |    | X  | X  |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Angochitina</i> sp. 1                   | X        | X | X | X | X | X | X | X |    |    |    | X  | X  | X  | X  | X   | X  | X  | X  | X  |    | X  |    |
| <i>Angochitina</i> sp.2                    |          |   |   |   |   |   | X |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Angochitina</i> sp. 3                   |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    | X  |    |    |    |    |    |
| <i>Cingulachitina ervensis</i>             |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | X  |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Cingulachitina serrata</i>              |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | X  |    | X   |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Cingulachitina</i> sp.                  |          |   |   | X | X |   | X |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Conochitina</i> cf. <i>pachycephala</i> |          |   | X | X |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     | X  |    |    |    |    |    |    |
| <i>Conochitina tuba</i>                    |          |   | X |   |   |   |   |   | X  |    |    |    |    |    |    |     | X  |    |    |    |    |    |    |
| <i>Conochitina</i> sp.1                    |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | X  | X   |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Desmochitina cortesiana</i>             |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | X  |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Euconochitina gordonensis</i>           |          |   |   |   |   |   |   |   |    | X  |    |    |    | X  |    |     | X  | X  |    |    |    | X  |    |
| <i>Euconochitina</i> sp. nov               |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | X  |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Fungochitina</i> sp. A                  |          |   |   |   |   |   | X |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Linochitina</i> ex. gr. <i>erratica</i> |          |   |   | X |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Ramochitina bjornsundquisti</i>         |          |   |   |   |   |   | X | X | X  | X  | X  | X  |    | X  | X  |     | X  |    |    |    |    |    |    |
| <i>Rhabdochitina conocephala</i>           |          | X |   |   |   |   | X |   |    |    |    |    |    | X  |    |     |    |    |    |    |    |    |    |
| <i>Tanuchitina elenitae</i>                |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    | X  |    |    |    |
| <i>RAMochitina autasmerimensis</i>         |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    | X  |    |    |
| <i>Ramochitina</i> cf. <i>illiziasis</i>   |          |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | X  |     |    |    |    |    |    |    |    |

**Figura 18** – Fotomicrografia de quitinozoários identificados neste estudo. **1.** *Linochitina* ex. gr. *erratica*, 05-EF:G42-4; **2.** *Linochitina* ex. gr. *erratica*, apertural view, 05-EF:G42-4, 100X; **3.** *Linochitina* sp. A, 05-EF: G42-4; **4.** *Conochitina packycephala*, 05-EF:034-3; **5.** *Ancyrochitina gutnica*, 07-EF:R60; **6.** *Ancyrochitina* cf. *oliveirae*, 01-EF:W34; **7.** *Ancyrochitina* sp. D, 30-EF:S36; **8.** *Angochitina echinata*, 09-EF:O35-4; **9.** *Angochitina filosa*, 06-EF:F52-2; **10.** *Angochitina mourai*, 06-EF:H49-2; **11.** *Angochitina strigosa*, 09-EF:L43-4; **12.** *Angochitina* sp. 1, 08-EF:X50.



**Fonte:** Autoria própria.

**Figura 19** – Fotomicrografia de quitinozoários identificados neste estudo. 1. *Angochitina* sp. 2, 08-EF:W44; 2. *Cingulachitina ervensis*, 30-EF:F43-2; 3. *Cingulachitina serrata*, 30-EF: P19-3; 4. *Cingulachitina* sp., 08-EF:E57-1; 5. *Conochitina tuba*, 09-EF:W55-2; 6. *Desmochitina cartesiana*, 30-EF:Q33; 7. *Euconochitina gordonensis*, 20-EF:L50-4; 8. *Euconochitina* sp. nov, 30-EF:F44; 9. *Fungochitina* sp. A, 08-EF:X41-2; 10. *Ramochitina bjornsundquisti*, 09-EF:D50-3; 11. *Ramochitina autasmirimense*; 12. *Rhabdochitina conocephala*, 30-EF:L28.



**Fonte:** Autoria própria.

A análise bioestratigráfica foi subsidiada pelo estudo de Grahn e Melo (2003, 2004), Grahn (2005), Azevedo-Soares & Grahn (2005) e Azevedo-Soares (2009), e de maneira geral, apresenta uma correspondência parcial com os dados apresentados por esses autores.

Considerando os estudos de Grahn & Melo (2003, 2004) e Grahn (2005), foram reconhecidas 3 assembleias de quitinozoários nas exposições investigadas: 1) A (Ludlow superior), 2) B (Pridoli inferior) e 3) C (Lochkoviano inferior), que exibem distribuições de associações de quitinozoários característicos da Formação Manacapuru. Enquanto para Azevedo-Soares e Grahn (2005) e Azevedo-Soares (2009), tem-se 7 assembleias de

quitinozoários, e dessas 6 (seis) se relacionam ao estudo de Grahn e Melo (2003), com algumas peculiaridades, são elas: I e II (Llandoveryano), III (Wenlockiano), IV (Lodlowiano), V (Pridoli), VI (Lochkoviano inferior), conforme ilustrado na Figura 20. Além dessas, segue as zonas de intervalo *Alpenachitina eisenacki* e *Ramochitina stiphrospinata*, que não foram individualizados pela ausência das espécies relacionadas, mas que podem ser interpretadas como uma delas pela presença de *Ramochitina autasmerimensis*.

**Figura 20** – Diagrama mostrando as distribuições de quitinozoários na seção de afloramento investigada (região de Presidente Figueiredo).

| SILURIANO                                   |                  | DEVONIANO   |  |                                |                                   | CRONO                               | Espécies encontradas nesse trabalho |
|---------------------------------------------|------------------|-------------|--|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Ludlow Sup.                                 | Pridoli Inferior | Lochkoviano |  | Eifeliano                      | Givetiano                         |                                     |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Linochitina ex. gr. erratica</i> |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Angochitina echinata</i>         |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Angochitina mourai</i>           |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Angochitina strigosa</i>         |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Cingulochitina serrata</i>       |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Cingulochitina ervensis</i>      |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Conochitina packycephala</i>     |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Conochitina tuba</i>             |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Desmochitina corsiana</i>        |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Euconochitina gordoensis</i>     |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Fungochitina sp. A</i>           |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Ramochitina bjornsonduquisti</i> |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Rhabdochitina conopephala</i>    |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Ancyrochitina gutnica</i>        |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Ancyrochitina sp. D</i>          |                                     |
|                                             |                  |             |  |                                |                                   | <i>Ramochitina autasmerimensis</i>  |                                     |
| A / IV                                      | B / V            | C / VI      |  | <i>Alpenachitina eisenacki</i> | <i>Ramochitina stiphrospinata</i> | Biozonas                            |                                     |
| Grahn & Melo (2003) / Azevedo-Soares (2009) |                  |             |  | Grahn & Melo (2004)            |                                   | Autores                             |                                     |
| Pitinga                                     | Manacapuru       |             |  | Ererê                          |                                   | Formações                           |                                     |

**Fonte:** Grahn e Melo (2003), Grahn e Melo (2004) e Azevedo-Soares (2009).

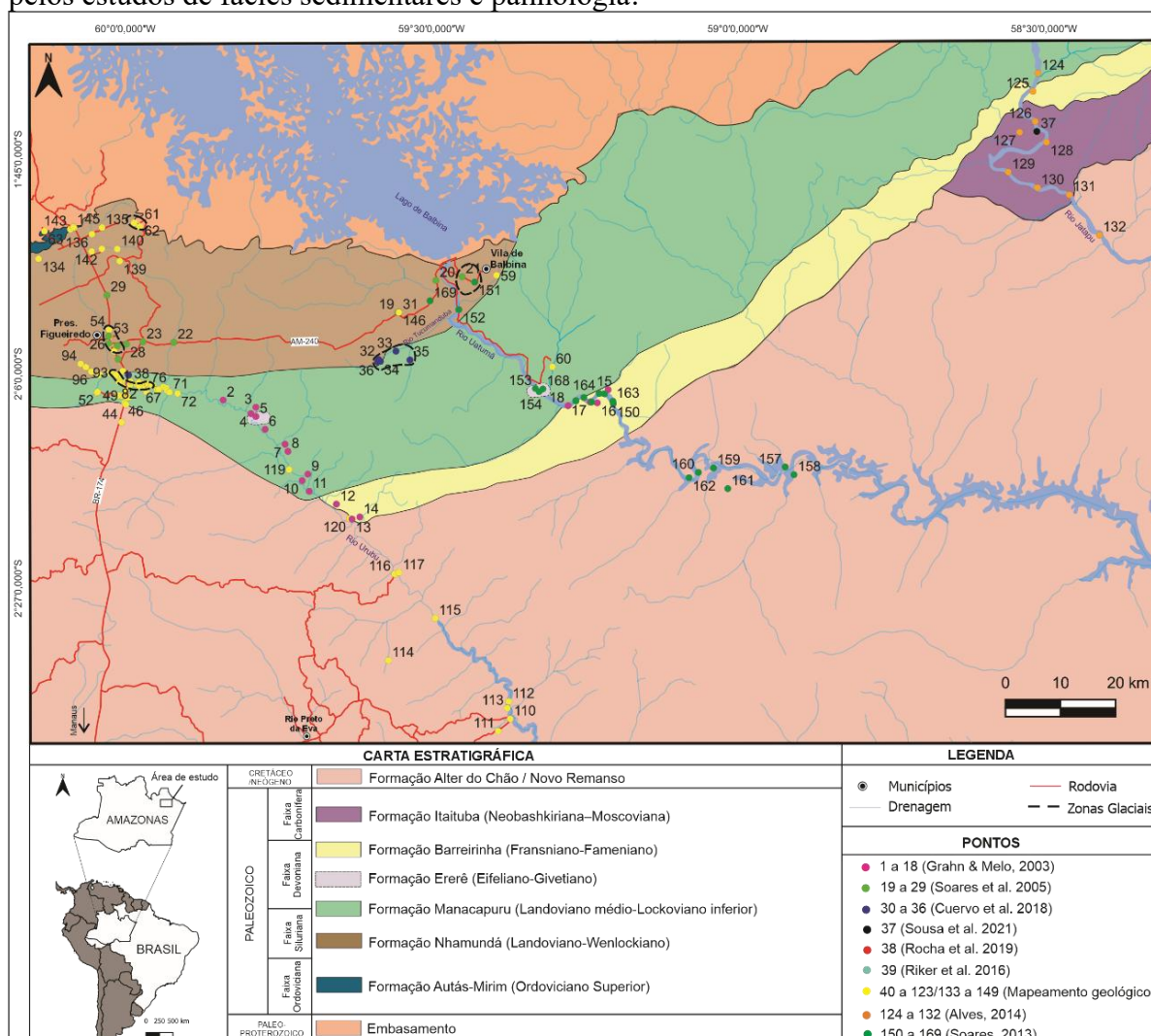
#### 6.4 Unidades litoestratigráficas paleozoicas da borda norte da bacia

A integração dos dados de fácies sedimentares e palinologia deste estudo e trabalhos geológicos regionais, possibilitou a elaboração do mapa geológico de um trecho da borda norte da Bacia do Amazonas, na área dos rios Urubu, Uatumã e Jatapu. Nesta região, aflora uma faixa contínua de direção geral E-W, que contém sequências deposicionais proterozoicas-paleozoicas, cuja nomenclaturas seguem a contextualização litoestratigráfica definida por Cunha *et al.* (2007). Ao longo de sua extensão, a faixa é delimitada a norte e sul, pelas rochas do embasamento cristalino e da cobertura sedimentar cretáceo-neógena, respectivamente.

Foram individualizados 06 subfaixas paleozoicas, contínuas e descontínuas, com dezenas de quilômetros de extensão, definidas pelos grupos Trombetas (formações Autás Mirim, Nhamundá e Manacapuru), Urupadi (Formação Ererê), Curuá (Formação Barreirinha) e

Tapajós (Formação Itaituba) (Figura 21 e Anexo A). Dentre estas, destaca-se pela maior distribuição em área e posicionamento geográfico de sul para norte, 04 subfaixas principais, representadas pelas formações Nhamundá, Manacapuru, Barreirinha e Itaituba. Localmente, depósitos residuais da Formação Ererê recobrem depósitos da Formação Manacapuru. Depósitos quaternários ocorrem ao longo da rede de drenagem regional (Souza; Nogueira, 2009; Riker *et al.*, 2016), não sendo individualizados no mapa em função da escala proposta (verificar item 4.2).

**Figura 21** – Mapa geológico da região dos rios Urubu, Uatumã e Jatapu, com destaque para as faixas sedimentares paleozoicas, de direção geral E-W, com limites estratigráficos estabelecidos pelos estudos de fácies sedimentares e palinologia.



**Fonte:** Grahm e Melo (2003), Soares *et al.* (2005), Soares (2013), Alves (2014), Riker *et al.* (2016), Cuervo *et al.* (2018) e Rocha *et al.* (2019).

Na porção noroeste, ocorrem os depósitos da Formação Autás Mirim, que compõem uma subfaixa estreita e descontínua, com espessura de 10 km, disposta em cotas de 180 a 240

m. É caracterizada por arenitos e pelitos, sendo posicionada no Cambriano (486-541 Ma) ao Ordoviciano Superior com base em datação U/Pb de zircões detríticos (Riker *et al.*, 2016).

A subfaixa descontínua da Formação Nhamundá ocorre na porção NW da área, com aproximadamente 34 km de extensão transversal aflorante, disposta em cota de 180 a 240 m. Nesta faixa foram estudados depósitos glaciomarinheiros, compostos de diamictitos ( fácies Dpp), arenitos ( fácies Ap e Act) e pelitos ( fácies Pl). Na caracterização desta faixa foram também incluídos afloramentos ao longo das rodovias (BR-174 e AM-240) e rios Urubu, Uatumã e Tucumanduba, com a caracterização de fácies sedimentares marinhas e glaciais identificadas nos estudos de Soares *et al.* (2005) e Cuervo *et al.* (2018). Dado palinológico pontual posicionou os pelitos da Formação Nhamundá no Landoveriano-Wenlockiano (Melo, 1997; Melo; Steemans, 1997). Nesta unidade foram identificados três locais de ocorrência de depósitos glaciais (Figura 21)

A subfaixa contínua da Formação Manacapuru é a mais expressiva da área estudada, com média de 40 km de espessura aflorante e disposta em cota de 60 a 180 m. Esta subfaixa compreende as litofácies de diamictitos ( fácies Dpo), arenitos ( fácies Ap e Apbc), além de pelito com laminação plano-paralela e pelito com *dropstones* ( fácies Pl e Pld). O limite aflorante desta faixa se baseou nas assembleias de quitinozoários de idade Ludloviano, Pridoliano e Lochkoviano identificadas nos pelitos aflorantes nos rios Urubu, Uatumã e Abacate por Grahn e Melo (2003) e Steemans *et al.* (2008). Nos limites da Formação Manacapuru foram identificadas duas ocorrências de fácies glaciais (Dpo e Pld), reconhecidas com base nos quitinozoários posicionados no intervalo Pridoli e Lochkoviano (Figura 20).

Dois registros lenticulares da Formação Ererê ocorrem sobrepostos discordantemente sobre a Formação Manacapuru. Uma ocorrência, com cerca de 8 km de comprimento e disposta em cotas de 60 a 120 m, foi identificada nas margens do rio Urubu por dados palinológicos obtidos de Grahn e Melo (2003) que definiram uma idade Givetiana precoce. Outra ocorrência foi registrada nas margens do rio Uatumã, identificados pela presença de *Ramochitina autasmerimensis*, que tem idade Eifeliana-Givetiana e corrobora com a idade proposta por Melo e Loboziak (2003) para esta formação.

A subfaixa contínua da Formação Barreirinha apresenta espessura aflorante entre 9 a 10 km, sendo disposta em cotas de 60 a 120 m. Foi definida com base em dados palinológicos em afloramentos ao longo dos rios Urubu e Uatumã, sendo posicionada no Givetiano – Frasniano (Grahn; Melo, 2003).

Por fim, a subfaixa descontínua da Formação Itaituba, com espessura aflorante de aproximadamente 20 m, disposta em cotas de 60 a 120 m no extremo leste da área. Foi definida

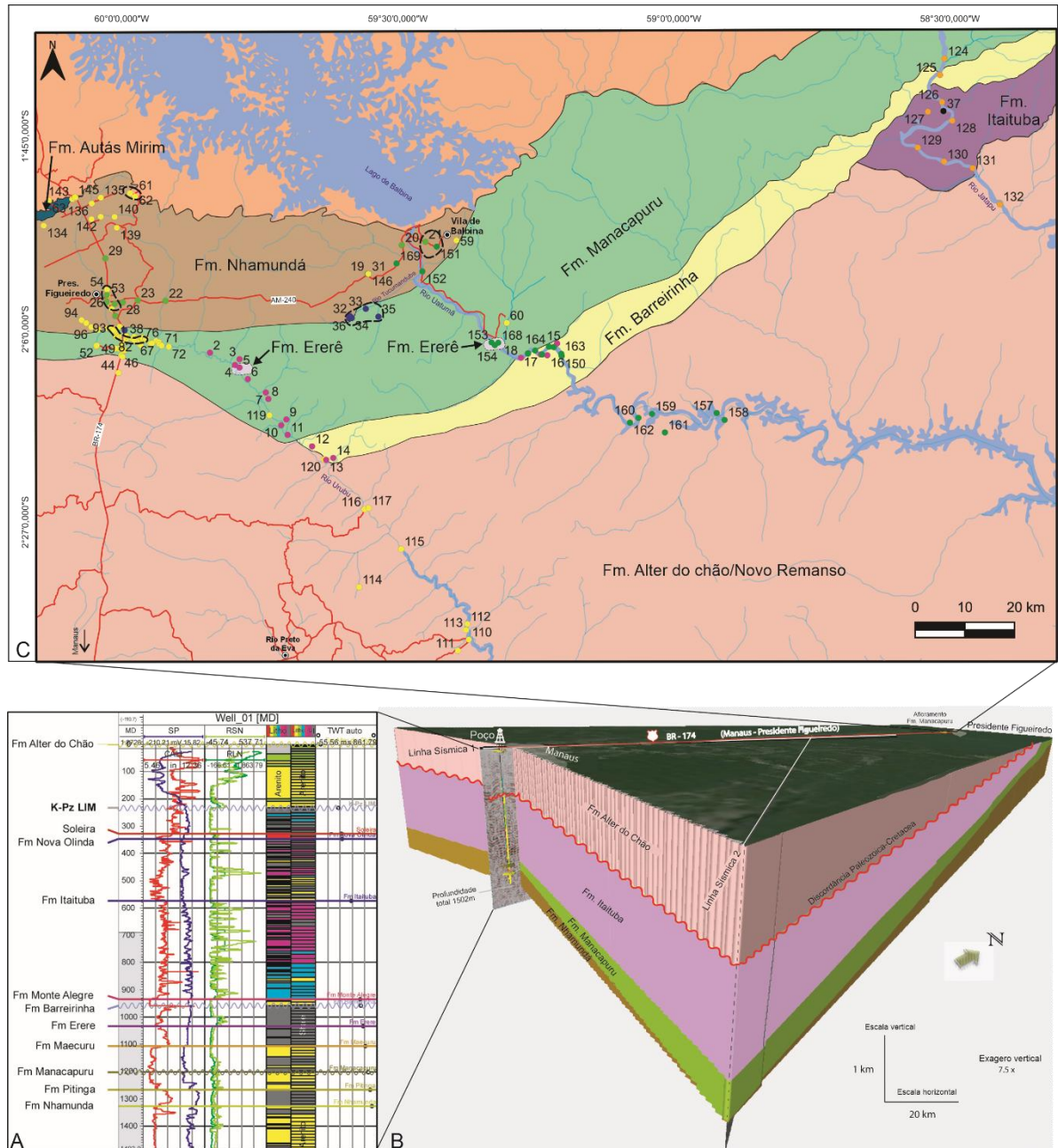
na região do Rio Jatapu (Mina de calcário), composta por microfácies carbonáticas característica de mar epicontinental posicionada por palinologia no Pensilvaniano (Sousa *et al.*, 2021).

#### 6.4.1 Correlação estratigráfica de dados de superfície e subsuperfície

O empilhamento sedimentar de subsuperfície do poço 2MNST-001 AM (profundidade de 1320 metros), localizado em Manaus, distante cerca de 100 km de Presidente Figueiredo, é composto principalmente por unidades sedimentares paleozoicas das formações Nhamundá, Manacapuru, Maecuru, Ererê, Barreirinha, Monte Alegre, Itaituba, Nova Olinda, recobertas por depósitos da Formação Alter do Chão (Cretáceo) (Figura 22A). Parte dessas unidades emergem do poço em direção a região de Presidente Figueiredo, ocorrendo como subfaixas sedimentares aflorantes na borda norte da bacia, conforme correlação estratigráfica definida na composição do bloco diagrama (Figura 22B-C).

Na correlação estratigráfica apenas as subfaixas sedimentares mais espessas foram consideradas no referido bloco e definem uma feição de *onlap* costeiro, segundo a concepção de Caputo (2014) (Figura 22B). Provavelmente, em função da falta de detalhamento palinoestratigráfico em superfície, apenas as formações Nhamundá, Manacapuru, Ererê, Barreirinha e Alter do Chão puderam ser correlacionadas (Figura 22B-C).

**Figura 22** – A) Perfil estratigráfico do poço 2MNST-001 AM, com dados litológicos e geofísicos (Potencial Espontâneo - SP, Caliper - CAL, Resistividade - RSN/RLN). B) Modelo tridimensional das unidades paleozoicas e mesozoica no trecho entre Manaus e Presidente Figueiredo. C) Mapa geológico com a individualização das faixas sedimentares aflorantes na região de Presidente Figueiredo.



## 7 DISCUSSÃO

As associações de fácies identificadas nas formações Nhamundá e Manacapuru, aflorantes na borda norte da Bacia do Amazonas, refletem o paleoambiente de *foreshore-shoreface* sob influência glacial. As fácies de *shoreface* inferior (Pl), *shoreface* superior (Act e Apbc) e *foreshore* (Ap e Apbs) evidenciam variações da energia e dinâmica sedimentar do ambiente marinho costeiro.

A fácies Pl (Formação Manacapuru) foi interpretada neste estudo como pertencente ao paleoambiente de *shoreface* inferior, bem como ao paleoambiente de *offshore* por Rocha *et al.* (2019). As fácies Act, Apbc, Ap e Apbs (formações Nhamundá e Manacapuru) foram associadas ao paleoambiente de *foreshore-shoreface* superior, corroborando com estudos faciológicos regionais propostos para a Formação Nhamundá na borda norte da bacia (Nogueira *et al.*, 1999; Soares *et al.*, 2005; Cuervo *et al.*, 2018).

As fácies de diamictitos (Dpo e Dpp) e pelitos com *dropstones* (Pld) identificados neste estudo, ocorrem como camadas intraformacionais intercaladas às fácies marinhas e exibem texturas e estruturas características de depósitos glaciais (verificar item 6.2.1). As fácies Dpo e Dpp são relacionadas à deposição por morenas terminais, onde detritos são depositados na porção frontal da geleira durante avanço e recuo do gelo. Depósitos correlatos denominados de morenas terminais e/ou supraglaciais da Formação Nhamundá aflorantes na região de Presidente Figueiredo, semelhantes litologicamente ao diamictito oligomítico (fácies Dpo) deste estudo, foram definidos por Cuervo *et al.* (2018), cuja gênese foi associada ao transporte por fluido viscoso com mistura de detritos. Particularmente, o aspecto polimítico da fácies Dpp indica que a geleira se deslocou sobre áreas fontes distintas, associadas ao embasamento cristalino e depósitos de *foreshore-shoreface*. A fácies Pld, identificada pela primeira vez na Formação Manacapuru, indica sedimentação em lagoas proglaciais a partir do desprendimento de clastos da base de *icebergs* (Thomas; Connell, 1985).

Embora não tenham sido observadas deformação glacioteclônica nas fácies glaciais estudadas, feições microtexturais foram identificadas nos depósitos glaciais deformados aflorantes na região de Presidente Figueiredo por Nogueira *et al.* (1999) e Soares *et al.* (2005) (verificar item 6.2.2). Neste enfoque, destaca-se a microtextura de estrias paralelas que são diagnósticas do deslocamento de geleiras, além de superfície de clivagem, *v-shapes*, depressões profundas e sulcos (retos e curvados) que podem ocorrer tanto no ambiente glacial quanto no fluvial e marinho (Mahaney, 2002; Voz *et al.*, 2014; Keiser *et al.*, 2015). Dados microtexturais obtidos por Barbosa (2018) nesses depósitos deformados indicaram também a presença de

estrias, *v-shapes*, fraturas (paralelas e conchoidais), sulcos e calhas profundas, as quais foram associadas ao processo de cisalhamento basal e colapso de geleiras.

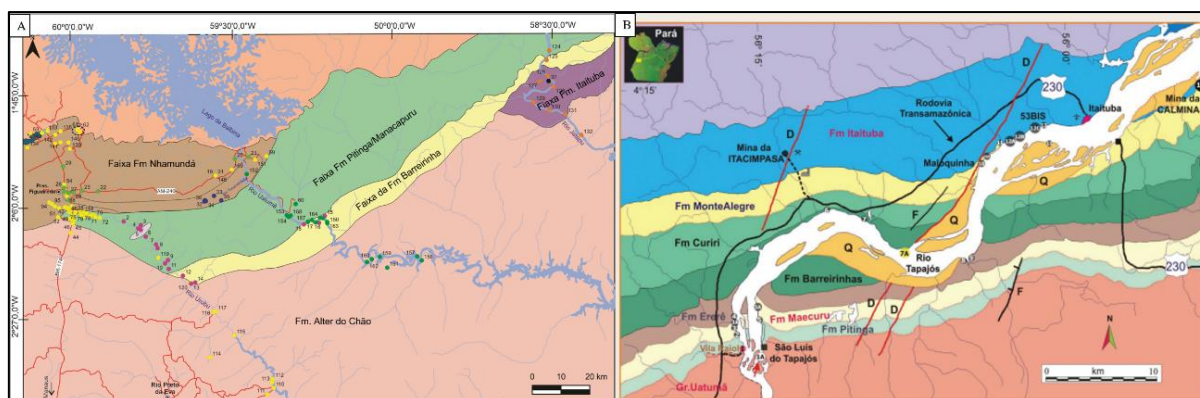
Dados palinoestratigráficos das fácies glaciais estudadas permitiram associá-las a dois eventos glaciais na Bacia do Amazonas. Devido o posicionamento geográfico, a fácies Dpp foi inserida nos depósitos glaciais da Formação Nhamundá, posicionada previamente por palinologia no Llandoveryano-Wenlockiano (Melo, 1997; Melo; Steemans, 1997; Soares, 1998; Nogueira *et al.*, 1999; Soares *et al.*, 2005). Por sua vez, as fácies Dpo e Pld permitiram definir um novo evento glacial na bacia, posicionado no Siluriano Superior-Devoniano Inferior, com base nos quitinozoários diagnósticos do Pridoli e Lochkoviano Inferior. Além disso, a presença de clastos facetados e *dropstones* fortalece a evidência dos eventos glaciais durante a deposição Siluro-Devoniana da Bacia do Amazonas.

A assembleia de minerais pesados das formações Nhamundá e Manacapuru, identificadas nas fácies de *foreshore-shoreface*, exibe um predomínio de grãos ultraestáveis (zircão, turmalina, rutilo e anatásio) a pouco instáveis (hornblenda, epídoto e silimanita). O elevado percentual de ultraestáveis pode ser associado ao intenso retrabalhamento no ambiente costeiro, enquanto, a presença restrita de grãos instáveis pode ser relacionada a rápida sedimentação e/ou cimentação precoce durante a diagênese. Comparativamente, nos depósitos glaciais ocorrem grãos de zircão e turmalina, cujo empobrecimento da assembleia pode estar associado a dissolução intraestratal durante a diagênese, conforme denotado pelas feições superficiais de corrosão nos grãos de quartzo. A presença restrita de grãos de anatásio euédrico nos depósitos glaciais pode ser associado ao surgimento de novas fases minerais durante a diagênese, conforme enfatizado por Morton e Hallsworth (1999). Em geral, essas assembleias assemelham-se às descritas por Santos (2012), Cuervo (2014) e Cuervo *et al.* (2018) para depósitos da Formação Nhamundá. A proveniência desses minerais é atribuída ao embasamento cristalino da borda norte da bacia, composto por rochas graníticas da Suíte Intrusiva Água Branca, vulcânicas do Grupo Iricoumé e metamórficas do Complexo Jaruaperi (Souza; Nogueira, 2009; Reis *et al.*, 2016), bem como as rochas sedimentares da Formação Autás Mirim.

No contexto estratigráfico local, não foi definida uma correlação das subfaixas sedimentares aflorantes na borda norte (identificadas neste estudo) com as da borda sul (estudo de Matsuda *et al.*, 2010). Das 06 subfaixas sedimentares paleozoicas (formações Autás Mirim, Nhamundá, Manacapuru, Ererê, Barreirinha e Itaituba) da borda norte, apenas as formações Ererê, Barreirinha e Itaituba afloram na borda sul (Figura 23). Provavelmente, a ausência ou presença de determinadas unidades nas bordas norte e sul, pode estar relacionada à escassez de detalhamento faciológico e palinoestratigráfico regional, que dificulta a identificação das

unidades, bem como a correlação estratigráfica entre trechos distintos da Bacia do Amazonas. A escassez de detalhamento palinoestratigráfico tem dificultado o posicionamento dos depósitos glaciais intraformacionais nas bordas da bacia, como exemplo, na borda norte afloram os diamictitos das formações Nhamundá-Manacapuru (Siluriano-Devoniano Inferior), enquanto na sul, os da Formação Curiri (Devoniano Superior).

**Figura 23** – Mapas geológicos mostrando a delimitação das subfaixas sedimentares paleozoicas aflorantes nas bordas norte (A, deste estudo) e sul (B, Matsuda *et al.*, 2010) da Bacia do Amazonas.



**Fonte:** Matsuda *et al.* (2010).

## 8 CONCLUSÃO

A análise palinofaciológica dos depósitos aflorantes nos rios Urubu, Uatumã e Jatapu (borda norte da Bacia do Amazonas) permitiu a caracterização dos paleoambientes de *foreshore-shoreface* sob influência glacial, para às formações Nhamundá e Manacapuru.

As fácies *foreshore-shoreface* são constituídas principalmente por quartzo-arenitos e pelitos. Os arenitos exibem uma assembleia de minerais pesados ultraestável-instável (zircão, turmalina, rutilo, anatásio, hornblenda, epídoto e silimanita) indicativa de vários ciclos de retrabalhamento sedimentar com episódios de sedimentação rápida. Comparativamente, o diamictito Dpo exibe uma assembleia empobrecida composta por zircão, turmalina e anatásio, em função do retrabalhamento das fácies de *foreshore-shoreface*, bem como pela dissolução intraestratal durante a diagênese.

Nas camadas intraformacionais glaciais destacam-se os clastos facetados e *dropstones*, considerados indicadores diagnósticos da atividade glacial. Além disso, microtexturas superficiais (principalmente estrias paralelas) corroboram essa interpretação paleoambiental. Dados palinológicos permitiram definir dois eventos glaciais em afloramentos da borda norte da Bacia do Amazonas, um posicionado no Siluriano Inferior (Llandoveryano-Wenlockiano) e definido em estudos prévios e outro no Siluriano Superior-Devoniano Inferior (Pridoli-Lochkoviano), sem registros correlatos na bacia.

A integração de dados sedimentológicos, palinológicos e mineralógicos possibilitou a elaboração do mapa geológico da borda norte, com a definição de 06 subfaixas paleozoicas, contínuas e descontínuas, de direção geral E-W, pertencentes às formações Autás Mirim, Nhamundá, Manacapuru, Ererê, Barreirinha e Itaituba. No entanto, a correlação estratigráfica dessas subfaixas com as reconhecidas na borda sul foi parcial e direcionada às formações Ererê, Barreirinha e Itaituba, em função da escassez de estudos faciológicos e palinoestratigráficos. A dificuldade de correlação aumenta quando direcionada aos diamictitos grosseiros intraformacionais, principalmente em função da restrita distribuição em área, espessura reduzida e ausência de material apropriado para palinologia.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP; SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SGB. Banco de Dados de Informações Petrolíferas – Reate Terrestre. Brasília, 2022. Disponível em: <https://reate.cprm.gov.br/anp/TERRESTRE>. Acesso em: 17 jun. 2024.
- ALVES, R. O. **Mapeamento geológico do trecho do Rio Jatapu, entre o Rio Amazonas e o Igarapé Sorva, borda norte da Bacia do Amazonas**. 2014. Relatório de Pesquisa (Iniciação Científica) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014. Disponível em: <https://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/3823>. Acesso em: 10 abril 2023.
- ANTONIOLI, L.; DINO, R.; PORTELA, H.A.; AMARAL, P.F. New method of rock samples preparation for palynological and palynofaciological analysis. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 1, p. 339-345, 2020. DOI: [https://doi.org/10.11137/2020\\_1\\_339\\_345](https://doi.org/10.11137/2020_1_339_345).
- ARNOT, M. J.; GOOD, T. R.; LEWIS, J. J. Photogeological and image-analysis techniques for collection of large-scale outcrop data. **Journal of Sedimentary Research**, v. 67, n. 5, 1997.
- AZEVEDO-SOARES, H. L. C. The Trombetas Group chitinozoans of the Amazon Basin, Northern Brazil. **Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen**, p. 133-143, 2009.
- AZEVEDO-SOARES, H. L. C.; GRAHN Y. The Silurian–Devonian boundary in the Amazon Basin, northern Brazil. **Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen**, v. 236, p. 79-94, 2005.
- BARBOSA, R. C. M.; NOGUEIRA, A. C. R. Paleoambiente da Formação Prosperança, embasamento neoproterozóico da Bacia do Amazonas. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 1-17, 2011. DOI: <https://doi.org/10.25249/0375-7536.20114110117>
- BUATOIS, L. A.; MÁNGANO, M. G. **Ichnology: Organism-substrate interactions in space and time**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.
- CAPUTO, M. V. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. 1984. 583 f. Tese (Doutorado em Geologia) – University of California, Santa Barbara, 1984.
- CAPUTO, M. V. **Bacia do Amazonas, tectônica e magmatismo**. Rio de Janeiro: ResearchGate, 2014. Preparado para a ANA, p.151.
- COUTINHO, J. M. V.; COIMBRA, A. M. **Tabela de identificação Óptica de Minerais Transparentes em Sedimentos**. Curitiba/São Paulo: UFPR/USP, 2005. p.17.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Projeto Aerogeofísico Pitinga: Relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos**. Rio de Janeiro: Lasa Engenharia e Prospecções S/A, 2007. v. 1, p. 288.
- CUERVO, H. D. R. **Fácies sedimentares das unidades Siluro-devonianas aflorantes na porção sudeste do município de Presidente Figueiredo, borda norte da Bacia do Amazonas - AM**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do

Amazonas, Manaus, 2014.

CUERVO, H. D. R.; SOARES, E. A. A.; CAPUTO, M. V; DINO, R. Sedimentology and stratigraphy of new outcrops of Silurian glaciomarine strata in the Presidente Figueiredo region, northwestern margin of the Amazonas Basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 85, p. 43-56, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.04.023>

CUNHA, P. R. C.; GONZAGA F. G.; COUTINHO L. F. C.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n. 1, p. 47-55, 1994.

CUNHA P. R. C.; MELO J. H. G.; SILVA O. B. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, n. 2, p. 227-251, 2007.

DINO, R; SILVA, O. B.; ABRAHÃO, D. Caracterização palinológica e estratigráfica de estratos cretáceos da Formação Alter do Chão, Bacia do Amazonas. In: **SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO DO BRASIL**, 5., 1999, Serra Negra. *Anais...* Serra Negra: IGCE/UNESP, 1999. p. 557-565.

DINO, R.; SOARES, E.A.A.; ANTONIOLI, L.; RICCOMINI, C.; NOGUEIRA, A.C.R. Palynostratigraphy and sedimentary facies of Middle Miocene fluvial deposits of the Amazonas Basin, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 34, p. 61-80, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.11.008>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Dados do IBGE. Disponível em: [www.portaldemapas.ibge.gov.br](http://www.portaldemapas.ibge.gov.br). Acesso em: 21 abr. 2023.

GALEHOUSE, J.S. Counting grain mounts: number percentage vs. number frequency. **Journal of Sedimentary Research**, v. 39, p. 812-815, 1969. DOI: <https://doi.org/10.1306/74D71D3E-2B21-11D7-8648000102C1865D>

GRAHN, Y. Silurian and Early Devonian chitinozoan taxonomy and biostratigraphy of the Trombetas Group, Amazonas Basin, northern Brazil. **Bulletin of Geosciences**, v. 80, n. 4, p. 245-76, 2005.

GRAHN, C. Y.; MELO, J. H. G. Silurian-Devonian chitinozoan biostratigraphy along the Urubu, Uatumã and Abacate rivers in the western part of the Amazonas Basin, northern Brazil. **Bulletin of Geosciences**, v. 78, n. 4, p. 373-391, 2003.

GRAHN, Y.; MELO, J. H. G. Integrated Middle Devonian chitinozoan and miospore zonation of the Amazonas Basin, northern Brazil. **Revue de micropaléontologie**, v. 47, n. 2, p. 71-85, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.revmic.2004.03.001>

KNAUST, D.; THOMAS, R. D. K; CURRAN, H. A. *Skolithos linearis* Haldeman, 1840 at its early Cambrian type locality, Chickies Rock, Pennsylvania: analysis and designation of a neotype. **Earth-Science Reviews**, v. 185, p. 15-31, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.05.009>

LANGE, F. W. Subdivisão bioestratigráfica e revisão da coluna siluro-devoniana da bacia do baixo Amazonas. In: **SIMPÓSIO SOBRE A BIOTA AMAZÔNICA (Geociências)**, 1967. *Anais...* p.215-326.

MACEACHERN, J. A.; PEMBERTON, S. G. Ichnological aspects of Cretaceous shoreface

successions and shoreface variability in the Western Interior Seaway of North America. In: PEMBERTON, S. G. (Ed.). **Applications of Ichnology to Petroleum Exploration: a Core Workshop**. Tulsa: Society for Sedimentary Geology (SEPM), 1992. v. 17, p. 57-84. DOI: <https://doi.org/10.2110/cor.92.01.0057>.

MAHANEY, W. C. **Atlas of Sand Grain Surface Textures and Applications**. New York: Oxford University Press, 2002. 237 p.

MANGE, M. A.; MAURER, H. F. W. **Heavy Minerals in Colour**. London: Chapman e Hall, 1922. 147 p.

MATSUDA, N. S.; WINTER, W. R.; WANDERLEY FILHO, J. R.; CACELA, A. S. M. **O Paleozoico da borda sul da Bacia do Amazonas. Rio Tapajós – Estado do Pará**. 2010.

MELO, J. H. G. **Resultados de solicitação de análise Palinológica em amostras de Superfície da Região da Represa Balbina (AM), Bacia do Amazonas**. Rio de Janeiro: PEROBRAS, 1997. 7 p. (Relatório Interno).

MELO, J. H. G.; STEEMANS, P. **Resultados de Investigações palinoestratigráficas em amostras de Superfície da Região de Presidente Figueiredo (AM), Bacia do Amazonas**. Rio de Janeiro: PEROBRAS, 1997. 12 p. (Relatório Interno).

MELO, J. H. G.; LOBOZIAK, S. Devonian - Early Carboniferous miospore biostratigraphy of the Amazon Basin, Northern Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 124, n. 3-4, p. 131-202, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(02\)00184-7](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(02)00184-7)

MIALL A. D. A review of the braided-river depositional environment. **Earth-Science Reviews**, v. 13, n. 1, p. 1-62, 1977. DOI: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(77\)90055-1](https://doi.org/10.1016/0012-8252(77)90055-1)

MIALL, A. D. **Principles of sedimentary basin analysis**. 3. ed. Berlin: Springer-Verlag, 2000. 616 p.

MIALL, A. D. **The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analyses, and petroleum geology**. Berlin: Springer-Verlag, 2013. 582 p.

MORTON, A. C.; HALLSWORTH, C. R. Processes controlling the composition of heavy mineral assemblages in sandstones. **Sedimentary Geology**, v. 124, n. 1-4, p. 3-29, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(98\)00118-3](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(98)00118-3)

NICHOLS, G. **Sedimentary and stratigraphy**. 2. ed. Chichester: Wiley-Blackwell, 2009. 419 p.

NOGUEIRA, A. C. R.; SOUZA, V.; SOARES, E. A. A. Contribuição à tectônica cenozoica da região de Presidente Figueiredo, Norte de Manaus-AM. In: **SIMPÓSIO NACIONAL DE ESTUDOS TECTÔNICOS**, 6., 1997, Pirenópolis. *Anais...* Pirenópolis: Sociedade Brasileira de Geologia, 1997. p. 123-125.

NOGUEIRA, A. C. R.; TRUCKENBRODT, W.; SOARES, E. A. A. O icnogênero *Arthropycus* de depósitos sublitorâneos da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior) da Bacia do Amazonas, região de Presidente Figueiredo. **Brazilian Journal of Geology**, v. 29, n. 2, p. 135-140, 1999.

PETTIJOHN, F. J.; POTTER, P. E.; SIEVER, R. **Petrography of Common Sands and**

Sandstones. In: **Sands and Sandstones**. 2. ed. Berlin: Springer. 1987. 618 p.

PLINT, A. G. Wave-and storm-dominated shoreline and shallow-marine systems. In: WALKER, R.G.; JAMES, N. P. (ed.) **Facies models 4**. Canada: Geological Association of Canada, 2010. p. 167-201.

POWERS M. C. A new roundness scale for sedimentary particles. **Journal of Sedimentary Research**, v. 23, n. 2, p. 117-119, 1953. DOI: <https://doi.org/10.1306/D4269567-2B26-11D7-8648000102C1865D>

PUPIN, J. Zircon and granite petrology. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 73, p. 207-220, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00381441>

REIS, N. J.; ALMEIDA, M. E.; RIKER, S. L.; FERREIRA, A. L. **Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas Programa Geologia do Brasil (mapas geológicos estaduais, escala 1: 1.000. 000)**. Manaus: CIAMA/CPRM, 2006.

RIKER S. R. L.; LIMA F. J. D. C.; MOTTA M. B.; SILVA D. P. B. **Geologia e recursos minerais da região metropolitana de Manaus, Estado do Amazonas, escala de integração – 1: 500.000**. Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2016.

ROCHA P. F.; SILVEIRA R. R.; BARBOSA R. C. M. Age and palaeoenvironments of the Manacapuru Formation, Presidente Figueiredo (AM) region, Lochkovian of the Amazonas Basin. **Brazilian Journal of Geology**, v. 49, n. 4, p. e20180130, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-4889201920180130>

ROZO, J. M. G.; NOGUEIRA, A. C. R.; HORBE, A. M. C.; CARVALHO, A. S. Depósitos Neógenos da Bacia do Amazonas. **Contribuições à Geologia da Amazônia**, Belém: SBG, v. 4, p. 201-207, 2005.

ROZO, J. M. G.; NOGUEIRA, A. C. R.; TRUCKENBRODT, W. The anastomosing pattern and the extensively distributed scroll bars in the middle Amazon River. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 37, n. 14, p. 1471-1488, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3249>

SANTOS, F.B. dos. **Análise estratigráfica da sequência sedimentar Proterozóica-Cretácea da Região de Presidente Figueiredo com base no estudo de minerais pesados**. 2012. Relatório de Pesquisa (Iniciação Científica) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012. Disponível em: <http://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/2569>

SANTOS, J. D.; HARTMANN, L. A.; RIKER, S. R.; SOUZA, M. D.; ALMEIDA, M. E.; MCNAUGHTON, N. J. A compartimentação do cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006. In: **SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA**, 9., 2006, Belém. *Anais...* Belém: SBG, 2006. p. 156-159.

SEILACHER, A. Bathymetry of traces fossils. **Marine Geology**, v. 5, p. 413-428, 1967. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(67\)90051-5](https://doi.org/10.1016/0025-3227(67)90051-5)

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – SBG. Dados do SBG. Brasília, 2016. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br>. Acesso em: 25 abr. 2023.

SILVA, P. A. S.; AFONSO J. W. L.; SOARES J. L.; NOGUEIRA A. C. R. Depósitos de plataforma mista, Neocarbonífero da Bacia do Amazonas, região de Uruará, estado do Pará.

**Revista do Instituto de Geociências - USP**, v.15, n.2, p.79-98, 2015.

SILVA, Y. A.; OLIVEIRA, G. C. C. A.; DE OLIVEIRA, R. S.; SCHEFFLER S. M. Nova Ocorrência de Crinoidea no Pensilvaniano da Formação Itaituba, Pedreira Caltarém, Norte da Bacia do Amazonas. **Revista Brasileira de Paleontologia**, v. 26, n. 1, p. 21-34, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4072/rbp.2023.1.03>

SOARES, D. P. **Mapeamento Geológico e Análise de Fácies Sedimentares da Região do rio Uatumã, no trecho entre os lagos de Balbina e Jutuarana, Borda Norte da Bacia do Amazonas**. Trabalho final de graduação (Geologia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

SOARES, E. A. A. **Fácies Litorâneas e Feições Glaciais da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior) na Região de Presidente Figueiredo-AM, Bacia do Amazonas**. 1998. 98 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

SOARES, E. A. A.; TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, A. C. R. Fácies litorâneas e subglaciais da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior), região de Presidente Figueiredo, Bacia do Amazonas. **Boletim do Museu Emílio Goeldi**, v. 1, n. 2, p. 89-116, 2005.

SOARES, E.A.A.; DINO, R.; SOARES, D.P.; ANTONIOLI, L.; SILVA, M.A.L.D. New sedimentological and palynological data from surface Miocene strata in the central Amazonas Basin area. **Brazilian Journal of Geology**, v. 45, n. 3, p. 337-357, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/2317-488920150030283>

SOUSA, E. S.; BARBOSA, R. C. M.; RUDNITZKI I. D. Microfácies de carbonatos pensilvanianos da Formação Itaituba (Grupo Tapajós) no norte da Bacia do Amazonas, Urucará (AM). **Pesquisa em Geociências**, v. 48, n. 1, p. e092531-e092531, 2021. DOI: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.92531>

SOUZA, V .S.; NOGUEIRA, A. C. R. Seção geológica Manaus – Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 1, p. 16-29, 2009.

STEEMANS, P.; RUBINSTEIN, C.; MELO, J. H. G. Siluro-Devonian Miospore Biostratigraphy of the Urubu River area, Western Amazon Basin, Northern Brazil. **Geobios**, v. 41, p. 263-282, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geobios.2007.06.003>

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

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2003. 416 p.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the Amazonian Craton. **Episodes-Newsmagazine of the International Union of Geological Sciences**, v. 22, n. 3, p. 174-182, 1999. DOI: <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1999/v22i3/004>

THOMAS, G.S.P.; CONNELL, R.J. Iceberg drop, dump, and grounding structures from Pleistocene glacio-lacustrine sediments, Scotland. **Journal of Sedimentary Research** , v. 55, n. 2, p. 243-249, 1985. DOI: <https://doi.org/10.1306/212F8689-2B24-11D7-8648000102C1865D>.

TUCKER, M. E. **Sedimentary rocks in the field**. Chichester: John Wiley & Sons, 2003. 234

p.

VASQUEZ, M. L.; ROSA COSTA, L. T.; SILVA, C. M. G., KLEIN, E. L. Compartimentação tectônica. In: VASQUEZ M. L.; ROSA COSTA L. T. (org.). **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: Texto explicativo dos mapas geológico e tectônico e de recursos minerais do Estado do Pará. Escala 1:1.000.000.** Belém: CPRM, 2008. p.39-112.

VOS, K.; VANDENBERGHE, N.; ELSEEN, J. Surface textural analysis of quartz grains by scanning electron microscopy (SEM): From sample preparation to environmental interpretation. **Earth-Science Reviews**, v. 128, p. 93-104, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.013>

WALKER, R. G. Facies, facies models and modern stratigraphic concepts. In: WALKER, R. G.; JAMES, N. P. (ed). **Facies models: response to sea level change.** Canada: Geological Association of Canada, 1992. p. 1-14.

WALKER, R. G.; PLINT, A. G. Wave and storm dominated shallow marine systems. In: WALKER, R. G.; JAMES, N. P. (ed). **Facies models: response to sea level change.** Canada: Geological Association of Canada, 1992. p. 219-238.

WANDERLEY FILHO, J. R.; COSTA, J. B. S. Contribuição à evolução estrutural da Bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento. In: **SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA**, 6., 1991, Belém. *Anais...* Belém: Sociedade Brasileira de Geologia, 1991. p. 244-259.

WANDERLEY FILHO, J. R.; GONÇALVES, H.; FONSECA, M. M.; MACHADO, D. M. C. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do Amazonas. **Fundação Paleontológica Phoenix**, v. 82, p. 1-6, 2005.

WIZEVICH, M. Photomosaics of outcrops: useful photographic techniques. In: MIAL, A.D.; TYLER, N. (ed.). **The three-dimensional facies architecture of terrigenous clastic sediments and its implications for hydrocarbon discovery and recovery.** Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1991. (Concepts in sedimentology and paleontology, v. 3), p. 22-24

## ANEXO A – Mapa geológico das faixas sedimentares paleozoicas da borda norte da Bacia do Amazonas.

