

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

ISABELA APOEMA GOMES DE SOUZA

JACUZZIS NATURAIS (POTHOLES) NA PROPOSTA GEOPARQUE
CACHOEIRAS DO AMAZONAS: ORIGEM, EVOLUÇÃO E
ESTRATÉGIAS DE GEOCONSERVAÇÃO

MANAUS-AM

2025

ISABELA APOEMA GOMES DE SOUZA

**JACUZZIS NATURAIS (POTHOLES) NA PROPOSTA GEOPARQUE
CACHOEIRAS DO AMAZONAS: ORIGEM, EVOLUÇÃO E ESTRATÉGIAS DE
GEOCONSERVAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós Graduação em Geociências, da
Universidade Federal do Amazonas, como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Geociências.

ORIENTADORES: PROF. DR. ROBERTO CESAR DE MENDONÇA BARBOSA
PROF. DR. CARLOS ALEJANDRO SALAZAR

MANAUS-AM

2025

Ficha Catalográfica

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

S729j Souza, Isabela Apoema Gomes de
Jacuzzis naturais (potholes) na proposta Geoparque Cachoeiras
do Amazonas: origem, evolução e estratégias de geoconservação /
Isabela Apoema Gomes de Souza. - 2025.
137 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Roberto Cesar de Mendonça Barbosa.
Coorientador(a): Carlos Alejandro Salazar.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas,
Programa de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, 2025.

1. Carstes. 2. Marmitas. 3. Geodiversidade. 4. Formação
Nhamundá. 5. Presidente Figueiredo. I. Barbosa, Roberto Cesar de
Mendonça. II. Salazar, Carlos Alejandro. III. Universidade Federal
do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Geociências. IV.
Título

ISABELA APOEMA GOMES DE SOUZA

JACUZZIS NATURAIS (POTHOLES) NA PROPOSTA GEOPARQUE
CACHOEIRAS DO AMAZONAS: ORIGEM, EVOLUÇÃO E ESTRATÉGIAS
DE GEOCONSERVAÇÃO

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: 29 de abril de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ROBERTO CESAR DE MENDONÇA BARBOSA**
Data: 18/06/2025 15:47:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Roberto Cesar de Mendonça Barbosa, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

Documento assinado digitalmente
 **MARCOS ANTONIO LEITE DO NASCIMENTO**
Data: 18/06/2025 11:38:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Antonio Leite do Nascimento, Membro.
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN

Documento assinado digitalmente
 **RAIMUNDO HUMBERTO CAVALCANTE LIMA**
Data: 18/06/2025 12:35:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

RESUMO

No ano de 2012 foi proposto a criação do Geoparque Cachoeiras do Amazonas, um território de preservação e promoção da geodiversidade situado no município de Presidente Figueiredo (AM). A proposta atual contempla 18 geossítios e dois sítios da geodiversidade distribuídos principalmente em geoformas nos arenitos silurianos da Formação Nhamundá na Bacia do Amazonas. Entretanto, ainda há uma limitação nos estudos sobre as feições cársticas, em especial as marmitas, além da escassez de iniciativas para a quantificação, o uso sustentável e a promoção da geodiversidade local, especialmente no envolvimento de grupos de interesse do território. Ao longo das drenagens do território são encontradas marmitas, algumas de grandes dimensões (localmente chamadas de jacuzzis naturais), com mais de 6 m de profundidade. Essas feições despertam interesse tanto em relação ao seu potencial geoturístico, quanto pelos processos envolvidos em sua formação. A presença dessas estruturas em rochas siliciclásticas levanta questões sobre os mecanismos erosivos que atuam em sua geração e evolução, especialmente em um contexto geológico onde processos cársticos clássicos são menos comuns. Nesse sentido, foi procedida uma avaliação estrutural com a identificação de estruturas e lineamentos que podem influenciar a formação das marmitas; uma análise morfométrica, por meio da medição e do tratamento estatístico das dimensões dessas geoformas; e da geodiversidade, com a avaliação quantitativa para fins turísticos, educativos e científicos nos locais de ocorrência de marmitas, com o objetivo de compreender sua origem e evolução, além de subsidiar estratégias de geoconservação. Os resultados da pesquisa geraram dois artigos científicos. O primeiro publicado no *Journal of South American Earth Science* com o título "*Potholes and shear zones deformation in sandstones: Central Amazon Basin*" destaca a influência da neotectônica na escala, geometria, orientação e dimensões das marmitas, correlacionando-as com processos de arenitização em microescala. Já o segundo, com o título "Origem e Evolução das Jacuzzis Naturais (Marmitas) em Presidente Figueiredo (AM): utilização de Exocarstes para Preservação do Meio Natural na Proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas" submetido à Revista Geonorte disserta sobre a origem das marmitas e sua evolução até jacuzzis naturais, qualifica a geodiversidade nos locais de ocorrência, sobre propostas em conjunto com guias de turismo e estratégias para geoconservação das feições exocársticas através de painéis interpretativos dos locais avaliados. Os painéis foram disponibilizados para a prefeitura municipal e poderão ser utilizados como ferramenta para a geoconservação das geoformas, meio de disseminação das geociências aos visitantes do município.

Palavras chaves: Carstes; Marmitas; Geodiversidade; Formação Nhamundá; Presidente Figueiredo.

ABSTRACT

In 2012, it was proposed to create the Cachoeiras do Amazonas Geopark, a territory for the preservation and promotion of geodiversity in the municipality of Presidente Figueiredo (AM). The current proposal includes 18 geosites and 2 geodiversity sites, mainly distributed in geoforms in the Silurian sandstones of the Nhamundá Formation, in the Amazonas Basin. However, studies on karst features, especially the potholes, are still limited, and there is a lack of initiatives for the quantification, sustainable use and promotion of local geodiversity, especially in the involvement of interest groups in the territory. However, studies on karst features, especially marmite, are still limited, and there are few initiatives to quantify, sustainably use and promote local geodiversity, especially when it comes to involving local interest groups. Throughout the territory's drainages, there are marmitas, some of them large (locally called natural jacuzzis), more than 6 m deep. These features are of interest both for their geotourism potential and for the processes involved in their formation. The presence of these structures in siliciclastic rocks raises questions about the erosive mechanisms involved in their generation and evolution, especially in a geological context where classic karst processes are less common. To this end, a structural assessment was carried out, identifying structures and lineaments that can influence the formation of the marmitas; a morphometric analysis, measuring and statistically treating the dimensions of these geoforms; and geodiversity, with a quantitative assessment for tourism, educational and scientific purposes in the places where marmitas occur, with the aim of understanding their origin and evolution, as well as supporting geoconservation strategies. The results of the research generated two scientific articles. The first, published in the Journal of South American Earth Science under the title "Potholes and shear zones deformation in sandstones: Central Amazon Basin", highlights the influence of neotectonics on the scale, geometry, orientation and dimensions of the potholes, correlating them with microscale arenitization processes. The second, entitled "Origin and Evolution of Natural Jacuzzis (Marmitas) in Presidente Figueiredo (AM): Utilization of Exocarsts for Preservation of the Natural Environment in the Cachoeiras do Amazonas Geopark Proposal" submitted to the Geonorte Magazine dissects the origin of marmitas and their evolution into natural jacuzzis, qualifies the geodiversity in the places of occurrence, and proposals, together with tourist guides, strategies for geoconservation of the exocárstic features through interpretive panels of the sites evaluated. The panels were made available to the town hall and could be used as a tool for geoconservation of the geoforms and as a means of disseminating geosciences to visitors to the town.

Keywords: Karst; Potholes; Geodiversity; Nhamundá Formation; Presidente Figueiredo.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa de localização e geológico simplificado da área proposta para Geoparque Cachoeiras do Amazonas, com a indicação dos geossítios cadastrados e os pontos alvos desta pesquisa (adaptado de Luzardo, 2012).....16
- Figura 2.** Principais elementos morfométricos de marmitas com exemplos encontradas na proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas. Em planta, a obtenção dos dados geométricos é realizada a partir dos comprimentos do eixo maior (a) e menor (b), enquanto que em perfil são medidos a profundidade (h), o nível da água (n), o comprimento de sedimento (as) e a profundidade do sedimento (ps).....23
- Figura 3.** Contexto geológico simplificado da Bacia do Amazonas. A bacia é limitada no eixo E-W pelos arcos estruturais Purus e Gurupá, enquanto no eixo N-S pelos escudos das Guianas e Brasileiro. A área de estudo está localizada na borda norte da bacia e compreende exclusivamente unidades sedimentares da Sequência Ordovício-Devoniana.....26
- Figura 4.** Carta estratigráfica da Bacia Sedimentar do Amazonas com a distribuição das cinco sequências de 2ª ordem e destaque para a unidade sedimentar alvo desta pesquisa, representada por arenitos silurianos da Formação Nhamundá.....27
- Figura 5.** Padrão de drenagem em treliça nas principais afluentes da margem esquerda do rio Amazonas na região de Manaus. Vales alinhados com direção NW-SE (linhas tracejadas) no trecho do baixo rio Negro e rios Urubu, Preto da Eva e Uatumã por controle estrutural associado à neotectônica.....31
- Figura 6.** Diagramas de blocos evolutivos das cachoeiras de Presidente Figueiredo. A - Cachoeiras desenvolvidas a partir de falhas normais: 1) Situação antes do tectonismo. 2) Formação de cachoeiras pela interseção de rios com falhas normais. 3) Esvaziamento e consequente colapso do muro de rochas fragilizadas, resultando no recuo da escarpa. B - Cachoeiras controladas por relevo cárstico, exemplificado pela Cachoeira dos Arcos: 1) Formação de cavernas e dutos por dissolução e remoção hidrodinâmica na zona freática. 2) Soerguimento da área, intensificação dos processos de formação de cavernas e início da dissecação do relevo. 3) Configuração atual da cachoeira, com relevo ruiforme esculpido em antigas feições cársticas.....32
- Figura 7.** Perfil esquemático e características gerais dos ambientes cársticos. No ambiente exocárstico as feições são formadas pela dissolução em pontos mais suscetíveis da rocha (fraturas, juntas, planos de acamamentos). No ambiente epicárstico o processo de dissolução do substrato é expandido gerando geoformas como dolinas e *lapiás*, enquanto no ambiente endocárstico podem ser constatados condutos, cavernas, grutas, *lapiás*, bem como espeleotemas.....34
- Figura 8.** Domínios cársticos definidos a partir da interação água x rocha em sistemas carbonáticos. A introdução da água no sistema ocorre na zona superficial e

epicárstica que se infiltra pela ação da gravidade no substrato através de condutos no endocarste. O endocarste pode ser dividido em três zonas (vadosa, oscilação e freática). A água é eliminada do sistema cárstico na região de descarga ou carste de restituição.....35

Figura 9. O sistema hidrológico/químico de formação de terrenos cársticos dividido em duas zonas principais (erosão e deposição), controlada pela natureza das águas intersticiais. Setas indicam a transferência de fluidos no sistema cárstico.....36

Figura 10. Exemplos de feições exocársticas negativas, como marmitas/jacuzzis naturais e bacias de dissolução/gnamma/kamenitzas. Essas feições com geometria circular são encontradas nos leitos de rios/lajedos e podem estar desenvolvidas nas mais variadas litologias. As marmitas podem se desenvolver de forma isolada ou colonial, apresentar no máximo 99 cm de largura e profundidade de até 50 cm, enquanto as feições maiores que essas dimensões são chamadas de jacuzzis naturais. As bacias de dissolução são mais rasas, quando sua profundidade passa de 1 m tendem a denomina-se de tanques naturais. A – Marmitas em formas circulares individuais e coloniais em arenito no rio de Las Gachas, Colômbia. B – Gnammas holes ao sul da Austrália, bacias de dissolução do tipo isoladas e circulares encontradas em granito. C – Marmitas fluviais isoladas e coloniais desenvolvida em granito no leito do rio Ingá (Paraíba, Brasil). D – Lajedo Salambaia composta por sieno/monzogranito e suas bacias de dissolução métricas e rasas no Município de Boa Vista (Paraíba, Brasil).....39

Figura 11. Modelo de formação de uma marmita e sua evolução para uma jacuzzi natural em leitos rochosos influenciados por correntes fluviais. A e B – Os sedimentos transportados por arraste (amoladores) em correntes fluviais turbulentas promovem a formação de redemoinhos que escavam o substrato rochoso. C e D – Com a evolução da geoforma, amoladores de maior granulometria são capturados e dão início ao alargamento lateral. No início da formação as marmitas tendem a serem mais profundas e cilíndricas, mas ao atingirem a maturidade tendem a alargar-se e passam a ser chamadas de piscinas e/ou jacuzzis naturais.....40

Figura 12. Classificação das marmitas de acordo com a forma com que a corrente fluvial escava o substrato rochoso. A – Marmitas de redemoinhos são geradas por fluxos turbulentos estacionários e paralelos a escavação. B – Marmitas de goiva ou furo são moldadas por fluxos turbulentos associados ao impacto direto e oblíquo em relação ao substrato rochoso. C – Marmitas de Piscinas são as maiores, mais profundas e associadas a quedas d'água com impacto vertical direto do fluxo da água em relação ao substrato rochoso.....40

Figura 13. Fatores que influenciam no desenvolvimento de marmitas/jacuzzis naturais resumido em três itens: propriedades da rocha, as ferramentas e hidrologia. A litologia é responsável pela resistência da rocha à erosão e as características geométricas da geoforma. As ferramentas, por sua vez, agem como facilitadores abrasivos no substrato atuam como agentes de erosão e modelamento dos buracos ao longo do tempo. A hidrologia do ambiente atua na natureza no fluxo de água

gerado e sua influência para evolução das marmitas para jacuzzis naturais.....43

Figura 14. O processo de dissolução (arenitização) em arenitos da Formação Furnas. Ácidos orgânicos promovem a solubilização de sílica a partir de elementos do arcabouço (grãos de quartzo) e intersticiais (matriz e cimento de argilominerais) que tornam a rocha susceptível a remoção do material e formação de feições cársticas.....44

Figura 15. Mapa do território brasileiro com destaque para as províncias espeleológicas com registro de carste em rochas siliciclásticas.....46

Figura 16. Exemplos de painéis interpretativos em Geoparques nacionais e internacionais, destacando a importância da geodiversidade e do patrimônio geológico. A – Geoparque Quarta Colônia (Brasil), afloramento do dique e processos geológicos associados. B – Geoparque Araripe (Brasil), painel com mapa e informações sobre os geossítios. C – Geoparque Estrela (Portugal), painel sobre o geossítio Covão do Boi explicando sua formação e relevância. D – Geoparque Bakony–Balaton (Hungria), painel sobre erupções vulcânicas e formações rochosas associadas.....49

Figure 17. Geological location of the outcrops: A. 1 - Mutum waterfall (Barreto stream), 2 - Urubuí, 3 - Lajes rapids (Urubuí stream), 4 - Princesinha do Urubuí waterfall (Urubuí river).....52

Figure 18. Elevation digital model of the SE President Figueiredo region with distribution and attitude of morphological alignments, and lower hemisphere projection equal area diagram.....56

Figure 19. Structures in knickzones. A) Spatial distribution of shear zones, associated fractures with attitude in the lower hemisphere projection equal area diagram, and the position of photographs highlights. B and C) Shear zones with protomylonite foliation (Smi), lineation, and sigmoids. D and E) Structural alignments with the position of photographs highlight the Riedel shear system model for the studies of the structure.....57

Figure 20. Caves formed in sandstone of the Nhamundá Formation, related to ruptile shearing (Fortaleza das Águas). A) Conjugate shear zones and occurrence of potholes aligned with the structure oriented towards $356^{\circ}/60^{\circ}$, Riedel shear zones model. B and C) carves in sandstone. D and E) Deformation within the shear zone at the riverbed (Lajes). Schematic representation of shear conjugate zones and lower hemisphere projection equal area diagram.....58

Figure 21. Structures in the Princesinha do Urubuí waterfall of the Urubu River. A) Steps of reverse fault. B) Spatial relation to the occurrence of potholes vs fault. C) Fault highlights for the orientation of cross reverse fault tracks to the flow of river, fault steps or cascade, and attitude of fault (stereo net projection lower hemisphere, equal area with cyclographic plot of faults orientation and their striae -E attitude). C1)

Position of potholes and faults. C2) Steps by fault displacement forming the cascade.....60

Figure 22. Petrographic aspects of the Nhamundá sandstones. A and B) Fine-to-medium-grained quartzarenite and subarkoses sandstones with sub-rounded to sub-angular grains and moderate sorting. C) Detail of clay (C) and iron oxides/hydroxides (Fe) cement. Note the diagenetic iron oxides/hydroxides filling fractures and quartz (Q) embayment grains (arrow). D) Detail of syntaxial silica overgrowths (arrows) filling intergranular pores. A, B and D NX, C N//. P-plagioclase, F-potassium feldspar, M-muscovite, C-diagenetic clays.....61

Figure 23. Ruptile strain within the shear bands on Nhamundá sandstones in meso and micro-scale. A and B) Oriented sandstone sample, highlighting the cataclastic shear bands. Lower projection hemisphere inferior equal area diagram of shear bands in red. C) Photomicrographs of quartz arenite textures in shear bands (pointed line) in silt-grained matrix sandstone. Note a fracturing and reducing grain size is concentrated on shear bands. D) Detail of quartzarenite with fractured quartz grain associated with shear bands.....62

Figure 24. Deformation evidence on Nhamundá sandstones. A, B, C and D) Oriented sandstone sample with deformation related to the shear conjugate system in Mutum outcrop and schematic drawing of fragile-plastic strain mechanisms on SC foliation. E and F) Quartzarenite framework with fracture (black arrows), grain size reduction, rotation, undulate extinction (blue arrows), deformed silica cement boundaries (yellow arrows), and restricted stretching.....63

Figure 25. Potholes from the Urubuí knickzone. A and B) Aerial view and structural schematic drawing of riverbed ramps with potholes and transverse fracture (Fr) river direction at Urubuí rapid stream. C and D). Aerial view and structural schematic drawing of riverbed ramp at Urubuí outcrop. Potholes show the orientation major axis parallel to the attitude of the structures (dotted lines) highlighted in the diagram of the lower hemisphere projection equal area. E) Fractures controlling the axis of potholes and pressure relief fractures Urubuí outcrop. F) Associated karstic features (tafone) and fracture with pothole in Urubuí rapid stream.....64

Figure 26. Mutum waterfall histograms of the geometrical parameters (a, b, a/b, D, h, and D/h) measured for 27 potholes. N- the number of potholes; M- the arithmetic mean; Me- the median (the 50th percentile in the distribution); and Mo- the mode.....66

Figure 27. Evidence of the tectonic influence in the formation of potholes. A) Mutum potholes with geometry related to shear zones, with major axis (a) alignment with attitudes of SZ, showed at lower projection hemisphere diagram equal area. B) Structural schematic drawing of the conjugate shear system (SZ1).....66

Figure 28. 3D diagram block showing reverse faults ramps and their effects on the morphology of riverbeds in the knickzone formation of the Princesinha do Urubuí waterfall with potholes development.....69

Figura 29. Mapa de localização e geológico simplificado da porção sudoeste da proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas, com destaque para os principais locais de ocorrência das marmitas.....75

Figura 30. Características do substrato rochoso da Formação Nhamundá nos locais avaliados. A e B) Exposições de arenitos e delgadas intercalações de argilito na Corredeira das Lajes e Cachoeira Princesinha do Urubuí, respectivamente C) *Tafonis* desenvolvidos em superfícies verticalizadas de arenitos na Corredeira das Lajes. D) Alvéolos e marmitas em arenitos na Cachoeira do Mutum. E) Canelura conectada a bacia de dissolução na Corredeira do Mutum. F) Amoladores fixos subparalelos em forma de canoa na Corredeira das Lajes.....78

Figura 31. Marmitas da proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas. A e B) Fotografia aérea e panorâmica com destaque para as marmitas com aberturas circulares a elíptica. C) Marmita com abertura elíptica e borda suspensa (seta branca). D) Marmitas com abertura alongada desenvolvida ao longo de fratura (linha tracejada). E) Marmita com borda poligonal limitada por fraturas conjugadas (linha tracejada). Observe a base da marmita preenchida parcialmente com folhas. F) Exemplo de marmitas com borda reta. G) Marmita com bordas inclinadas (tipo poltrona). H) Destaque para marmitas com preservação de múltiplas bordas suspensas (seta branca). Cachoeira Princesinha do Urubuí (A), Cachoeira do Mutum (B, H), Corredeira das Lajes (C, D), Corredeira do Urubuí (E, F, G).....80

Figura 32. Histogramas dos parâmetros morfométricos de 123 marmitas avaliadas. (a/b) - razão da borda externa, (D/h) razão diâmetro-profundidade e; (b/h) - razão da forma lateral. N – número de feições medidas, M - média aritmética, Me - mediana, e Mo - moda (Mo).....82

Figura 33. Gráficos de dispersão com as relações entre o diâmetro médio e a profundidade (D/H) das marmitas com suas respectivas linhas de ajuste geral. A) Corredeira do Mutum (cor rosa). B) Corredeira das Lajes (cor verde). C) Corredeira do Urubuí (cor vermelho). D) Integração de todas as 123 feições analisadas (cor preta).....83

Figura 34. Distribuição dos dados de orientação do eixo principal/eixo maior (a) das marmitas em relação à direção do fluxo da drenagem local (indicado pela seta azul). A) Cachoeira do Mutum. B) Corredeira das Lajes. C) Corredeira da Urubuí.....84

Figura 35. Jacuzzis naturais da Cachoeira do Mutum e desenho esquemático do leito arenítico do Igarapé Barreto. Destaques para as fraturas preenchidas parcialmente com quartzo (setas) associadas a uma zona de cisalhamento que controlam o alargamento e aprofundamento das geoformas (em amarelo). Observe alvéolos associados às jacuzzis aturais.....87

Figura 36. Fases de evolução de marmitas para jacuzzis naturais da Cachoeira do Mutum, proposta GCA. Na fase 1 as escavações iniciais são favorecidas em anisotropias estruturais e na fase 2 ocorre a coalescência de marmitas em

geoformas maiores. Já na fase 3 o rebaixamento cíclico do lençol freático e anisotropias estruturais facilitam o processo de dissolução do substrato rochoso que leva ao aprofundamento e ampliação da geoforma.....89

Figura 37. Avaliação quantitativa dos pontos com marmitas da proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas em termos de valor científico, risco de degradação, bem como potenciais de uso e proteção científico, educativo e turístico. A análise permitiu classificar as cachoeiras do Mutum e Princesinha do Urubui, assim como a Corredeira do Urubuí como geossítios de relevância nacional. Por sua vez, a Corredeira das Lajes foi classificada como sítio da geodiversidade de relevância regional.....91

Figura 38. Atividades desenvolvidas com os guias de turismo residentes no território da proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas. A e B) Roda de conversa e curso sobre a geodiversidade local. C e D) Visita técnica nas feições cársticas da Formação Nhamundá.....94

Figura 39. Exemplo de painel interpretativo para uso sustentável de jacuzzis naturais na proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas para o geossítio Cachoeira do Mutum.....101

LISTA DE QUADROS/TABELAS

Quadro 1. Evolução da classificação e principais contribuições a respeito de marmitas/jacuzzis naturais em função da morfologia, característica do fluxo do rio e maturidade evolutiva.....41

Table 1. Arithmetic means of the geometrical parameters of Mutum waterfall potholes developed in sandstones of the Nhamundá Formation.....65

Tabela 2. Valores de média dos parâmetros morfométricos das marmitas obtidas nas exposições analisadas. n: número de medidas, a: eixo maior, b: eixo menor, D: diâmetro médio, h: profundidade, D/h: razão entre o diâmetro e a profundidade e R^2 : coeficiente de determinação.....81

SUMÁRIO

RESUMO	v
LISTA DE FIGURAS	vii
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 . JUSTIFICATIVAS	18
1.2. OBJETIVOS	19
CAPÍTULO 2. MÉTODOS.....	20
2.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA	20
2.2. ANÁLISE ESTRUTURAL	20
2.3. ANÁLISE SEDIMENTAR E MORFOMETRIA DAS MARMITAS	22
2.4. INVENTÁRIO, DIAGNÓSTICO SOCIAL E DIVULGAÇÃO DA GEODIVERSIDADE	23
CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
3.1. GEOLOGIA REGIONAL	25
3.1.1. Bacia Sedimentar do Amazonas	26
3.1.2. Formação Nhamundá (Landoveriano – Wenlockiano) no Geoparque Cachoeira do Amazonas (GCA)	28
3.2. NEOTECTÔNICA	30
3.3. O CARSTE, SISTEMA CÁRSTICO.....	33
3.3.2. Feições Exocársticas	37
3.3.3. Marmitas, Panelas e Bacias de Dissolução.....	38
3.4. CARSTES EM ARENITOS	42
3.6. PAINÉIS INTERPRETATIVOS	46
CAPÍTULO 4. ARTIGO EM REVISÃO NO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES	50
4.1. INTRODUCTION	50
4.2. GEOLOGICAL CONTEXT	53
4.3. METHODS	55
4.4. RESULTS	55
4.4.1. Tectonic Structures.....	55
4.4.2 Sandstone Petrography	59
4.4.3. Strain Mechanisms	61
4.4.4. Morphogenetic Process.....	63
4.4.5. Mutum Waterfall Potholes Geometrical Analyses	65
4.5. DISCUSSIONS	67

4.6. CONCLUSIONS	71
CAPÍTULO 5. ARTIGO SUBMETIDO A REVISTA GEONORTE.....	72
5.1. INTRODUÇÃO	73
5.2. MATERIAIS E MÉTODOS	76
5.2.1. Área de Estudo.....	77
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
5.3.1. Análise Morfométrica	78
5.3.2. Avaliação da Geodiversidade.....	90
5.3.3. Percepção da Geodiversidade por Guias de Turismo	93
5.3.4. Estratégia para Promoção das Marmitas	98
5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	101
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES.....	102
CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS	105

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

A geodiversidade é definida como a variedade de ambientes geológicos, fenômenos e processos ativos que dão origem a paisagens, minerais, fósseis, rochas, solos e outros depósitos superficiais essenciais para a manutenção e evolução da vida no nosso planeta (Stanley, 2000). A observação e análise da geodiversidade permitem desvendar a história da Terra, frequentemente relacionada à arte e cultura locais. Assim, torna-se vital a criação de políticas de preservação e conservação, garantindo que as futuras gerações também possam desfrutar patrimônio.

Em atendimento a preservação, gestão sustentável e promoção dos elementos da geodiversidade, a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO) criou o Programa Internacional de Geociências e Geoparques. Os Geoparques Mundiais da UNESCO (*UNESCO Global Geoparks*) são áreas geográficas unificadas, onde sítios e paisagens de relevância geológica internacional são administrados com base em um conceito holístico de proteção, educação e desenvolvimento sustentável. Sua abordagem ascendente que combina a conservação com desenvolvimento sustentável e que, ao mesmo tempo, envolve as comunidades locais, está se tornando cada vez mais popular (UNESCO, 2024). Uma das estratégias mais comuns para a implantação de um geoparque e consequentemente o desenvolvimento da economia local e do bem-estar social das comunidades, é a utilização do geoturismo combinados a práticas de uso sustentável do território e a valorização dos hábitos e sistemas socioculturais (Dowling, 2011; Lopes *et al.*, 2011; Silva Filho & Maracajá, 2019; Fleig *et al.*, 2022; Stolz & Megerle, 2022).

No estado do Amazonas, uma das áreas que se destaca pelo potencial geoturístico está localizada no município de Presidente Figueiredo, conhecido regionalmente como a “Terra das Cachoeiras” (Figura 1; Maia & Marmos, 2010). Esta área apresenta elementos da geodiversidade compostos de cachoeiras, corredeiras, grutas, cavernas e pequenos cânions de beleza cênica singulares, bem como de sítios geológicos e paleontológicos de interesse científico. Esse cenário natural é complementado pela presença de espécies endêmicas, como o Galo da Serra (*Rupicola rupicola*) e o uirapuru (*Cyphorhinus arada*), e por registros arqueológicos na forma de pinturas rupestres, cerâmicas e amoladores. Tais

elementos da geodiversidade apresentam grande potencial para promover e fomentar a economia local, especialmente turística, com a criação de atividades comerciais de apoio ao visitante, como por exemplo, guias turísticos, redes de hospedagem e artesanato com elementos da geodiversidade (Luzardo 2012).

Esse conjunto fez com que fosse proposta a criação de um território para conservação e promoção da geodiversidade chamado de Geoparque Cachoeiras do Amazonas, distante aproximadamente 107 km ao norte de Manaus, ocupando uma área de 24.781 km² e delimitado entre a linha do Equador, o paralelo 3°00'S e os meridianos 61°30'W e 58°30'W.

Dentre os 18 geossítios e seus 02 sítios da geodiversidade cadastrados no território, 11 deles abrangem feições cársticas e neotectônicas como marmitas (localmente chamada de jacuzzis naturais), cavernas, grutas e cachoeiras desenvolvidas em arenitos da Formação Nhamundá, o que evidencia a importância geoturística e socioeconômica da unidade geológica na proposta do GCA (Souza; Ribeiro, 2024). A Formação Nhamundá, pertencente ao Grupo Trombetas da Bacia do Amazonas, é composta por quartzo-arenito fino a grosso onde se destacam feições cársticas, intercalado com folhelho, siltito e diamictito, com registros de icnofósseis do tipo *Skolithos sp.* e *Arthropycus alleghaniensis*, produtos de um paleoambiente plataformar costeiro com influência glacial do Llandovery – Wenlok Inferior (Nogueira *et al.*, 1999; Soares *et al.*, 2005; Cunha *et al.*, 2007; Souza & Nogueira, 2009; Cuervo *et al.*, 2018).

Em especial, jacuzzis naturais encontradas em leitos de igarapés de arenitos da Formação Nhamundá, como por exemplo, na Cachoeira do Mutum e da Princesinha do Urubuí (Figura 1), têm ganhado destaque midiático e apresentam elevado potencial geoturístico devido suas grandes dimensões. As marmitas são geoformas circulares encontradas nos leitos rochosos dos rios formadas pelo movimento turbilhonar da água que sobrecava o substrato rochoso (Diaz, 2008, Twidale & Bourne, 2018). Na Cachoeira do Mutum, por exemplo, a avaliação geométrica das jacuzzis realizada por Souza *et al.*, (2019) revelaram feições com diâmetro que variam entre 0,90 a 3,77 m e profundidades que podem alcançar até 5,0 m, distribuídas em aproximadamente 10 estruturas cársticas que assumem formas circulares, elípticas e poligonais. Embora existam modelos amplamente conhecidos para formação das jacuzzis em leitos areníticos de rios juvenis

associadas a fluxos turbilhonares (Das, 2019; Ji, 2019; Sane *et al.*, 2020; Udomsak *et al.*, 2021; Singtuen & Junjue, 2022), os modelos exclusivamente hidrodinâmicos preexistentes ainda não explicam a geração dessas feições de grande escala, como as encontradas no GCA, e sua associação ou não, com a neotectônica, como proposto para feições cársticas em arenitos e formações ferríferas na Amazônia (Braga *et al.*, 2017; Freire *et al.*, 2017).

Essas feições geomorfológicas podem desempenhar um papel importante na conservação e promoção da geodiversidade local, fomentando o geoturismo e funcionando como atrativos naturais de grande valor cênico e educativo no território onde estão inseridas. No rio *Las Gachas* (Colômbia), por exemplo, os turistas são atraídos pelas piscinas naturais avermelhadas que se formam sobre a rocha, proporcionando uma experiência única de contato com a geodiversidade. As *Gnammas holes* ao sul da Austrália, são promovidas como elementos de valor científico e cultural, sendo associadas às tradições indígenas locais. No Brasil, destacam-se as marmitas isoladas e coloniais desenvolvidas no leito do rio Ingá (Paraíba), bem como o Lajedo Salambaia, uma formação composta por sieno a monzogranito caracterizada por bacias de dissolução métricas e rasas no Município de Boa Vista (Paraíba). A presença dessas feições no território do GCA, além de valorizar a geodiversidade local, também podem impulsionar o desenvolvimento sustentável da região por meio do geoturismo, contribuir para a conscientização ambiental, bem como o reconhecimento do patrimônio geológico de Presidente Figueiredo. Dessa forma, a promoção dessas formações naturais reforça os critérios exigidos pela UNESCO para a certificação do GCA como um geoparque mundial.

Uma vez que essas feições possuem um elevado potencial geoturístico para o GCA, que seu estudo pode contribuir com informações relacionadas à evolução geomorfológica da região e a processos de dissolução em terrenos não cársticos na Amazônia (Silva *et al.*, 2017; Paungya, *et al.*, 2020; Costa *et al.*, 2021), ou seja, processos ativos que moldam a geodiversidade local, também podem ser utilizadas de maneira sustentável através de elaboração de roteiros da geodiversidade envolvendo práticas interdisciplinares para geoconservação e geoturismo. Assim, é vital que essas informações sejam exploradas por produtos interpretativos e de divulgação, em concordância com os agentes políticos e sociais diretamente envolvidos, como por exemplo a Prefeitura Municipal, guias e Associação de Guias Turísticos (Silva *et al.*, 2021; Costa *et al.*, 2022; Garcia *et al.*, 2022), em linguagem

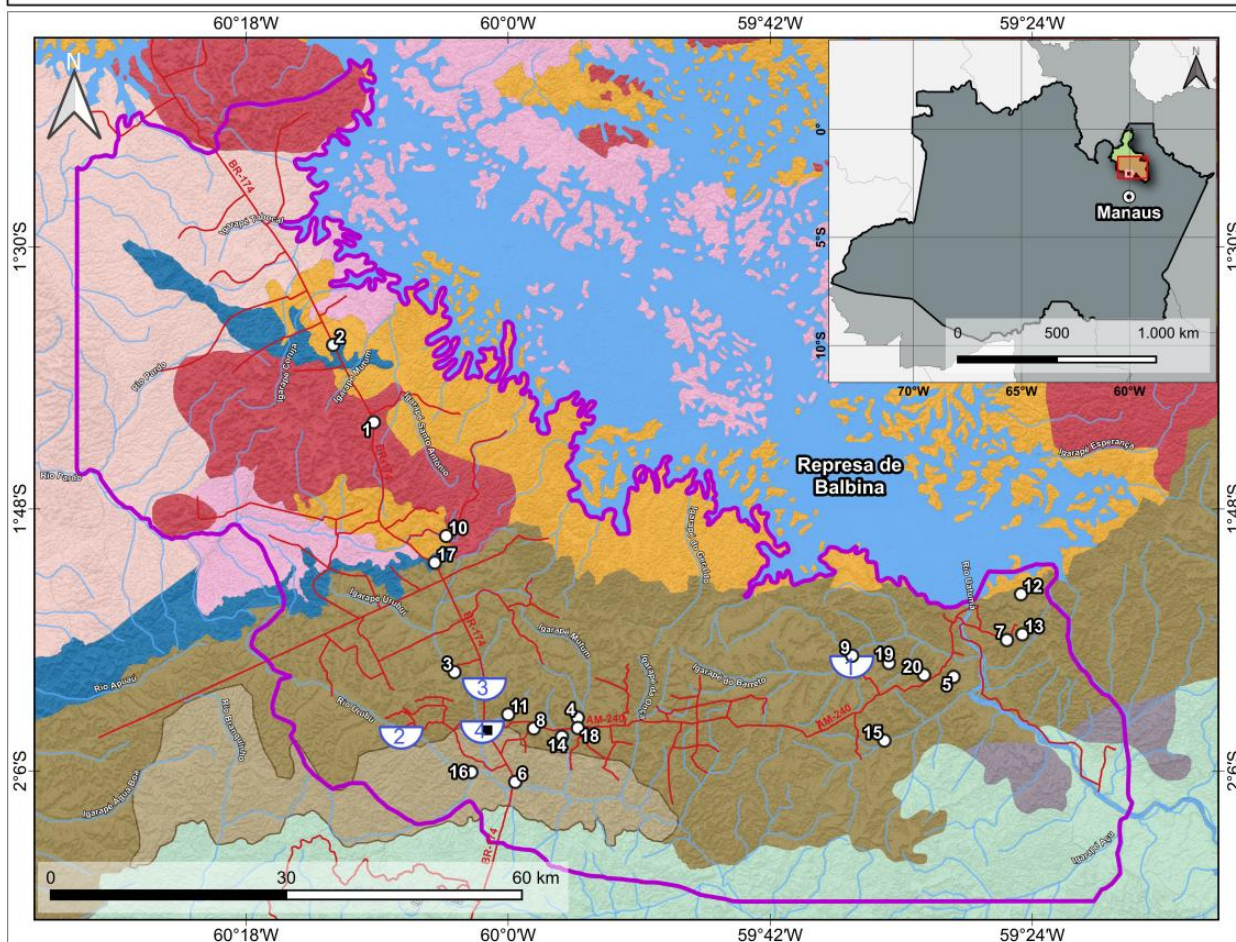
acessível e de ampla promoção do geoparque, tais como roteiros virtuais (Martin *et al.*, 2014; Pica *et al.*, 2018; González-Delgado *et al.*, 2020; Sperandio *et al.*, 2020; Guadagnin *et al.*, 2022), atualmente inexistentes no GCA.

Perante os dados expostos, este mestrado consiste na avaliação estrutural, sedimentar, geométrica e estatística de feições cársticas da Formação Nhamundá. Destaque será realizado para análise das jacuzzis naturais localizadas em 4 pontos ao longo dos igarapés Barreto, Santa Cruz e rio Urubu, que fazem parte da Bacia Hidrográfica do Rio Urubu (Figura 1), para sugerir modelos de gênese e evolução. Ademais, o mestrado pretende explorar essas informações através de um roteiro virtual da geodiversidade para divulgação, promoção e práticas de desenvolvimento sustentável para as pessoas inseridas e visitantes do território do GCA.

O presente texto de qualificação de mestrado está organizado em 6 capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, justificativas e metas da pesquisa, o Capítulo 2 versa sobre os métodos que serão empregados para que os objetivos inicialmente traçados sejam alcançados. Por sua vez, os Capítulos 3 e 4 reúnem a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento da pesquisa e os resultados preliminares da pesquisa, respectivamente. Já o Capítulo 5 exhibe o cronograma de atividades atualizado e os próximos passos para a conclusão da dissertação de mestrado, enquanto o Capítulo 6 destaca as principais referências consultadas na pesquisa.

Figura 1. Mapa de localização e geológico simplificado da área proposta para Geoparque Cachoeiras do Amazonas, com a indicação dos geossítios cadastrados e os pontos alvos desta pesquisa (adaptado de Luzardo, 2012).

Mapa Geológico da Proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas - GCA



Ponto	Nome
1	Embasamento Cristalino
2	Formação Prosperança
3	Cachoeira da Iracema
4	Cachoeira da Porteira
5	Cachoeira da Pedra Furada
6	Formação Manacapuru
7	Platô Laterítico
8	Gruta do Maroaga
9	Cachoeira do Mutum
10	Geossítio Cachieura Micade
11	Geossítio Cachoeira das Orquídeas
12	Geossítio Cachoeira Sussuarana
13	Geossítio Gruta do Batismo
14	Geossítio Cachoeira Berro D'água
15	Geossítio Cachoeira da Neblina
16	Geossítio Cachoeira Natal
17	Geossítio Perfil Laterítico da Formação Prosperança
18	Geossítio Perfil Laterítico da Formação Alter do Chão
19	Circuito Salto do Ipy (SG-1)
20	Circuito da Kyra (SG-2)

Escala: 1:760.000. Datum: SIRGAS 2000. Projeção Geográfica EPSG 4674. Fontes: ANA, Agência Nacional de Águas (2022); CPRM/SBGeo, Serviço Geológico do Brasil (2022); IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). QGIS 3.28.8 Firenze. Autora: Isabela Apoema (2025)

Legenda

- Sede Presidente Figueiredo
- Geossítios e Sítios da Geodiversidade
- Área de Estudo
- Represa de Balbina
- Drenagens
- Rodovias
- Perímetro da Proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas - GCA

Unidades Litoestratigráficas

- Formação Alter do Chão
- Formação Jatapú
- Formação Pitinga
- Formação Manacapuru
- Formação Nhamundá
- Formação Prosperança
- Suíte Intrusiva Mapuera
- Grupo Iricoumé
- Suíte Intrusiva Água Branca
- Complexo Jauaperi

Pontos com Jacuzzis Naturais

- 1 Cachoeira do Mutum
- 2 Cachoeira Princesinha do Urubuí
- 3 Corredeira das Lajes
- 4 Corredeira do Urubuí



1.1. JUSTIFICATIVAS

O estado do Amazonas apresenta um grande potencial para a prática do geoturismo que pode impactar de forma positiva na economia das comunidades locais, considerando as estruturas de hospedagem, alimentação, transportes, guias e outros serviços básicos associados (Maia & Marmos, 2010). De acordo com o Ministério do Turismo, no ano de 2022, dos 36.441 turistas que visitaram o estado no último trienal, mais de 70% das viagens foram motivados por práticas na natureza e ecoturismo (Brasil, 2022).

O Município de Presidente Figueiredo (AM) abriga um conjunto de feições cársticas em arenitos da Formação Nhamundá que representam uma das principais atrações para turistas que visitam o estado. A Caverna Refúgio do Maroaga, Gruta do Batismo, Gruta da Judeia, Cachoeira da Pedra Furada, Cachoeira de Iracema e jacuzzis naturais de grande escala são os exemplos mais famosos dessas feições que integram a Província Espeleológica Alto Urubu-Uatumã, uma das 20 províncias espeológicas mapeadas no Brasil (Karmann, 1986; Jansen *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2018; Reis *et al.*, 2020).

Apesar das feições cársticas representarem o principal atrativo turístico do GCA, serviços de guias locais exploram apenas isoladamente as características geológicas básicas e as belezas cênicas dos locais, o que impede o entendimento de parte da história evolutiva do relevo, marcada por eventos de magmatismo, transgressões marinhas, glaciações e deformações neotectônicas, esta última diretamente associada às cavernas, grutas, quedas d'água e cachoeiras do GCA (Nogueira & Sarges, 2001; Souza & Nogueira, 2009; Marques *et al.*, 2014). A carência de roteiros geoturísticos com destaque para os carstes dificulta a compreensão dos elementos da geodiversidade relacionados ao próprio GCA, vitais para o reconhecimento e conservação do patrimônio geológico para as gerações futuras. Entretanto, para a proposição de roteiros com destaque nos carstes é essencial à compreensão da geoforma, além da participação ativa e colaboração dos principais interessados e agentes de transformação incluídas do território do GCA (Santos & Bacci, 2019; Pinto *et al.*, 2023; Santos *et al.*, 2023).

Em especial, para as jacuzzis naturais de grande escala, expostas exclusivamente na estação de estiagem da região, entre os meses de agosto a novembro (Oliveira *et al.*, 2022), apenas análises morfométricas e geométricas foram

realizadas sem se atentar para informações quanto à origem e evolução. Ademais, nunca foi realizada uma correlação dessas feições cársticas com anisotropias naturais da rocha e uma análise estatística (Ji *et al.*, 2018, 2019) que poderiam gerar respostas para as dimensões constatadas nas jacuzzis. Assim, uma das maneiras para a aplicação de políticas de manejo sustentável e promoção da geodiversidade do GCA é a criação dos roteiros virtuais que promovam as práticas de geodiversidade, geoturismo e geoconservação com os atores sociais e visitantes, que possibilitem trocas de experiências, novas sensações e significados ao local, em concordância com as diretrizes para oficialização do selo Geoparque UNESCO (Raeisi *et al.*, 2022; Fusté-Forné, 2023; Leite *et al.*, 2023; Menin & Bacci 2023).

A pesquisa em questão está vinculada ao subprojeto “Entre Pedras e Mergulhos” inserida no “Projeto Consolidação da Pós-Graduação da Universidade Federal do Amazonas em Áreas Estratégicas”, referente ao Edital Capes “Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (PDPG – Amazônia Legal)”.

1.2. OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa são propor a origem, formação e evolução de feições cársticas desenvolvidas nas rochas siliciclásticas da Formação Nhamundá, com destaque para as marmitas ou jacuzzis naturais que ocorrem ao longo dos igarapés Barreto, Santa Cruz e rio Urubu e que fazem parte da Bacia Hidrográfica do Rio Urubu. Como objetivos específicos, pretendem-se caracterizar o contexto estrutural, as fácies sedimentares e as feições cársticas na tentativa de estabelecer a correlação com anisotropias estruturais. Além disso, explorar essas informações através de um roteiro virtual da geodiversidade para divulgação, promoção e práticas de desenvolvimento sustentável para as pessoas inseridas no território da Proposta de Geoparque Cachoeiras do Amazonas – GCA.

CAPÍTULO 2. MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos para desenvolver esta pesquisa de mestrado e alcançar os objetivos propostos consistiram em: pesquisa bibliográfica, análise estrutural, análise sedimentar, aprendizagem social, inventário e divulgação da geodiversidade.

2.1. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Consistiu na pesquisa, consulta e fichamento de artigos, revistas nacionais e internacionais, base de dados de repositórios e livros a respeito do contexto geológico regional, estratigráfico, estrutural e sedimentar na área delimitada pela proposta GCA. A pesquisa bibliográfica também se concentrou nos métodos utilizados, bem como no processamento e interpretação de imagens a partir de Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (RPAS), de dados estruturais, faciológicos, petrográficos, estatísticos e de feições cársticas em arenitos.

2.2. ANÁLISE ESTRUTURAL

Esse procedimento metodológico foi realizado em duas escalas de trabalho: i) a primeira em macroescala para reconhecimento de lineamentos morfológicos como resultado da integração do alinhamento de vales e de serras, truncamento de relevos produtos do processamento digital de imagens de sensores remotos de modo a destacar estruturas correlacionando esta informação com cartas geológicas a escala regional da área de estudo; ii) a segunda, em nível de afloramento com o objetivo de constatar se as feições cársticas, em especial as jacuzzis naturais, são controladas por estruturas tectônicas. Em macroescala a análise estrutural foi iniciada com a seleção, processamento, análise e interpretação de produtos digitais do sensor remoto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) como modelos digitais do relevo, elevação e superfície (MDT, MDE e MDS) com a utilização do *software* QGIS 3.28.8 *Firenze*, ambos com resolução espacial de 30 m, disponibilizados gratuitamente no site da *United States Geological Survey* (USGS).

Para ressaltar e facilitar a extração de lineamentos da área de interesse foi selecionado o modelo digital de elevação (MDE) e aplicada à ferramenta *hillshade* para geração de sombreamentos do relevo em quatro direções preferenciais de incidência solar: N-S, E-W, NE-SW e NW-SE (Batista *et al.*, 2014; Das *et al.*, 2018). Esse procedimento permitirá correlacionar feições de relevo como cristas de serra,

quebras de relevo, padrões de drenagens, vales encaixados, além de contraste tonal e de cobertura vegetal com lineamentos estruturais inferidos (Santos *et al.*, 2014; Silva & Maia, 2017). A obtenção das orientações dos lineamentos permitirá determinar o contexto estrutural regional através dos principais *trends* e eixos dos tensores (Hancock & Engelder, 1989; Neto *et al.*, 2018; Silva & Bricalli, 2023) e assim, se as feições cársticas estão sendo controladas por estruturas tectônicas, mas não necessariamente caracterizar essa deformação. Além disso, o processamento e interpretação de produtos de sensores remotos também darão origem a mapas temáticos, por exemplo: relevo, hidrográfico, estrutural, de pontos, que alimentarão o roteiro virtual da geodiversidade a ser criado.

A análise em macro escala foi complementada com avaliações em nível de afloramento de exposições da Formação Nhamundá associadas com feições cársticas de interesse, especialmente as jacuzzis naturais de grande escala. A aquisição das informações estruturais *in situ* subdividiu-se em: **a) análise geométrica:** consiste na identificação de estruturas planares e lineares, a medida da orientação (*strike/dip*), descrição do tipo de estrutura, continuidade espacial mediante perfis transversais à atitude, largura e caracterização da deformação associada (rúptil, plástica); **b) análise cinemática:** inclui a identificação de indicadores de movimento relacionados ao registro da deformação, como o plano de deformação XY e XZ e medida da orientação do eixo de maior deformação e o sentido de deslocamento (Fossen, 2017). Para complementar a análise estrutural foram coletadas amostras orientadas do arenito visando confeccionar lâminas delgadas para análises de microtexturas e de *strain* (Passchier & Trouw, 2005). A informação foi complementada com o registro fotográfico das estruturas e desenhos interpretativos de modo a destacar as evidências dos tipos estruturas e de deformação. A obtenção das atitudes geológicas foi efetuada usando bússola geológica modelo *Brunton*. Para o processamento de dados vetoriais (atitude de estruturas) foi utilizado o programa *Stereonet v. 11* (Richard & Allmendinger, 2020) o qual também gera diagrama projeção hemisfério inferior de igual área. A organização de dados foi realizada em tabelas em *Excel*. Este processo visa quantificar e qualificar o regime de esforços tectônicos regionais (Almeida-Filho *et al.*, 2010; Ibanez *et al.*, 2014), além de testar a hipótese de correlação entre os lineamentos estruturais inferidos em macroescala, com os obtidos em afloramento e a sua influência no desenvolvimento de feições cársticas analisadas.

2.3. ANÁLISE SEDIMENTAR E MORFOMETRIA DAS MARMITAS

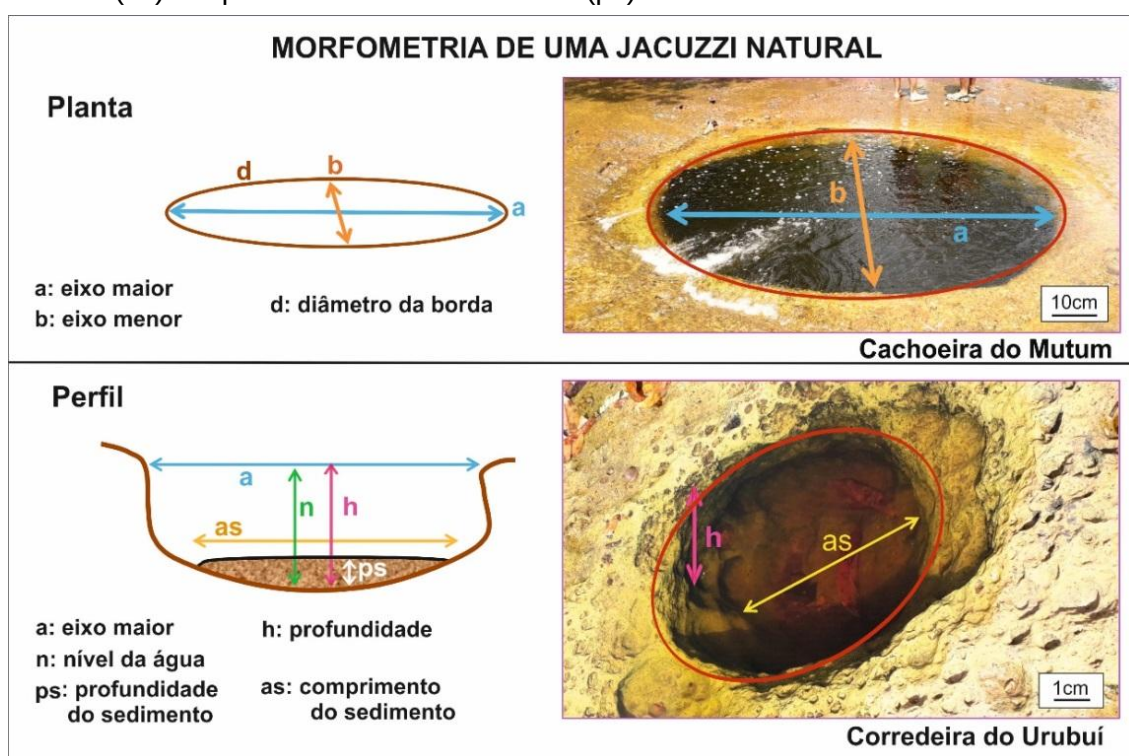
A análise sedimentar foi concentrada em afloramentos da Formação Nhamundá ao longo de igarapés com ocorrência de jacuzzis naturais na área proposta do GCA. No sentido de complementar as observações faciológicas, foram coletadas 08 amostras de arenitos relacionados com as jacuzzis naturais para análise petrográfica. Assim, as amostras foram cortadas em blocos perpendicularmente à estratificação resultando 10 blocos em função de duplicação de uma amostra iniciais. Posteriormente as amostras foram resinadas, destinadas para o Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA) e resultaram em 10 lâminas delgadas de arenito para avaliação qualitativa e quantitativa dos elementos do arcabouço para averiguar fatores indutores do processo de carstificação na Formação Nhamundá (Folk, 1980; Adams *et al.*, 1984; Worden & Burley, 2003; Weltje, 2004). As feições do arcabouço dos arenitos foram avaliadas e registradas digitalmente com o uso do microscópio petrográfico modelo *Olympus cx31* lotado no Laboratório de Microscopia do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

Destaque foi dado para as feições cársticas avaliadas nos trechos dos igarapés do Barreto, Santa Cruz e Rio Urubu, como por exemplo, alvéolos, bacias de dissolução, jacuzzis naturais/marmitas e *tafonis* em arenitos da Formação Nhamundá, descritas de acordo com a proposta de Lorenc *et al.*, (1994), Campbell (1997) e Klimchouk (2018). Esses autores levam em consideração algumas características para classificação do tipo de feição cárstica, como por exemplo, o tipo de rocha, a superfície de ocorrência, a forma das bordas, dimensões (largura, comprimento, profundidade), presença de sedimentos, estruturas internas e externas.

Em especial, nas marmitas e jacuzzis naturais de grande escala, foi procedida uma caracterização geométrica de cada feição individual considerando-as análogas a um cilindro elíptico com seção transversal posicionado em uma superfície de eixo maior (a), eixo menor (b) e profundidade (h), ambas perpendiculares (Figura 2). A obtenção do comprimento dos eixos a e b foram realizadas com uma trena retrátil de 10 m, enquanto a profundidade h com a utilização de uma corda não elástica graduada anexada a um plumo de ferro fundido de 400 g. Os dados geomórficos

foram organizados em tabelas e utilizados para uma análise estatística conforme Ji *et al.*, (2019), que utilizou o aspecto do raio e o diâmetro médio (D) das feições iguais a a/b e $\sqrt{ab}$, respectivamente, além da razão diâmetro-profundidade (D/h), como importantes parâmetros para caracterização geomórfica e evolutiva das marmitas por apresentarem uma relação aproximadamente linear. Ademais, o processamento dos dados estatísticos e confecção de gráficos foi realizado através do programa *RStudio* versão 2023.06.0 (Battist *et al.*, 2019; R core team, 2023).

Figura 2. Principais elementos morfométricos de marmitas com exemplos encontradas na proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas. Em planta, a obtenção dos dados geométricos é realizada a partir dos comprimentos do eixo maior (a) e menor (b), enquanto que em perfil são medidos a profundidade (h), o nível da água (n), o comprimento de sedimento (as) e a profundidade do sedimento (ps).



2.4. INVENTÁRIO, DIAGNÓSTICO SOCIAL E DIVULGAÇÃO DA GEODIVERSIDADE

Para a obtenção de informações relevantes para o diagnóstico sobre geodiversidade foram organizadas atividades com um dos principais atores sociais (guias de turismo) inseridos na proposta GCA através da promoção e condução de diálogos (Oliveira *et al.*, 2019). Essa abordagem foi adotada para nortear os diálogos (Jacobi *et al.*, 2011) com a promoção de um espaço seguro e confortável para a troca de ideias entre os atores sociais a respeito da geodiversidade local, em

especial, sobre a existência e relevância científica, educacional e turística das marmittas/jacuzzis naturais.

O diagnóstico foi concentrado nos guias de turismo da Associação de Guias de Selva (AGUIAS), no entanto outros atores sociais do GCA, que incluem funcionários do poder público e educadores locais, foram convidados para as atividades. A iniciativa incluiu uma roda de conversa, em um espaço aberto e colaborativo para argumentação dos temas apresentados, um curso sobre a geodiversidade local e sobre o sistema cárstico, bem como uma visita técnica nas geoformas de interesse. A estratégia adotada permitiu a troca de experiências, conhecimentos, preocupações, projetos futuros e demandas entre os participantes.

As informações coletadas foram utilizadas para traçar o estado da arte sobre a geodiversidade cárstica local, obter informações relevantes sobre as potencialidades científica, educacional e turística, bem como a proposição de estratégias para a utilização e promoção sustentável dos sítios que apresentam essas feições.

Por sua vez, a inventariação da geodiversidade foi concentrada em localidades de ocorrências das jacuzzis naturais avaliadas nessa pesquisa por meio de métodos qualitativos e quantitativos. A avaliação qualitativa envolveu a caracterização prévia dos elementos da geodiversidade das feições de interesse em documentos disponíveis e visita *in loco*, seguido do preenchimento de formulários qualitativos com foco no geoturismo como os descritos nas pesquisas de Alves *et al.*, (2020), Silva *et al.*, (2021; 2022) e Henriques & Alves (2023).

A avaliação quantitativa da plataforma GEOSSIT (Sistema de Cadastro e Quantificação de Geossítios e Sítios da Geodiversidade) do Serviço Geológico do Brasil (SBG). O GEOSSIT é um aplicativo que padroniza o cadastramento de sítios geológicos do Brasil com alvo de definir um banco de dados do patrimônio geológico nacional. Para isso, o aplicativo inventaria, qualifica e avalia quantitativamente geossítios e de sítios da geodiversidade por meio de tabelas com critérios e atribuições de notas nos quesitos: científico, risco de degradação, potencial de uso educativo e turístico, prioridade de proteção, classificação e recomendação de uso sustentável das localidades (Brilha, 2005; 2016; Garcia-Cortés & Urquí, 2013; Romão & Garcia, 2017). Assim, as médias dos valores das notas de cada quesito da localidade selecionada determinarão a sua classificação e relevância nos âmbitos internacional (> 300), nacional (entre 200 e 299) ou regional (< 199), bem como as

prioridades para medidas de proteção e preservação devido a atividades didáticas, turísticas e científicas.

Os dados obtidos foram organizados digitalmente para elaborar painéis interpretativos da geodiversidade, com ênfase nos locais de ocorrência das jacuzzis naturais.. De forma complementar, foi realizado o imageamento aéreo dos locais de interesse por meio de um veículo aéreo não tripulado (VANT) para a produção de ortomosaicos de acordo com a proposta de Navarrete *et al.*, (2023). Assim, foi utilizado o VANT quadricóptero da marca *DJI Mavic 2 Pro*, equipado com câmera de 12,4 megapixels e com receptor GPS do tipo Glonass. As imagens foram registradas com a câmera modelo megapx FC3411, em voos com altitude entre 10-30 m e sobreposição de imagens longitudinal e lateral entre 60% e 80%. Por sua vez, para a geração dos mosaicos foi utilizado o programa *Agisoft Metashape Professional*, que envolve as etapas essenciais: *Alignment*, *Dense cloud*, *Mesh*, *Texture* e *Orthomosaic* para criar um modelo tridimensional preciso e realista da área imageada (Júnior & Gomes, 2022, Navarrete *et al.*, 2023).

CAPÍTULO 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar ao leitor a contextualização geológica, tectônica e estratigráfica do território da proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas (GCA), concentrada na unidade sedimentar onde ocorrem as jacuzzis naturais, bem como expor informações a respeito de feições cársticas e processo de carstificação em arenitos, alvos da investigação desta pesquisa.

3.1. GEOLOGIA REGIONAL

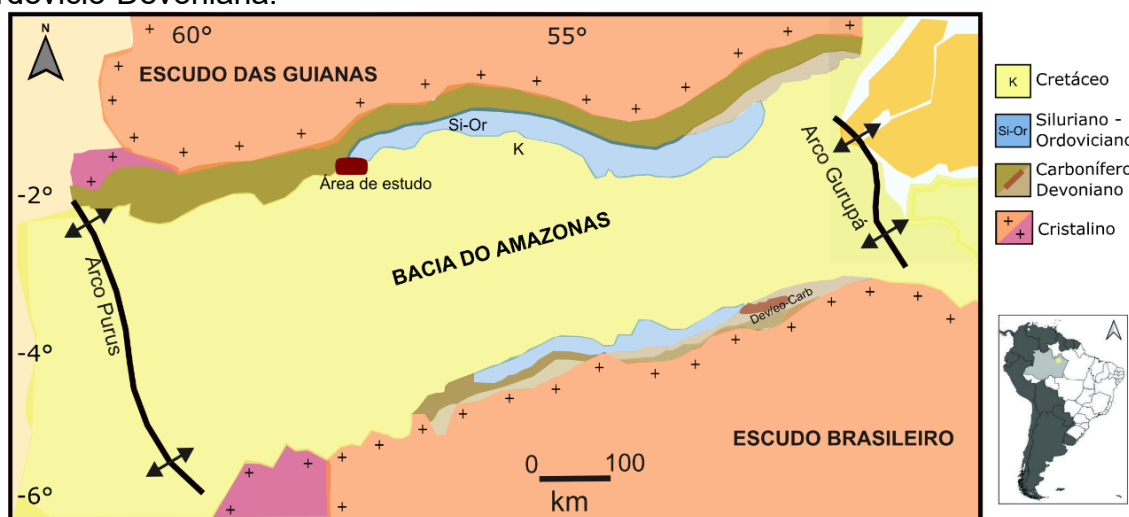
O perímetro da área proposta do GCA está situado no limite de duas unidades geotectônicas representadas pelo embasamento cristalino do sul do Escudo das Guianas e a faixa de exposição norte de unidades sedimentares da Bacia do Amazonas (Figura 3). Enquanto o embasamento cristalino reúne majoritariamente rochas ígneas e metamórficas de idade proterozoica, na faixa norte da Bacia do Amazonas está registrada parte da sequência ordovício-devoniana e cretácea, representadas predominantemente por rochas de natureza siliciclásticas. Nesta pesquisa, o principal foco será a Formação Nhamundá, do Grupo Trombetas, unidade geológica onde ocorrem as marmitas.

3.1.1. Bacia Sedimentar do Amazonas

A Bacia do Amazonas é uma unidade sedimentar intracratônica com aproximadamente 500.000 km² de área superficial, situada na região norte do Brasil, principalmente nos estados do Amazonas e Pará, limitada no eixo norte-sul pelo Escudo das Guianas e Brasil Central, respectivamente. Por sua vez, no segmento leste-oeste os limites da bacia são indicados pelo Arco de Gurupá, que a limita da bacia tafrogênica do Marajó, e o Arco Purus, que a separa da Bacia do Solimões (Figura 3; Cunha *et al.*, 2007; Souza & Nogueira 2009).

A origem da Bacia do Amazonas está ligada a dispersão de esforços tectônicos durante o fechamento do Ciclo Brasileiro (aproximadamente 510 Ma), que originaram riftes com orientação NW-SE e NE-SW e deram início a sedimentação predominantemente siliciclástica (Costa *et al.*, 2001; Cunha *et al.*, 2007). No entanto, segundo Cunha *et al.* (2007) a sedimentação pré-cambriana nos riftes primordiais que originaram a bacia, representadas pelas formações Prosperança e Acari e reunidas no Grupo Purus, correspondem a uma sedimentação anterior ao processo de sinéclise, assim são considerados como parte do embasamento sedimentar da bacia.

Figura 3. Contexto geológico simplificado da Bacia do Amazonas. A bacia é limitada no eixo E-W pelos arcos estruturais Purus e Gurupá, enquanto no eixo N-S pelos escudos das Guianas e Brasileiro. A área de estudo está localizada na borda norte da bacia e compreende exclusivamente unidades sedimentares da Sequência Ordovício-Devoniana.



Fonte: Adaptado de Wanderley Filho *et al.* (2005).

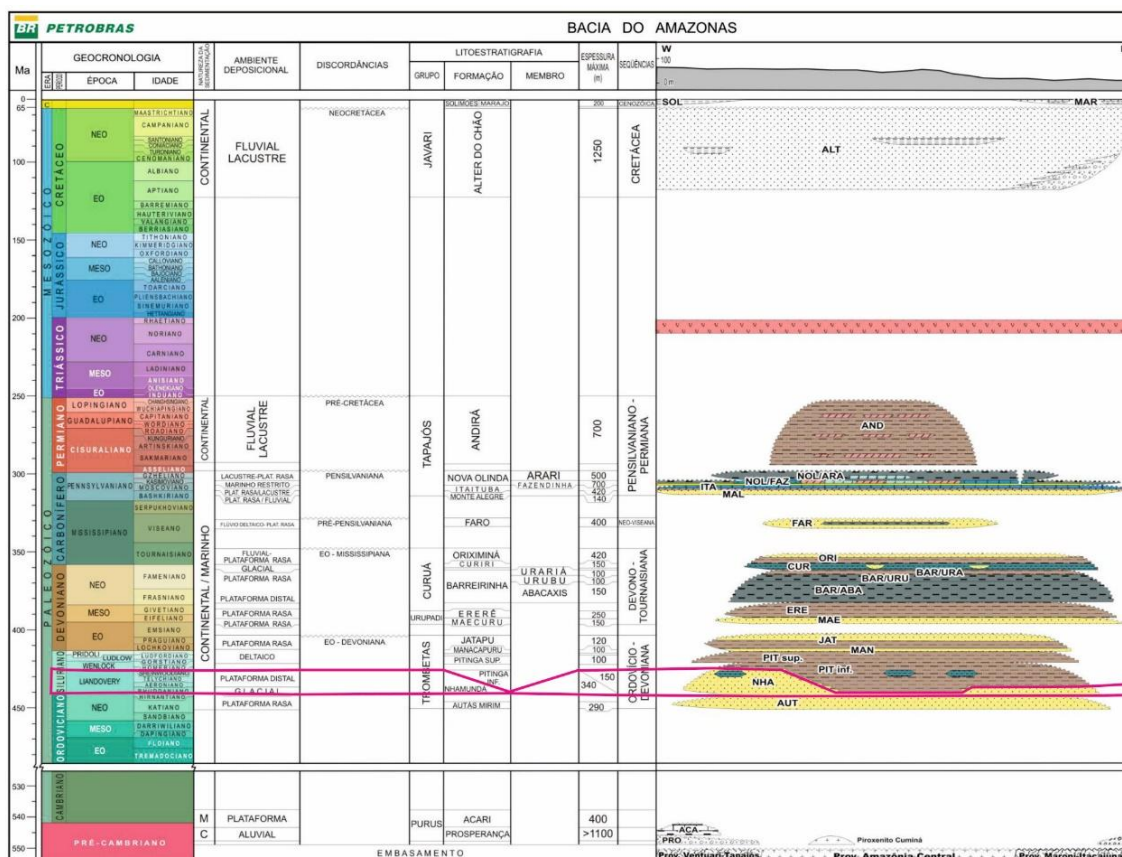
O arcabouço estratigráfico da Bacia do Amazonas é organizado em duas megassequências de 1ª ordem, a Paleozoica e a Mesozoica-Cenozoica, que em

conjunto totalizam cerca de 5 mil metros de preenchimento sedimentar e vulcânico (Figura 4). A Megassequência Paleozoica é constituída por uma associação de rochas sedimentares intercaladas/intrudidas por um grande volume de diques e soleiras de diabásio com idade mesozoica, organizadas em quatro sequência de 2ª ordem: 1) Sequência Ordovício-Devoniana (Grupo Trombetas), 2) Sequência Devono-Tournaisiana (grupos Urupadi e Curuá), 3) Sequência Neoviseana (Formação Faro) e 4) Sequência Pensilvaniano-Permiana (Grupo Tapajós).

Todas as sequências de 2ª ordem são delimitadas por hiatos e lacunas significativas da sedimentação, decorrentes dos eventos glácio-tectônicos atuantes nas bordas da Placa Gondwânica, retratadas pelas expressivas discordâncias regionais que as separam (Cunha *et al.*, 2007; Wanderley Filho *et al.*, 2005). O Grupo Trombetas, pertencente à Sequência Ordovício-Devoniana, será destacado nesta pesquisa devido à ocorrência das marmitas fluviais na Formação Nhamundá, que compõe essa unidade.

A sequência Sequência Ordovício-Devoniana (Grupo Trombetas), representa o início da sedimentação na Bacia do Amazonas e está organizada em 5 formações: rochas de ambiência glacio-marinhas das formações Autás Mirim (arenitos e folhelhos neríticos de idade neo-ordoviciana), Nhamundá (arenitos neríticos e diamictitos eossilurianos), alvo da pesquisa deste mestrado, Pitinga (folhelhos e diamictitos silurianos), Manacapuru (arenitos e pelitos neríticos com idades do neossiluriana a eodevoniana) e Jatapu (arenitos e siltitos parálicos eodevonianos) (Cunha *et al.*, 2007; Wanderley Filho *et al.*, 2005).

Figura 4. Carta estratigráfica da Bacia Sedimentar do Amazonas com a distribuição das cinco sequências de 2ª ordem e destaque para a unidade sedimentar alvo desta pesquisa, representada por arenitos silurianos da Formação Nhamundá.



Fonte: Cunha et al. (2007).

3.1.2. Formação Nhamundá (Landroveriano – Wenlockiano) no Geoparque Cachoeira do Amazonas (GCA)

A Formação Nhamundá foi descrita pela primeira vez por Derby (1879), denominando-a como “Grés do Trombetas” ao analisar rochas aflorantes nas cachoeiras Vira-Mundo e Porteira, situadas no médio curso do rio Trombetas, Município de Oriximiná (PA). A unidade foi posicionada no Siluriano Inferior com base na ocorrência do icnofóssil *Arthropycus harlani* em suas exposições. Após uma correlação bioestratigráfica com Andar Niágara nos Estados Unidos com base em gastrópodes, Clarke (1899) propôs a denominação de Série Trombetas para esses estratos.

A denominação Série Trombetas evoluiu litoestratigraficamente para Grupo Trombetas através de análises e investigações pioneiras na região amazônica concentradas em dados de afloramentos e, posteriormente, apoiados por informações de subsuperfície, com as contribuições de Albuquerque (1922), Breitbach (1957), Ludwig (1964), Lange (1967), Caputo & Vasconcelos (1971), Caputo (1972) e Caputo (1984). Posteriormente, Cunha et al., (1994; 2007) estabeleceram a classificação litoestratigráfica mais atual, subdividindo o então

Grupo Trombetas nas formações Autás-Mirim, Nhamundá, Pitinga, Manacapuru e Jatapu.

Posicionada na porção basal da sequência transgressiva-regressiva Ordovício-Devoniana, a Formação Nhamundá aflora predominantemente na porção oeste da Bacia do Amazonas e possui estratos que alcançam até 340 metros em poços estratigráficos da Petrobrás (1-AM-1-AM) (Lange, 1967). A área tipo da unidade situa-se ao longo do rio Nhamundá, tributário do rio Amazonas, na região limítrofe dos estados do Amazonas e Pará (Grahn & Paris, 1992). A unidade sedimentar está depositada erosivamente sobre arenitos da Formação Autás-Mirim e são recobertos concordantemente por folhelhos transgressivos da Formação Pitinga (Cunha *et al.*, 2007).

No contexto geológico do GCA, destaca-se como a unidade geológica mais extensa em superfície, aflorando principalmente ao longo de rodovias, bem como nas margens rochosas das drenagens e, em determinadas localidades, a espessura das camadas alcança aproximadamente 450 metros (Souza *et al.*, 2009; Luzardo, 2012). Os litotipos da Formação Nhamundá em Presidente Figueiredo (AM) são estritamente de natureza siliclástica com predominância de arenitos e localmente pelitos, folhelhos e diamictitos. As principais estruturas sedimentares em arenitos e pelitos são representadas por maciça, laminação planar, cruzada cavalgante, marcas onduladas simétricas e estratificação cruzada *hummocky*, enquanto os diamictitos podem desenvolver estruturas como falhas, fraturas, foliação, cavalgamento de estratos, blocos inclinados e boudinagem destacados por *pods* de arenitos imersos e matriz siltica-argilosa (Soares *et al.*, 2005; Cuervo *et al.*, 2018).

O conteúdo fossilífero macroscópico constatado na Formação Nhamundá são predominantemente representados por icnofósseis de invertebrados marinhos como, por exemplo, da icnofácies *Skolithos* e *Arthropycus alleghaniensis*, o último preservado especialmente na forma de contramolde na interface de camadas arenosas e argilosas (Silva, 2015). Entretanto, investigações realizadas por Cardoso (2005) no conteúdo palinológico a partir de folhelhos indicou grãos de acritárcos datados no intervalo entre o Landoveriano e o Wenlockiano Inferior. Por outro lado, dados palinológicos interpretados por Cuervo *et al.*, (2018) em diamictitos, composto por miosporos e acritarcos simples, permitiram datar os depósitos glaciais no Llandoveryano Médio-Tardio, compatível os dados bioestratigráficos de Grahn & Caputo (1992) e Caputo *et al.*, (1998) e idade admitida para a unidade.

Análises faciológicas em afloramentos situados no GCA realizados por Soares *et al.*, (2005) permitiram a identificação de fácies sedimentares não deformadas e deformadas englobados em um paleoambiente costeiro com influência glacial. Desta forma, a evolução paleoambiental admitida para a Formação Nhamundá pode ser dividida em três fases: i) implantação de um sistema costeiro com ondas de tempestade; ii) recuo do nível do mar devido a expansão da geleira em direção a costa gerando fácies sedimentares deformadas glaciotectonicamente e, iii) retração da geleira e implantação de ambientes costeiros mais próximos da antepraia, representada pelas fácies não-deformadas (Nogueira *et al.*, 1997; 1999).

3.2. NEOTECTÔNICA

A pesquisa de Sternberg (1950) foi uma das pioneiras em observar as relações de paralelismo entre as principais drenagens amazônicas e vales encaixados em grandes lineamentos de caráter regional e interpretá-los como resultado de um evento tectônico recente. Avaliações posteriores através de produtos de sensoriamento remoto permitiram a identificação de outras feições geomorfológicas, tais como cristas de serras alinhadas, rios com foz afogadas, lagos retilíneos, bem como horizontes lateríticos deslocados e falhados, que contribuíam com as interpretações de Sternberg e as reuniram em um evento chamado de Neotectônica (Costa *et al.*, 2001; Latrubesse & Franzinelli, 2002; Igreja, 2012).

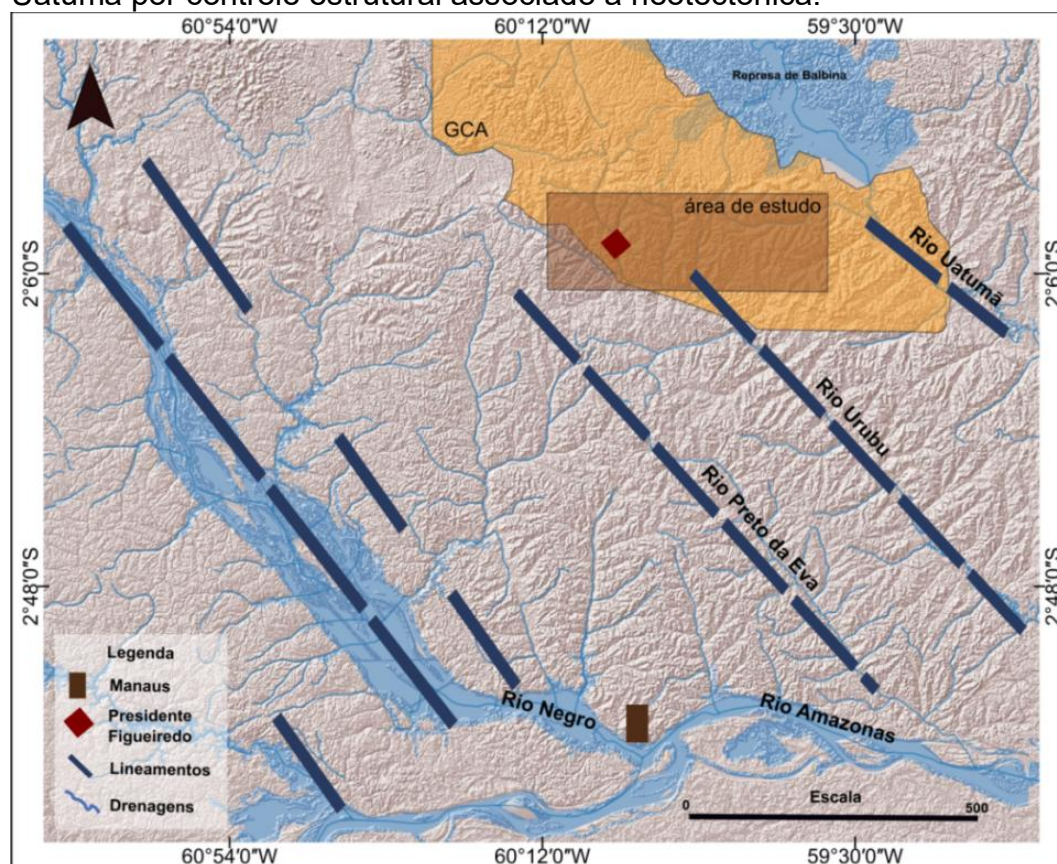
A Neotectônica originalmente se referia ao "mais recente movimento crustal da Terra desde o final do Neogeno até a primeira metade do Quaternário" (Cheng & Yang, 2008; Pavlides, 1989). No entanto, a palavra neotectônica refere-se ao "processo de movimento ou tectônica crustal mais jovem, mais recente ou ainda em curso", ou seja, os processos tectônicos mais recentes da história geológica. Por conseguinte, este termo não especifica um período ou limite no tempo (Wu & Hu, 2019). Nesta pesquisa, este termo será aplicado a evidências de processos deformacionais e da evolução geomorfológica recente da área de estudo.

Esses aspectos foram inicialmente abordados por Freitas (1951) em sua discussão sobre a tectônica moderna do Brasil, baseado em dados geológicos e geomorfológicos. Posteriormente Saadi (1993, 2002), exploraram o controle tectônico da Bacia do Amazonas pela interação dinâmica das placas de Nazca e Sul-Americana. A evolução geológica da Bacia do Amazonas, segundo Wanderley Filho & Costa (1991), experimentou quatro episódios tectônicos: i) distensão e

intrusão de diques de dolerito do Jurássico; ii) propagação de falhas transcorrentes; iii) distensão com deposição das sequencias fluviais da Formação Alter do Chão; iv) no Mioceno, deformação das sequencias sedimentares com domínios transpressivos.

Para Travassos & Barbosa Filho (1990), as rochas da Bacia do Amazonas, na região de Manaus, teriam experimentado deformação no cenozoico relacionado à tectônica transpressiva. Na área de estudo, efeitos de deformação neotectônica podem ser constatados em perfis lateríticos deslocados por falhas normais na Formação Nhamundá e pela formação de uma rede de drenagem em treliça, com vales alinhados (rios Baixo Rio Negro, Puraquecuara, Uatumá, Rio Preto da Eva e Urubu, Figura 5), paralelos ao trend NW-SE de falhas normais, associadas a estruturas transcorrentes, que resultaram de uma reativação tectônica recente (Costa *et al.*, 2001; Franzinelli & Igreja, 2002).

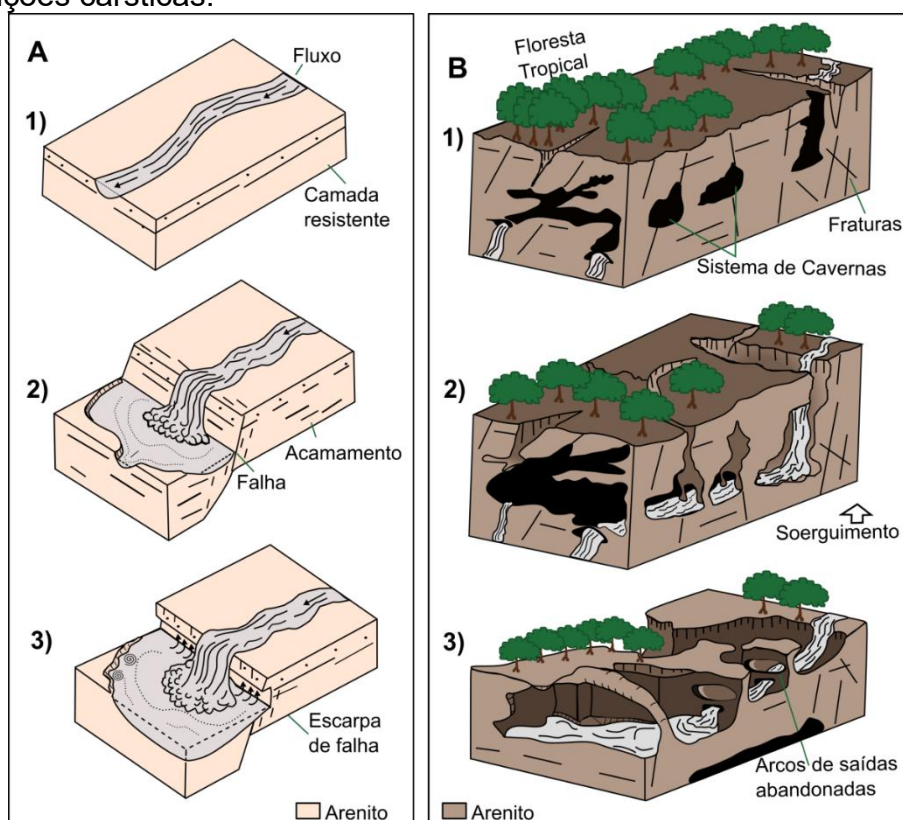
Figura 5. Padrão de drenagem em treliça nas principais afluentes da margem esquerda do rio Amazonas na região de Manaus. Vales alinhados com direção NW-SE (linhas tracejadas) no trecho do baixo rio Negro e rios Urubu, Preto da Eva e Uatumã por controle estrutural associado à neotectônica.



Fonte: Adaptado de Franzinelli e Igreja (2002).

Os rios Urubu e Uatumã são os principais cursos d'água da bacia hidrográfica do GCA e fluem principalmente para sudeste (Figura 6). Seu padrão dendrítico a subdendrítico, com disposição paralela dos cursos d'água, se concentra nos lineamentos regionais e em alguns segmentos entrincheirados dentro de falhas, desenvolvendo localmente anomalias do tipo na direção do vale em mudança cotovelo (Costa *et al.*, 1996; Franzinelli & Igreja, 2002). Os principais lineamentos identificados possuem tendência preferencial para NW-SE. Lineamentos orientados E-W e N-S são subordinados. Localmente, os lineamentos apresentam padrões em formato romboédrico, formados por conjuntos conjugados NE-SW e NW-SE, às vezes associados a falhas frágeis de deslizamento lateral direita e esquerda (Nogueira & Sarges, 2001; Passos *et al.*, 2020).

Figura 6 – Diagramas de blocos evolutivos das cachoeiras de Presidente Figueiredo. A - Cachoeiras desenvolvidas a partir de falhas normais: 1) Situação antes do tectonismo. 2) Formação de cachoeiras pela interseção de rios com falhas normais. 3) Esvaziamento e consequente colapso do muro de rochas fragilizadas, resultando no recuo da escarpa. B - Cachoeiras controladas por relevo cárstico, exemplificado pela Cachoeira dos Arcos: 1) Formação de cavernas e dutos por dissolução e remoção hidrodinâmica na zona freática. 2) Soerguimento da área, intensificação dos processos de formação de cavernas e início da dissecação do relevo. 3) Configuração atual da cachoeira, com relevo ruiniforme esculpido em antigas feições cársticas.



Fonte: Adaptado de Nogueira e Sarges (2001).

Nogueira e Sarges (2001) investigaram a origem das cachoeiras e quedas d'água no GCA e constataram fraturas e falhas normais com orientação NE-SW, alinhadas às direções das paredes das quedas d'água, aos deslocamentos estratigráficos e aos leitos inclinados que configuram a neotectônica quaternária, instalada em escarpas de falhas normais. A origem das cachoeiras na região remonta ao Neógeno, quando a área estava sujeita a processos de lateritização associados a um clima úmido e uma densa cobertura vegetal, favorecendo o desenvolvimento de cavernas nos quartzarenitos da Formação Nhamundá (Figura 6). Durante o Quaternário, a região foi afetada por falhas normais NE-SW, que deslocaram perfis lateríticos e truncaram rios e igarapés, resultando na formação das cachoeiras. Observou-se também o desenvolvimento de feições cársticas, embora com menor frequência. Assim, a formação das cachoeiras em Presidente Figueiredo foi influenciada por uma combinação de processos geológicos, tectônicos e climáticos ao longo do tempo geológico e permitiram a identificação de dois grupos: as desenvolvidas a partir de falhas normais e as controladas por feições cársticas.

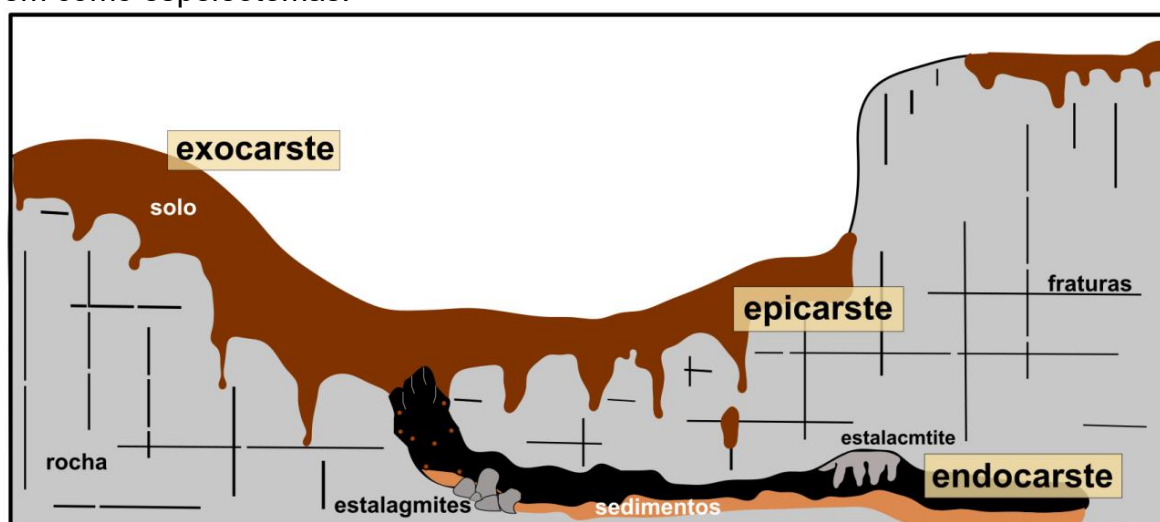
3.3. O CARSTE, SISTEMA CÁRSTICO

O termo carste (*Krast* ou *Carso*) refere-se ao conjunto de formas rugosas associadas a colunas e torres descritas pela primeira vez em rochas carbonáticas situadas entre a Eslovênia e a Itália (White, 1988; Hardt & Pinto, 2009). Autores como Hardt & Pinto (2009), Karmann (2000) e Piló (2000) definem o relevo cárstico como uma paisagem influenciada por processos de dissolução do substrato rochoso que condiciona o surgimento de morfologias, bem como a formação uma rede de condutos/drenagens que podem se propagar em direção ao subterrâneo. De forma geral, o processo de dissolução química que atua na gênese do relevo e desenvolve as feições cársticas é chamado de carstificação, nesse sentido o conjunto dessas feições associados aos processos geradores compõem o sistema cárstico.

Piló (2000) propôs a classificação das morfologias cársticas em três ambientes conforme sua superfície de ocorrência e os mecanismos responsáveis pela operação de processos geomorfológicos em: exocarste, epicarste e endocarste (Figura 7). No ambiente exocárstico as formas geradas são predominantemente governadas por processos de dissolução da rocha via água superficial naturalmente acidulada e, em menor escala, com o auxílio dos processos físicos, que atuam

diretamente nas anisotropias do substrato iniciando o processo. Assim, podem ser constatadas geoformas como *lapiás*, dolinas, *uvalas*, *poljes*, sumidouros, surgências e as ressurgências de drenagens, bem como alvéolos, panelas/marmitas, bacias de dissolução, caneluras, paredões e torres (Ford & Williams, 2007).

Figura 7. Perfil esquemático e características gerais dos ambientes cársticos. No ambiente exocárstico as feições são formadas principalmente pela dissolução em pontos mais suscetíveis da rocha (fraturas, juntas, planos de acamamentos) que iniciam pequenas depressões utilizadas por águas superficiais que migram para áreas mais profundas. No ambiente epicárstico o processo de dissolução do substrato é expandido gerando geoformas como dolinas e *lapiás*, enquanto no ambiente endocárstico podem ser constatados condutos, cavernas, grutas, *lapiás*, bem como espeleotemas.



Fonte: Adaptado de Piló (2007).

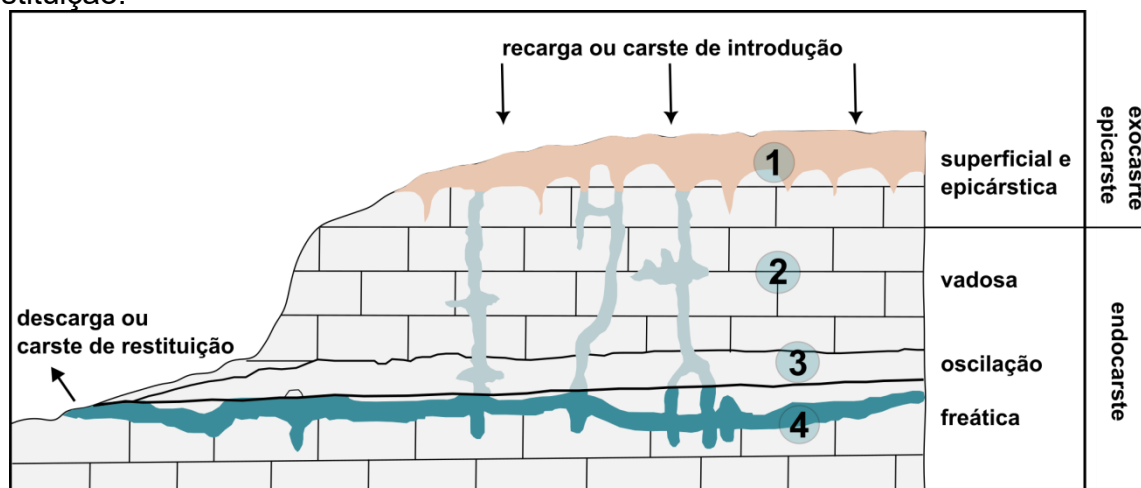
Por sua vez, no ambiente epicárstico a interação do solo e da vegetação na água superficial, aliados a anisotropias do substrato rochoso, aumentam o processo de dissolução e favorecem a expansão do processo de carstificação. Neste sentido, as feições geomorfológicas que caracterizam esse ambiente são representadas por sumidouros, nascentes, lagoas e também dolinas e *lapiás*, que têm seu início de formação ligado à acumulação de água nas drenagens armazenadas nesta área (Klimchouck, 2004; Ford & Williams, 2007).

Já no ambiente endocárstico estão concentradas feições como condutos, cavernas, grutas, *lapiás*, tocas, abismos e furnas, bem como estruturas de escala menor que adornam as feições maiores como as cúpulas e ondas de erosão (*scallops*) e os espeleotemas. Os condutos formados neste ambiente podem ser secos, inundados ou totalmente ocupados por água, apresentando no seu leito formas de leito arenosas quando submetidas a correntes trativas (Bosch & White,

2004; Herman *et al.*, 2012; Laureano & Karmann, 2013). Segundo Ford & Williams (2007) e Piló (2000), as estruturas formadas na zona endocárstica são favorecidas pela propagação de anisotropias estruturais do substrato rochoso e sua relação entre a área de recarga e descarga do aquífero cárstico.

Entretanto, Piló (2000) realizou uma interpretação do sistema cárstico desenvolvidos em rochas carbonáticas baseado na interação entre a água e a rocha em dois domínios hidrológicos, o exocárste/epicárste e o endocárste (Figura 8). Enquanto o domínio exocárste/epicárste é representado pela zona superficial e epicárstica, onde a água é introduzida no sistema, no endocárste o processo de carstificação é plenamente desenvolvido e subdividido em três zonas, a vadosa, a oscilatória e a freática. Segundo o autor, a zona superficial e epicárstica equivalente ao ambiente exocarste e epicarste do modelo de Piló (2007), onde as águas superficiais são introduzidas ao sistema cárstico em pontos mais suscetíveis a dissolução (fraturas, juntas, planos de acamamento) e adentram na zona vadosa.

Figura 8. Domínios cársticos definidos a partir da interação água x rocha em sistemas carbonáticos. A introdução da água no sistema ocorre na zona superficial e epicárstica que se infiltra pela ação da gravidade no substrato através de condutos no endocarste. O endocarste pode ser dividido em três zonas (vadosa, oscilação e freática). A água é eliminada do sistema cárstico na região de descarga ou carste de restituição.



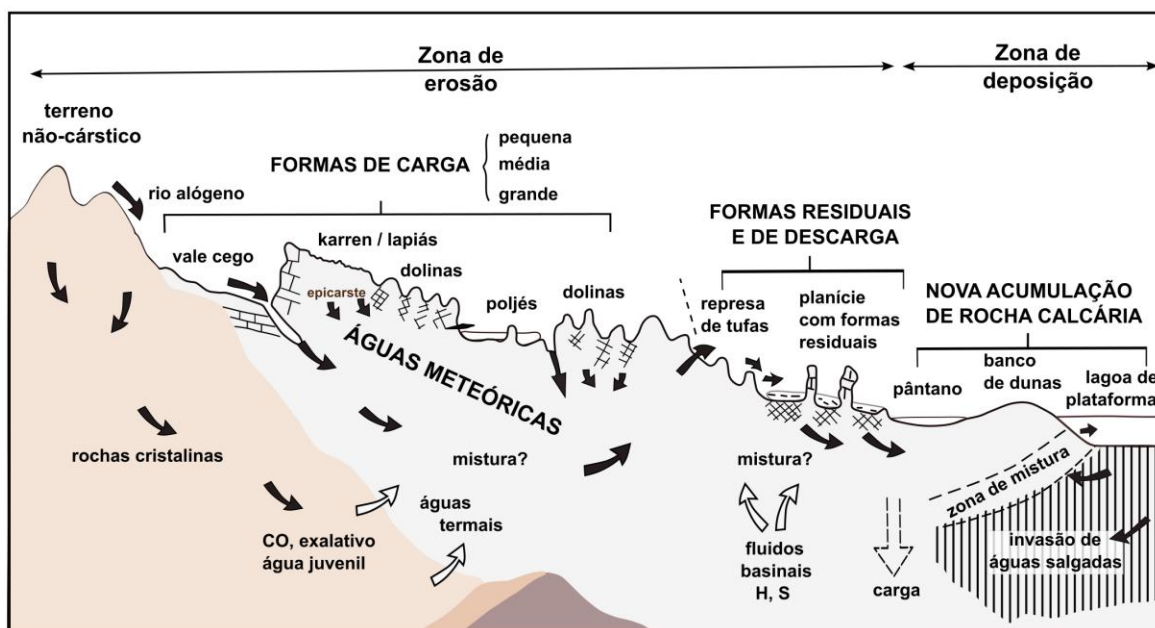
Fonte: Adaptado de Piló (2000).

Na zona vadosa, a água introduzida no sistema promove a expansão das fraturas por dissolução formando condutos, que por sua vez, podem evoluir para cavernas ao se encontrarem com cursos d'água preexistentes. Na zona oscilatória, os condutos e poços formados são influenciados para variação do lençol freático e podem produzir paredes verticais pela dissolução-precipitação dos sedimentos. Já

na zona freática a água preenche todos os poros das rochas e os produtos de dissolução são liberados do sistema cárstico através de canais de restituição ou ressurgências.

No entanto, para Klimchouk & Ford (2000) o sistema cárstico pode ser interpretado como um sistema hidrológico-químico de transferência de massa desenvolvido entre rochas não cársticas e as cársticas propriamente dita. A transferência de massa é garantida pela permeabilidade concentradas em anisotropias estruturais que facilitam o processo de dissolução e promovem a circulação de fluidos entre as zonas. Deste modo, baseando-se nos processos de transferência de massa e na relevância para as tipologias geradas pela dissolução, os autores organizam o sistema cárstico em duas zonas maiores denominadas de zona de erosão e zona de deposição (Figura 9).

Figura 9. O sistema hidrológico/químico de formação de terrenos cársticos dividido em duas zonas principais, de erosão e deposição, controlada pela natureza das águas intersticiais. Na zona de erosão predominam a mistura de águas meteóricas e termais da bacia. Na zona de deposição as águas são caracterizadas por residuais e de descarga. Na margem externa do sistema, águas salgadas interagem com os depósitos epicársticos e com os sedimentos recém precipitados na zona de acumulação de rochas calcárias. Setas indicam a transferência de fluidos no sistema cárstico.



Fonte: Adaptado de Klimchouk & Ford (2000).

Na natureza o sistema cárstico em si não funciona da maneira ilustrada/ descrita acima, pois fatores como a posição que as feições se encontram, o clima, o tipo de carste, a litologia, estruturas regionais, limites estratigráficos, a topografia do

local e principalmente a química dos fluidos percolantes afetam o desenvolvimento e evolução das feições inseridas no sistema. Neste sentido, trata-se de um modelo idealizado em que a formação do relevo é favorecida pela circulação da água no sistema, que advém de ambientes distintos, como a partir de chuvas, águas juvenis percolantes no terreno não-cárstico e fluidos basinais, normalmente acidificadas, que definem áreas no sistema chamadas de zona de erosão e deposição (Grimes, 1999; Klimchouk & Ford, 2000; Ford & Willmans, 2007).

As zonas estabelecidas neste modelo são intrinsecamente ligadas à natureza das águas percolantes no sistema. Na zona de erosão as águas são produto da interação de fluidos meteóricos oriundos de terrenos não cársticos, águas termais e das próprias águas que geraram as formas de carga/negativas/feições do exocarste (dolinas, *karren/lapiás*, *poljés*, vales cegos). Por outro lado, na zona de deposição as águas são caracterizadas como residuais e de descarga (represa de tufas, planície com formas residuais) que favorecem a deposição de sedimentos calcários em dunas e lagoas/pântanos. À margem do sistema, a contribuição de águas salgadas interage com a zona epicárstica e com parte dos sedimentos calcários recém depositados.

Em resumo, o fator clima representa um condicionante de primeira ordem na evolução de sistemas cársticos, pois regula a disponibilidade de água, a principal modeladora do relevo. Por exemplo, em climas quentes e úmidos a disponibilidade de água e a densa vegetação desenvolvida fomenta a acidificação natural das águas devido à produção excessiva de dióxido de carbono (CO_2) biogênico no solo. Assim, a água das chuvas inicialmente acidificadas com CO_2 atmosférico à medida que infiltra no solo agregam o ácido carbônico (H_2CO_3) proveniente da respiração das plantas e decomposição da matéria orgânica, fomentando ainda mais a dissolução de substratos carbonáticos e ampliando as feições cársticas (Grimes, 1999; Karmann, 2000).

3.3.2. Feições Exocársticas

Feições exocársticas podem ser entendidas como um conjunto de relevos e geoformas de dissolução superficiais onde é iniciada a remobilização e entrada de materiais no sistema cárstico. Segundo Piló (2000), essas feições podem ser agrupadas em duas classes, a saber: feições com relevo positivo e com relevo negativo. Feições exocársticas com relevo positivo são caracterizadas por relevos

residuais que apresentam topografia destacada em relação ao seu entorno, como por exemplo, *lapiás*, maciços, torres e paredões. Por sua vez, geoformas exocársticas com relevo negativo estão associados a processos de dissolução concentradas e/ou abatimentos de terreno, tais como dolinas, uvalas, *poljes*, sumidouros, surgências e as ressurgências de drenagens, bem como alvéolos, painéis/marmitas, bacias de dissolução e caneluras, *lapiás* ou *karren*.

Como o foco desta pesquisa está exclusivamente nas marmitas presentes na proposta GCA, a investigação será direcionada para quatro localidades específicas: Cachoeira do Mutum, Cachoeira da Princesinha, e as formações encontradas no leito da Corredeira das Lajes e de Urubuí. Dessa forma, a revisão bibliográfica será centrada apenas nessas geoformas, abordando suas características, processos de formação e relevância geoturística.

3.3.3. Marmitas, Painéis e Bacias de Dissolução

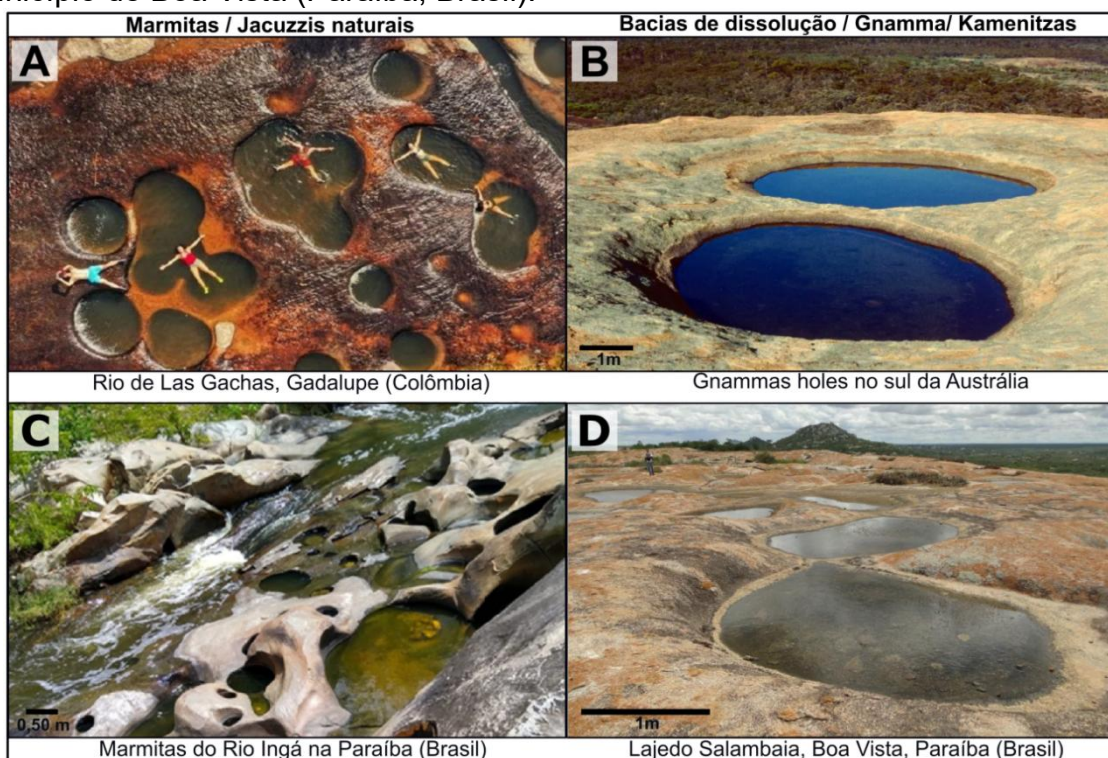
As marmitas, painéis, jacuzzis naturais e bacias de dissolução (*potholes*, *weathering pit*) são as mesmas denominações para identificação de feições exocársticas na forma de depressões naturais em formas circulares desenvolvidas no substrato rochoso que independem da litologia, seja ígneo, metamórfico ou sedimentar (Figura 10). Essas feições podem apresentar dimensões variáveis e comumente estão associadas à ação abrasiva das águas fluviais ou pluviais na rocha, contudo existe uma contribuição de processos de dissolução envolvidos (Alexander, 1932; Campbell, 1997; Diaz, 2008, Twidale & Bourne, 2018).

A distinção entre as marmitas e as bacias de dissolução está no seu processo de formação. Marmitas ou jacuzzis naturais, como é conhecida na área do GCA, são originadas pelo movimento turbilhonar das correntes de água que transportam sedimentos por arrasto, chamados de amoladores, e erodem o substrato rochoso (Figura 11). São feições exocársticas observadas comumente em cachoeiras, corredeiras, riachos e rios (Lorenc *et al.*, 1995; Richardson & Carling, 2005), bem como associados a outros ambientes modernos, como o costeiro, desértico, fluvial e glacial (Fleming & Brand, 2019; Green *et al.*, 2023).

Por sua vez, as bacias de dissolução (*kamenitzas* ou *gnammas*) têm sua gênese vinculada a processos químicos na rocha exposta, preferencialmente concentrada nas zonas de fraqueza e interseções de fraturas. Assim, regiões com substrato rochoso com anisotropias estruturais primárias promovem a estagnação

de águas pluviais em depressões superficiais, reações ácidas do intemperismo bioquímico agem resultando na descamação por insolação e quebra das irregularidades cristalinas, aumentando progressivamente as dimensões da geoforma (Campbell, 1997; Timms, 2013; 2021). Contudo, nem toda depressão onde a água se acumula será considerada uma bacia de dissolução, pois esta geoforma implica uma evolução erosiva (Domínguez-Villar, 2006).

Figura 10 – Exemplos de feições exocársticas negativas, como marmitas/jacuzzis naturais e bacias de dissolução/*gnamma/kamenitzas*. Essas feições com geometria circular são encontradas nos leitos de rios/lajedos e podem estar desenvolvidas nas mais variadas litologias. As marmitas podem se desenvolver de forma isolada ou colonial, apresentar no máximo 99 cm de largura e profundidade de até 50 cm, enquanto as feições maiores que essas dimensões são chamadas de jacuzzis naturais. As bacias de dissolução são mais rasas, quando sua profundidade passa de 1 m tendem a denomina-se de tanques naturais. A – Marmitas em formas circulares individuais e coloniais em arenito no rio de Las Gachas, Colômbia. B – *Gnammas holes* ao sul da Austrália, bacias de dissolução do tipo isoladas e circulares encontradas em granito. C – Marmitas fluviais isoladas e coloniais desenvolvida em granito no leito do rio Ingá (Paraíba, Brasil). D – Lajedo Salambaia composta por sieno/monzogranito e suas bacias de dissolução métricas e rasas no Município de Boa Vista (Paraíba, Brasil).

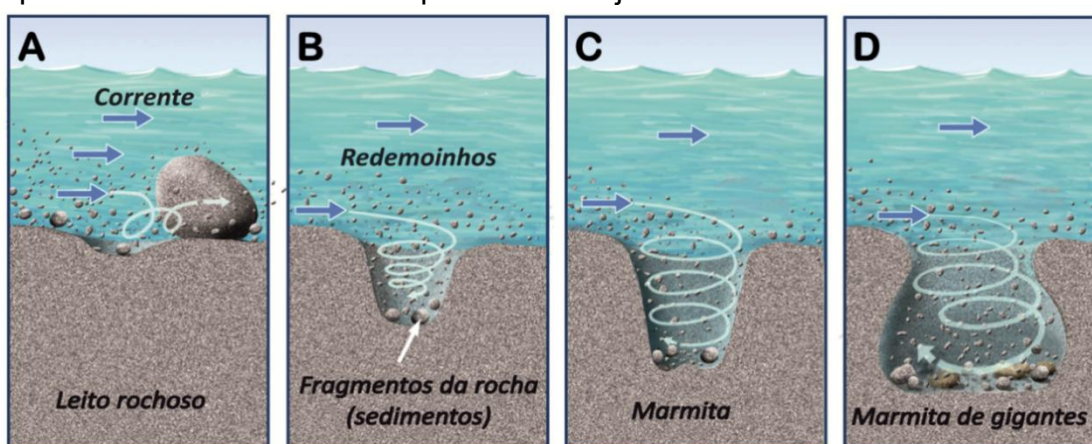


Fonte: A – Página De Ruta Por Colombia no Facebook (2020), B – Site Mapio.net (2024), C – Lopes (2020), D – Ferreira (2021).

Uma das propostas mais antigas para a classificação de marmitas/jacuzzis naturais foi a de Alexandre (1932) que sugeriu a existência de três grupos de acordo com a forma com que o fluxo turbilhonar escava a geoforma em: i) marmitas de

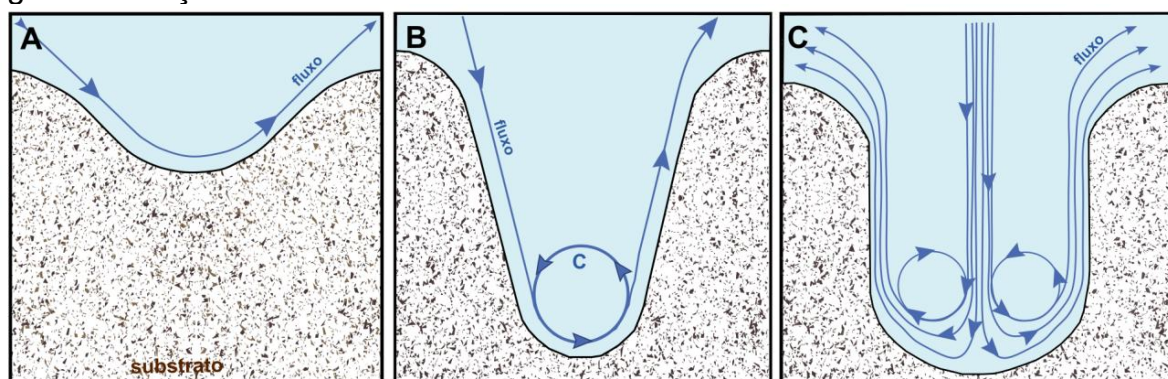
redemoinho, ii) marmitas de goiva ou furos e iii) marmitas de piscinas (Figura 12). As marmitas formadas a partir de redemoinho apresentam forma cilíndrica e são geradas pela abrasão de sedimentos por correntes turbilhonares, semelhante ao modelo demonstrado na figura anterior.

Figura 11. Modelo de formação de uma marmita e sua evolução para uma jacuzzi natural em leitos rochosos influenciados por correntes fluviais. A e B – Os sedimentos transportados por arraste (amoladores) em correntes fluviais turbulentas promovem a formação de redemoinhos que escavam o substrato rochoso. C e D – Com a evolução da geoforma, amoladores de maior granulometria são capturados e dão início ao alargamento lateral. No início da formação as marmitas tendem a serem mais profundas e cilíndricas, mas ao atingirem a maturidade tendem a alargar-se e passam a ser chamadas de piscinas e/ou jacuzzis naturais.



Fonte: Traduzido e adaptado de Jara (2021).

Figura 12. Classificação das marmitas de acordo com a forma com que a corrente fluvial escava o substrato rochoso. A – Marmitas de redemoinhos são geradas por fluxos turbulentos estacionários e paralelos a escavação. B – Marmitas de goiva ou furo são moldadas por fluxos turbulentos associados ao impacto direto e oblíquo em relação ao substrato rochoso. C – Marmitas de Piscinas são as maiores, mais profundas e associadas a quedas d'água com impacto vertical direto do fluxo da água em relação ao substrato rochoso.



Fonte: Adaptado de Alexander (1932).

Por sua vez, marmitas de goiva são alongadas, com seção vertical em forma de U alargada, desenvolvidas paralelas a corrente do rio e geradas por impacto

direto oblíquo da água. Já as marmitas de piscinas possuem geometria elípticas, são alargadas internamente e geradas pela ação erosiva de água em queda livre, como por exemplo, em cachoeiras. A partir desta classificação, outros autores aprofundaram seu estudo de gênese, evolução e classificação das geoformas, aqui reunidas e compiladas no Quadro 1.

Quadro 1. Evolução da classificação e principais contribuições a respeito de marmitas/jacuzzis naturais em função da morfologia, característica do fluxo do rio e maturidade evolutiva.

Autores	Definição / Principais Contribuições
Alexander (1932)	Denominou as marmitas de acordo com a forma com que o fluxo turbilhonar escava a geoforma: 1. Buracos de redemoinhos - formados em leitos de riachos com seções transversais circulares ou elípticas e geradas por sedimentos agitados nos redemoinhos estacionários paralelos ao leito rochoso; 2. Buraco de goiva - apresentam geometria em forma de U e são mais profundas que as de redemoinhos, assemelhando-se a um cilindro. Sua formação está ligada ao fluxo turbilhonar paralelo ao leito rochoso fomentado por impacto oblíquo e direto sobre o substrato rochoso e; 3. Buracos de Piscinas - ligadas ao fluxo turbulento gerado por impactos verticais no substrato rochoso, comumente encontrado em cachoeiras e quedas d'água.
Nemec <i>et al.</i> (1982)	Dividiram as marmitas/jacuzzis naturais de acordo com seu estágio evolutivo: 1. Estágio jovem - geoformas recém formadas e com geometria simétrica; 2. Estágio de desenvolvimento - geoformas em evolução formadas em depressões ativas, com geometria cilíndrica e simétrica e; 3. Estágio antigo - geoformas bem desenvolvidas, em maior escala e com geometria assimétrica.
Zen & Prestegard (1994) e Kanhaiya <i>et al.</i> (2019)	O desenvolvimento de marmitas/jacuzzis naturais às margens dos rios é influenciado pela sua posição ao longo do canal e a geometria do mesmo.
Lorenc <i>et al.</i> (1994, 1995)	Sugeriram uma rota de evolução das marmitas/jacuzzis naturais, relacionaram com sua distribuição ao longo da drenagem e função do desenvolvimento do vale fluvial.
Campbell (1997)	Organizou as depressões em granitos em três tipologias baseadas na inclinação no substrato da geoforma, exposição e profundidade: 1. Pit - geoformas geradas em substrato homogêneo e com fundo côncavo; 2. Pan - geoformas com pouca profundidade em substrato homogêneo e/ou anisotropias pouco desenvolvidas e com fundo plano; 3. Cilíndrica - geoformas mais profundas em substrato homogêneo, controladas por anisotropias (falhas e fraturas) e com o fundo côncavo e; 4. Poltrona - geoformas desenvolvidas em substrato homogêneo e em locais íngremes do substrato.
Richardson & Carling (2005)	Diferenciaram três estágios de evolução das marmitas/jacuzzis naturais: 1. Inicial - geoformas com cavidades internas lisas; 2. Intermediário - geoformas com cavidades mais profundas

	e; 3. Avançado – geoformas coalescentes e com conexão com outras geoformas.
Pelletier <i>et al.</i> (2015)	Propuseram um modelo teórico para as formas e tamanhos das marmitas/jacuzzis naturais comparando-as a um cilindro. Por modelagem computacional definiram uma relação linear entre o raio (R) e a profundidade (Z) da geoforma, chegando a conclusão que, independentemente da escala, razões de aspecto iguais a 1 e 2 maximizam tensões de cisalhamento no fundo das <i>potholes</i> , acelerando o crescimento das mesmas. O raio médio e a profundidade tendem a aumentar proporcionalmente ($Z=2R$), ou seja, a profundidade dos <i>potholes</i> medidos são o dobro do raio.
Álvarez-Vázquez & De Uña-Álvarez (2017)	Estabeleceram limites morfológicos e dimensionais para melhor identificar os estágios evolutivos das geoformas (a – eixo maior, b – eixo menor e H – profundidade) em três classes: 1. Incipientes - geoformas com crescimento ativo e razão $a \approx b > H$; 2. Longitudinais - geoformas com crescimento estacionário e razão $a > b > H$ e; 3: Circulares – geoformas com crescimento estacionário e razão $a \approx b \geq H$.

De acordo com Ji *et al.*, (2018; 2019), os parâmetros mais importantes na formação das marmitas/jacuzzis naturais em ambientes fluviais podem ser representados por: as propriedades litológicas, a fábrica da rocha e a hidrologia local. Assim, certas características como, por exemplo, a profundidade, largura, direção de desenvolvimento, volume de vazios e taxa de crescimento, são dependentes da resistência do leito rochoso à abrasão e suas anisotropias, da velocidade do corrente e do volume hídrico, bem como do tipo, tamanho e quantidade do material sólido transportado (amoladores).

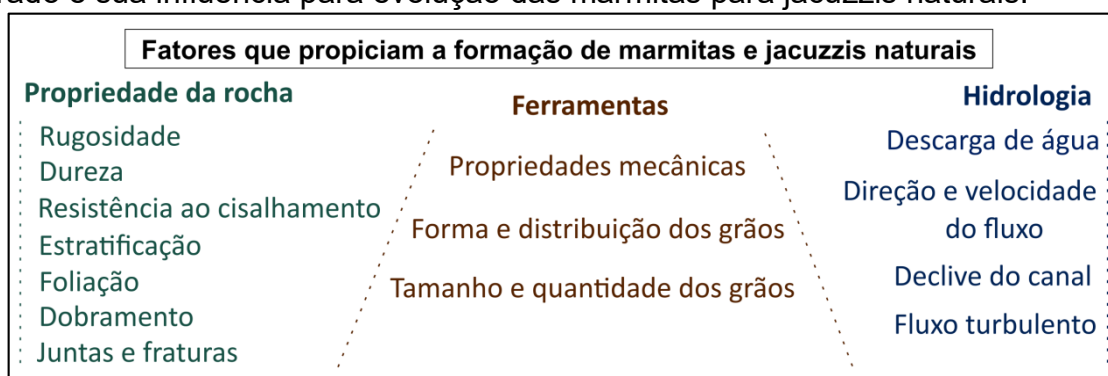
No entanto, pesquisadores como Bera *et al.*, (2019; 2021) e Aylar *et al.*, (2022) destacam características flúvio-hidrológicas como determinantes para a dinâmica evolutiva dessas feições cársticas, especialmente seu desenvolvimento vertical em profundidade e lateral. A Figura 13 apresentada abaixo reúne os principais fatores que condicionam a formação e desenvolvimento das marmitas/jacuzzis naturais (Dhali & Biswas, 2017; Ji *et al.*, 2018; 2019; Bera *et al.*, 2019; 2021; Aylar *et al.*, 2022).

3.4. CARSTES EM ARENITOS

O carste tradicional e o seu relevo são extensivamente debatidos na literatura (Hardt *et al.*, 2010; Fabri *et al.*, 2014; Klimchouck, 2015; Henriques, 2016). Atualmente, o carste pode ser definido como o resultado do processo de interação

entre rochas solúveis, tais como carbonatos (Planalto de Kras, Eslovênia e Itália), calcários (Cordilheira dos Alpes Dináricos, na Eslovênia), dolomitos e evaporitos, e águas das mais diversas naturezas e origens, que desenvolvem feições geomorfológicas (abrigos, arcadas, alvéolos, cavernas, dolina, furnas, grutas, bacias de dissolução, *lapiás*, marmitas, cúpulas, sumidores, torres, *tafoni* de diferentes escalas em superfície e subsuperfície.

Figura 13. Fatores que influenciam no desenvolvimento de marmitas/jacuzzis naturais resumido em três itens: propriedades da rocha, as ferramentas e hidrologia. A litologia é responsável pela resistência da rocha à erosão e as características geométricas da geoforma. As ferramentas, por sua vez, agem como facilitadores abrasivos no substrato atuam como agentes de erosão e modelamento dos buracos ao longo do tempo. A hidrologia do ambiente atua na natureza no fluxo de água gerado e sua influência para evolução das marmitas para jacuzzis naturais.



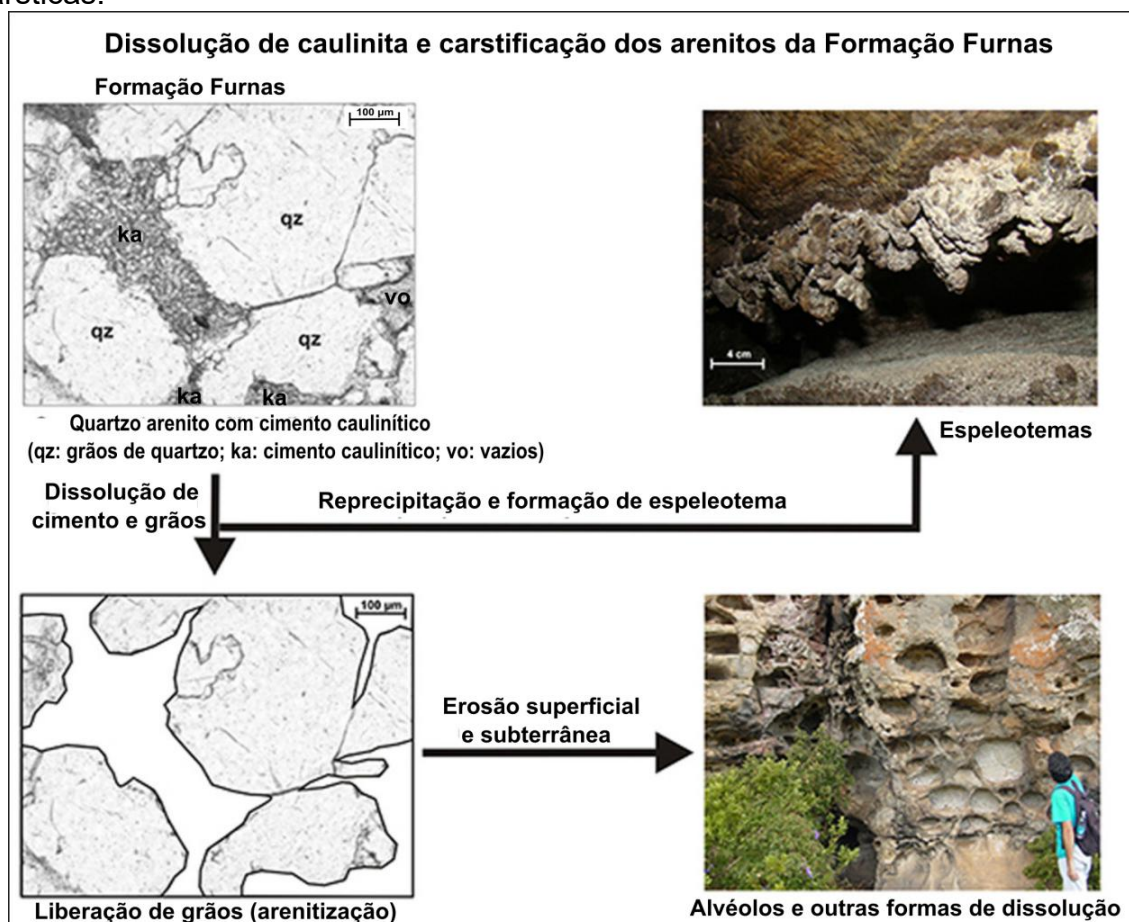
A carstificação, portanto, pode ser entendida como o processo intrínseco que envolve tanto a dissolução química de rochas, quanto erosão mecânica responsável pela geração de terrenos cársticos. Apesar de que em rochas carbonáticas cerca de 80% ou mais do volume da rocha é solúvel, quando avaliamos as rochas siliciclásticas mais puras a fração dissolvível não é superior a 10-20%, volume incompatível com a grandeza e complexidade de feições cársticas já mapeadas (Wray, 2017; Ferreira & Uagoda, 2020).

No entanto, carstes registrados em rochas não solúveis, como por exemplo, em arenitos, quartzitos, basalto, granitos e formações ferríferas bandadas podem ser considerados de origem cárstica quando o processo de dissolução é fundamental para a formação das feições, considerando suas evidências morfológicas, químicas e estruturas (Wray, 2013; Wray & Sauro, 2017). Em rochas sedimentares, características petrográficas e físicas, tempo de exposição, taxa de descarga pluviométrica, anisotropias e condições ambientais, deixam a rocha menos resistente e facilitam o processo de dissolução. Assim, a dissolução entre os grãos do arcabouço, principalmente ao longo dos seus limites, aumenta a porosidade total

da rocha e reduz a sua resistência as intempéries, processo denominado de arenitização (Wray & Sauro, 2017).

O termo arenitização foi introduzido por Martini (2000) para descrever o processo de dissolução/erosão em rochas de natureza siliciclástica ao analisar feições cársticas em quartzitos da Formação *Black Reef*, Proterozoico da África do Sul. O autor descreveu o processo como o resultado da interação entre a dissolução química e a erosão mecânica. A nível microscópico, processos de dissolução atuam no limite entre os cristais que compõe a rocha, promovendo a porosidade e a susceptibilidade erosiva (Figura 14). O processo de dissolução facilita a remoção de materiais por processos fluviais e de *piping* e, por consequência, o desenvolvimento de geoformas cársticas (Wray, 2013).

Figura 14. O processo de dissolução (arenitização) em arenitos da Formação Furnas. Ácidos orgânicos promovem a solubilização de sílica a partir de elementos do arcabouço (grãos de quartzo) e intersticiais (matriz e cimento de argilominerais) que tornam a rocha susceptível a remoção do material e formação de feições cársticas.



Fonte: Melo et al., (2015).

Em condições de subsuperfície, a presença de ácidos oxidantes produto de áreas com ampla cobertura vegetal, favorecem o desenvolvimento de feições

cársticas em rochas tradicionalmente não solúveis, como em substratos rochosos compostos por arenitos. Entretanto, o estabelecimento de modelos de dissolução de sílica em ambientes oxidantes pode ser problemático, pois soluções saturadas em sílica nessas condições são mais susceptíveis a precipitação do soluto, assim condições de solubilidade da sílica são fomentadas em ambientes mais alcalinos (Wray, 2013; Melo *et al.*, 2015; Sauro & Wray, 2017).

Entretanto, autores como Lazo *et al.* (2017) e Potysz & Bartz (2024) destacam que a solubilidade da sílica pode ser alcançada em condições superficiais quando existe uma contribuição importante de ácidos orgânicos produzidos pelo manto intempérico e a ampla cobertura vegetal implantada sobre esses terrenos siliciclásticos. Nestas condições, a sílica pode ser dissolvida não apenas a partir dos grãos de quartzo que compõem o arcabouço, mas também diretamente do sobrecrecimento de sílica, especialmente os de baixa temperatura de formação, como a sílica amorfa. Portanto, na maioria dos arenitos, o processo de arenitização não remove a maior parte da rocha e as paisagens são moldadas por uma combinação de dissolução de sílica auxiliada por erosão mecânica posterior (Jennings, 1985; Wray, 2013; Sauro & Wray, 2017).

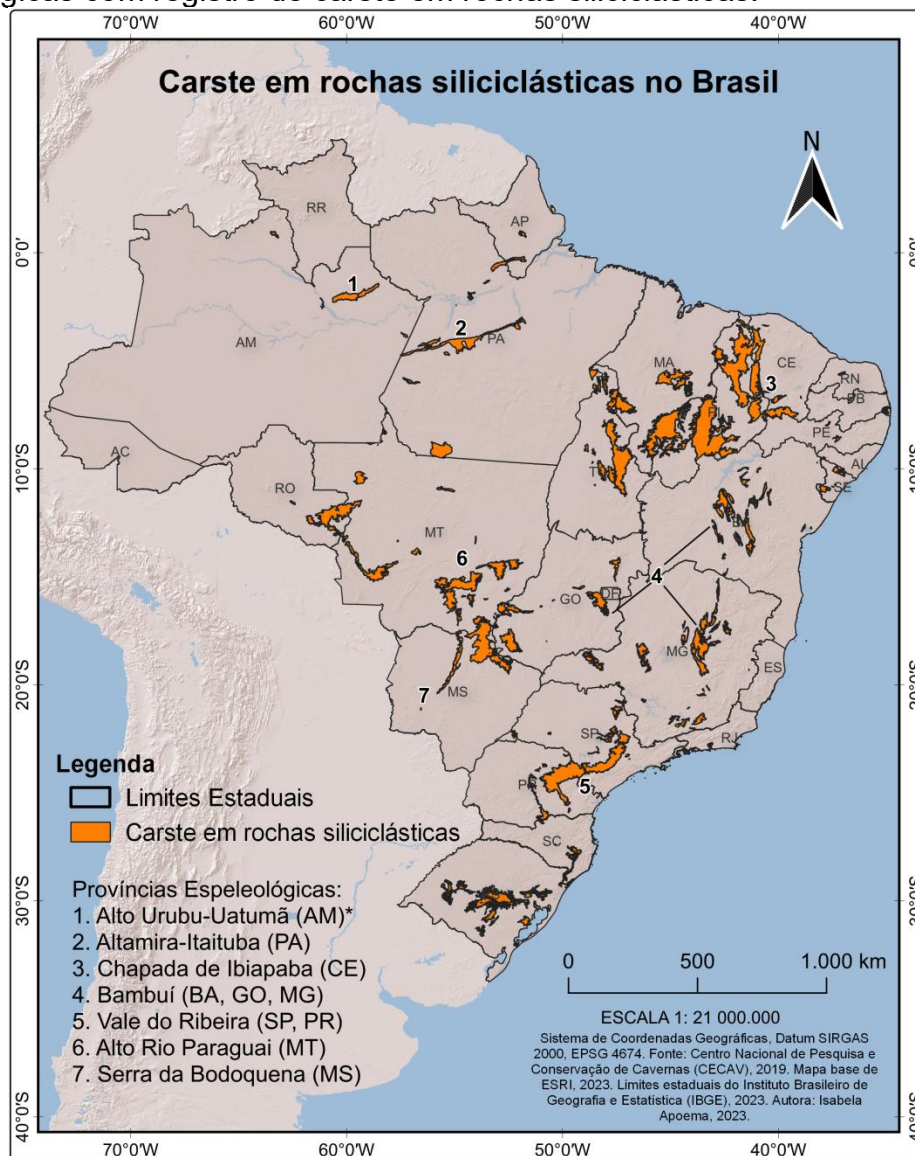
No Brasil, exemplos de carstes desenvolvidos em rochas siliciclásticas podem ser registrados nas formações Cabeças e Sambaíba da Bacia do Parnaíba (Castro *et al.*, 2019; Maia, 2023), Furnas, Campo Mourão e Botucatu da Bacia do Paraná (Pontes *et al.*, 2022), bem como nas formações Nhamundá e Maecuru na Bacia do Amazonas (Figura 15; Pinheiro *et al.*, 2015; Freire *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2018). As feições desenvolvidas nessas unidades areníticas são representadas por alvéolos, cavernas, fendas, grutas, sumidouros, porém em específico as jacuzzis naturais ocorrem na Formação Nhamundá.

As regiões cársticas fazem parte de unidades espeleogeológicas, catalogadas e inseridas no Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) e no Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV). Atualmente, são reconhecidas dezenove regiões cársticas, com destaque para cinco unidades espeleogeológicas: Vale do Ribeira (SP, PR) e do Bambuí (BA, GO, MG), Serra da Bodoquena (MS), Alto Rio Paraguai (MT) e Chapada de Ibiapaba (CE).

Essas províncias espeleológicas desenvolvem as maiores cavernas do país e biodiversidade rara. Na região Amazônica, a Bacia do Amazonas registra carstes em arenitos em paisagens excepcionais, como por exemplo, na Província Espeleológica

Altamira-Itaituba (PA), através de um conjunto de cavidades naturais subterrâneas ornamentadas com diferentes feições endocársticas (Freire *et al.*, 2017). Por sua vez, no Estado do Amazonas destaca-se a Província Espeleológica Alto Urubu-Uatumã, inserida no perímetro do GCA, que reúnem grutas e cavernas, inicialmente descritas por Karmann (1986), bem como marmitas, *tafoni* e outras feições exocársticas bem documentadas no baixo curso do rio Negro, no Parque Nacional de Anavilhanas (Lima *et al.*, 2024).

Figura 15. Mapa do território brasileiro com destaque para as províncias espeleológicas com registro de carste em rochas siliciclásticas.



Fonte: Adaptado de CEVAC (2019).

3.6. PAINÉIS INTERPRETATIVOS

Os painéis interpretativos são estruturas informativas instaladas em locais de interesse geológico, turístico e/ou ambiental, projetadas para educar e engajar o

público sobre a geodiversidade local, ferramenta amplamente usada nos parques nacionais. Esses painéis podem fornecer informações acessíveis sobre formações geológicas, processos geomorfológicos, paleontologia, hidrologia e interações ecológicas, promovendo a valorização e a conservação do patrimônio geológico. A interpretação ambiental e geológica, por meio desses painéis, segue princípios de comunicação visual e textual, facilitando a compreensão de conceitos complexos para diferentes públicos, incluindo turistas, pesquisadores e comunidades locais (Tilden, 2009).

De acordo com Bento & Nazar (2020), para que os painéis interpretativos sejam eficazes devem conter elementos essenciais, como: título e subtítulo (chamativo e informativo, indicando o tema principal), texto explicativo (redação clara e concisa, utilizando linguagem acessível e inclusiva), imagens e ilustrações (fotografias, mapas, diagramas e infográficos para auxiliar a compreensão), códigos QR e interatividade (links para vídeos, modelos 3D e informações adicionais) e elementos sensoriais (materiais táteis e tridimensionais para experiências inclusivas), e interpretação para deficientes visuais.

As principais vantagens na utilização de painéis interpretativos para a promoção da geodiversidade local incluem a possibilidade de serem utilizados simultaneamente por vários visitantes, a baixa necessidade de manutenção, a facilidade de uso, a combinação eficaz de imagens e textos para melhor compreensão, a orientação espacial dos visitantes e a independência em relação à supervisão direta, como a presença de guias, entre outros benefícios. Para que a interpretação proporcione uma experiência positiva, é essencial que seja significativa, envolvente, diferenciada, temática, bem organizada e prazerosa. Dessa forma, ao final da visita, o observador não apenas assimila informações, mas também pode desenvolver uma nova percepção ou atitude em relação ao patrimônio geológico (Tilden, 2009; Bento & Nazar, 2020; Štrba, & Palgutová, 2024).

Os painéis interpretativos auxiliam na promoção da geodiversidade reforçando diretamente pilares fundamentais, como: a educação, informando aos visitantes sobre a história geológica e os processos naturais que moldaram a paisagem; a sensibilização para a conservação do patrimônio geológico, incentivando boas práticas ambientais; o fortalecimento do geoturismo, agregando valor a geoparques e unidades de conservação; a valorização da identidade local, resgatando histórias e conhecimentos tradicionais associados à geodiversidade e;

como apoio a projetos de educação ambiental, pois serve como ferramentas pedagógicas em visitas guiadas e atividades escolares (Kejian *et al.*, 2010; Newsome & Dowling, 2010).

Von Ahn e Simon (2019) analisaram 37 painéis de Geoparques reconhecidos pela UNESCO e concluíram que não existe um padrão estruturado ou técnico na elaboração desses materiais interpretativos. No entanto, apresentamos alguns exemplos que ilustram como os painéis interpretativos são utilizados ao redor do mundo e no Brasil para educar e envolver os visitantes, destacando a importância da geodiversidade e promovendo a conservação do patrimônio geológico.

No Brasil destacam-se os painéis interpretativos no Geoparque Quarta Colônia (Rio Grande do Sul) que apresentam a geodiversidade local, com destaque para as formações geológicas da Bacia do Paraná, os fósseis de répteis e vegetais do Triássico, além da relação entre a geologia e o patrimônio cultural da imigração italiana na região. Por sua vez, no Geoparque Araripe (Ceará) painéis interpretativos destacam a história geológica do Cretáceo na região, registros paleontológicos e a interação com a cultura local (Figuras 16 A e B).

Figura 16. Exemplos de painéis interpretativos em Geoparques nacionais e internacionais, destacando a importância da geodiversidade e do patrimônio geológico. A – Geoparque Quarta Colônia (Brasil), afloramento do dique e processos geológicos associados. B – Geoparque Araripe (Brasil), painel com mapa e informações sobre os geossítios. C – Geoparque Estrela (Portugal), painel sobre o geossítio Covão do Boi explicando sua formação e relevância. D – Geoparque Bakony–Balaton (Hungria), painel sobre erupções vulcânicas e formações rochosas associadas.



Fonte: A – Kiefer (2023); B – SGB (2024) ; C e D - Štrba, & Palgutová (2024).

No âmbito internacional podemos citar o Geoparque Estrela (Portugal), onde os painéis interpretativos destacam as formações graníticas, os processos de erosão glacial e a biodiversidade da Serra da Estrela, promovendo a conexão entre a geologia e o meio ambiente, assim como o Geoparque Bakony–Balaton (Hungria), que utiliza painéis informativos para apresentar a evolução geológica da região, as formações cársticas e a importância da geoconservação em um dos territórios mais ricos em fósseis marinhos do país (Figuras 16 C e D).

CAPÍTULO 4. ARTIGO EM REVISÃO NO JOURNAL OF SOUTH AMERICAN EARTH SCIENCES

Título: Potholes and shear zones deformation in sandstones: Central Amazon basin.

Autores: Carlos Alejandro Salazar¹, Roberto Cesar de Mendonça Barbosa¹, Isabela Apoema Gomes de Souza¹, Marta Edith Velásquez David², Andressa Resende Soares² e Diego Wenderson Venâncio².

¹ Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas.

² Departamento de Geociências da Universidade Federal do Amazonas.

Abstract: A pothole is a form related to morphogenetic processes that occur in rock outcrops (such as granites), which are particularly susceptible to water physical and chemical weathering processes, generally in humid tropical climates. In the center of the Amazon basin, waterfalls, rapids streams, and knickzones with the development of potholes, are formed in the beds of several rivers (Urubuí and their tributaries) that erode sandstones from the Silurian Nhamundá Formation. To elucidate the origin of these potholes, there are highlights on analyzing the susceptibility to erosion processes, variations in texture, mineral composition, and strain deformation recorded in quartzarenite to subarkosic sandstones. Panholes are observed and associated with knickzones, where ruptile dextral simple shear zone systems and their conjugate structures influence the drainage network. This search shows that the potholes are spatially positioned at the intersections of tectonic structures which, in addition to the dissolution processes of the sandstone framework, allow the development of large- scale potholes, such as in the Mutum waterfall. They were formed by morphodynamic processes in river valleys carved out of the Nhamundá Formation.

Keywords: Deformed Sandstone, Knickzone Riverbeds, Conjugate Shear Zones, Stream Rapids, Waterfalls.

4.1. INTRODUCTION

Geoforms developed in sandstones are understood as the result of the combination of hydric erosion in river valleys, fracturing due to lithostatic pressure relief, exposed rock surfaces or/and tectonic influence, variation in the incidence of

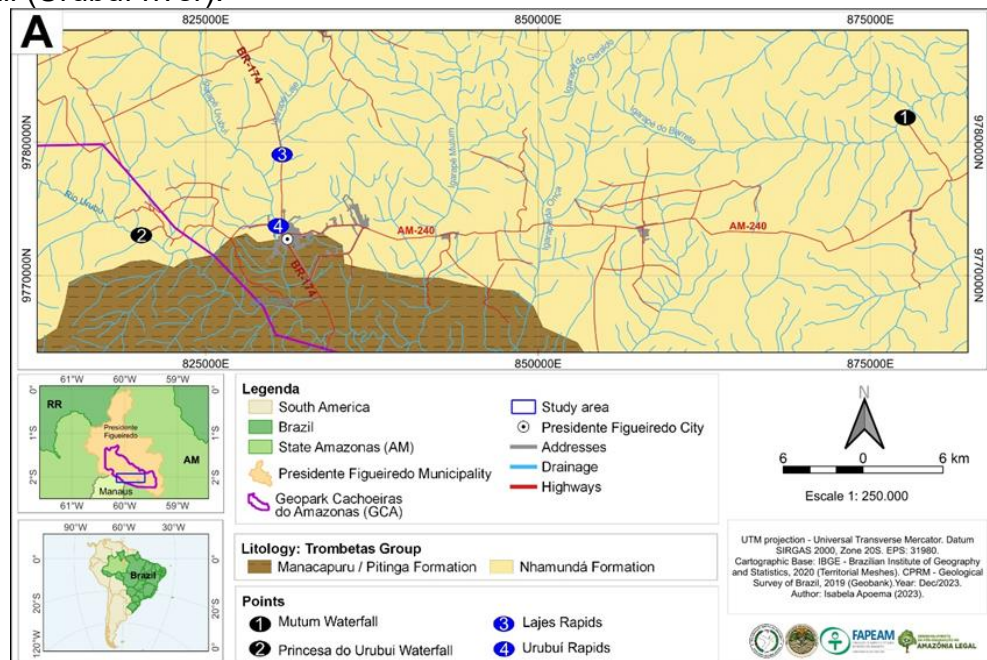
solar radiation, chemical dissolution related to percolation of acid rain waters. These factors can dominate or interact with each other, with varying intensity and efficiency over time (Wray & Sauro, 2017). Wray (2010) and Wray & Sauro (2017) emphasize the processes of chemical weathering and dissolution evolving to develop pseudokarstic cavities superficial in sandstone. In the literature, Pan is a generic name used for geoform whose origin is associated with environmental and climatic conditions and classified depending on the morphogenetic process as chemical alteration, physical erosion, and lithological susceptibilities (weaknesses joints, xenoliths), or singular changes in the texture and composition of the rocks. Pan is an open and superficial cavity broadly associated with morphogenic depression carved out of rocky terrain by weathering, dissolution, and erosion (Twidale, 1982).

Similar geoforms have received diverse and generic names considering geometry, morphogenetic process, and lithotype of occurrence, among them: rock basins, armchair-shaped hollows, weathering pits, oriçangas, water eyes, gnammas, potholes, and panholes (Twidale & Bourne, 2008). For Whipple et al., (2000), fluvial erosive processes related to hydrodynamic vortexes acting in bedrocks, create fluvial potholes. Weathering pans, rock rules, and granite pits are cavities because of weathering and erosion processes acting on exposed rock surfaces, those rocks contain mechanical weaknesses or are susceptible to chemical alteration of rocks (Twidale, 1982). Armchair hollows are formed by erosive processes acting on sloping surfaces, and tafone, are vertical surface cavities commonly generated by mineral dissolution and erosion processes (Twidale, 1982; Vidal-Romaní & Twidale, 1998). Potholes are superficial geoforms occurring in granitic rocks in the Fazenda Nova District in Pernambuco (Brazil) (Silva et al., 2007) and on sandstones eroded by the Ingá River, in the Paraíba State, Brazil (Lopes, 2020). For Paradise (2013), morphogenetic carves have been grouped using climate conditions, local occurrence topography, and geometric parameters (size, and shape).

This research presents pothole-type geoforms in riverbeds that erode locally quartz-to subarkosic sandstones of the Nhamundá Formation, Amazonas Basin. These are stratified rocks from the shallow marine storm-to-glacial influenced Nhamundá Formation, Silurian of the Amazonas Basin. In the study area, potholes are formed and preserved on mainly sandstone facies in the valley bottoms of black water rivers that drain the Amazon rainforest.

Few references in the literature explain the origin and formation of potholes formed in sandstone. Potholes are associated with rocks that respond anisotropically to physical (erosion) and chemical (mineral alteration and dissolution) processes due to variations in mineral composition and/or deformation structures, contrary to what happens in quartz sandstone (Paschier & Trouw, 2005). This explains the low probability of formation and preservation of potholes in sandstones, but also the relevance of studying and understanding the origin of the object of this research. The study area includes the occurrence of potholes in the rapids of the Urubuí and its tributary rivers: Mutum, Lajes, and Princess Waterfall (Figure 17). These locations were selected because are where the main reports of pothole concentrations in the proposal geopark Cachoeiras do Amazonas. The genesis and evolution of these potholes are a bit of a debated topic, and currently, the evaluation of these geoforms is restricted to morphology and mode of occurrence.

Figure 17. Geological location of the outcrops: A. 1 - Mutum waterfall (Barreto stream), 2 - Urubuí, 3 - Lajes rapids (Urubuí stream), 4 - Princesinha do Urubuí waterfall (Urubuí river).



This research was based on finding the probable causes, to understand and explain the processes that generated the potholes. Locally, the pothole geoforms are natural jacuzzis for the population, tourists, and visitors. These sites are attractive for recreational and leisure activities, including access trails. They are also used for practical lessons for geology and geography students due to their geological and geomorphological information and have high potential for geosites

4.2. GEOLOGICAL CONTEXT

The formation of the Amazonas basin is mainly understood based on the interpretation of seismic information and, to a lesser extent, on evidence obtained directly in the field. The tectonic evolution of this basin is summarized in phases that integrate processes of deformation, sedimentation, and tectonic reactivations, which explain the consolidation of the graben, whose main axis is oriented W-E (Costa et al., 1991; Bermeguy & Costa, 1991; Cunha et al., 2007).

At the base of the basin's stratigraphic stack, occurs a sedimentary sequence from the Ordovician to the Devonian, with deposits in shallow-to-deep marine and glacial facies. From base to top, this sequence contains Ordovician neritic sandstones and shales (Autás Mirim Formation), followed by Silurian neritic sandstones and diamictites (Nhamundá Formation); Silurian marine shales and diamictites (Pitinga Formation); Silurian-Devonian neritic sandstones and pelites (Manacapuru Formation); and towards the top, sandstones and paralic marine siltstones of the Jatapu Formation (Soares et al., 2005; Nogueira et al., 1999; Cunha et al., 2007; Cuervo et al., 2018).

Associated with the sedimentary filling of the basin was the reactivation of a transcurrent shear system that limits the graben. That shear system facilitated the intrusion of swarms of Permo-Jurassic diabase dykes and sills, and the emplacement of sills and dykes of the Jurassic-Triassic Cassiporé diabase, in Amapá, and Penatecaua, on the northern edge of the basin. These pulses of basic magmatism fit into tensile structures resulting from tectonic reactivations related to the opening of the Atlantic Ocean basin (Zalán, 2004). The Caledonian orogeny generated uplift and compression in the Amazonas basin, and the sedimentation of subsequent deep-sea tract sequences (Cunha et al., 2007), complement the sedimentary stacking. Flexural subsidence and shear deformation in the Cenozoic generated segments with transpressive and transtensive structures in the basin. Evidence of tectonic deformation controls drainage systems is suggested by valleys limited by faceted triangular alignment segments, displaced terrace levels, and drowned lakes, characteristic of the Amazon basin (Passos et al., 2017).

For Costa et al., (1991), the Purus arc parallel to transcurrent faults stands out in the paleogeography of the western Amazonas basin. In the Palaeogene, the rise of

the Andean arc redirected the drainages eastwards. In the Neogene, the current fault-controlled landscape was formed. For Costa et al., (2001), the Cretaceous western portion of the Amazonas basin registered reverse faulting-oriented NE-SW, and during the Miocene-Pliocene developed a lattice drainage system with NW-SE rivers controlled by normal faults and a record of folds with a NE-orientated axis. In the Pleistocene-Holocene, normal faults NW-SE and sedimentation in grabens were reactivated.

Some sedimentary units from the northern edge of the Amazonas Basin are found in the Presidente Figueiredo city (study area), particularly the sandstones of the Nhamundá Formation. The Nhamundá Formation is constituted by quartzarenites and restricted pelites and diamictites stratigraphic sequences. In sandstones, the main structures are planar lamination, cross-lamination, symmetrical wavy marks, and hummocky cross-stratification, while pelites typically are massive. In diamictites, tectonic structures such as surface faults, fractures, protomylonitic deformation bands, inclined fault block rocks, stratification, and badinage were highlighted by sandstone pods immersed in a silty-to clay-grained matrix (Cuervo et al., 2018). Strata of medium- to fine-grained subarkose, interbedded with thick layers of medium-grained massive quartzarenites, are the potholes substrates.

The Nhamundá Formation was deformed by faults with a NE-SW attitude, which interfered with the drainage evolution system by controlling the vertical incision process (Costa et al., 2001) and the formation of waterfalls. The main features of the landscape evolution in the study area include a trellis drainage system and knick zones characterized by rapids streams, waterfalls, and potholes. The region is characterized by its trellised drainage system with waterfalls and the formation of rapids streams. They are high-energy erosive rivers with seasonal variations in water flow of up to 5 times due to a dry period (June to October) with an average rainfall of <150 mm/month and a wet period (November to May) with an average rainfall of >250 mm/month (INMET consulting in 02/12/2024). The potholes occur in the beds of blackwater streams and rivers with low concentrations of suspended sediment, pigmented by dissolved organic matter.

4.3. METHODS

To understand the role of the rock deformation and morphogenesis of the origin, evolution, and characteristics of the knickzones where the potholes are, images of LandSat-8 of Palsar Alos Radar, and remote sensing data were integrated with structural analysis. Images on a regional scale were used to define the drainage network pattern, lineament map (Ibanez et al., 2014; Das et al., 2018), and knickzones to be validated and verified on an outcrop scale. Detailed structural geological mapping of outcrops was carried out using cross-sectional profiling of structures and applying geometric and kinematic analysis of structures (Passchier & Trouw, 2005; Fossen, 2018). This analysis also included aerial photographic surveys using DJI Mavic 2 Pro drone to create more realistic images and enrich the deformation and potholes geometrical interpretations (Junior & Gomes, 2022; Navarrete et al., 2023).

In particular, large-scale potholes found at Mutum Falls were the target of geometrical parameters evaluation to observe the influence of tectonic structures on their formation and expansion (Ji et al., 2019). Thus, the horizontal section (aperture, major and minor axis), depth, walls, and floors feature, as well as the presence of grinding tools were measured using a retractable tape and a graduated non-elastic line attached to a 400 g cast iron plumb. Furthermore, the statistical data processing and graphs were performed by the RStudio program version 2023.06.0 (Braun & Murdoch, 2007). This analysis was complemented with the sandstone samples, thus the microscale sandstone characterization was carried out in 12 oriented thin sections by the qualification and quantification (95% accuracy) of primary, diagenetic constituents, pores, compositional classification, as well as microphotographs records and strain mechanisms (Folk, 1980; Weltje, 2002; Passchier & Trouw, 2005).

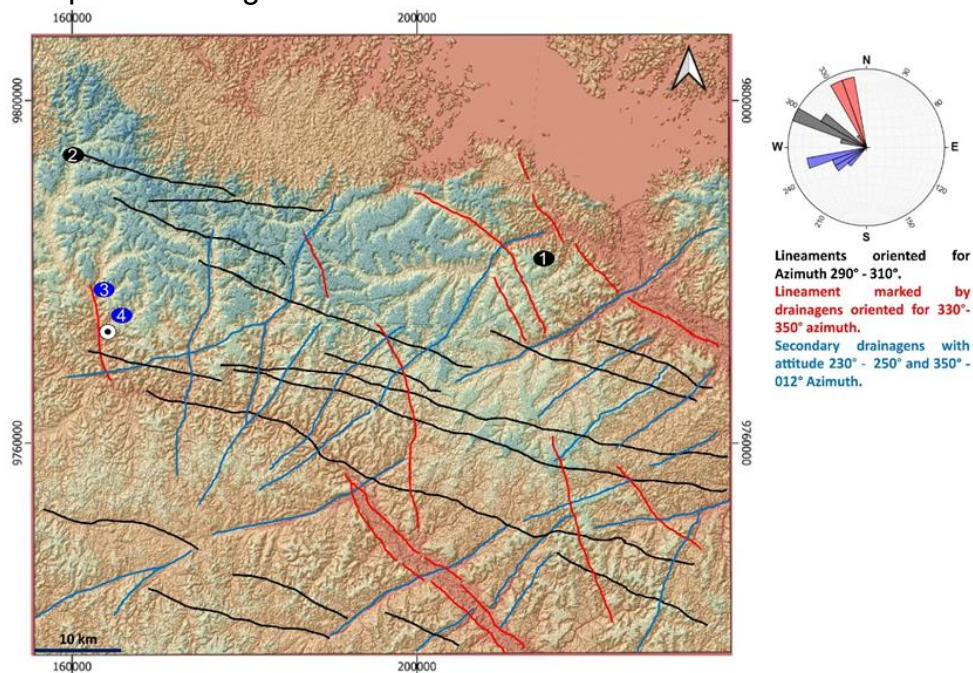
4.4. RESULTS

4.4.1. Tectonic Structures

Remote sensing image analyses show that the potholes occur in river valleys near the springs, where vertical incision and erosion predominate (Figure 18). These river valleys are aligned, bordered by triangular facets, and show changes in the direction of the current flow. The influence of a likely shear zone deformation was related to: i) the alignment of triangular facets in river valleys, staged terraces on

valley bottoms, and sharp angular changes (in elbow) in the river valley's directions, as well as, for the drainage network of the region, which are characteristic of the Uatumã and Urubuí rivers valleys (main or first-order alignment valleys) and likely controlled by structures with an attitude towards the azimuths 300° – 330° ; and ii) other straight alignments defined by secondary order drainage with trends to 230° – 250° and restricted to 190° – 200° azimuths, that forms discontinuous, spaced and sinuous valley alignments, likely represent the conjugate structures of the shear zone.

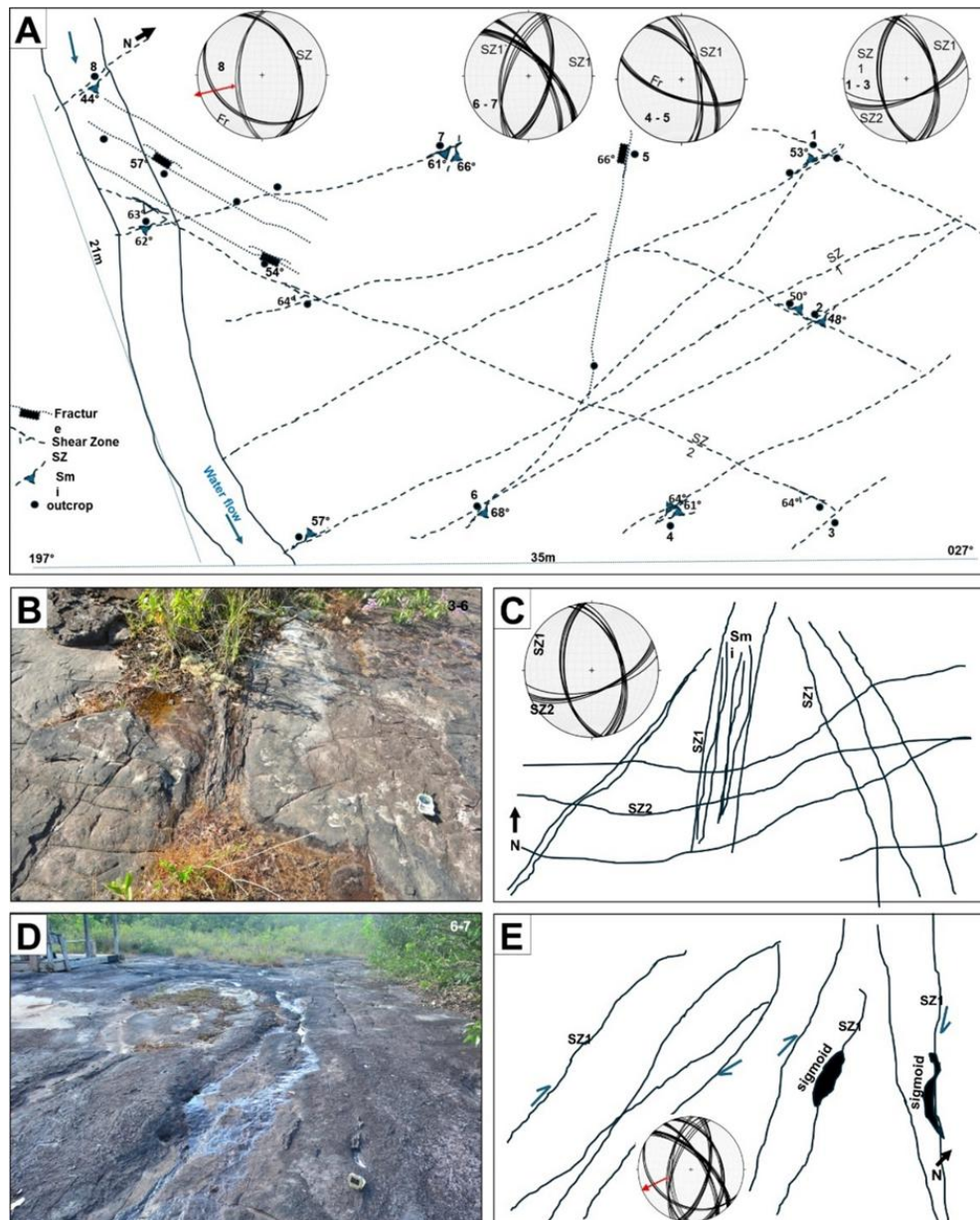
Figure 18. Elevation digital model of the SE President Figueiredo region with distribution and attitude of morphological alignments, and lower hemisphere projection equal area diagram.



In turn, structural profile analysis in the sandstone outcrops of Mutum, Urubuí, Lajes, and Princesa do Urubuí exhibits deformation restricted to sinuous shear zones (SZ). In Mutum waterfall, the structural map shows the spatial orientation of the shear zone (SZ) that deformed the rocks (Figure 19). The SZ range in width from 0.4 m to 1.9 m and develop protomylonitic foliation (Smi) and elliptical sigmoids (SC structure) with the major axis oriented at $174^{\circ}/53^{\circ}$ or $012^{\circ}/60^{\circ}$, and elongation lineation, oriented $247^{\circ}/52^{\circ}$ azimuth (Figures 19 A, B, D). The sigmoid indicates dextral kinematics related to the transpressive deformation regime (Figure 19 B). These conjugated synthetic structures generated sigmoids up to 30 cm in the major and 18 cm in the minor axes, respectively.

The recrystallized quartz grains in the sigmoids display a sucrose texture and massive appearance. The discontinuous, diffuse, and twisted foliation is oriented at $329^{\circ}/68^{\circ}$, varying to azimuths of $348^{\circ}/67^{\circ}$ and $314^{\circ}/66^{\circ}$ – $320^{\circ}/64^{\circ}$ (Figure 19 A). Persistent shear zones with widths between 3 and 5 cm, spaced between 20 m and 30 m apart, are oriented to $110^{\circ}/67^{\circ}$ – $128^{\circ}/64^{\circ}$ varying to $295^{\circ}/57^{\circ}$ – $314^{\circ}/54^{\circ}$ azimuths. Stretched lineation is oriented to 240° – 260° azimuths, indicating the mass transport during the deformation record.

Figure 19. Structures in knickzones. A) Spatial distribution of shear zones, associated fractures with attitude in the lower hemisphere projection equal area diagram, and the position of photographs highlights. B and C) Shear zones with protomylonite foliation (Smi), lineation, and sigmoids. D and E) Structural alignments with the position of photographs highlight the Riedel shear system model for the studies of the structure.



At the Fortaleza das Águas resort and the Lajes rapids streams (Figure 20), the sandstone strata are deformed by a 10 m wide shear zone which generates fractures, and sigmoids with 10 cm long and 4–6 cm wide. The deformation attitude varies from $356^{\circ}/62^{\circ}$ – $015^{\circ}/65^{\circ}$ because the SZ has a curved surface. A persistent fracturing system over 50 m long occurs oriented at $114^{\circ}/68^{\circ}$ azimuth (Figure 20B). In this outcrop, an exogenous cave is aligned with the shear zone (Figures 20 B–D).

Figure 20. Caves formed in sandstone of the Nhamundá Formation, related to ruptile shearing (Fortaleza das Águas). A) Conjugate shear zones and occurrence of potholes aligned with the structure oriented towards $356^{\circ}/60^{\circ}$, Riedel shear zones model. B and C) carves in sandstone. D and E) Deformation within the shear zone at the riverbed (Lajes). Schematic representation of shear conjugate zones and lower hemisphere projection equal area diagram.



In a section of the riverbed, about 20 m long and 4 m wide, in the intersection of shear zones, are development elliptical potholes with a major axis aligned with the structure oriented at $015^{\circ}/65^{\circ}$ (Figure 20 E). Other potholes with low eccentricity occur aligned at azimuth $130^{\circ}/72^{\circ}$ (Figures 20 D and E). All these structures represent a conjugate shear system (Figure 20A), shown in sketches and cyclographic hemisphere inferior projection equal area diagrams. In the Urubuí River, and the waterfall Princesa do Urubuí outcrops have various fault surfaces that generate steps and rapid streams with slope variables in the riverbed.

Structural correlation analysis showed that at this many outcrops the rocks were deformed by a main dextral shear zone, oriented at 120° – $300^{\circ}/50^{\circ}$ – 65° azimuths, and its conjugate structures: i) transpressive oriented at 012° and 240° azimuth, and ii) transtensive oriented $314^{\circ}/60^{\circ}$ – $330^{\circ}/67^{\circ}$ azimuth. The shear zones observed in the

study area are shown in the Riedel conjugate model (Figure 19 A) summarizing the principal structures related to pothole occurrences.

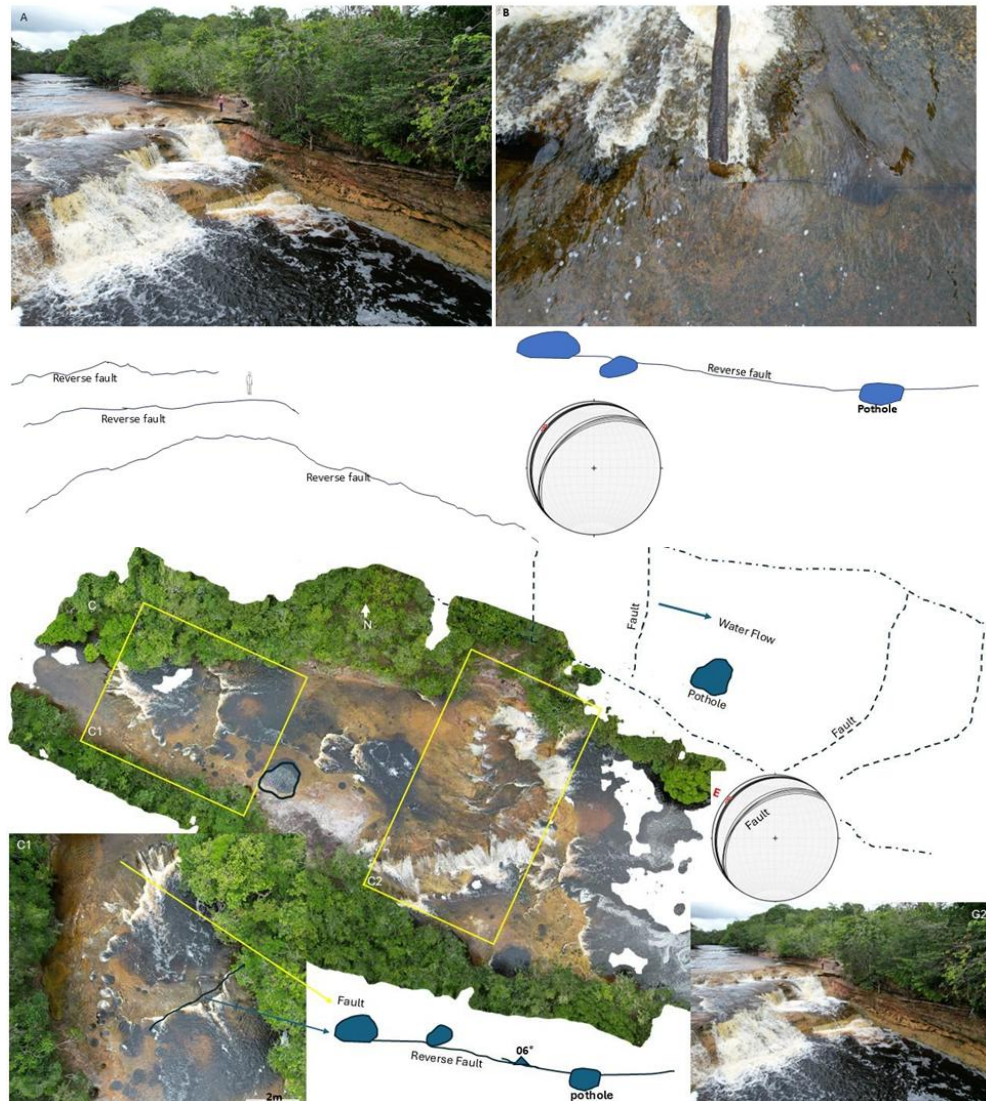
The Princesa do Urubuí waterfall (in the riverbed of the Urubuí River) is defined by three steps with heights between 0.6 and 2.5 m (Figure 21 A). In the site, sandstone up to 1.2 m thick shows traces of fossils of skolithos which tilt 56° to the azimuth 256° . In this outcrop, each step of the waterfall represents fault surfaces (Figure 21, C2) oriented to $216^\circ/09^\circ$ – $240^\circ/40^\circ$ – 50° , which develop slickensides that contain stretch marks oriented towards the azimuth 306° – $312^\circ/04^\circ$ – 06° . On these surfaces, fault steps indicate dextral kinematics related to reverse faulting. Potholes with circular to elliptical shapes with longer axis varying sizes from 0.4 to 4 m, commonly aligned with a reverse fault that defines the cascade (Figure 21, C1, and C2). The rotation of fault blocks with reverse kinematics and a subordinate transcurrent component (indicated by the orientation of striations and steps, lower hemisphere equal area projection diagram, Figure 21 A), gave rise to the Princesa do Urubuí waterfall. Reverse faults are common in ruptile shear systems (deformation Riedel model), with secondary conjugate structures.

4.4.2 Sandstone Petrography

The very fine-to-medium-grained Nhamundá sandstones are mostly quartzarenite, and subordinary subarkoses (Folk, 1980). The grains are sub-rounded to sub-angular, moderately sorted, and display predominantly high sphericity, however, fractured, rotated, and embayment grains are also observed (Figures 22 A, B, and C). In some sandstone fabrics, preferential orientation of low-sphericity grains occurs. The packing index is normally highlighted by concavo-convex and tangential contacts.

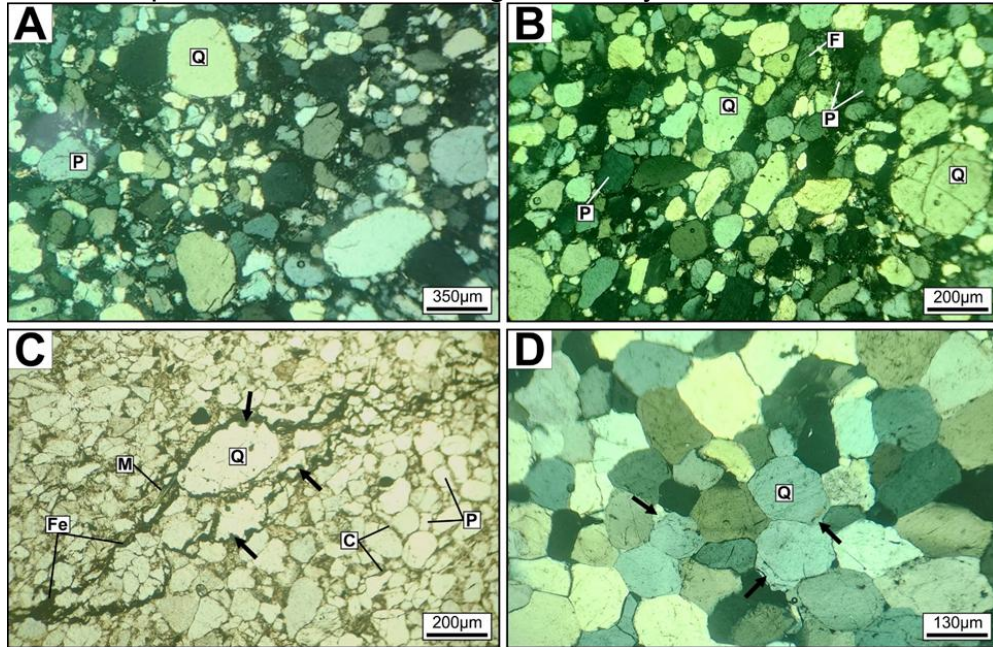
The quartz grains are mainly igneous monocrystalline with abrupt (average of 58.6%) to slightly (average of 9%) undulose extinction, besides polycrystalline metamorphic origin (average of 4%). Detrital plagioclase (average of 7%) dominates over potassium feldspar (average of 3%), and both can exhibit limited dissolution (maximum of. 1%). Trace amounts of rock fragments (plutonic and mudrocks) and translucent heavy minerals (zircon and tourmaline) grains occur dispersed in the sandstones (average of 1.7%).

Figure 21. Structures in the Princesinha do Urubuí waterfall of the Urubu River. A) Steps of reverse fault. B) Spatial relation to the occurrence of potholes vs fault. C) Fault highlights for the orientation of cross reverse fault tracks to the flow of river, fault steps or cascade, and attitude of fault (stereo net projection lower hemisphere, equal area with cyclographic plot of faults orientation and their striae -E attitude). C1) Position of potholes and faults. C2) Steps by fault displacement forming the cascade.



On the other hand, the sandstone matrix is represented by silt-grained quartz grains and muscovite. The main diagenetic minerals in Nhamundá sandstones are authigenic clay and iron oxides/hydroxides as porelining rims (average of 4.2%), partial porefilling and oriented along fractures, as well as silica (average of 2.3%), which developed microquartz rims and syntaxial overgrowth habits (Figure 22 D). Nonetheless, in samples collected next to foliations structures the intergranular space (up to 9%) is filled by syntaxial quartz overgrowths.

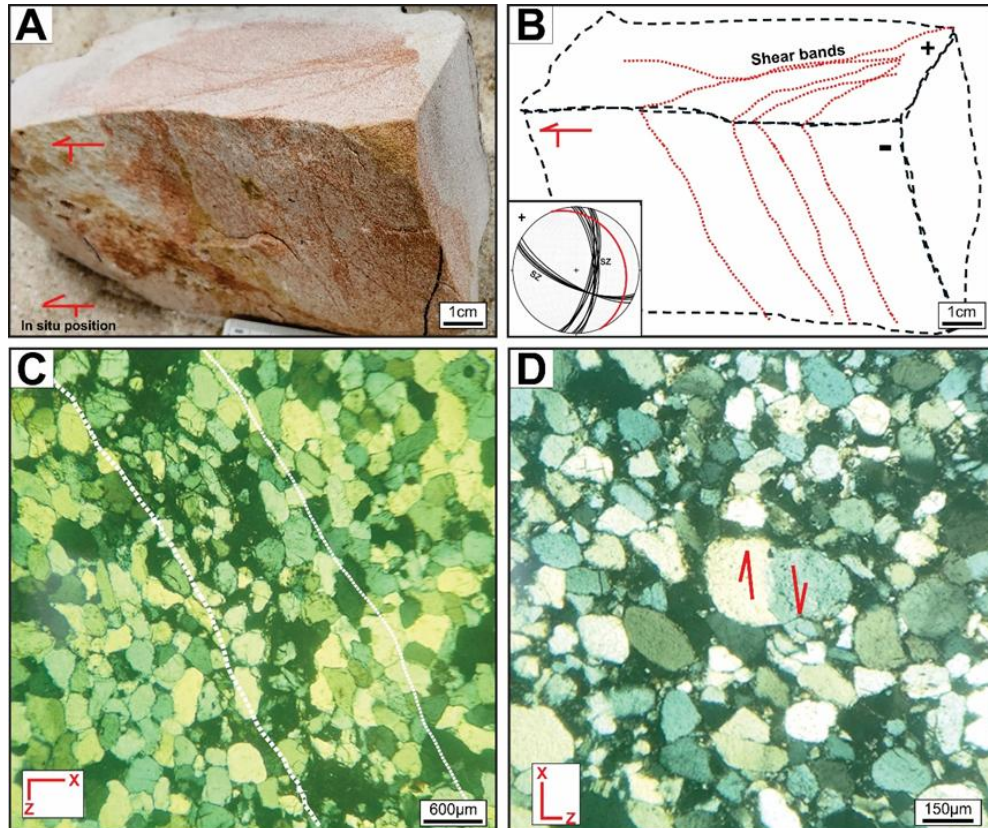
Figure 22. Petrographic aspects of the Nhamundá sandstones. A and B) Fine-to-medium-grained quartzarenite and subarkoses sandstones with sub-rounded to sub-angular grains and moderate sorting. C) Detail of clay (C) and iron oxides/hydroxides (Fe) cement. Note the diagenetic iron oxides/hydroxides filling fractures and quartz (Q) embayment grains (arrow). D) Detail of syntaxial silica overgrowths (arrows) filling intergranular pores. A, B and D NX, C N//. P-plagioclase, F-potassium feldspar, M-muscovite, C-diagenetic clays.



4.4.3. Strain Mechanisms

The evidence of deformation observed in the sandstone of the Nhamundá Formation thin sections corresponds to simple shear zones and records fragile structures through which rainwater percolates and causes framework oxidation/dissolution of sandstone. Brittle shear structures are usually registered as shear bands (Figures 23 A, B, C, D), whose strain mechanisms are characterized by: i) fracturing with reduction of grain size, forming cataclastic bands, and grains dissolution (Figures 23 B, C, D); ii) intracrystalline strain is indicated by quartz grains undulose extinction and fracturing (Figure 23 C); and iii) grain size reduction and rotated (Figures 23 B and C) indicating that in the shear band, the strain has progressively developed by the rotation of grains related to simple shearing, so low sphericity grains acquired preferential orientation and alignment (Figures 23 B and C).

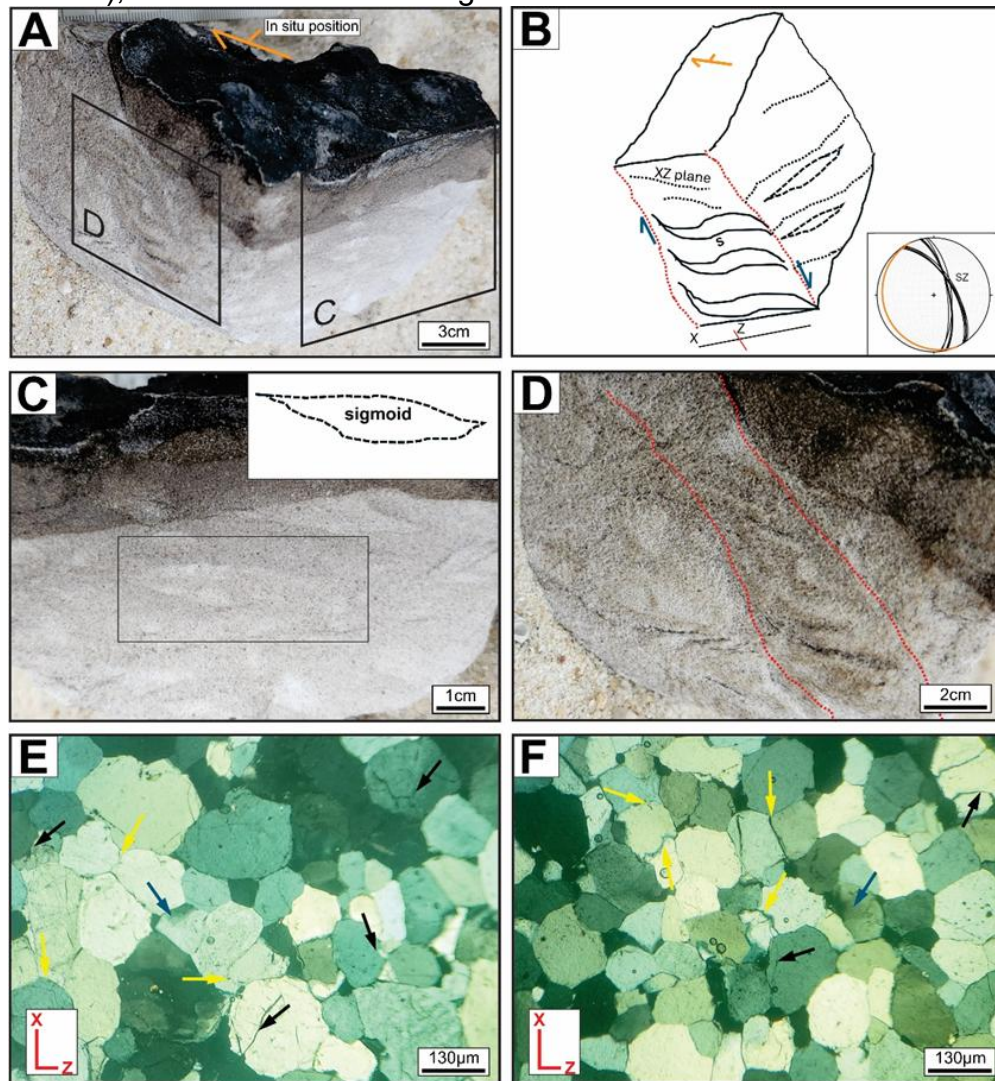
Figure 23. Ruptile strain within the shear bands on Nhamundá sandstones in meso and micro-scale. A and B) Oriented sandstone sample, highlighting the cataclastic shear bands. Lower projection hemisphere inferior equal area diagram of shear bands in red. C) Photomicrographs of quartz arenite textures in shear bands (pointed line) in silt-grained matrix sandstone. Note a fracturing and reducing grain size is concentrated on shear bands. D) Detail of quartzarenite with fractured quartz grain associated with shear bands.



In the Princesa do Urubuí and Mutum knickzones, the shear zone (SZ) developed conjugated structures, cataclastic strain mechanisms, restricted protomylonite foliation (Smi) or SC shear bands, recrystallized sigmoidal sandstones, and SC foliation (XZ plane, Figures 23 and 24). On the other hand, in the microscale, the main evidence is related to grain size reduction, rotation, fractures, embayment, preferential low-sphericity grains orientation, and deformed silica overgrowth contacts (Figures 21 B, D, 22 C, 7 D, and 24).

These deformation processes in the rock developed: i) dynamic recrystallization of quartz associated with shearing and incipient stretching; ii) total filling of interstitial spaces by silica overgrowth cement, and iii) reorganization and development of low sphericity grains preferential orientation.

Figure 24. Deformation evidence on Nhamundá sandstones. A, B, C and D) Oriented sandstone sample with deformation related to the shear conjugate system in Mutum outcrop and schematic drawing of fragile-plastic strain mechanisms on SC foliation. E and F) Quartzarenite framework with fracture (black arrows), grain size reduction, rotation, undulate extinction (blue arrows), deformed silica cement boundaries (yellow arrows), and restricted stretching.

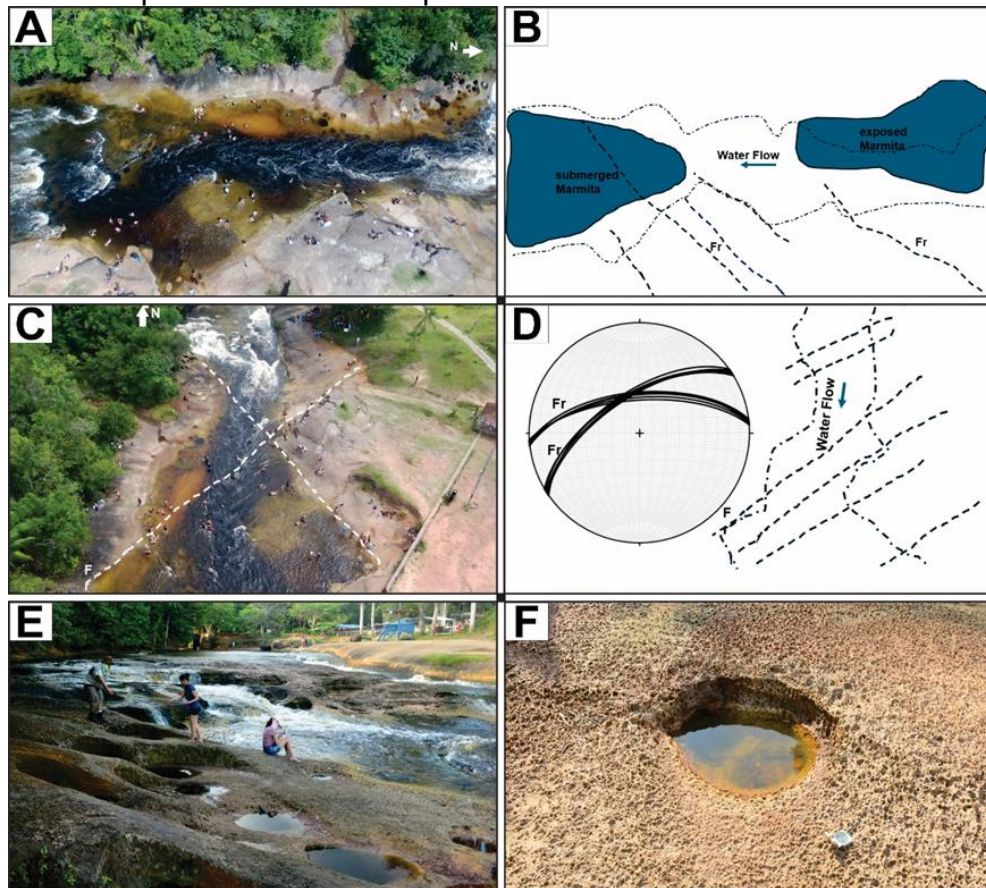


4.4.4. Morphogenetic Process

Among the most relevant surface geological processes that support the pothole's origin and evolution, are: i) on rocks with surfaces exposed to weathering and meteoric fluid, the dissolution and erosion process generates caves, carves, and other karstic features (p.e. tafoni, alveoli, dissolution basins) on quartz-to subarcosic geological unit, as well as the reported deformation and; ii) the erosion processes in riverbeds are especially efficient in knickzones due to the relative movement of faulted rock blocks. In the stretch of rivers where the potholes occur, the river valleys are notched with steep slopes, straight, and the riverbed has a flat cross-section.

In knickzones mapped, the riverbed ramps slopes range between 02° and 04° , between 05° – 08° and 15° – 22° , and form waterfalls up to 5 m high, so the topographic gradient change of the riverbed favors the hydrodynamic erosion by turbulent flow process (Figures 25 A, B, C, D). For example, at the Mutum outcrop, the potholes occur in a riverbed section about 70 m long and 8 m wide, and the flow of the water of the creek is mainly directed to the azimuths 012° , following ramps of low slope (04°), and for 320° of azimuth in ramps with greater slope (08° – 20°). The potholes are more concentrated in the ramps from 08° to 20° of inclination.

Figure 25. Potholes from the Urubuí knickzone. A and B) Aerial view and structural schematic drawing of riverbed ramps with potholes and transverse fracture (Fr) river direction at Urubuí rapid stream. C and D). Aerial view and structural schematic drawing of riverbed ramp at Urubuí outcrop. Potholes show the orientation major axis parallel to the attitude of the structures (dotted lines) highlighted in the diagram of the lower hemisphere projection equal area. E) Fractures controlling the axis of potholes and pressure relief fractures Urubuí outcrop. F) Associated karstic features (tafone) and fracture with pothole in Urubuí rapid stream.



In the Urubuí rapid stream, the riverbed has several ramps about 60 m long (Figures 25 A and B). Some potholes have elliptical shapes (with a longer axis aligned to the azimuth 260°) and are more concentrated on the right edge. Such

ramps are separated by fractures (Fr) with attitudes from 235°/65°, and 265°/67°, which control the geometry of the left-eastern margin of the river valley. These segments are straight and oriented transverses to the direction of the water flow. These fractures are highlighted by weathering in foreshore facies sandstone when the rock exhibits, in addition to deformation, differential displacements of the strata sandstone in the riverbed (erosive front, Figures 25 C and D). In the riverbed is common the formation of karstic features where potholes occur, highlighting the susceptibility to erosion of the sandstones (Figure 25 D).

4.4.5. Mutum Waterfall Potholes Geometrical Analyses

An area of approximately 21 m² was the target of the geometric analysis of 27 potholes, and the potholes were characterized as an elliptic cylinder according to Ji et al., (2019). The measured of potholes parameters included: major axis (a), minor axis (b), depth (h), mean outer edge diameter (D), outer edge aspect ratio (a/b), side shape (b/h), and diameter-to-depth ratio (D/h), as demonstrated in Table 1 and Figure 26.

Table 1. Arithmetic means of thr geometrical parameters of Mutum waterfall potholes developed in sandstones of the Nhamundá Formation.

n	a (m)	b (m)	a/b	D (m)	h (m)	D/h	R ²
27	2.380	1.735	1.423	2.365	2.023	1.772	0.734

The potholes of Mutum waterfall have an outer edge aspect ratio (a/b) between 1.00 m and 2.49 m, with an arithmetic mean of 2.08 m, and are considered compatible with the cylindrical-to-elliptical geometry of the aperture on the surface section observed in the riverbed. In eccentric elliptical aperture, potholes commonly are major axis (a) aligned to the local 320° azimuth conjugate shear zone, whilst low eccentric elliptical aperture to the azimuth 012° (Figure 27).

The diameter-to-depth ratio (D/h) ranges from 0.41 m to 1.55 m with an arithmetic mean of 0.79 m. The frequency distribution curve shows positive skewed and bimodal patterns in major and minor axis parameters, respectively, while the outer edge aspect ratio (a/b) displays negative skewed. The diameter-to-depth ratio (D/h) frequency distribution curve was classified as unimodal with negative skewed. Additionally, a linear trend for the diameter-to-depth ratio (D/h) parameter was observed for most measured potholes ($D = 0.7721h + 0.8034$; $R^2 = 0.734$).

Figure 26. Mutum waterfall histograms of the geometrical parameters (a, b, a/b, D, h, and D/h) measured for 27 potholes. N- the number of potholes; M- the arithmetic mean; Me- the median (the 50th percentile in the distribution); and Mo- the mode.

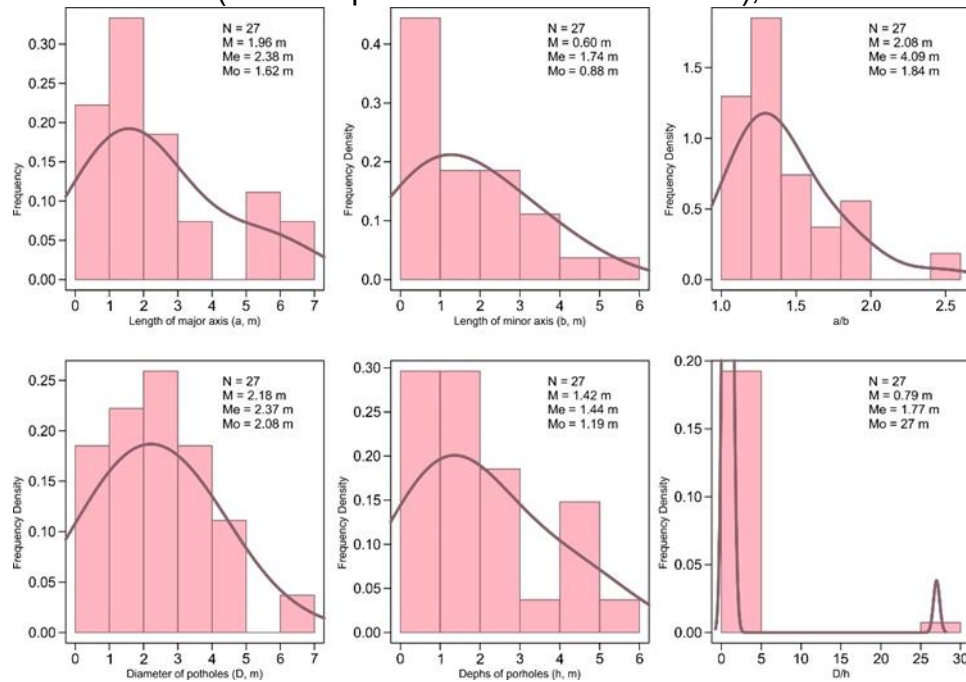
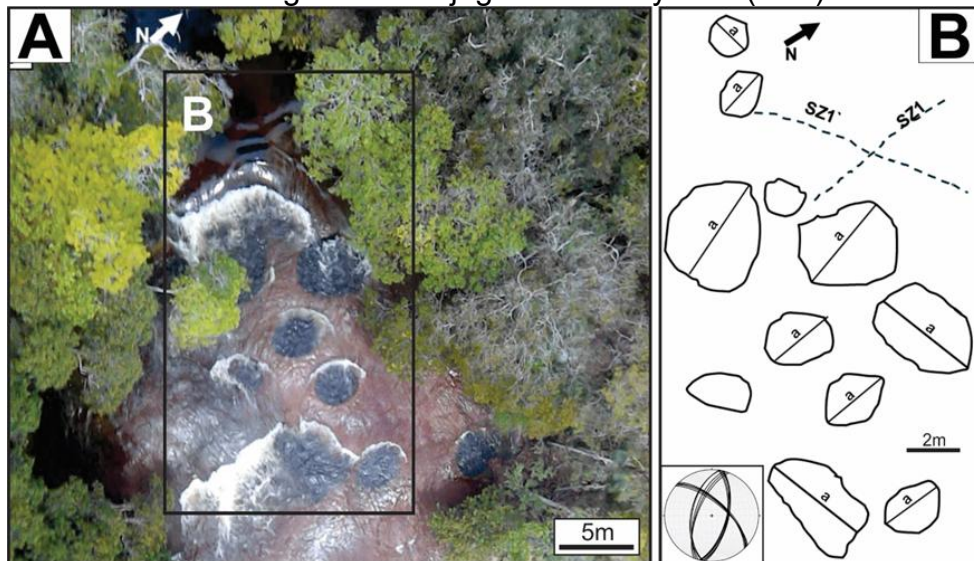


Figure 27. Evidence of the tectonic influence in the formation of potholes. A) Mutum potholes with geometry related to shear zones, with major axis (a) alignment with attitudes of SZ, showed at lower projection hemisphere diagram equal area. B) Structural schematic drawing of the conjugate shear system (SZ1).



4.5. DISCUSSIONS

Potholes, pans, and pits are geoforms that develop on exposed rock surfaces due to chemical weathering and erosion processes (Twidale, 1982; Ortega et al., 2014). These processes are more efficient in tropical rainforest areas where: (a) processes of rainfall and evaporation in a seasonal occurrence and (b) high-energy rainwater runoff across rock surfaces, sweeping away the depressions as an erosive agent.

In this context, potholes are formed by weathering, and rainwater is a seasonal erosive agent. For Vidal-Romani and Vilaplana (1984) mineral dissolution processes are facilitated when the rocks have varied mineral compositions. Because some minerals are susceptible to chemical weathering processes (e.g. feldspars in igneous rocks, carbonates in sedimentary rocks). A contrary response is expected in quartzarenite (rocks with a dominant mono-mineral composition). For some authors, weathering, and migration of rainwater associated with dissolution, are the main processes that develop potholes (Twidale, 1982; Vidal Romaní & Twidale, 1998; Vidal Romaní & Rodriguez, 2007).

In the study area, the record of tectonic structures in sandstone through fragile strain mechanisms modified the resistance of the rocks. Thus, partial sandstone framework dissolution due to shear bands mapped, disaggregation of mineral grains, and the spread of weathering fronts processes acting over time, are associated with the pothole's origin. Besides, the alignment of potholes along tectonic fractures is reported by Vidal-Romaní & Twidale (1998). The abrasion of pebbles and clasts, rotated by hydrodynamic forces in riverbeds, explains the marmite formation associated with pure erosive processes (Christofolletti, 1980). However, the origin and evolution of the large-scale potholes studied at Mutum Waterfall are different. To understand and explain this enigma, some interpretations are supported by the development of specific geological processes.

In this research, the origin and evolution of potholes result from the interaction of many processes, as follows:

i) The evolution of some river valleys of the trellis pattern drainage in the Presidente Figueiredo region, carved in sandstones, is promoted by erosion and tectonic deformation effects on rocks. These processes occur mainly in knickzones formed in

the intersection of shear zones that represent a shear conjugate model, and by seasonal changes in the volume and the energy of the water flow.

ii) Riedel structures are commonly reported as the product of shear zones (Gapais et al., 1987; Carreras et al., 2010; Fossen & Cavalcante, 2017). The dextral shear system that deformed the rocks studied is represented by sinuous and anastomosed, conjugate shear bands arranged in Echelon. In the outcrops studied, the major axis of elliptical potholes is related to the shear zone attitude. So, the network consists of a main structure or P-type shear zone orientated around 300° – 130° azimuths, R-type shear bands orientated at 330° , and more restrictively with the R' shear bands with 012° azimuths (controls the potholes in Mutum and Lajes). Subordinated shear zones X-type orientated close to 240° azimuth control the position of the potholes and their geometry in Princesa do Urubuí and Urubuí outcrops. This tectonic structuring is thought to have resulted from progressive simple shear deformation of the Nhamundá sandstones, mainly related to cataclastic flow.

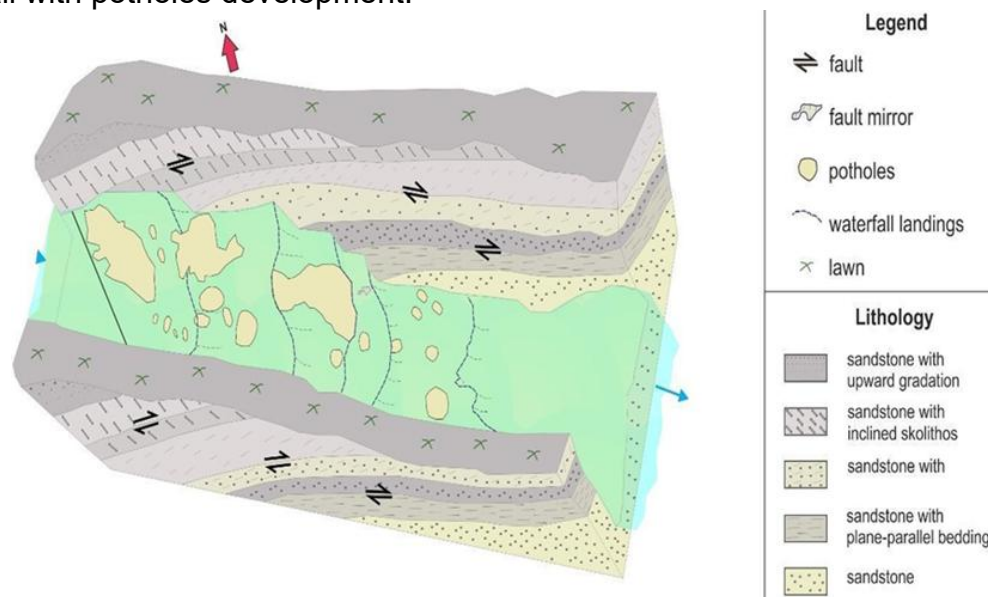
iii) Neotectonic structures and morphogenetic processes along the Amazonas Basin's northern edge geological history, particularly the tectonic activations, and reactivations, which influenced the response of the rocks to morphogenetic processes and controlled the evolution of the landscape (Costa et al., 2001). The drainage trellis pattern shows rivers characterized by knickzones where dominant changes in the inclination of the riverbed, the direction and energy of the water flow, and the presence of rapids streams, and waterfalls. Sinuous riverbeds are composed of ramps with a slope between 02° and 08° , separated by ramps inclined 15° – 22° . In these ramps the water flow is turbulent, changing the direction of drainage to the azimuths 320° and 012° and of speed (kinetic energy of the stream). These conditions induce the formation of local water flow vortexes and promote the vertical erosion of the siliciclastic rocks at the intersections of shear deformation structures.

iv) Epigenetic caves are common in limestone and evaporite rocks because of dissolution, and ion transportation (Ford & Williams, 2007). Inside caves, speleothems are formed by precipitation and deposition processes that act over geological time, and therefore record variations in the paleoclimatic conditions of a region (Grimes, 2012a, b). However, karsts recorded in non-soluble rocks, such as sandstones, can be considered of karst origin when the dissolution process is fundamental for the formation of the features, considering their morphological,

chemical, and structural evidence (Wray, 2013; Wray & Sauro, 2017). Thus, the sandstone framework dissolution increases the total porosity and reduces its resistance to weathering, a process called arenization (Wray & Sauro, 2017).

v) Potholes are concentrated in segments of the riverbeds with varying slopes of ramps of slip of faulting surfaces (Figure 28). The vertical incision of the valley, and the hydrodynamic evolving erosive vortex formation, depend on the erosive power of the rivers. The combination of all these factors explains the origin of the potholes, however, their evolution is conditioned by specific and intrinsic tectonic deformation mechanisms in the sandstone.

Figure 28. 3D diagram block showing reverse faults ramps and their effects on the morphology of riverbeds in the knickzone formation of the Princesinha do Urubuí waterfall with potholes development.



vi) In thin sections, the dissolution in the Nhamundá sandstones was associated to authigenic clay and iron oxides/hydroxides oriented along fractures, which causes embayment grains, fracturing, reducing, and rotation grains weakening the rock framework. The presence of feldspars in the mineral composition of sandstones (subarkose intervals) facilitates the dissolution process in shear band deformation. However, silica dissolution models in oxidizing environments can be problematic, as silica-saturated solutions under these conditions are more susceptible to solute, thus silica solubility conditions are fostered in more alkaline environments (Wray, 2013; Sauro, 2014; Melo et al., 2015). Lazo et al., (2017) and Potysz & Bartz (2024) highlight that silica solubility can be reached under surface conditions when there is a significant organic acid contribution by the weathering mantle and the extensive

vegetation cover implanted. Under these conditions, silica can be dissolved not only from the framework quartz grains but also directly from silica overgrowth, especially low-temperature cement, such as amorphous silica. Therefore, in most sandstones, the arenization process does not remove the majority of framework rock, and the landscapes are molded by a combination of silica dissolution aided by subsequent mechanical erosion (Jennings, 1985; Wray, 2013; Sauro, 2014). The rocks of the Nhamundá Formation were deformed by a conjugate shear system and shaped by morphogenetic processes under tropical climate conditions, forming knickzones, potholes, and exogenous caves. The genesis of those geoforms was correlated to dissolution processes in sandstone, and percolation of rainwater by the shearing surfaces. This interpretation is supported by volumes of deformed and shear structures whose surfaces are highlighted by Fe hydroxides, indicating the migration paths of meteoric fluids. Similar processes were reported by Wray & Sauro (2017) in the sandstones (tepui in the Gran Sabana, Venezuela).

vii) In thin sections, silica overgrowth contacts with strain mechanisms due to fragile simple shear bands are associated with volume change and mass transfer. Micro-fracturing of grains and migration of fluids induce transformations and deformation at the silica cement contacts (Gratz, 1991, Sauro, 2014). Ion diffusion evolves dissolved mass out of the grain cement contact zone by transferring normal stress boundaries (Ruter, 1983; Means & Paterson, 1996; Fossen, 2018). The precipitation of iron hydroxides was caused by rainwater migration and was channeled by shear bands. Grain alignment and low-sphericity grains preferential orientation are also associated with the effects of deviatoric stress, diffusion, and mass distribution, which occurs from higher to lower pressure surfaces (Means & Paterson, 1996; Awad et al., 2000). These processes act at different scales favoring the conditions for pothole formation and contributing to understanding the occurrence of karst features in sandstone.

viii) The geometric parameters of Mutum waterfall are consistent with the influence of tectonics on its origin and evolution. The average a/b ratio of 2.08 m suggests major contributions of ecliptic aperture potholes, in which the major axis (a) is often oriented according to tectonic structures related to SZ, leading to the large a/b ratios. The D/h ratio values close to 1.77 m indicate that the depth for most potholes exceeded the effectiveness for the highest bottom shear stress required for frictional sliding of grinders on the floors (Pelletier et al., 2015), so D/h ratio greater than 1 m, and the

occurrence of ZC associated to potholes, indicate that the reported structural anisotropies contributed to the widening and deepening of geoforms. According to Pelletier et al., (2015), the diameter-to-depth ratio (D/h) is an important parameter for the geometrical characterization of potholes and no-scale spatial dependence, assuming linear behavior. Data diameter-to-depth ratio variations outside of linear behavior are traditionally interpreted as related to local hydrodynamic characteristics (e.g. substrate gradient changes, size of grinders). However, here we assume that the nonlinear behavior of some pothole data is directly linked to the fragility of the sandstone substrate associated with tectonic anisotropies.

4.6. CONCLUSIONS

The formation of potholes in the sandstones of Nhamundá Formation is a unique expression that stands out in the region as an important tourist attraction. In this research, four outcrops representative of geological diversity, quartzarenite strain, and morphogenetic dynamic process were analyzed. These sites have geoscientific aspects, attributes, and values of the natural landscape, and especially the potholes of Mutum in the Figueiredo Region are famous for their “natural jacuzzis” and it’s a tourist site. The results of this study are relevant by their scientific support, explaining the origin of a singular geoform, that has necessary attributes to be registered as geosite. This study highlights the characteristics of a shear conjugate system and the relevant role of tectonic structures in the landscape evolution in the region.

As a highlight of this research, it was understood that potholes are formed by the erosive power of the water flow in the riverbeds on sandstone substrates, which were deformed by specific tectonic structures. In all knickzones where the potholes occur, partial dissolution of sandstone framework, hydraulic erosion, and shear strain mechanisms are present. The pothole’s geometry depends mainly on the orientation of the structures recorded in the rocks, as demonstrated by geometric analysis, which directs the advance of erosion processes because of water flow on riverbeds.

Factors such as mineral composition, texture variation, and the record of the conjugate shear system, accentuated the susceptibility to the erosion of the Nhamundá sandstone. Where these variables converge, the river’s hydraulic energy and its erosive capacity overcome the resistance of the rocks and form potholes. The

main conclusion of this research was to understand the role of sandstone strain in the origin and evolution of the potholes represents an unprecedented fact for the Amazon region.

CAPÍTULO 5. ARTIGO SUBMETIDO A REVISTA GEONORTE

Título: Origem e Evolução das Jacuzzis Naturais (Marmitas) em Presidente Figueiredo (AM): utilização de Exocarstes para Preservação do Meio Natural na Proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas

Autores: Isabela Apoema Gomes de Souza¹, Roberto Cesar de Mendonça Barbosa¹ e Carlos Alejandro Salazar¹.

¹Programa de Pós-graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas.

Resumo: As marmitas são geoformas exocársticas na forma de depressões circulares encontradas no leito rochoso de drenagens e tradicionalmente associadas à ação abrasiva das águas. Em Presidente Figueiredo (AM), marmitas de grandes dimensões, localmente chamadas de jacuzzis naturais, têm chamado a atenção devido ao seu potencial geoturístico, bem como questionamentos sobre sua formação, uma vez que os modelos hidrodinâmicos tradicionais são incompatíveis com as profundidades dessas geoformas. Esse artigo apresenta a caracterização morfométrica e da geodiversidade nas principais ocorrências das geoformas, com objetivo de promoção da geodiversidade local e utilização sustentável do meio natural na proposta de Geoparque Cachoeiras do Amazonas. As 123 marmitas avaliadas ocorrem em arenitos finos a médios da Formação Nhamundá (Bacia do Amazonas). Predominam aberturas elípticas, do tipo *pan*, com relação diâmetro/profundidade com tendência linear positiva e eixo maior orientado para o quadrante NW, compatíveis com os principais esforços neotectônicos da região. A origem e evolução de marmitas para jacuzzis naturais envolve escavações iniciais em anisotropias estruturais, coalescência e aumento da geoforma ao longo das anisotropias e a dissolução do substrato rochoso promovido pelo rebaixamento cíclico do lençol freático. A avaliação da geodiversidade classificou os locais como geossítios de relevância nacional e sítio da geodiversidade. As informações foram compartilhadas com os guias de turismo do território e utilizadas na proposição de

painéis interpretativos que destacam a geodiversidade local reforçando políticas inerentes a futura implementação do geoparque.

Palavras-chave: Geoconservação; Carstes; Painéis Interpretativos.

Abstract: The potholes are circular exokarst geoforms found in the drainage bedrock and traditionally due to the abrasive action of water. At Presidente Figueiredo (AM), large potholes, locally called naturals jacuzzi, have attracted attention related to their geotourism potential, as well as formation, since traditional hydrodynamic models are incompatible with the depths of these geoforms. This article presents a morphometrics and geodiversity characterization of the main occurrences of the geoforms sites, with the aim of promoting local geodiversity and sustainable use of the natural environment of the proposal Cachoeiras do Amazonas Geopark. The 123 availed potholes occur in fine-to-medium grained sandstones of the Nhamundá Formation (Amazon Basin). Elliptical apertures and pan type predominate, with positive linear trend diameter/depth ratio and a major axis oriented toward the NW quadrant, compatible with the main regional neotectonic efforts. The origin and evolution of naturals jacuzzi involve initial excavations in structural anisotropies, coalescence and enlarge of the geoform along the anisotropies, and rock dissolution promoted by the cyclical lowering of the water table. The geodiversity analysis classified the geoforms occurrences as national relevance geosites and geodiversity sites. The information was shared with the territory's tourist guides and used to propose interpretative panels that highlight the local geodiversity, reinforcing policies inherent to the future implementation of the geopark.

Keywords: Geoconservation; Karsts; Interpretative Panels.

5.1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a ação desenfreada do ser humano e as alterações do meio ambiente têm gerado uma preocupação crescente quanto à conservação da geodiversidade para as gerações futuras. Nesse contexto, nasce o conceito de Geoparque, que visa valorizar o patrimônio da Terra, suas paisagens e formações geológicas em conjunto com práticas de desenvolvimento sustentável local (Carvalho *et al.*, 2020; Catana & Brilha, 2020; Rodrigues *et al.*, 2021; Fleig *et al.*, 2022; Kuhn *et al.*, 2022). A essência de um Geoparque baseia-se na ideia de uma sala de aula/laboratório *in natura* de beleza excepcional e relevância geocientífica,

promovendo pesquisas científicas, socioeducativas, ambientais e sustentáveis (Gray *et al.*, 2013; Brilha *et al.*, 2018; Ferreira e Valdati, 2023).

Para que um Geoparque seja desenvolvido é necessário inicialmente conhecer a diversidade geológica do local, o que norteia as avaliações e potenciais que farão parte do planejamento das ações de conservação e uso. Segundo Garcia *et al.*, (2022), as estratégias de geoconservação abrange três módulos gerais: diagnóstico (coleta de dados e avaliação), conservação (proteção legal e monitoramento) e promoção (ações de divulgação). Esses módulos devem ser aplicados em conjunto para o sucesso de políticas bem-sucedidas de conservação e sustentabilidade baseada na geodiversidade.

No início da década passada, o município de Presidente Figueiredo (AM), conhecido regionalmente como “Terra das Cachoeiras”, foi alvo de um inventário do geopatrimônio da região, delimitando um território de 6.774 km² sob a denominação de Projeto Geoparque Cachoeiras do Amazonas (GCA) (Figura 29; Schobbenhaus, 2012). Atualmente o Projeto GCA conta com 18 geossítios e 2 sítios da geodiversidade cadastrados que evidenciam elementos geológicos do norte da Bacia do Amazonas, além de aspectos paleontológicos e arqueológicos de relevância científica, educativa e turística (Oliveira *et al.*, 2022; Souza & Ribeiro, 2024). Os geossítios cadastrados estão concentrados em cachoeiras, quedas d’água, corredeiras e, especialmente, em feições cársticas (p.e. grutas e cavernas) ainda pouco estudadas nos arenitos silurianos da Formação Nhamundá, Grupo Trombetas da Bacia do Amazonas (Cunha *et al.*, 2007).

Nos últimos anos, outras feições cársticas como as marmitas e jacuzzis naturais (termo local para exemplares de grande escala) têm despertado interesse geoturístico, entretanto ainda permanece não bem compreendida cientificamente, uma vez que os modelos hidrodinâmicos tradicionais de origem e evolução são incompatíveis com suas grandes dimensões, que podem alcançar 4.95 m de abertura e profundidades de até 5,21 m (Oliveira *et al.*, 2022).

Após a criação do projeto e a quantificação preliminar do geoparque, poucas iniciativas ocorreram para a elaboração de um plano de atividades para a sua implementação, especialmente as aplicadas nos grupos de interesse (*stakeholders*), resultando na desvirtuação das atividades de geoconservação, vitais em qualquer geoparque. Neste sentido, este artigo apresenta a análise morfométrica e considerações sobre a origem e evolução das marmitas, o diagnóstico da

Mapa Geológico da Proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas - GCA

Ponto	Nome
1	Embasamento Cristalino
2	Formação Prosperança
3	Cachoeira da Iracema
4	Cachoeira da Porteira
5	Cachoeira da Pedra Furada
6	Formação Manacapuru
7	Platô Laterítico
8	Gruta do Maroaga
9	Cachoeira do Mutum
10	Geossítio Cachieira Micade
11	Geossítio Cachoeira das Orquídeas
12	Geossítio Cachoeira Sussuarana
13	Geossítio Gruta do Batismo
14	Geossítio Cachoeira Berro D'água
15	Geossítio Cachoeira da Neblina
16	Geossítio Cachoeira Natal
17	Geossítio Perfil Laterítico da Formação Prosperança
18	Geossítio Perfil Laterítico da Formação Alter do Chão
19	Circuito Salto do Ipy (SG-1)
20	Circuito da Kyra (SG-2)

Legenda

- Sede Presidente Figueiredo
- Geossítios e Sítios da Geodiversidade
- Área de Estudo
- Represa de Balbina
- Drenagens
- Rodovias
- Perímetro da Proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas - GCA

Unidades Litoestratigráficas

- Formação Alter do Chão
- Formação Jatapu
- Formação Pitinga
- Formação Manacapuru
- Formação Nhamundá
- Formação Prosperança
- Suíte Intrusiva Mapuera
- Grupo Iricumé
- Suíte Intrusiva Água Branca
- Complexo Jauaperi

Pontos com Jacuzzi's Naturais

- 1 Cachoeira do Mutum
- 2 Cachoeira Princesinha do Urubuí
- 3 Corredeira das Lajes
- 4 Corredeira do Urubuí

Escala: 1:760.000. Datum: SIRGAS 2000. Projeção Geográfica EPSG 4674. Fontes: ANA, Agência Nacional de Águas (2022); CPRM/SBGeo, Serviço Geológico do Brasil (2022); IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). QGIS 3.28.8 Firenze. Autora: Isabela Apoema (2025)

5.2. MATERIAIS E MÉTODOS

A caracterização morfométrica das marmitas seguiu a proposta de Ji *et al.*, (2019), por meio da obtenção dos elementos geométricos de 123 marmitas realizadas com uma trena retrátil de 10 m e uma corda não elástica graduada anexada a um plumo de ferro fundido de 400 g. Os dados estatísticos foram apresentados na forma de histogramas e complementados por gráficos gerados no programa *RStudio* versão 2023.06.0 (Battist *et al.*, 2019).

Essas informações serviram de base para o diagnóstico da geodiversidade dos locais de interesse geológico (Brilha, 2016) que considera o valor científico, os potenciais para uso educacional e turístico, bem como o risco de degradação. Os locais com marmitas foram caracterizados em campo com o auxílio de uma ficha de inventário e avaliados quantitativa via plataforma GEOSIT (Sistema de Cadastro e Quantificação de Geossítios e Sítios da Geodiversidade), que permitiram a classificação e recomendação de uso sustentável (Rocha *et al.*, 2016). Assim, as médias dos valores das notas de cada quesito da localidade selecionada determinarão a sua classificação e relevância nos âmbitos internacional (> 300), nacional (entre 200 e 299) ou regional (< 199), bem como as prioridades para medidas de proteção e conservação devido a atividades didáticas, turísticas e científicas.

A avaliação qualitativa envolveu a caracterização prévia dos elementos da geodiversidade das feições de interesse em documentos disponíveis e visita *in loco*, seguido do preenchimento de formulários com foco no geoturismo, como os descritos nas pesquisas de Alves *et al.*, (2020), Silva *et al.*, (2021; 2022) e Henriques & Alves (2023). Este formulário possui os critérios de identificação e avaliação, incluindo os valores da geodiversidade, potenciais de uso e necessidade de proteção. Por sua vez, o diagnóstico socioambiental dos guias de turismo foi realizado por meio da promoção e condução de diálogos participativos (Oliveira *et al.*, 2019), estabelecidos por um conjunto de atividades que incluíram uma roda de conversa, um curso temático e uma visita técnica. As informações obtidas nos métodos anteriores foram integradas e utilizadas para a proposição de modelos de painéis interpretativos sobre a geodiversidade representada pelas marmitas.

Os painéis interpretativos foram elaborados para comunicar informações sobre as jacuzzis naturais e outras feições geológicas da Cachoeira do Mutum e da

Corredeira do Urubuí. Sua estrutura segue um *layout* organizado, dividido em seções distintas, facilitando a interpretação visual e textual pelos visitantes, integrado com elementos básicos como título e subtítulos, cores, texto explicativo, imagens e elementos gráficos (Projeto Doce Mata, 2002; Bento & Nazar, 2020).

5.2.1. Área de Estudo

No contexto do GCA, o substrato rochoso onde as marmitas avaliadas ocorrem pertencem a Formação Nhamundá (Grupo Trombetas), na faixa de exposição da borda norte da Bacia do Amazonas (Cunha *et al.*, 2007). Essa unidade geológica aflora ao longo de rodovias, bem como ao longo das margens rochosas das drenagens e, em determinadas localidades, a espessura das camadas alcança aproximadamente 450 m (Souza *et al.*, 2009). Os litotipos da Formação Nhamundá em Presidente Figueiredo (AM) são de natureza siliciclástica, com predominância de arenitos e localmente pelitos, folhelhos e diamictitos. Análises faciológicas em afloramentos situados no Projeto GCA realizados por Soares *et al.*, (2005) permitiram a identificação de fácies sedimentares relacionadas a um paleoambiente costeiro com influência glacial de idade siluriana (Cuervo *et al.*, 2018).

Os três domínios geomorfológicos que ocorrem na região são representados por Baixos Platôs da Amazônia Centro-Oriental, Superfícies Aplainadas do Norte da Amazônia e Planalto Residual do Norte da Amazônia (Dantas & Maia, 2010). A evolução do relevo local está associada a deformação neotectônica que resultou na formação de vales encaixados e sistemas de drenagem em treliça caracterizados por corredeiras, cachoeiras e processos de carstificação na Formação Nhamundá (Nogueira e Sarges, 2001; Franzinelli e Igreja, 2002).

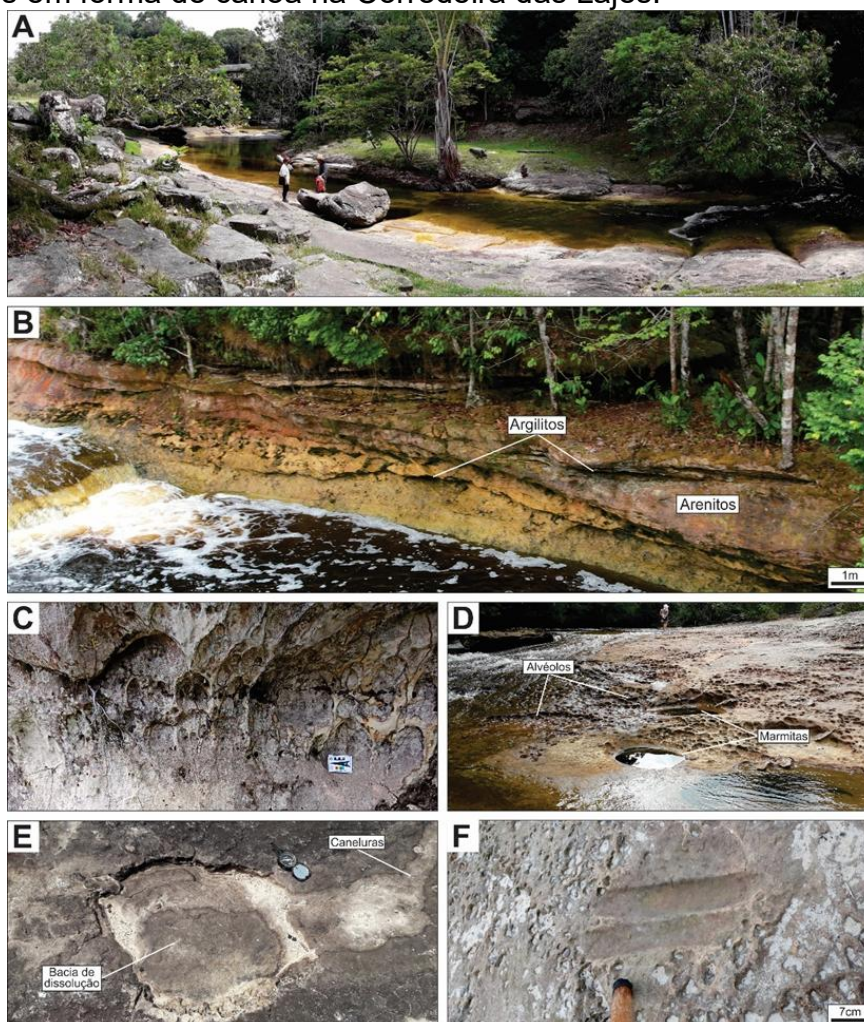
O clima que predomina é o tropical chuvoso, quente e úmido, com temperatura média anual de 27° C, com meses mais quentes entre agosto e novembro. Por sua vez, a média mensal de pluviosidade é em torno de 250 mm, com período mais chuvoso entre dezembro a maio. As geoformas ocorrem em drenagens das bacias hidrográficas do Uatumã (Cachoeira do Mutum) e a do Urubu (Cachoeira Princesinha do Urubuí e corredeiras das Lajes e Urubuí), caracterizadas por águas escuras (Dantas & Maia, 2010).

5.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1. Análise Morfométrica

A análise foi concentrada em exposições situadas nas margens dos igarapés onde ocorriam os principais relatos de marmitas no território, a saber: Cachoeira do Mutum, no médio curso do igarapé Barreto; Cachoeira Princesinha do Urubuí, no baixo curso do rio homônimo; Corredeira das Lajes, no baixo curso do igarapé das Lajes e; Corredeira do Urubuí, no baixo curso do rio Santa Cruz. Feições exocársticas no substrato rochoso são comuns, em especial as encontradas na Cachoeira do Mutum, que incluem alvéolos, tafonis, caneluras, bacias de dissolução e marmitas (Figura 30).

Figura 30. Características do substrato rochoso da Formação Nhamundá nos locais avaliados. A e B) Exposições de arenitos e delgadas intercalações de argilito na Corredeira das Lajes e Cachoeira Princesinha do Urubuí, respectivamente C) *Tafonis* desenvolvidos em superfícies verticalizadas de arenitos na Corredeira das Lajes. D) Alvéolos e marmitas em arenitos na Cachoeira do Mutum. E) Canelura conectada a bacia de dissolução na Corredeira do Mutum. F) Amoladores fixos subparalelos em forma de canoa na Corredeira das Lajes.



Nos quatro locais avaliados as marmitas foram encontradas em trechos de rios a montante de cachoeiras (Mutum e Princesinha do Urubuí) e associadas a corredeiras/quedas d'água (Lajes e Urubuí) com gradientes entre 9° e 10° (Figura 31). Com exceção da Cachoeira do Mutum, onde as marmitas estão distribuídas tanto na porção central da drenagem quanto nas margens rochosas inundáveis sazonalmente, nas outras localidades as feições tendem a estarem concentradas preferencialmente na margem direita da drenagem.

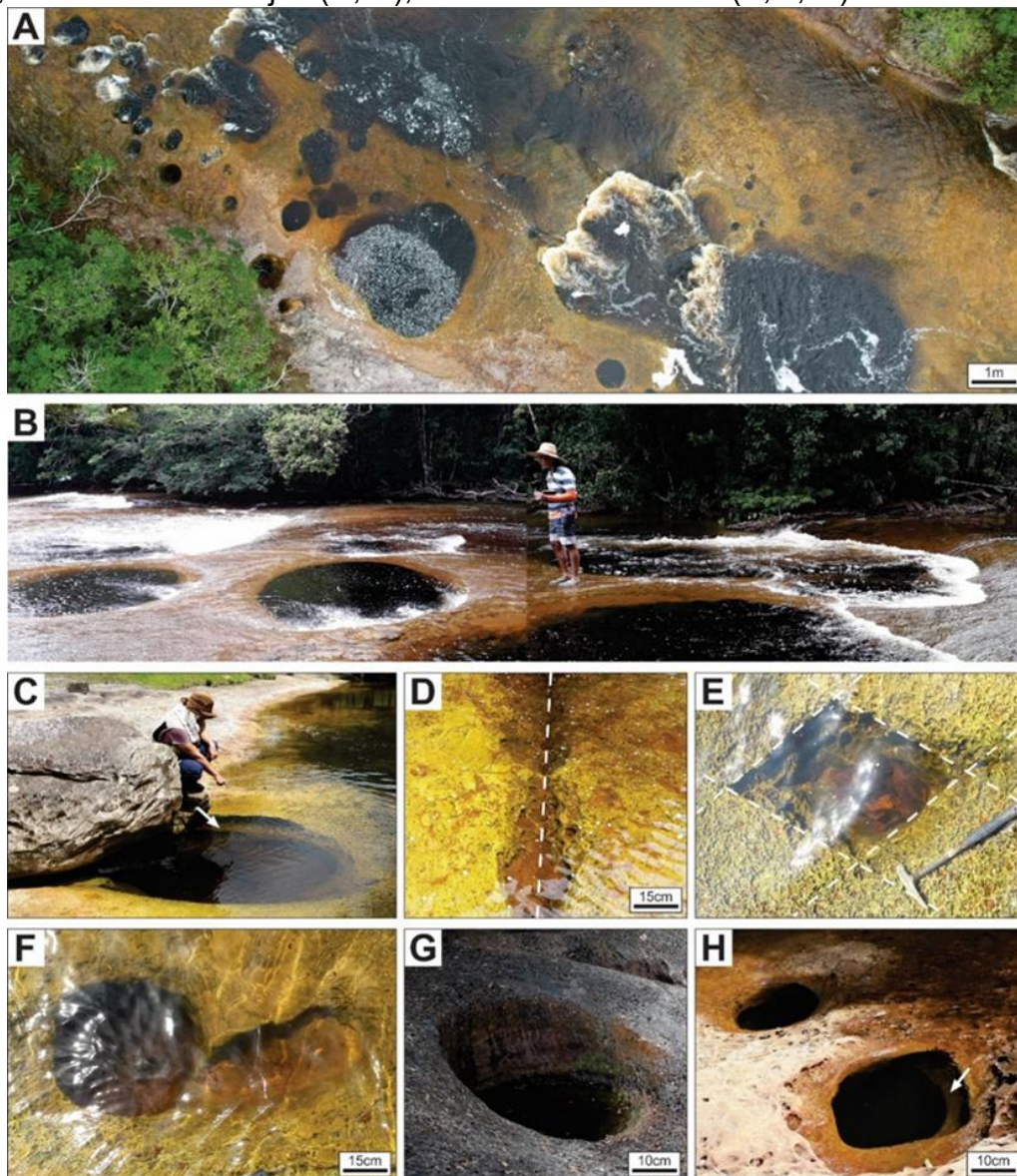
As marmitas são observadas de forma agrupadas ou isoladas, algumas conectadas em profundidade, com geometria da seção horizontal que incluem aberturas circulares, subcirculares, elípticas e poligonais, as últimas limitadas por fraturas (Figuras 31 C a 31 E). As geoformas assumem em profundidade geometria aproximada das aberturas, gerando bordas retas e suspensas (Figuras 31 F a 31 H). Entretanto, locais com substratos inclinados, como nas corredeiras das Lajes e Urubuí, produzem marmitas com bordas inclinadas, especialmente quando associadas a falhas e fraturas.

Em especial, alguns exemplares de marmitas e jacuzzis naturais na Cachoeira do Mutum e na Corredeira das Lajes apresentam múltiplas bordas suspensas, chamadas de telescópicas. Por sua vez, as paredes das escavações são suavemente lisas, destacando estruturas sedimentares primárias, como por exemplo, laminações planares e traços fósseis. No entanto, também são comuns paredes internas rugosas e/ou com alvéolos, as últimas localizadas nas margens das drenagens e/ou que ficam expostas parcialmente na estação seca da região.

A base das marmitas avaliadas pode variar de formatos planos a convexas. Em escavações com profundidades maiores que 1 m de profundidade são mais frequentes bases convexas, enquanto as situadas a montante e jusante das cachoeiras e corredeiras, bem como nas margens dos canais, assemelham-se as bases constatadas nas variedades do tipo *pan*. Em casos mais restritos, como no substrato rochoso inclinado da Corredeira do Urubuí e na Cachoeira Princesinha do Urubuí, também podem ser constatadas a variedade côncavas do tipo *poltrona*.

Figura 31. Marmitas da proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas. A e B) Fotografia aérea e panorâmica com destaque para as marmitas com aberturas circulares a elíptica. C) Marmita com abertura elíptica e borda suspensa (seta branca). D) Marmitas com abertura alongada desenvolvida ao longo de fratura (linha tracejada). E) Marmita com borda poligonal limitada por fraturas conjugadas (linha tracejada). Observe a base da marmita preenchida parcialmente com folhas. F)

Exemplo de marmitas com borda reta. G) Marmita com bordas inclinadas (tipo poltrona). H) Destaque para marmitas com preservação de múltiplas bordas suspensas (seta branca). Cachoeira Princesinha do Urubuí (A), Cachoeira do Mutum (B, H), Corredeira das Lajes (C, D), Corredeira do Urubuí (E, F, G).



Na base das marmitas pode estar preservado moedores, como os identificados nas corredeiras das Lajes e do Urubuí, compostos predominantemente por sedimentos arenosos de granulometria fina a média, bem como em menor proporção fragmentos de laterita do tamanho cascalho, material vegetal como folhas, galhos e sementes em decomposição, estes mais comuns nas marmitas do tipo *pan* e com aberturas cilíndricas.

Na avaliação morfométrica as marmitas foram consideradas como análogas a cilindros elípticos (Ji *et al.*, 2019), dessa forma os parâmetros mensurados em metros, como o eixo maior (a), o eixo menor (b), a profundidade (h), o diâmetro

médio da borda externa (D), além das razões de aspecto da borda externa (a/b), da forma lateral (b/h), a razão diâmetro-profundidade (D/h) e orientação preferencial, foram obtidas a partir de 123 exemplares concentrados em uma área de cerca de 21 m² (Tabela 2).

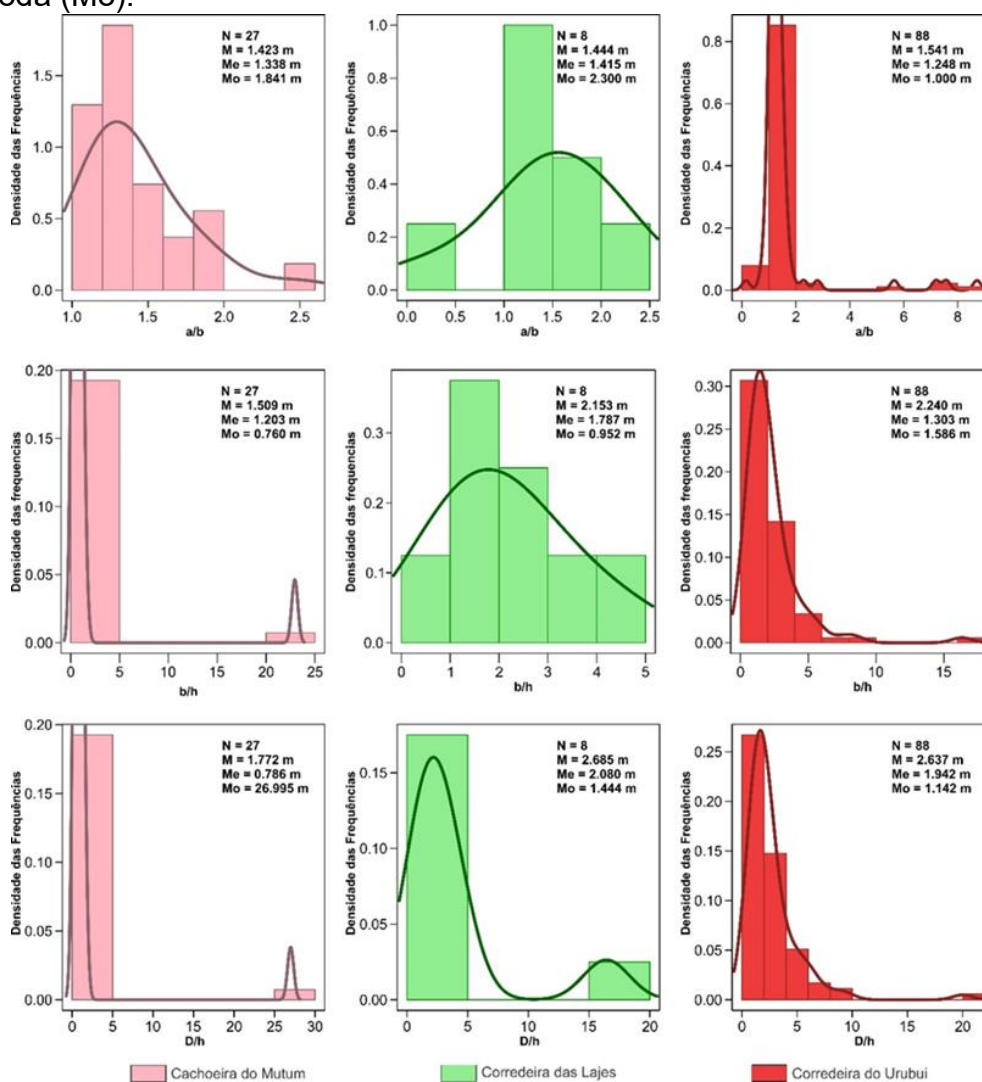
Tabela 2. Valores de média dos parâmetros morfométricos das marmitas obtidas nas exposições analisadas. n: número de medidas, a: eixo maior, b: eixo menor, D: diâmetro médio, h: profundidade, D/h: razão entre o diâmetro e a profundidade e R²: coeficiente de determinação.

Local	Lat./Log.	n	a (m)	b (m)	a/b	D (m)	h (m)	D/h	b/h	R ²
Cachoeira do Mutum	1°58'03.8"S / 59°36'21.8"W	27	2.380	1.735	1.423	2.023	2.365	1.772	1.509	0.734
Corredeira das Lajes	1°59'38.8"S / 60°01'37.3"W	8	0.947	0.597	1.444	0.748	0.348	2.685	2.153	0.624
Cachoeira do Urubuí	2°02'35.9"S / 60°01'46.6"W	88	0.838	0.614	1.595	0.706	0.381	2.637	2.420	0.073

As geoformas mensuradas foram assim distribuídas: 27 na Cachoeira do Mutum, 8 na Corredeira das Lajes e 88 na Corredeira do Urubuí. A análise morfométrica na Cachoeira Princesinha do Urubuí não pode ser realizada, pois durante a etapa de campo as feições estavam submersas, sendo procedida apenas uma análise geométrica comparativa e visual.

Os histogramas dos valores de média da razão da borda externa (a/b), da forma lateral (b/h) e de diâmetro-profundidade (D/h), considerados os mais importantes parâmetros para a avaliação geométrica (Pelletier *et al.*, 2015) são apresentados na Figura 32. Os valores a/b variam entre 2.492 – 1.000, 2.300 – 1.172 e, 8.714 – 1.000, com médias de 1.423, 1.444 e 1.595, respectivamente para a Cachoeira do Mutum e corredeiras da Lajes e Urubuí. Em geral, as razões a/b estão entre 1.000 e 2.492 (Cachoeira do Mutum e Corredeira das Lajes), entretanto os valores na Corredeira do Urubuí alcançam razões superiores a 8.00. As curvas de distribuição de a/b para essas localidades são unimodais, com assimetria com tendência positiva para a Cachoeira do Mutum e Corredeira do Urubuí, e tendências negativas para a Corredeira das Lajes.

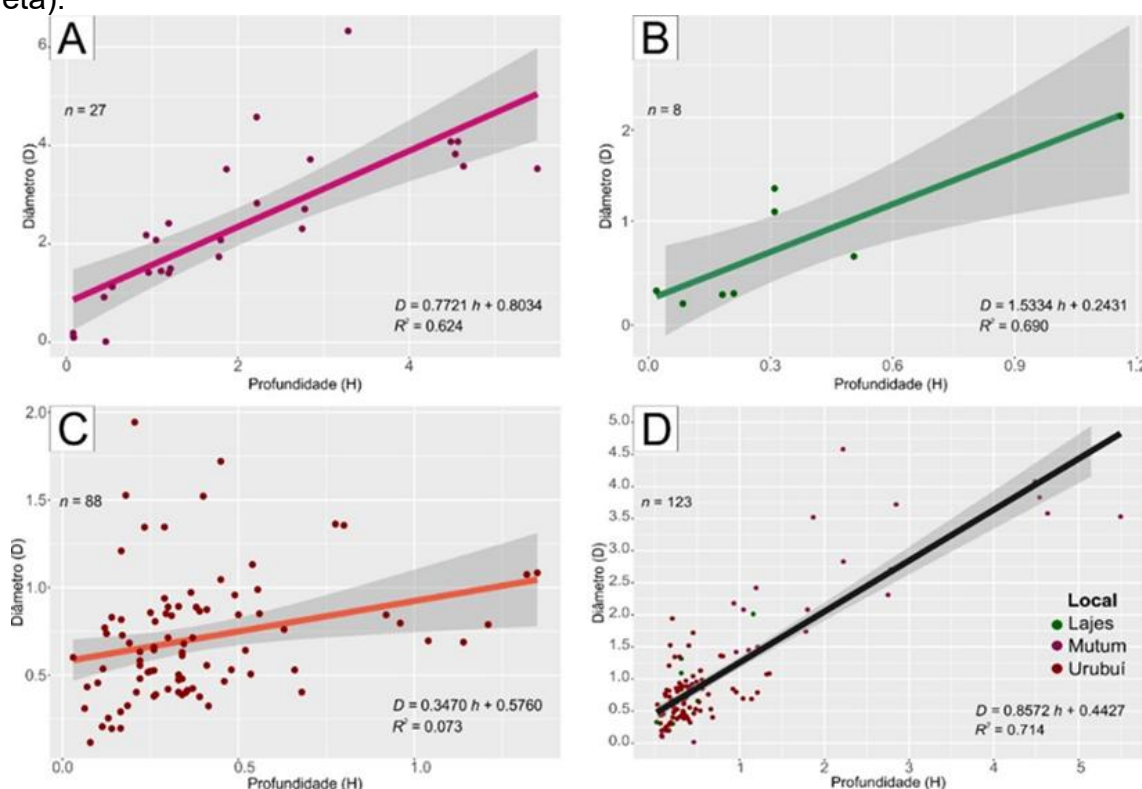
Figura 32. Histogramas dos parâmetros morfométricos de 123 marmitas avaliadas. (a/b) - razão da borda externa, (D/h) razão diâmetro-profundidade e; (b/h) - razão da forma lateral. N - número de feições medidas, M - média aritmética, Me - mediana, e Mo - moda (Mo).



Já os valores da razão da forma lateral (b/h) variam entre 22.941 – 0.271, 4.500 – 0.952 e, 16.333 – 0.394, com médias de 1.509, 2,153 e 2.420, para a Cachoeira do Mutum e corredeiras das Lajes e Urubuí. As respectivas curvas de distribuição apresentam comportamento unimodal, com assimetria positiva. Por sua vez, as razões D/h exibem valores entre 26.995 – 0.418, 5.196 – 1.308 e, 20.018 – 0.593, com médias de 1.772, 2.685 e 2.637, para as três localidades avaliadas. Os valores das razões D/h estão concentrados entre 0 e 5, entretanto destacam-se valores entre 25 e 30 para as feições na Cachoeira do Mutum. Em relação as curvas de distribuição todas são unimodais e apresentam clara tendência de assimetria positiva.

Além disso, as razões D/h seguem aproximadamente uma tendência linear positiva, com valores de R^2 iguais a 0.624 e 0.734, respectivamente para a Cachoeira do Mutum e Corredeira das Lajes (Figura 33). Entretanto, para essas localidades as marmitas (maiores que 1 m de diâmetro médio) e situadas na porção central desviam da tendência linear observada (Figuras 33 A e 33 B). Por outro lado, para a Corredeira do Urubuí a correlação entre diâmetro e a profundidade é quase nula ($R^2 = 0.073$), e os exemplares de marmitas que fogem da tendência linear estão situadas nas margens do rio, muitas delas registrando icnofósseis nas suas paredes (Figura 33 C).

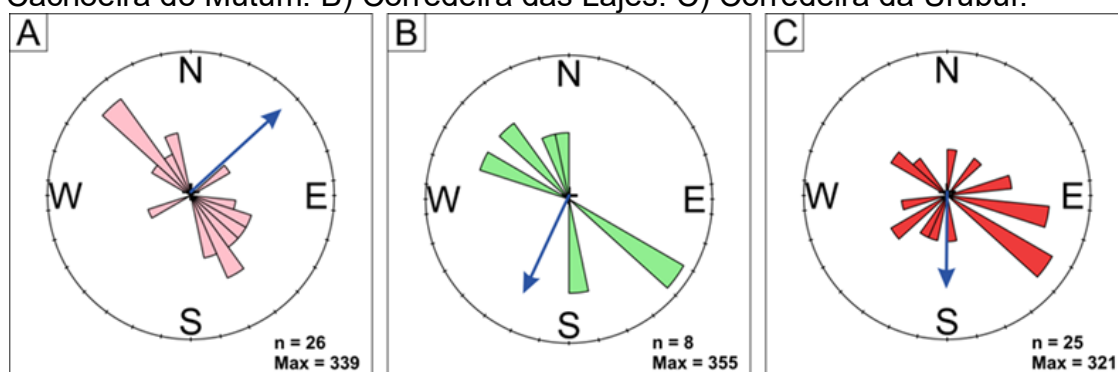
Figura 33. Gráficos de dispersão com as relações entre o diâmetro médio e a profundidade (D/H) das marmitas com suas respectivas linhas de ajuste geral. A) Corredeira do Mutum (cor rosa). B) Corredeira das Lajes (cor verde). C) Corredeira do Urubuí (cor vermelho). D) Integração de todas as 123 feições analisadas (cor preta).



Ao reunirmos os dados das 123 feições nas três localidades alvos, observa-se que, embora exista uma relação geral entre diâmetro e profundidade linear, as marmitas de maiores dimensões e/ou que apresentam icnofósseis em suas paredes não seguem essa regra. Isso é particularmente evidente na Cachoeira do Mutum e na Corredeira do Urubuí, onde é registrada uma dispersão significativa dos pontos nos gráficos (Figura 33 D).

Com respeito as orientações do eixo maior (a) das marmitas com aberturas elípticas, independentemente da direção principal do fluxo da drenagem, seus eixos principais apresentam uma forte orientação NW-SE (entre 320° e 340°Az), com frequências azimutais de 339° (n=26), 355° (n=8) e 321°Az (n=25), respectivamente para a Cachoeira do Mutum e corredeiras das Lajes e Urubuí (Figura 34).

Figura 34. Distribuição dos dados de orientação do eixo principal/eixo maior (a) das marmitas em relação à direção do fluxo da drenagem local (indicado pela seta azul). A) Cachoeira do Mutum. B) Corredeira das Lajes. C) Corredeira da Urubuí.



Gênese e Evolução

As marmitas ou jacuzzis naturais da proposta GCA são feições exocársticas desenvolvidas em arenitos finos a médios, encontradas nas proximidades de cachoeiras, quedas d'águas e corredeiras. Avaliações em marmitas podem trazer informações sobre a evolução da paisagem, história tectônica, condições climáticas, características flúvio-hidrológicas, bem como variação do lençol freático (Egholm *et al.*, 2013; Ji, 2018; Bera *et al.*, 2019; Aylar *et al.*, 2022). Portanto, é vital o desenvolvimento de análises geométricas e estatísticas em detrimento a investigações geométricas visuais, que podem trazer uma indesejável parcela de subjetividade às avaliações.

Os valores da razão a/b encontrados são preferencialmente maiores que 1 (perfeitamente circular quando $a/b = 1$) e confirmaram as observações de campo de que as marmitas apresentam aberturas com geometria predominantemente elíptica na superfície horizontal. Em especial, altas razões a/b encontradas na Corredeira do Urubuí (entre 5.645 e 8.714) estão associadas com marmitas desenvolvidas preferencialmente em interseções ou ao longo de juntas e fraturas que resultam em aberturas elípticas com alta excentricidade. Esta relação positiva é favorecida pela abrasão diferencial e alargamento das anisotropias estruturais ao longo do leito rochoso (Richardson & Carling, 2005; Wohl, 2008).

O domínio de aberturas elípticas alcança volume superior a 85.23% em todos os locais avaliados, com eixo maior (a) orientado fortemente na direção NW-SE (320° a 340° Az). Apesar de ser registrado uma tendência de paralelismo entre a orientação dos eixos principais dessas feições e a direção principal das drenagens (Ortega *et al.*, 2014; Ji *et al.*, 2019), a forte orientação NW-SE representa uma correlação positiva com estruturas conjugadas de zona de cisalhamento atribuídas a neotectônica e orientadas com atitudes entre 300° e 330° Az (Salazar *et al.*, 2025). As deformações neotectônicas já foram mapeadas através de estruturas transcorrentes que influenciaram a formação de uma rede de drenagem em treliça, com vales de primeira ordem alinhados (rios Uatumã, Preto da Eva e Urubu), paralelos ao *trend* NW-SE de falhas normais (Costa *et al.*, 2001; Nogueira & Sarges, 2001; Franzinelli & Igreja, 2002).

Em relação a razão da forma lateral (b/h) foi constatado o predomínio de marmitas do tipo *pan* ($b > h$), em proporções acima de 79.55% nas corredeiras das Lajes e Urubuí, enquanto na Cachoeira do Mutum predominam formas cilíndricas com relação $b < h$ (96.30%). De acordo com Campbell (1996), a razão da forma lateral de marmitas está relacionada com inclinação do substrato da geoforma, localização em relação a drenagem e profundidade. As marmitas do tipo *pan* são caracterizadas por com pouca profundidade, formadas em substrato homogêneo, com anisotropias estruturais pouco desenvolvidas e com fundo plano, enquanto as do tipo cilíndricas são mais profundas, ocorrem em substrato homogêneo, controladas por anisotropias estruturais mais proeminentes e com o fundo côncavo.

O predomínio de marmitas do tipo *pan* nas corredeiras das Lajes e Urubuí estão ligadas a anisotropias de menor ordem hierárquica local (juntas e fraturas) aliadas ao posicionamento mais marginal em relação a drenagem, gerando geoformas com razão b/h maior que 3. Já para as marmitas, inclusive as jacuzzis naturais encontradas na Cachoeira do Mutum e posicionadas na porção central da drenagem, onde a força de abrasão dos moedores é consideravelmente maior, a presença de estruturas associadas a uma zona de cisalhamento que intersecta a drenagem (Salazar *et al.*, 2025), facilita o processo de escavação e produz relações b/h entre 1.100 a 3.000, que caracterizam formas cilíndricas em profundidade.

Eventuais formas em poltrona (b/h entre 0.620 a 1.357) encontradas na Cachoeira Princesinha do Urubuí e Corredeira do Urubuí foram atribuídas ao desenvolvimento de geoformas em regiões marginais a drenagem, com inclinações

mais pronunciadas, geralmente associadas a cachoeiras e quedas d'água produzidas por falhamentos e ativas apenas em períodos de cheia na região. Alvéolos nas paredes internas dessas marmitas coadunam a ausência de fluxos turbilhonar necessário para a evolução contínua e alargamento/aprofundamento da geoforma.

As razões D/h médias para as corredeiras das Lajes e Urubuí apresentaram valores similares (2.685 e 2.637, respectivamente), enquanto para a Cachoeira do Mutum o valor médio é 33.41% menor (média de 1.772). Entretanto, para todos os locais avaliados os valores seguem aproximadamente uma tendência linear positiva na relação D/h , como já registrado em outras avaliações morfométricas em marmitas, representando um parâmetro independente da escala espacial (Ortega *et al.*, 2014; Pelletier *et al.*, 2015; Ji *et al.*, 2019).

Na Corredeira das Lajes as maiores marmitas estão localizadas na porção central do rio e desviam da tendência linear observada (Figura 33 C), com $R^2=0.690$, semelhante ao identificado na Cachoeira do Mutum (Figura 33 A), com valores de $R^2=0.624$. Por outro lado, na Corredeira do Urubuí, a correlação entre diâmetro e a profundidade é quase nula ($R^2=0.073$), indicando que o diâmetro é independente da profundidade, aqui interpretado como geoformas orientadas ao longo de juntas, falhas e fraturas.

Ademais, outras marmitas que fogem a tendência linear estão situadas nas margens do rio, experimentam na época de exposição e inundação sazonais, muitas delas com feições sedimentares e cársticas preservadas nas suas paredes, como por exemplo icnofósseis, laminações e alvéolos (Figura 31 G). Essas feições também representam anisotropias que podem modificar o processo de escavação das geoformas e gerar dispersão da tendência linear esperada para as razões D/h (Aylar *et al.*, 2022).

A dispersão dos dados obtidos para as marmitas está fortemente relacionada a anisotropias estruturais, mais pronunciada na Cachoeira do Mutum pela ocorrência de uma zona de cisalhamento e suas estruturas conjugadas às jacuzzis naturais (Salazar *et al.*, 2025), em comparação com as demais ocorrências (Figura 35). Outros fatores não quantificados ou de difícil obtenção nessa avaliação, como por exemplo, hidrodinâmica local, variação no lençol freático, natureza dos moedores e tensão de cisalhamento basal induzida pela turbulência, também podem ser considerados. Contudo, as tendências lineares observadas para a maioria dos

dados coadunam para a interpretação que, tanto o diâmetro quanto a profundidade das marmitas aumentam ao longo do tempo, sendo o aprofundamento geralmente mais rápido do que o alargamento (Dhali, 2019; Aylar *et al.*, 2022).

Figura 35. Jacuzzis naturais da Cachoeira do Mutum e desenho esquemático do leito arenítico do Igarapé Barreto. Destaques para as fraturas preenchidas parcialmente com quartzo (setas) associadas a uma zona de cisalhamento que controlam o alargamento e aprofundamento das geoformas (em amarelo). Observe alvéolos associados as jacuzzis naturais.



Em relação a tensão de cisalhamento basal induzida pela turbulência, Ji *et al.*, (2019) afirmam que para marmitas com relação $D/h=2$ o poder de escavação e ampliação da geoforma é máximo, diminuindo sua capacidade de erosão não linearmente se a razão D/h estiver fora desse valor. Ou seja, se a razão D/h fugir desse valor crítico a tensão de cisalhamento basal perde a energia e os moedores na base da marmita não são eficientes para o seu alargamento e/ou aprofundamento (Pelletier *et al.*, 2015; Dhali *et al.*, 2017; Sane *et al.*, 2020; Fleming *et al.*, 2025).

As médias da razão D/h avaliados para as corredeiras da Lajes (2.685) e Urubuí (2.637) apresentaram valores divergentes para uma tensão de cisalhamento efetiva de formação da geoforma, especialmente as razões encontradas para as jacuzzis naturais na Cachoeira do Mutum (1.772), com valores de h médios de 2.292 m (máximo de 6.330 m), destacado em relação as corredeiras das Lajes (média de 0.353 e máximo de 1.160 m) e Urubuí (média de 0.381 e máximo de 1.350 m).

Apesar de Ji *et al.*, (2019) relatarem que a força abrasiva para marmitas com $D/h=1.0 \pm 0,5$ ser mais eficiente em função da maior capacidade das geoformas reterem em sua base ferramentas de moagem com textura grossa (Whipple *et al.*, 2000), a textura areia fina a média dos moedores encontrados descarta essa possibilidade. Além disso, esses fatos apontam para que as marmitas da proposta GCA estão em estágios evolutivos distintos e parte do seu desenvolvimento está intrinsicamente relacionado com os tipos e escala das anisotropias estruturais de cada localidade.

Em especial, as jacuzzis naturais da Cachoeira do Mutum e a associação com estruturas de uma zona de cisalhamento sugerem estágios de formação mais evoluídos e com importante contribuição de processos de dissolução. Apesar da dissolução em rochas areníticas não ser comum em condições superficiais, autores como Lazo *et al.*, (2017) e Potysz & Bartz (2024) destacam que a solubilidade da sílica pode ser alcançada quando existe uma contribuição importante de ácidos orgânicos produzidos pelo manto intempérico devido a ampla cobertura vegetal implantada sobre rochas sedimentares siliciclásticas, como são notavelmente reconhecidas no território da proposta GCA.

Sauro & Wray (2017) afirmam que em rochas areníticas a sílica pode ser dissolvida não apenas a partir dos grãos de quartzo que compõem o arcabouço, mas também diretamente do sobrecrecimento de sílica, especialmente os de baixa temperatura de formação, como a sílica amorfa. Essa característica foi constatada por Salazar *et al.*, (2025) por meio de engolfamento de grãos de quartzo associados a fraturas preenchidas com sesquióxido de ferro em lâminas delgadas de arenitos da Cachoeira do Mutum.

A partir dos dados morfométricos e dos diferentes estágios evolutivos das marmitas foi possível propor a seguinte formação das jacuzzis naturais na Cachoeira do Mutum (Figura 36). Na fase 1 as escavações no substrato arenítico do Igarapé Barreto são iniciadas a partir formas esculpidas incipientes, concentradas em anisotropias estruturais (juntas, falhas e fraturas) que progressivamente passam por processos de alargamento e aprofundamento. Estruturas sedimentares como os traços fósseis podem favorecer o desenvolvimento de alvéolos e, por consequência, de buracos seminais.

Na fase 2 as marmitas aumentam a profundidade formando cadeias de geoformas orientadas com eixo maior (a) de acordo com as anisotropias estruturas

na porção central das drenagens, onde o fluxo do igarapé é mais intenso, produzindo eventualmente conexões no substrato arenítico. Nessas condições, o contínuo processo de alargamento e aprofundamento resulta na coalescência de marmitas, gerando uma maior abertura (D próximo a 5.4 m) e profundidade (h aproximadamente 3.5 m), até alcançar o limite máximo onde o fluxo turbulento de moedores ainda é eficiente (D/h próximo de 2).

Figura 36. Fases de evolução de marmitas para jacuzzis naturais da Cachoeira do Mutum, proposta GCA. Na fase 1 as escavações iniciais são favorecidas em anisotropias estruturais e na fase 2 ocorre a coalescência de marmitas em geoformas maiores. Já na fase 3 o rebaixamento cíclico do lençol freático e anisotropias estruturais facilitam o processo de dissolução do substrato rochoso que leva ao aprofundamento e ampliação da geoforma.



Já na fase 3, a geração de uma falha normal na cachoeira a jusante do local de ocorrência das marmitas provoca o rebaixamento do lençol freático, cria um gradiente hidráulico, bem como fomenta a percolação de águas no sentido

descendente e o início do aprofundamento das jacuzzis naturais de grande escala por uma combinação de dissolução de elementos do arcabouço do arenito auxiliada por erosão mecânica posterior. A progressiva reativação da falha normal rebaixa o nível do lençol freático e contribui com múltiplos pulsos de alargamento/aprofundamento, evidenciado pelo registro de bordas telescópicas e que podem alcançar profundidade máxima compatível com o rejeito atual da falha (em torno de 6 m).

Os sedimentos que foram erodidos durante a formação das jacuzzis naturais de grande escala e que poderiam preencher parcialmente a geoforma são eliminados por suspensão durante eventos de aumento da corrente do igarapé (período de chuvas torrenciais) e/ou eliminados por meio de conexões internas e processo de *piping* associados a propagação das anisotropias estruturais em profundidade.

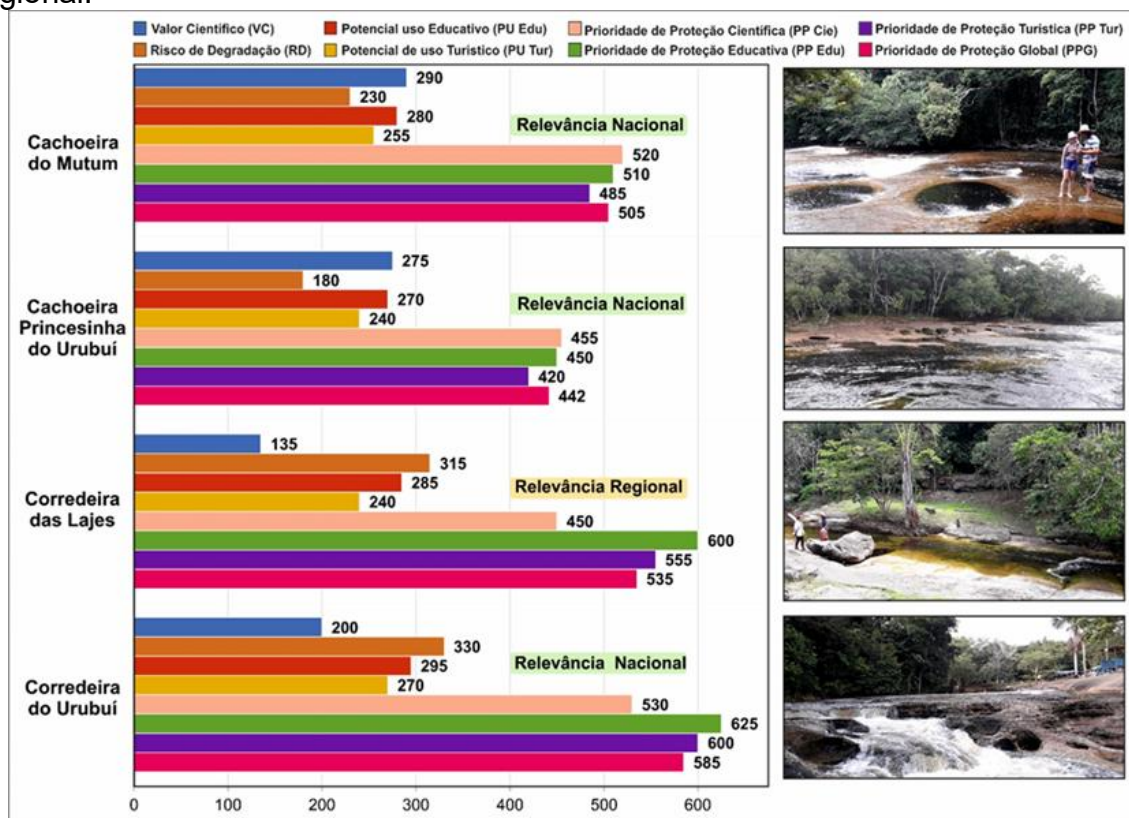
Nesse sentido, os dados interpretativos nas marmitas encontradas no território da proposta GCA comprovam que anisotropias estruturais relacionadas a neotectônica são controladoras de primeira ordem na ocorrência, distribuição, geometria da abertura, orientação, forma lateral, bem como na fomentação de processos de dissolução que produzem as grandes dimensões encontradas na Cachoeira do Mutum. Além disso, essa análise destaca o papel fundamental de ácidos orgânicos na dissolução em arenitos em superfície e apontam diretamente para a correlação entre a implantação da Floresta Amazônica, provedora de ácidos orgânicos necessários para o processo de dissolução, e o registro de feições cársticas na Formação Nhamundá.

5.3.2. Avaliação da Geodiversidade

A avaliação quantitativa dos locais de interesse geológico (LIGs) por meio da plataforma GEOSIT produziu uma classificação da relevância para os valores da geodiversidade, com destaque para os quesitos científicos, risco de degradação, potencial de uso educativo e turísticos, prioridade de proteção, classificação e recomendação de uso sustentável das localidades (Figura 37).

Figura 37. Avaliação quantitativa dos pontos com marmitas da proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas em termos de valor científico, risco de degradação, bem como potenciais de uso e proteção científico, educativo e turístico. A análise permitiu classificar as cachoeiras do Mutum e Princesinha do Urubui, assim como a

Corredeira do Urubuí como geossítios de relevância nacional. Por sua vez, a Corredeira das Lajes foi classificada como sítio da geodiversidade de relevância regional.



Nesse sentido, a avaliação do valor científico (VC) para os LIGs variou entre 135 (Corredeira das Lajes) e 290 pontos (Cachoeira do Mutum), com destaque para pontuações máximas nos critérios representatividade, integridade e diversidade geológica para as cachoeiras do Mutum e Princesinha do Urubuí. Além disso, estágios mais evoluídos de formação das jacuzzis naturais, garantiram a Cachoeira do Mutum pontuação máxima no critério raridade.

Por outro lado, no critério local tipo nenhum LIGs pontuou. Vale ressaltar que, o fato dos LIGs integrarem Áreas de Proteção Ambiental (APAs) que visam a proteção do meio natural e dos atributos estéticos e culturais, em áreas com certa ocupação humana, através do fomento de condições para a realização de pesquisas integradas (BRASIL, 2006), facilita o acesso às exposições. Assim, a baixa pontuação nesse item (< 300 pontos) para alguns LIGs não significa que não possua importância, mas sim, que pode não ter sido, até o momento, alvo de atenção da comunidade científica (BRILHA, 2016).

Na avaliação do risco de degradação (RD) os locais apresentaram os conceitos alto para as corredeiras das Lajes (315 pontos) e Urubuí (330 pontos), médio e

baixo, para as cachoeiras do Mutum (230 pontos) e Princesinha do Urubuí (180 pontos), respectivamente. Os critérios acessibilidade e a proximidade de áreas com potencial para degradação foram fundamentais para aumentar a potencialidade de deterioração dos elementos da geodiversidade em LIGs classificados com alto risco.

Por sua vez, o potencial de uso educativo (PUE) apresentou pouca variação, entre 270 (Corredeira do Urubuí) e 295 pontos (Cachoeira Princesinha do Urubuí). Os critérios como a logística, a associação com outros valores ecológicos e culturais, bem como o potencial didático em diferentes níveis de ensino contribuíram para os elevados valores de média. Entretanto, critérios como segurança e densidade não foram bem avaliados, o primeiro em especial, relacionado a ausência/escassez de placas informativas para atividade educativa.

A pontuação obtida para o potencial de uso turístico (PUT) variaram entre 240 (Cachoeira Princesinha do Urubuí e Corredeira das Lajes) e 270 pontos para a Corredeira do Urubuí. Neste índice destacaram-se os critérios máximos para potencial de divulgação perceptíveis para todos os tipos de público e a proximidade com zonas recreativas, com LIGs localizados a menos de 5 km de distância destas.

Consequentemente, os resultados da avaliação quantitativa apontaram para a Prioridade de Proteção Global (PPG), Prioridade de Proteção Educativa (PP Edu); Prioridade de Proteção Turística (PP Tur) e a Prioridade Científica (PP Cie) a necessidade de recomendação de que medidas para proteção da geodiversidade sejam tomadas de médio a curto prazo para a Cachoeira do Mutum (PPG =505; PP Edu = 510; PP Tur = 485; PP Cie = 520), Cachoeira Princesinha do Urubuí (PPG =442; PP Edu = 450; PP Tur = 420; PP Cie = 455), Corredeira das Lajes (PPG =535; PP Edu = 600; PP Tur = 555; PP Cie = 450) e Corredeira do Urubuí (PPG =585; PP Edu = 625; PP Tur = 600; PP Cie = 530).

De acordo com a plataforma GEOSSIT, LIGs com valor científico acima de 200 pontos são considerados geossítios (200 e 300 - relevância nacional; > 300 - relevância internacional), enquanto os abaixo de 200 pontos são denominados sítios da geodiversidade. Assim, a avaliação quantitativa classificou as cachoeiras do Mutum (VC = 290), Princesinha do Urubuí (VC = 275) e a Corredeira do Urubuí (VC = 200) como geossítios de relevância nacional. Já a corredeira das Lajes (VC = 135) foi classificada como um sítio da geodiversidade com relevância regional. Dentre os geossítios e sítios da geodiversidade avaliados para o maior potencial de uso

educativo (PUE) e turístico (PUT) destacam-se a Cachoeira Princesinha do Urubuí e a Corredeira do Urubuí, esta última também com o maior risco de degradação (RD).

Em especial, a mais recente atualização do inventário e quantificação da geodiversidade via plataforma GEOSSIT da proposta GCA realizada pelo Serviço Geológico do Brasil (Souza & Ribeiro, 2024), também classificou a Cachoeira do Mutum como geossítio. No entanto, a somatória dos valores científicos (245 pontos), educacionais (265 pontos), turísticos (280 pontos) e risco de degradação (115 pontos) foram significativamente menores em relação a esse estudo.

Este fato pode ser explicado, uma vez que a avaliação quantitativa realizada foi de base temática nas principais ocorrências de feições exocársticas (marmitas), enquanto a da SGB foi levado em consideração LIGs que poderiam representar a diversidade das unidades geológicas por meio dos principais atrativos turísticos do território. Nesse sentido, análises temáticas para inventariação e quantificação da geodiversidade procedida aqui forneceram uma maior base de dados científicos e, por consequência melhores ranqueamento dos valores da geodiversidade em relação a avaliações generalizadas.

5.3.3. Percepção da Geodiversidade por Guias de Turismo

O território da proposta GCA conta oficialmente apenas com uma associação de guias de turismo, a Associação de Guias de Selva (AGUIAS), que até 2024 reunia 52 profissionais residentes e atuantes em Presidente Figueiredo, com a proposta de fornecer serviços de guiamento turístico nas cachoeiras e feições cársticas. Assim, foram estabelecidos os primeiros contatos com o presidente da AGUIAS para a troca de experiências e a proposição de um conjunto de atividades para valorização, preservação e uso sustentável das marmitas. As atividades incluíram uma roda de conversa, o curso sobre a geodiversidade da proposta GCA, complementado com uma visita técnica às feições cársticas da Formação Nhamundá (Figura 38).

As atividades foram realizadas no auditório do Núcleo de Ensino Superior de Presidente Figueiredo da Universidade do Estado do Amazonas (NESP-UEA) em agosto de 2022, com a participação majoritária de associados homens, com idade entre 25 e 44 anos, com grau de escolaridade entre o ensino fundamental e superior completo. Os 16 participantes, sendo 4 destes guias de turismo da AGUIAS e

demais comunitários, relataram que exercem a atividade de guias entre 5 e 15 anos na região, bem como afirmaram que não era a sua única fonte de renda.

Figura 38. Atividades desenvolvidas com os guias de turismo residentes no território da proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas. A e B) Roda de conversa e curso sobre a geodiversidade local. C e D) Visita técnica nas feições cársticas da Formação Nhamundá.



Durante a abertura dos diálogos ficou claro que o conceito de geoparque está consolidado e todos consideram de extrema importância a conservação dos atributos geológicos para a sustentabilidade do município nos seguimentos de turismo, lazer, educação, pesquisa científica e conservação ambiental. Entretanto, alguns associados ainda desconheciam a proposta de criação do GCA. Em relação às atividades educativas sobre a geodiversidade local, relataram a participação em conversas e palestras, enquanto atividades como workshops, aulas e cursos foram menos frequentes.

Os associados utilizam como principais locais para o serviço de guiamento cachoeiras, corredeiras, cavernas, grutas, formações rochosas incomuns, bem como as marmitas, destacando a importância dessas geoformas como exemplo de patrimônio geológico e atrativo turístico. Além disso, relataram que as marmitas nos

LIGs estudados são requisitados como opção por turistas devido a sua estética considerada única e impressionante, especialmente as cachoeiras do Mutum e Princesinha do Urubui, a balneabilidade e relacionado à distância e dificuldades de acesso.

Quando questionados por turistas a respeito da formação das marmitas, os guias relatam que as geoformas foram geradas pela interação entre a água e fragilidades no arenito, entretanto não fornecem informações sobre processos de evolução de marmitas para jacuzzis naturais de grande escala, bem como outras feições exocársticas encontradas nos LIGs.

Entre os associados o conhecimento científico sobre as geoformas em destaque é visto como fundamental para fomentar o turismo, a conservação do meio natural e melhorar aspectos da educação ambiental e geológica. Em relação a ações para a preservação das marmitas, foram indicadas a instalação de placas educativas e interpretativas, bem como a sugestão de continuidade de treinamentos técnicos sobre as feições exocársticas da Formação Nhamundá.

Em especial, foi visto com preocupação pelos associados a atuação de guias de turismo não residentes do território da proposta GCA e colaboradores de empresas de turismo de Manaus. As principais motivações foram a preocupação com a qualidade das informações fornecidas aos turistas, a perda de potenciais clientes e a segurança, uma vez não conhecem o território, potencializando os riscos, como acidentes com animais e desorientação nas trilhas de acesso aos LIGs.

Em seguida, foi realizado o curso “Utilização de Carstes no Fortalecimento do Geoturismo no Geoparque Cachoeiras do Amazonas”, que destacaram os temas: geoparques, geoconservação e geoturismo, a geologia do GCA, o sistema cárstico, feições exocársticas e, caracterização e origem das marmitas. As atividades foram finalizadas com uma visita técnica para duas atrações turística, a Caverna do Maruaga e a Cachoeira do Mutum, onde foram apresentadas e discutidas com os guias algumas feições cársticas da Formação Nhamundá, como por exemplo, cavernas, grutas, marmitas, que compõem a temática da geodiversidade local avaliada.

Diagnóstico

O amplo conhecimento dos associados a respeito do conceito geoparque e da proposição do GCA foi interpretado como resultado de iniciativas recentes de

valorização e promoção da geodiversidade local por meio de atividades desenvolvidas pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e o SGB. Atividades como cursos, palestras, avaliações sociais nas comunidades, inventariação e quantificação da geodiversidade nas principais atrações turísticas da região, que muitas vezes contaram com apoio logístico e operacional da AGUIAS, ajudaram na sensibilização e conscientização da importância da conservação do meio natural para o desenvolvimento sustentável via geoturismo.

Destaca-se entre as contribuições da UFAM a realização do 2º Workshop (Con)ciência Cidadã em junho de 2024, que visou a promoção de abordagens colaborativas e participativas para o avanço da ciência e do desenvolvimento sustentável da região por meio da realização de palestras, oficinas e diálogos participativos a respeito do geoturismo e a geodiversidade. Mais recentemente, a iniciativa de visita a comunidades locais para dialogar a respeito da geodiversidade, aliado a doação de coleção de amostras da geologia local realizada pelo Programa de Educação Tutorial (PET) do curso de Geologia também tem recebido boa receptividade das comunidades contempladas pelo projeto.

Devido a recente inclusão de atividades de extensão comunitária nas disciplinas dos cursos de graduação da UFAM, a tendência é de aumento das atividades de promoção e valorização da geodiversidade local durante atividades de prática de campo do curso de geologia, tradicionalmente realizadas no território da proposta GCA. Além disso, os próprios resultados dessa pesquisa podem ser utilizados como tema para essas atividades.

A similaridade entre as respostas dadas aos turistas pelos guias a respeito da formação das marmitas e as fornecidas nessa pesquisa foi associada ao nível de escolaridade dos profissionais, ao potencial didático dos LIGs, bem como ao conhecimento empírico e tradicional adquirido por meio das suas vivências junto ao meio natural (Alves *et al.*, 2016; Henriques *et al.*, 2022). Apesar da reconhecida importância do conhecimento tradicional no entendimento e edificação de saberes do meio natural estar mais atrelada ao escopo da biodiversidade amazônica, no campo da geodiversidade e do patrimônio imaterial as contribuições ainda são incipientes e normalmente associadas a lugares sagrados (Kiernan, 2014; Basílio & Lima, 2024).

Como destacado por Alves *et al.*, (2016), a utilização do conhecimento empírico/tradicional dos guias manifesta-se como um potencial a ser explorado pelo

geoturismo local, no sentido de caracterizar e valorizar o patrimônio imaterial. Nesse sentido, o conhecimento tradicional, experiências e vivências dos guias, renovadas dia a dia por meio de suas atividades com os turistas, devem ser levados em consideração na construção de estratégias eficientes de geoconservação, geoeducação e geoturismo atreladas a território da proposta GCA, conforme destacado por Lima *et al.*, (2024) e Pãozinho & Nascimento (2024).

Dentre os LIGs estudados, a maior procura para visita das cachoeiras do Mutum e Princesinha do Urubuí para atividades turísticas estão ligadas a beleza cênica das geoformas, a ocorrência de marmitas, a balneabilidade e o distanciamento da cidade para acessar essas localidades. Essas respostas aliadas aos potenciais científico, educacional e turístico dos geossítios determinado pela avaliação quantitativa, reforçam a necessidade da produção e instalação de placas de acesso e com informações qualificadas sobre as marmitas, no sentido de promover a conservação e preservação da geodiversidade local.

Por outro lado, a atuação de guias de turismo não residentes no território da proposta GCA configura situação de conflito com os associados da AGUIAS e com a própria ideia de geoparque, uma vez que visam a conservação do patrimônio natural e cultural em intrínseca associação com a melhoria das condições socioambientais da população que habitam no território (Brilha *et al.*, 2018; Fleig *et al.*, 2022). Assim, é recomendado para a Prefeitura e o futuro comitê gestor do GCA a proposição, em conjunto com os grupos de interesse (*stakeholders*), soluções participativas e inclusivas visando o respeito as diretrizes de desenvolvimento sustentável do conceito geoparque.

De acordo com Pãozinho & Nascimento (2024), guias de turismo e condutores possuem um papel fundamental no despertar de visitantes para a geoconservação, influenciando o processo de entendimento sobre a geodiversidade do destino geoturístico, auxiliando na mitigação de impactos negativos sobre o patrimônio geológico. Quando munidos de informações técnicas mais precisas sobre as marmitas, potencializam o poder de disseminação de informações mais qualificadas, bem como o da importância da preservação dessa geoforma para o território.

Em especial, informações sobre a evolução das marmitas até a escala de jacuzzis naturais, observadas através dos geossítios e sítios da geodiversidade, podem ser transmitidas aos turistas reforçando o papel da neotectônica na formação das cachoeiras, no processo de carstificação da Província Espeleológica Rio Urubu

e da própria formação do relevo amazônico. Assim, as atividades realizadas aprofundaram o entendimento sobre esse grupo de interesse e serviu para nortear futuras ações para promoção e geoconservação das marmitas nos LIGs avaliados.

5.3.4. Estratégia para Promoção das Marmitas

A estratégia apresentada para a proposição de material de divulgação da geodiversidade e do geopatrimônio locais foi escolhida de acordo com os resultados das análises anteriores, visando a valorização, conservação e uso sustentável de marmitas encontradas na proposta GCA. Como apontado no diagnóstico com os guias de turismo do território, a idealização e instalação de painéis interpretativos nos locais avaliados seria uma excelente iniciativa para fomentar o uso sustentável das geoformas de interesse por meio da geoeducação. De forma geral, a instância do poder público municipal responsável pela implementação de políticas de manejo sustentável do meio natural é a Secretaria do Meio Ambiente e Sustentabilidade da Prefeitura de Presidente Figueiredo (SEMMAS).

De acordo com o disposto no Art. 32º, da Lei nº 699/2013, dentre as finalidades da SEMMAS, incluem-se: formular políticas e diretrizes de desenvolvimento ambiental (§1º); planejar, coordenar, executar e controlar, programas que visem à proteção, recuperação, conservação e melhoria da qualidade ambiental (§2º); administrar o patrimônio natural, disciplinando o uso, o acesso e a preservação, visando à proteção ambiental (§3º); bem como estimular a participação da comunidade no processo de gestão ambiental, assegurando a representação de todos os segmentos sociais no planejamento da Política Ambiental do Município (§23º).

Assim, a partir da publicação do Decreto Municipal nº 1301/2011 que instituiu o GCA, a SEMMAS instalou, sob a consultoria do SGB, painéis interpretativos em alguns geossítios já cadastrados na plataforma GEOSSIT, como por exemplo, nas cachoeiras da Porteira e Pedra Furada. Entretanto, as condições climáticas locais e o material escolhido (lona) não garantiram a durabilidade da iniciativa.

Em 2022 e sob a consultoria de pesquisadores do Departamento de Geociências da UFAM, a SEMMAS voltou a instalar painéis interpretativos com informações da geodiversidade no geossítio Cachoeira das Orquídeas, sob sua administração, destacando o registro de traços fósseis nos arenitos da Formação Nhamundá. Nas novas placas as informações a respeito do geossítio estão

protegidas por vidro, que isolam as geoinformações exploradas das intempéries e as tornam mais duráveis. Nesse sentido, o secretário da SEMMAS foi procurado e tomou ciência sobre o contexto, a importância, as principais conclusões e qual foi a estratégia de geoconservação e geoeducação escolhida junto aos guias de turismo. Em contrapartida, o secretário da SEMMAS reforçou a cooperação da Prefeitura com atividades de promoção e conservação de elementos da geodiversidade local e, sugeriu a padronização das geoinformações apresentadas, disponibilizando o modelo já instalados.

Foram escolhidos inicialmente dois geossítios definidos nessa pesquisa para a produção dos protótipos de painéis interpretativos: a Corredeira do Urubuí e a Cachoeira do Mutum. A escolha dos geossítios foi baseada nos aspectos de que a primeira representa o balneário mais popular da região, ser administrado pela SEMMAS e apresentar o maior poder de difusão da geoinformação, e a segunda por conter os exemplos mais evoluídos das geoformas exocársticas em destaque. As geoinformações do modelo de painel interpretativo disponibilizado pela SEMMAS foram avaliadas e, com o auxílio dos guias de turismo, adaptadas para destacar as feições exocársticas temáticas de forma simples e lúdica, facilitando a compreensão para todas as faixas de escolaridade.

Nesse sentido, os protótipos dos painéis interpretativos idealizados contêm informações como: localização do geossítio no contexto da Bacia Sedimentar do Amazonas, a localização dos outros geossítios e sítios da geodiversidade onde ocorrem as principais ocorrências de marmitas, um ortomosaico de imagem aérea destacando o geossítio, caracterização e imagens das principais estruturas da rocha, localização das geoformas de interesse, modo de formação das marmitas, bem como informações de segurança e risco para o melhor proveito dos geoturistas (Figura 39).

Figura 39. Exemplo de painel interpretativo para uso sustentável de jacuzzis naturais na proposta Geoparque Cachoeiras do Amazonas para o geossítio Cachoeira do Mutum.



O painel foi desenvolvido com o objetivo sensibilizar geoturisticamente os visitantes sobre a geodiversidade local e as jacuzzis naturais, promovendo a valorização do patrimônio geológico e incentivando práticas de geoconservação. Sua disposição estratégica em um ponto de visitação contribui para a experiência interpretativa autônoma, sem a necessidade de acompanhamento constante por guias.

O painel adota uma paleta de cores predominantemente amarela e verde, remetendo à natureza e ao ambiente geológico da região. O fundo bege e as caixas de texto em tons contrastantes ajudam na legibilidade das informações. O título principal, "Jacuzzis Naturais do GCA: Cachoeira do Mutum" está em negrito e destacado na parte superior do painel, facilitando a identificação do tema e seções bem definidas, como "Destaques", "Outras Estruturas", "Como as marmitas se formam?" e "Um pouco de geologia", que organizam o conteúdo em categorias intuitivas. O texto apresentado possui informações técnicas sobre as formações geológicas, como marmitas, jacuzzis naturais, bacias de dissolução, caneluras, alvéolos e falhas estruturais, bem como explica a geologia local, destacando a Formação Nhamundá como a unidade geológica principal.

O painel também fornece alerta de segurança, como "Caso não saiba nadar, não mergulhe nas feições!", além de recomendações de conservação, destacado com os ícones de alerta em vermelho para reforçar informações de segurança e conservação. Também foram incorporadas fotografias de campo para ilustrar as feições geológicas, identificadas com números, descrições explicativas e o mapa geológico no canto superior direito situa a localidade da Cachoeira do Mutum dentro da proposta GCA.

Os painéis idealizados foram disponibilizados para os administradores legais dos geossítios e, após instalados, terão o poder de auxiliar guias de turismo na apresentação das geoinformações dos geossítios por meio de sinalizações e recursos interpretativos para enriquecer a experiência dos visitantes. Para, além disso, promover a geodiversidade local, sensibilização da população e turistas sobre a importância da preservação das marmitas e dos recursos naturais que integram o futuro geoparque GCA.

5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dados morfométricos a partir de 123 feições estudadas indicam a dominância de aberturas elípticas, com forma lateral do tipo *pan* ($b > h$), com tendência linear positiva na relação D/h e fortemente orientadas nas direções 320° a 340° Az, compatíveis com os principais esforços neotectônicos da região. A origem e evolução de marmitas para jacuzzis naturais de grande escala podem ser reunidas em 3 fases: na primeira fase depressões iniciais são formadas isoladamente em anisotropias estruturais no leito do igarapé (p.e fraturas e falhas); na segunda fase novas marmitas se concentram ao longo das anisotropias, coalescem gerando geoformas maiores, menos numerosas e que se aprofundam até o limite de eficiência erosiva da tensão cisalhante dos moedores; já na terceira fase a geoforma se aprofunda fomentada por processos de dissolução de elementos do arcabouço do arenito.

Em especial, na Cachoeira do Mutum o aprofundamento das jacuzzis naturais foi intensificado pelo rebaixamento progressivo do lençol freático. As fases evolutivas propostas podem ser constatadas por geoturistas ao visitar os locais avaliados nessa pesquisa, com destaque para as geoformas mais evoluídas da proposta GCA, representada pelas jacuzzis naturais da Cachoeira do Mutum.

A avaliação da geodiversidade revelou potencial científico, educacional e turístico nos principais locais de ocorrências de marmitas e jacuzzis naturais, classificando-os como geossítios de relevância nacional (Cachoeira do Mutum, Cachoeira Princesinha do Urubuí e Corredeira do Urubuí) e sítio da geodiversidade (Corredeira das Lajes). A interação com um dos mais eficientes grupos de interesse do território para promoção e difusão da geoinformação, os guias de turismo, resultou na proposição de painéis interpretativos explorando informações da geodiversidade temáticos das feições exocársticas da Formação Nhamundá.

Por fim, a utilização de geoformas exocársticas comuns e associadas aos principais atrativos turísticos do município de Presidente Figueiredo, tem o poder para despertar a conscientização e importância da utilização sustentável do meio natural entre os habitantes do território e turistas, bem como para reforçar políticas inerentes a futura implementação do GCA.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

A análise multintegrada (estrutural, morfométrica e da geodiversidade) realizada a partir de 123 marmitas nas principais ocorrências mapeadas do território da proposta GCA permitiu desvendar que a geometria, escala e evolução das geoformas são tectonicamente controladas por esforços regionais. Drenagens em treliça e suas estruturas conjugadas em escala de afloramento, como zonas de cisalhamento dextrais, falhas, fraturas e juntas em arenitos da Formação Nhamundá representam áreas que facilitam a escavação de moedores no leito dos igarapés por fluxo turbilhonar. Em relação as marmitas, predominam aberturas elípticas do tipo *pan*, com tendência linear positiva na relação D/h e com eixo maior orientado de acordo com os principais esforços neotectônicos da região.

A metodologia empregada nesta pesquisa para a caracterização das marmitas formadas em rochas siliciclásticas pode ser aplicada em locais com formações rochosas semelhantes, permitindo a identificação e análise comparativa de geoformas formadas em substratos não cársticos. A combinação de técnicas investigativas em diferentes escalas de trabalho, como fotogrametria, investigações estruturais, morfometria e petrografia possibilita uma avaliação detalhada da origem e evolução dessas feições, contribuindo para o conhecimento geocientífico e sua valorização como patrimônio geológico.

A partir dos dados morfométricos das marmitas foi possível organizar sua origem e evolução em 3 fases, a saber: 1. escavações iniciais são formadas ao longo das anisotropias estruturais, 2. coalescência e geração de geoformas de maior escala e, 3. rebaixamento do lençol freático e dissolução do substrato rochoso que leva ao aprofundamento e ampliação da geoforma. Em especial, as jacuzzis naturais da Cachoeira do Mutum representam a fase mais evoluída (fase 3) entre as localidades avaliadas e com importante contribuição de processos de dissolução. A dissolução (carstificação) nos arenitos da Formação Nhamundá ocorre concentrado nas anisotropias estruturais, aliados a percolação de ácidos orgânicos no substrato que promovem o enfraquecimento de elementos do arcabouço (engolfamento, fraturamento e diminuição de grãos), em um processo chamado de arenitização, responsáveis pela ampliação da geoforma. Ademais, essa pesquisa também joga luz sobre a correlação entre a implantação da ampla cobertura vegetal e a formação de terrenos cársticos em rochas siliciclásticas na Amazônia.

A avaliação quantitativa temática da geodiversidade via plataforma GEOSIT classificou os locais avaliados como geossítios de relevância nacional (Cachoeira do Mutum, Cachoeira Princesinha do Urubuí e Corredeira do Urubuí) e sítio da geodiversidade (Corredeira das Lajes), bem indicou a necessidade de medidas de médio a curto prazo para proteção da geodiversidade. Apesar dos LIGs avaliados não alcançarem pontuações de destaque quando comparados a análogos nacionais, vale ressaltar que geossítios situados na Amazônia devem ser vistos de forma especial, uma vez que os critérios para o ranqueamento da geodiversidade tradicionais utilizam critérios desfavoráveis para os geossítios amazônicos. Por exemplo, na maioria das vezes o difícil acesso, distanciamento e dificuldades logísticas e operacionais resultam em quantificações subestimadas, entretanto para geoturistas interessados em LIGs amazônicos e na buscarem de uma conexão com a natureza, o isolamento é uma condição fundamental. As descobertas dessa pesquisa foram compartilhadas com guias de turismo locais, resultaram em um curso de qualificação e na proposição de painéis interpretativos explorando a geodiversidade concentrada nas feições exocársticas do território da proposta GCA.

Essas informações qualificaram os guias de turismo sobre feições e processos de carstificação na Formação Nhamundá, bem como sobre a evolução das marmitas até a escala de jacuzzis naturais, reforçando o papel da neotectônica na formação das cachoeiras, no processo de carstificação da Província Espeleológica Rio Urubu

e da própria formação do relevo amazônico. Por fim, essa pesquisa englobou os módulos de inventariação e promoção da geodiversidade local no sentido de despertar a conscientização e importância da utilização sustentável das marmitas e jacuzzis naturais, assim como contribuir com iniciativas para a futura implementação do GCA.

Os avanços trazidos por esta pesquisa ressaltam a importância de estudos adicionais sobre a interação entre intemperismo químico, dissolução de sílica e deformação estrutural em ambientes tropicais, aprofundando o conhecimento sobre a gênese e evolução das geoformas na Formação Nhamundá. Investigações futuras podem incluir análises microestruturais detalhadas e o monitoramento contínuo dos processos geomorfológicos, permitindo uma compreensão mais refinada das dinâmicas atuantes. Além do valor acadêmico, os resultados destacam o potencial geoturístico dessas formações, especialmente nas "jacuzzis naturais" da Cachoeira do Mutum, onde a interação entre geodiversidade e turismo sustentável pode ser amplamente explorada. O reconhecimento dessas geoformas como geossítios reforça a necessidade de estratégias de conservação e divulgação científica, promovendo não apenas a valorização do patrimônio geológico, mas também o desenvolvimento socioeconômico da região por meio do geoturismo.

CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS

ADAMS, A.; MACKENZIE, W.; GUILFORD, C. 1984. **Atlas of sedimentary rocks under microscope**, Longman Scientific & Technical, New York.

ALBUQUERQUE, O. Reconhecimentos geológicos no vale do Amazonas. **Boletim do Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil**, v. 3, p. 84, 1922.

ALEXANDER, H. Pothole erosion. **The Journal of Geology**, v. 40, n. 4, p. 305 – 337, 1932.

ALMEIDA-FILHO, R.; IBANEZ, D.; MIRANDA, F. Interpretação morfoestrutural com dados SRTM no auxílio à exploração petrolífera: um exemplo na bacia sedimentar do Amazonas. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, p. 89-98, 2010. DOI: 10.1590/S0102-261X2010000100007

ALVES, J.; MEDEIROS, W. Inventariação do patrimônio geomorfológico cárstico do Parque Nacional da Fuma Feia (RN, Brasil) como proposta para uso geoturístico. **Journal of Geography and Spatial Planning**, v. 20, n. 1, p. 122 – 148. 2020. DOI: 10.17127/got/2020.20.006

ALVES, J.; MEDEIROS, W.; TARGINO, D. Geodiversidade e Geoturismo no município de Apodi/RN: o caso do Lajedo de Soledade. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 2, p. 1201 – 1210, 2016. DOI: 10.21680/2447-3359.2016v2n0ID10586

AWAD, A.; van GROOS, A.; GUGGENHEIM, S. Forsteritic olivine: Effect of crystallographic direction on dissolution kinetics. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 64(10), p. 1765 – 1772. 2000. DOI: /10.1016/S0016-7037(99)00442-1

AYLAR, F.; UZUN, A.; ZEYBEK, H.; GÜRGÖZE, S.; DÜNDER, E. Formation and Geostatistical Analysis of Eğribük Creek Potholes, Samsun, Turkey. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 15, n. 3, p. 238, 2022. DOI: 10.1007/s12517-022-09526-0

BARRETO, C.; LAFON, J.; COSTA, L.; LIMA, E. Vulcanismo félsico paleoproterozoico do Grupo Iricoumé, Domínio Erepecuru-Trombetas, Província Amazônia Central: dados de campo, caracterização petrográfica e geocronologia Pb-Pb em zircão. **Geologia USP. Série científica**, v. 13, n. 1, p. 47 – 72, 2013. DOI: 10.5327/Z1519-874X2013000100004

BASILIO, C. M.; LIMA, R. H. C. Geologia dos Lugares Sagrados dos Povos Umükori Mahsã (Desana) e Yepamahsã (Tukano) Em São Gabriel da Cachoeira, Amazonas, Brasil. **Revista Geotemas**, v. 14, p. e02413-e02413, 2024.

BATISTA, C.; VERÍSSIMO, C.; AMARAL, W. Levantamento de feições estruturais lineares a partir de sensoriamento remoto – uma contribuição para o mapeamento geotécnico na Serra de Baturité, Ceará. **Revista do Instituto de Geociências, USP**, v. 14, n. 2, p. 6 – 82, 2014. DOI: /10.5327/Z1519-874X201400020004

BATTIST, I.; SMOLSKI, F. **Software R: Análise estatística de dados utilizando um programa livre**. Editora Faith, Bagé, RS, 2019, p 173.

BENTO, Lilian Carla Moreira; NAZAR, Thallita Isabela Silva Martins. Parque Nacional Serra da Canastra (Minas Gerais-Brasil): proposta de painel interpretativo. **Caderno de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 112-135, 2020.

BERA, B.; BHATTACHARJEE, S.; CHAMLING, M.; GHOSH, A.; SENGUTPA, N.; GHOSH, S. Relationship between diameter and depth of *potholes* controlled by lithology and structure in the Rarh region of India. **Curr Sci**, v. 121(5), p. 697 – 703, 2021. DOI: 10.18520/cs/v121/i5/697-703

BERA, B.; BHATTACHARJEE, S.; GHOSH, A.; GHOSH, S.; CHAMLING, M. Dynamic of channel potholes on Precambrian geological sites of Chhota Nagpur plateau, Indian peninsula: applying fluvio-hydrological and geospatial techniques. **SN Applied Sciences**, v. 1, p. 1 – 14, 2019. DOI: 10.1007/s42452-019-0516-2

BERMEGUY, R.; COSTA J. Considerações sobre a evolução do sistema de drenagem da Amazonia e sua relação com o arcabouço tectônico-estrutural. **Boletim do Museu Paraense Emilio Guedi**, v. 3, p 75 – 97, 1991.

BEZERRA, K. **Caracterização Geológica e Geoquímica das Rochas vulcânicas das Serras do Tabaco e Taramé, NE de Roraima, Domínio Surumu, Cráton Amazônico**. 2010. 81 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, 2010.

BORBA, A. Avanços e obstáculos para a certificação de um Geoparque em Caçapava do Sul, “Capital Gaúcha Da Geodiversidade”. **Terr@ Plural**, v. 12, n. 2, p. 201 – 210, 2018.

BORBA, A.; FREITAS FERREIRA, P.; GUADAGNIN, F.; MATTÉ, V.; GREGORY, T. R.; CAMARGO, S. Geoparque Caçapava Aspirante Unesco: Caminhos para o desenvolvimento local sustentável, 1ed., Pró-Reitoria de Extensão, UFSM, 178 p. 2022.

BOSCH, R.; WHITE, W. Lithofacies and transport of clastic sediments in karstic aquifers. In: **Studies of cave sediments: Physical and chemical records of paleoclimate**. Boston, MA: Springer US, 2004. p. 1-22.

BRAGA, A.; FIORI, A.; GONÇALVES, D.; COSTA, F. Influência Estrutural sobre Cavernas em Formações Ferríferas, Carajás-PA. **Geonomos**, v. 25(1), p. 24 – 39, 2017. DOI:10.18285/geonomos.v25i1.910

BRASIL. **Decreto nº 5.746, de 5 de abril de 2006**. Regulamenta o art. 21 da Lei no 9.985, de 18 de julho de 2000, que dispõe sobre o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. Brasília, Presidência da República, 2006.

BRILHA, J. Inventory and Quantitative Assessment of Geosites and Geodiversity Sites: A Review. **Geoheritage**, v. 8, n. 2, p. 119 – 134, 2016. DOI: 10.1007/s12371-014-0139-3

BRILHA, J. **Patrimônio geológico e geoconservação: a conservação da natureza na sua vertente geológica**. Palimage, 2005. 183 p.

BRILHA, J.; GRAY, M.; PEREIRA, D.; PEREIRA, P. Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. **Environmental Science and Policy**, v. 86, n. 19 – 28, 2018. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.05.001

CAMPBELL, E. Granite landforms. **Journal of the Royal Society of Western Australia**, v. 80, p. 101 – 112, 1997.

CAMPBELL, E., 1990. Late Pleistocene and Early Holocene hydrologic change in Amazonia. In: Symposium On Amazonia: A Dynamic Habitat – Past, Present and Future. New Orleans. 1990, p. 23.

CAPUTO, M. Bacia do Amazonas: estratigrafia, tectônica e magmatismo. 51 p. 2014.

CAPUTO, M. Glaciações Siluro-Devonianas no continente Gondwana Ocidental. In: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 1992, São Paulo. Boletim dos Resumos Expandidos. 1992. v. 1. p. 543-543.

CAPUTO, M. **Stratigraphy, tectonics, paleoclimatology and paleogeography of northern basins of Brazil**. University of California, Santa Barbara, 1984.

CAPUTO, M.; LANDING, E.; JOHNSON, M. Ordovician–Silurian glaciations and global sea-level changes. **Silurian Cycles: Linkages of Dynamic Stratigraphy with Atmospheric, Oceanic, and Tectonic Changes**, 1998.

CAPUTO, M.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972, Belém. Anais. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1972. v. 3, p. 35-46.

CAPUTO, M.; VASCONCELOS, D. Possibilidades de hidrocarbonetos no Arco Purus. **Petróleo Brasileiro, SA, Internal Report, Sistema de Informação em Exploração**, n. 130-5164, p. 21, 1971.

CAPUTO, M.V.; RODRIGUES, R.; VASCONCELOS, D.N.H. Nomenclatura estratigráfica da Bacia do Amazonas: histórico e atualização. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 26, Belém, SBG, 1972. v. 3, p. 35 – 46. 1972.

CARDOSO, T. Acrítarcos do Siluriano da Bacia do Amazonas: Bioestratigrafia E Geocronologia. **Arquivos do Museu Nacional**, v. 63, n. 4, p. 727 – 759, 2005.

CARRERAS, J.; CZECK, D.; DRUGUET, E. HUDLESTON, P. Structure and development of an anastomosing network of ductile shear zones. **J. Struct. Geol.** v. 32, p. 656 – 666. 2010. DOI: 10.1016/j.jsg.2010.03.013

CARVALHO, I.; HENRIQUES, M.; CASTRO, A. Promotion of the Geological Heritage of Araripe Unesco Global Geopark, Brazil: the Casa da Pedra Reference Center. **Geoheritage**, v. 12, p.17, 2020. DOI: 10.1007/s12371-020-00452-9

CARVALHO, I.; RAMINELLI, R.; HENRIQUES, M.; SOARES, R.; ANDRADE, J.; FREITAS, F. The Araripe Geopark (NE Brazil): Discovering the Earth's Past as a Driver of Economic and Social Transformation. **Geoheritage**, v. 13, p. 60, 2021. DOI: /10.1007/s12371-021-00586-4

CASTRO, C.E.; SILVA, F.M.; MACIEL, E.L. Considerações sobre a gênese de cavernas areníticas no sul do Maranhão. In: ZAMPAULO, R. A. (org.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 35, 2019. Bonito. Anais Campinas: SBE, 2019. p.132-137.

CATANA, M.; BRILHA, J. The role of UNESCO global geoparks in promoting geosciences education for sustainability. **Geoheritage**, v. 12, n. 1, p. 1, 2020. DOI: 10.1007/s12371-020-00440-z

CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas. Base digital de dados geoespacializados de cavernas do Brasil. Brasília: ICMBio/CECAV, 2019.

CHENG, S.; YANG, G. Review on the research progress of foreign neotectonics. **Seismol. Geol.**, v. 30, n. 1, p. 31 – 43, 2008.

CHRISTOFOLETTI, A. 1980. **Geomorfologia**. São Paulo, Editora Edgar Blücher Ltda.

CLARKE, John Mason. **A fauna siluriana superior do Rio Trombetas: Estado do Pará, Brazil**. Impr. Nacional, 1899.

CORDANI, U.; TEIXEIRA, W. Proterozoic accretionary belts in the Amazonian Craton. 4-D Framework of Continental Crust. Tradução. Colorado: Geological Society of America, 2007.

COSTA, J.; BEMERGUY, R.; HASUI, Y.; BORGES, M.; FERREIRA JÚNIOR C.; BEZERRA, P.; COSTA.; FERNANDES, J. Neotectônica da região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**, v. 4, n. 23 – 24, 1996. DOI: /10.18285/geonomos.v4i2.199

COSTA, J.; BEMERGUY, R.; HASUI, Y.; BORGES, M. Tectonics and paleogeography along the Amazon River. **Journal of South American Earth Sciences**. v. 14, p. 335 – 347, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(01\)00025-6](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(01)00025-6)

COSTA, J.; IGREJA, H.; BORGES, M.; HASUI, Y. O quadro tectônico regional do Mesozóico na região norte do Brasil. In: III Simpósio de Geologia da Amazônia. Belém, SBG, 1991. p. 166 – 178.

COSTA, J.; VASCONCELLOS, E.; BARROS, C.; CURY, L.; JUK, K. Petrologia e geoquímica da soleira de Medicilândia, diabásio Penatecaua, PA. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, n. 4, p. 754 – 771, 2012. DOI: 10.5327/Z0375-75362012000400008

COSTA, S.; NASCIMENTO, M.; SILVA, M. Roteiro virtual pelos geossítios do Geoparque Aspirante Seridó: ferramentas cartográficas livres do Google® para Geoeducação. **Terrae Didática**, v. 18, p. e022004, 2022. DOI: 10.20396/td.v18i00.8667435

COSTA, S.; SARAIVA JUNIOR, J.; PINTO, Y.; NASCIMENTO, M. Marmitas do curso médio do rio Potengi, Barcelona, Nordeste do Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 48, n. 2, 2021. DOI: 10.22456/1807-9806.95313

COUTINHO, M. Geologia do Craton Amazônico. In: Província Mineral do Tapajós: geologia, metalogenia e mapa previsional para ouro em SIG. Serviço Geológico do Brasil – SBGeo/ CPRM. p. 15 – 32. 2008.

CUERVO, H.; SOARES, E.; CAPUTO, M.; 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: /10.1016/j.jsames.2018.04.023

CUNHA, P.; GONZAGA, F.; COUTINHO, L.; FEIJÓ, F. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 15, p. 227 – 251, 2007.

CUNHA, P.; MELO, J.; SILVA, O. Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências Petrobrás**. v.15(2), p. 227 – 251, 2007.

DANTAS, M.; MAIA, M. **Geodiversidade do Estado do Amazonas**. 1. ed. Manaus: CPRM, 2012.

DAS, B. Control of substrates on pothole geometry. **Current Science**, v. 117, n. 2, p. 275-281, 2019.

DAS, S.; PARDESHI, S.; KULKARNI, P.; Doke, A. Extraction of lineaments from different azimuth angles using geospatial techniques: a case study of Pravara basin, Maharashtra, India. **Arabian Journal of Geosciences**. v. 11, p. 1 – 13. 2018. DOI: 10.1007/s12517-018-3522-6

DERBY, O. Contribuições para a geologia do baixo Amazonas. **Areh Mus. Afac**. v. 2, p. 77 – 104. 1879.

DHALI, M. Dynamic evolution of riverbed potholes in the granitic bedrock of Chota Nagpur Plateau, middle part of Subarnarekha River basin, India. **Journal of Hydrology**, v. 571, p. 819 – 836, 2019. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.02.022

DHALI, M.; SAHANA, M. Spatial variation in fluvial hydraulics with major bed erosion zone: a study of Kharoti river of India in the post monsoon period. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, p. 1 – 12, 2017. DOI: 10.1007/s12517-017-3205-8

DOMÍNGUEZ-VILLAR, D. Early formation of gnammas (weathering pits) in a recently glaciated area of Torres del Paine, southern Patagonia (Chile). **Geomorphology**, v. 76, n. 1-2, p. 137 – 147, 2006. DOI: /10.1016/j.geomorph.2005.10.006

DOWLING, R. Geotourism's Global Growth. **Geoheritage**, v. 3, p. 1 – 13, 2013. DOI 10.1007/s12371-010-0024-7

EGHOLM, D.; KNUDSEN, M.; SANDIFORD, M. Lifespan of mountain ranges scaled by feedbacks between landsliding and erosion by rivers. **Nature**, v. 498, n. 7455, p. 475 – 478, 2013. DOI: 10.1038/nature12218

FABRI, F.; AULER, A.; AUGUSTIN, C. Relevô Cárstico Em Rochas Siliciclásticas: Uma Revisão Com Base Na Literatura – Karstic Relief In Siliciclastic Rocks: A Revision On The Basis Of The Literature. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 3, 2014. DOI: 10.20502/rbg.v15i3.302.

FERREIRA, C.; UAGODA, R. Um panorama sobre mapeamentos de dolinas no Brasil, feições elementares do carste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 1, p. 302 – 321, 2020. DOI: /10.26848/rbgf.v13.1.p302-321

FERREIRA, D.; VALDATI, J. Geoparks and Sustainable Development: Systematic Review. **Geoheritage**, v. 15, p. 6, 2023. DOI: 10.1007/s12371-022-00775-9

FERREIRA, R. Lajedo Salambaia, Paraíba. Geossit. 2021. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/geossit/geossitios/ver/1332> Acessado em: 23 de mai de 24

FLEIG, R.; NASCIMENTO, I.; VALDATI, J. Geoparques: desenvolvimento sustentável e agenda 2030. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 42, p. e193925, 2022. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.193925.

- FLEIG, R.; NASCIMENTO, I.; VALDATI, J. Geoparques: desenvolvimento sustentável e agenda 2030. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 42, p. e193925-e193925, 2022. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.193925
- FLEMING, M.; BOOTSMAN, C.; MOLL, N.; BRAND, L. Pothole formation on Rock Window Mesa, Chinle valley, AZ. **Geomorphology**, v. 468, p. 109498, 2025. DOI: 10.1016/j.geomorph.2024.109498
- FOLK, R. 1980. **Petrology of Sedimentary Rocks**. Austin, Hemphill Publishing, p. 182.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. 2007. **Karst hydrogeology and geomorphology**. London, Unwin Hyman, 578 p.
- FORD, W. 2007. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, p. 562. DOI:10.1002/9781118684986
- FOSSSEN, H. 2017. **Geologia Estrutural**. São Paulo, Oficina de Textos. 610 p.
- FOSSSEN, H.; CAVALCANTE, G. Shear zones—a review. **Earth-Sci. Rev.** v. 171, p. 434 – 455, 2017. DOI: /j.earscirev.2017.05.002
- FRANZINELLI, E.; IGREJA, H. Modern sedimentation in the lower Negro river, Amazonas state, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, n. 3-4, p. 259 – 271, 2002. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00178-7
- FREIRE, L.; LIMA, J.; VERÍSSIMO, C.; SILVA, E. Carste em Rochas Não Carbonáticas: contribuição ao estudo geomorfológico em cavernas de arenito da Amazônia Paraense. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.10(6), p. 1829 – 1845, 2017. DOI: 10.26848/rbgf.v10.6.p1829-1845
- FREITAS, R. Ensaio sobre a tectônica moderna do Brasil. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, Universidade de São Paulo. Geologia**, n. 6, p. 7 – 107, 1951. DOI: 10.11606/issn.2526-3862.bffcluspgeologia.1951.121701
- FUSTÉ-FORNÉ, F. A slow tourist in the Basque Coast Geopark (Spain). **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 11, n. 2, p. 247 – 258, 2023. DOI: /10.1016/j.ijgeop.2023.03.003
- GAPAIS, D.; BALE, P.; CHOUKROUNE, P.; COBBOLD, P.; MAHJOUR, Y.; MARQUER, D. Bulk kinematics from shear zone patterns: some field examples. **J. Struct. Geol.** v. 9, p. 635 – 646, 1987. DOI:10.1016/0191-8141(87)90148-9
- GARCIA, M.; QUEIROZ, D.; MUCIVUNA, V. Geological diversity fostering actions in geoconservation: An overview of Brazil. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 10, p. 507 – 522, 2022. DOI: /10.1016/j.ijgeop.2022.08.008
- GARCÍA-CORTÉS, A.; URQUÍ, L. Documento Metodológico para la elaboracion del inventario español de lugares de interés geológico (IELIG). Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. 2013. 64 p.
- GOMES, M.; SANTOS, Y.; FERREIRA, D.; VALDATI, J. Geomorfossítios: a singularidade do patrimônio abiótico do Geoparque Caminhos dos Cânions do Sul,

Sul do Brasil. **PerCursos**, Florianópolis, v. 23, n. 52, p. 155 – 182, 2022. DOI: 10.5965/1984724623522022155.

GONZÁLEZ-DELGADO, J.; MARTÍNEZ-GRAÑA, A.; HOLGADO, M.; GONZALO, J.; LEGOINHA, P. Augmented reality as a tool for promoting the tourist value of the geological heritage around natural filming locations: A case study in “Sad Hill”(The Good, the Bad and the Ugly Movie, Burgos, Spain). **Geoheritage**, v. 12, p. 1 – 11, 2020. DOI: /10.1007/s12371-020-00457-4

GRAHN, Y.; CAPUTO, M. V. Early silurian glaciations in Brazil. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 99, n. 1-2, p. 9 – 15, 1992. DOI: /10.1016/0031-0182(92)90003-N

GRAHN, Y.; PARIS, F. Age and correlation of the Trombetas Group, Amazonas Basin, Brazil. **Revue de Micropaléontologie**, v. 35, n. 3, p. 197 – 209, 1992.

GRATZ, A. Solution-transfer compaction of quartzites: Progress toward a rate law. **Geology**, v. 19(9), p. 901, 1991.

GRAY, M. Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature, 2nd ed. Wiley Blackwell, Chichester, UK. 2013.

GRAY, M. Some observations and reflections on geodiversity, the oft-forgotten half of nature. **Geological Society**, London, Special Publications. v. 530, n. 1, p. SP530-2022-100, 2022. DOI: /10.1144/SP530-2022-100

GRAY, M.; GORDON, J.; BROWN, J. Geodiversity and the ecosystem approach: the contribution of geoscience in delivering integrated environmental management. **Proceedings of the Geologists' Association**, v. 124, n. 4, p. 659 – 673, 2013. DOI: 10.1016/j.pgeola.2013.01.003

GREEN, A.; HASTIE, W.; COOPER, A.; LIGHTFOOT, D. Anomalously large marine *potholes* on a submerged relict shore platform: The Eastern Cape shelf of SE Africa. **Geomorphology**, v. 430, p. 108673, 2023. DOI: /10.1016/j.geomorph.2023.108673

GRIMES, K. Karst and paleokarst features in sandstones of the Judbarra / Gregory National Park, Northern Territory, Australia. **Helictite**, v. 41, p. 67 – 73, 2012b.

GRIMES, K. Surface karst features of the Judbarra / Gregory Karst, Northern Territory, Australia. **Helictite**, v. 41, p. 15 – 36, 2012a.

GUADAGNIN, F.; MATTÉ, V.; KUMAIRA, S.; GREGORY, T. Passeios Virtuais Como Estratégia De Divulgação E Valorização Do Patrimônio Natural Do Território Do Geoparque Caçapava Aspirante Unesco. In: **Geoparque Caçapava Aspirante Unesco: caminhos para o desenvolvimento local sustentável**. p. 75-89, 2022.

HANCOCK, P.; ENGELDER, T. Neotectonic joints. **The Geological Society of América Bulletin**, v. 10, p. 1197 – 1208, 1989. DOI: /10.1130/0016-7606(1989)101<1197:NJ>2.3.CO;2

HARDT, R.; FERREIRA PINTO, S. Carste em Litologias não carbonáticas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, p. 99 – 105, 2009. DOI: 10.20502/rbg.v10i2.134

HARDT, R.; RODET, J.; PINTO, S. O carste, produto de uma evolução ou processo? Evolução de um conceito. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 3, p. 100 – 111, 2010.

HENRIQUES, D.; ALVES, A. Geodiversidade e Geoturismo no Semiárido Potiguar: Mapeamento De Geossítios Em Alexandria-Rn, Brasil. **GEOgraphia**. v. 15, n. 54. 2023. DOI: 10.22409/GEOgraphia2023.v25i54.a49065

HENRIQUES, D.; QUEIROZ, L.; QUEIROZ, F.; MEDEIROS, J.; MEDEIROS, W. Geodiversidade no horizonte popular: da cultura ao patrimônio geomorfológico e paisagístico de Serrinha dos Pintos-RN. **Revista de Geomorfologia**. v. 3, n. 2, p. 1 – 22, 2022. DOI: 10.48025/ISSN2675-6900.v3n2.2022.160

HENRIQUES, M.; BRILHA, J. UNESCO Global Geoparks: A strategy towards global understanding and sustainability. **Episodes Journal of International Geoscience**, v. 40, n. 4, p. 349 – 355, 2017. DOI:10.18814/epiugs/2017/v40i4/017036

HENRIQUES, R. Carste em Rochas Carbonáticas e Não Carbonáticas: contribuições na investigação das múltiplas formas esculpturadas em território brasileiro. **Revista Equador**, v. 5, n. 5, p. 36 – 55, 2016. DOI: /10.26694/equador.v5i5.4909

HERMAN, E.; TORAN, L.; WHITE, W. Clastic sediment transport and storage in fluviokarst aquifers: an essential component of karst hydrogeology. **Carbonates and Evaporites**, v. 27, p. 211 – 241, 2012. DOI: 10.1007/s13146-012-0112-7

IBANEZ, D.; MIRANDA, F.; RICCOMINI, C. Geomorphometric pattern recognition of SRTM data applied to the tectonic interpretation of the Amazonian landscape. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 87, p. 192 – 204, 2014. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.10.014

JACOBI, P. (Org.) **Aprendizagem social: diálogos e ferramentas participativas: aprender juntos para cuidar da água**. São Paulo: Gov. Amb, IEE, PROCAM, USP. FAPESP. 2011. 83 p.

JANSEN, D.; CAVALCANTI, L.; LAMBLÉM, H. Mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas no Brasil, na escala 1: 2.500. 000. **Revista Brasileira de Espeleologia**, v. 2, n. 1, p. 42 – 57, 2012.

JARA, V., Geoparque Mundial de la UNESCO. 2021. <https://geoparquevalluercas.es/marmitas-gigante-bohonal-ibor/>

JENNINGS, J. 1985. **Karst geomorphology**. Oxford, Basil Blackwell Ltd., 293 p.

Jl, S. Canyons of sculpted rocks. **Geological Publishing House, Beijing**, v. 632, p. 104413, 2019.

Jl, S. Canyons of sculpted rocks: Geographical wonders created by flowing water. **Chin. Natl. Geogr**, v. 693, p. 135 – 151, 2018.

Jl, S.; LI, L.; ZENG, W. The relationship between diameter and depth of potholes eroded by running water. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**. v.10(5), p. 818 – 831, 2018. DOI: /10.1016/j.jrmge.2018.05.002

Jl, S.; ZENG, W.; LE, L.; MA, Q.; FENG, J. Geometrical characterization of stream potholes in sandstone from the Sunxi River (Chongqing, China) and implications for

the development of bedrock channels. **Journal of Asian Earth Sciences**, n. 173, p. 374 – 385, 2019. DOI: 10.1016/j.jseaes.2019.01.037

JUNIOR, A.; GOMES, L. Extração da Informação Posicional de Pontos de Projeção Cartográfica Geradas em Rotinas de Processamento para Geração de Ortofotos. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 1, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n1-56925

KARMANN, I. Caracterização geral e aspectos genéticos da gruta arenítica Refúgio do Maroaga, AM-02. **Espeleotema**, v. 15, p. 9 – 18, 1986.

KEJIAN, Xu; LEI, Lei. Research on the designing of the interpretation panel of geoparks. In: The 2nd International Conference on Information Science and Engineering. IEEE, 2010. p. 1-4.

KIERNAN, K. Landforms as sacred places: implications for geodiversity and geoheritage. **Geoheritage**, v. 7, n. 2, p. 177 – 193, 2015. DOI: 10.1007/s12371-014-0128-6

KLIMCHOUK, A. Tafone and honeycomb structures as indicators of ascending fluid flow and hypogene karstification. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 466, n. 1, p. 79-105, 2018.

KLIMCHOUK, A.; FORD, D. Types of karst and evolution of hydrogeologic settings. In: KLIMCHOUK, A.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.), **Speleogenesis: Evolution of karst aquifers**. Huntsville/USA: National Speleological Society, 2000. p. 45-53

KUHN, C.; SANTOS, F. Geoparque Chapada dos Guimarães: Uma Viagem Pela História do Planeta. Associação Profissional dos Geólogos do Estado de Mato Grosso - AGEMAT: Federação Brasileira de Geólogos - FEBRAGEO, 2021.

KUHN, C.; SANTOS, F.; JESUZ, C.; KOLYA, A.; REIS, F. Public Policies for Geodiversity in Brazil. **Geoheritage**, v. 14, p. 74. 2022. DOI:/10.1007/s12371-022-00705-9

LANGE, F. Subdivisão bioestratigráfica e revisão da coluna siluro-devoniana da Bacia do Baixo Amazonas. In: **Atas do simpósio sobre a Biota Amazônica (Geociências)**. 1967. p. 215-326.

LATRUBESSE, E.; FRANZINELLI, E. The Holocene alluvial plain of the middle Amazon River, Brazil. **Geomorphology**, v. 44, n. 3-4. p. 241 – 257. 2002. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00177-5

LAUREANO, F.; KARMANN, I. Sedimentos clásticos em sistemas de cavernas e suas contribuições em estudos geomorfológicos: uma revisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 1, 2013. DOI: 10.20502/rbg.v14i1.306

LAZO, D.; DYER, L.; ALORRO, R. Silicate, phosphate and carbonate mineral dissolution behaviour in the presence of organic acids: A review. **Minerals Engineering**, v. 100, p. 115-123, 2017. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.10.013

LEITE, R.; PEIXOTO, M.; RAMOS, R.; MANSUR, K.; FREITAS, F.; ARAÚJO, P. Roteiro Turístico-Educacional pelos Geomorfossítios do Setor Noroeste da Bacia do

Rio Pirapetinga, Resende – RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 1, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i1.2207.

LIMA, R.; BARBOSA, R.; LIMA, V.; GARCIA, M.; COSTA, S.; JESUS, E.; SANTOS, V.; MAZOCA, C.; SOUZA, I.; SOUZA, A.; SANTOS, C.; VENÂNCIO, D.; JESUS, J. Estratégias De Geoconservação Em Áreas Protegidas No Baixo Rio Negro: Abordagem Preliminar. **Revista Geonorte**, v. 15, n. 48, 2024. DOI: 10.21170/geonorte.2024.V.15.N.48.01.29

LOPES, J. L. Marmitas no Rio Ingá, Paraíba, Brasil. **William Morris Davis - Revista de Geomorfologia**, v. 1, n. 2, 2020.

LOPES, L.; ARAUJO, J.; CASTRO, A. Geoturismo: Estratégia de Geoconservação e de Desenvolvimento Local. **Caderno de Geografia**, v. 21(35), p. 1 – 11, 2011.

LORENC, M.; BARCO, P.; SAAVEDRA, J. The evolution of potholes in granite bedrocks, W Espanha. **Catena**, v. 22, n. 4, p. 265 – 274, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90037-X](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90037-X)

LORENC, M.; MUÑOZ BARCO, P.; SAAVEDRA, J. Marmitas de gigante en el valle del río Jerte como ejemplo de erosión fluvial intensiva por remolinos e influencia tectónica en su distribución y morfología. **Cuaternario y Geomorfología**, v. 9, n. 1/2, p. 17 – 26, 1995.

LUDWIG, G. Divisão estratigráfico-faciológica do paleozóico da Bacia Amazônica. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 1964. 72 p. (Ciência Técnica Petróleo. Seção: Exploração de petróleo, n. 1).

LUZARDO, R. Geoparque Cachoeiras do Amazonas (AM): proposta. In: SCHOBENHAUS, Carlos; SILVA, Cassio Roberto da (Org.). **Geoparques do Brasil: propostas**. Rio de Janeiro: CPRM, 2012. Cap. 3.

MAIA, R. Aspectos morfoestruturais do carste em arenitos no Nordeste Brasileiro: O caso de Castelo do Piauí. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 3, 2023. DOI: 10.20502/rbg.v24i3.2249.

MAIA, R.; NASCIMENTO, M. Relevos Graníticos do Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 2, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i2.1295

Mapio.net. Disponível em: https://mapio.net/pic/p-40644275/#google_vignette . Acessado em: 23 de mai 24.

MARQUES, S.; SOUZA, V.; DANTAS, E.; VALÉRIO, C.; NASCIMENTO, R. Contributions to the petrography, geochemistry and geochronology (U-Pb and Sm-Nd) of the Paleoproterozoic effusive rocks from Iricoumé Group, Amazonian Craton, Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44(1), p. 121 – 138, 2014. DOI: /10.5327/Z2317-4889201400010010

MARTIN, S.; REYNARD, E.; PELLITERO ONDICOL, R.; GHIRALDI, L. Multi-scale Web Mapping for Geoheritage Visualisation and Promotion. **The European Association for Conservation of the Geological Heritage**, v. 6, p. 141 – 148, 2014. DOI: /10.1007/s12371-014-0102-3

MARTINI, J. Dissolution of quartz and silicate minerals. In: KLIMCHOUK, A. B.; FORD, D. C.; PALMER, A. N.; DREYBRODT, W. (Ed.). **Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers**. Huntsville/USA: National Speleological Society. p.171-174. 2000.

MEANS, W.; PATERSON, M. Experiments on preferred orientation of platy minerals. **Contributions to Mineralogy and Petrology**. v.13(2), p. 108 – 133, 1996. DOI: /10.1007/BF00518022

MELO, M.; GUIMARAES, G.; CHINELATTO, A.; GIANNINI, P.; PONTES, H.; CHINELATTO, A.; ATENCIO, D. Kaolinite, illite and quartz dissolution in the karstification of Paleozoic sandstones of the Furnas Formation, Paraná Basin, Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 63, p. 20 – 35, 2015. DOI: /10.1016/j.jsames.2015.06.011

MENIN, D.; BACCI, D. As cavernas como tema interdisciplinar na formação de professores da educação básica no Vale do Ribeira. **Geologia USP. Série Científica**, v. 23, n. 2, p. 75 – 86, 2023. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v23-205098.

MINISTÉRIO DO TURISMO. **Geoparques: contexto, origem e perspectivas no Brasil. Documento Técnico I**. Rio Grande do Norte: Funpec, 2021. 67 p.

NAVARRETE, F.; OCHOA, J.; GANGOTENA, F. Modelo digital y fotogrametría a través del uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV). Caso de estudio, entorno del río Tahuando en la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura. **Eídos**, v. 16, n. 22, p. 49 – 60, 2023. DOI: 10.29019/eidos.v16i22.1164

NEMEC, W.; LORENC, M.; ALONSO, J. Potholed granite terrace in the Rio Salor valley, western Spain: A study of bedrock erosion by floods. **Tecniterrae**, v. 50, p. 6 – 21, 1982.

NETO, A.; SANTOS, G.L.; SOUZA, S.; SANTOS, L.; BEZERRA, J.; CARRINO, T. Integration of remote sensing and airborne geophysical data applied to geological mapping: a case study of the Vieirópolis region (Paraíba), Rio Grande do Norte Subprovince, Borborema Province. **Geologia USP. Série Científica**, v. 18, p. 89 – a103. 2018. DOI: 10.11606/issn.2316-9095.v18-140834

NEWSOME, David; DOWLING, Ross K. **Geotourism: The Tourism of Geology**. 2010.

NOGUEIRA, A.; SARGES, R. Caracterização e gênese das cachoeiras da região de Presidente Figueiredo, nordeste do Estado do Amazonas, Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 73, p. 287 – 301, 2001. DOI: /10.1590/S0001-37652001000200012

NOGUEIRA, A.; SOARES, E.; SOUZA, V.; TRUNCKENBRODT, W.; CAPUTO, M. Estruturas glacioteclônicas na Formação Nhamundá, Siluriano da Bacia do Amazonas. In: SBG, Simp. de Est. Tect., 5, Pirinópolis, *Atas*, p.153- 155. 1997

NOGUEIRA, A.; TRUCKENBRODT, W.; SOARES, E. O icnogênero *Arthrophyvus* de depósitos sublitorâneos da Formação Nhamundá (Siluriano inferior) da bacia do Amazonas, região de Presidente Figueiredo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29(2), p. 135 – 140. 1999. DOI: 10.25249/0375-7536.199929135140

OLIVEIRA, A.; HENKES, S.; STROHSCHOEN, A. Conceptual Map and World Café: ressignificating the teaching of sciences for the argumentation. **Research, Society and Development**, v.8, n.3, p. e3183836, 2019. DOI: 10.33448/rsd-v8i3.836

OLIVEIRA, M.; ANDRETTA, E.; OLIVEIRA FILHO, I.; MARMOS, J.; SOUZA, A. **Avaliação geotécnica nos atrativos geoturísticos de Presidente Figueiredo, AM** v. 1. Brasília: CPRM, 2022.

ORTEGA, J.; GÓMEZ-HERAS, M.; PEREZ-LÓPEZ, R.; WOHL E. Multiscale structural and lithologic controls in the development of stream potholes on granite bedrock rivers. **Geomorphology**. v. 204, p. 588 – 598, 2014. DOI: /10.1016/j.geomorph.2013.09.005

PÃOZINHO, F.; NASCIMENTO, M. Geodiversidade e Geoturismo aplicados à formação de guias de turismo e condutores de visitantes do Parque Nacional da Chapada das Mesas e entorno imediato. **Caderno Virtual de Turismo**, v. 24, n. 3, p. 31 – 50, 2024. DOI: 10.18472/cvt.24n3.2024.2116

PARADISE, T. 2022. **Tafoni and other rock basins**.

PASSCHIER, C.; TROUW, R. 2005. **Microtectonics**. Springer Science & Business Media, p. 289.

PASSOS, M.; SOARES, E.; TATUMI, S.; YEE, M.; MITTANI, J.; HAYAKAWA, E.; SALAZAR, C. A. Pleistocene-Holocene sedimentary deposits of the Solimões-Amazonas fluvial system, Western Amazonia. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 98, p. 102455, 2020. DOI: /10.1016/j.jsames.2019.102455

PAUNGYA, N.; SINGTUEN, V.; WON-IN, K. The preliminary geotourism study in Phetchabun Province, Thailand. **Geo Journal of Tourism and Geosites**, v. 31, n. 3, p. 1057 – 1067, 2020. DOI: /10.30892/gtg.31318-541

PAVLIDES, S. Looking for a definition of neotectonics. **Terra nova**, v. 1, n. 3, p. 233 – 235, 1989. DOI: 10.1111/j.1365-3121.1989.tb00362.x

PELLETIER, J.; SWEENEY, K.; ROERING, J.; FINNEGAN, N. Controls on the geometry of potholes in bedrock channels. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 3, p. 797 – 803, 2015. DOI: 10.1002/2014GL062900

PILÓ, L. Geomorfologia Cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.1, n.1, p. 88 – 102, 2000. DOI: 10.20502/rbg.v1i1.73

PINHEIRO, R.; MAURITY, C.; PEREIRA, E. Cavernas em arenito da Província Espeleológica Altamira Itaituba: dados espeleogenéticos com base no exemplo da Gruta das Mãos (PA), Amazônia, Brasil. **Espeleo-Tema**, v. 26, n. 1, p. 5 – 18, 2015.

PINTO, A.; SILVA, L.; WEBER, A. Ensino não-formal e divulgação das geociências por meio da educação ambiental. **Terrae Didática**, v. 19, p. e023011, 2023. DOI: 10.20396/td.v19i00.8672229.

PONTES, H.; FERNANDES, L.; MELO, M.; GUIMARÃES, G.; MASSUQUETO, L. Características litofaciológicas e aspectos genéticos de feições cársticas da Formação Furnas e Arenito Vila Velha no município de Ponta Grossa (Paraná,

Brasil). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 1, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i1.2085.

POTYSZ, A.; BARTZ, W. Long-term (bio) deterioration of Fe-containing and Fe-depleted sandstones: An experimental insight into biotic and abiotic interactions. **Construction and Building Materials**, v. 421, p. 135700, 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135700

Projeto Doce Mata. PROJETO DOCES MATAS. Manual de introdução à interpretação ambiental. Belo Horizonte: IEF – IBAMA – Fundação Biodiversitas – GTZ, 2002.

QGIS.org. 2023. QGIS 3.28.8 Firenze, Geographic Information System. QGIS Association.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Viena: R Foundation for Statistical Computing. 2023.

RAEISI, R.; DINCĂ, I.; ALMODARESI, S.; SWART, M.; BOLOOR, A. An Assessment of Geosites and Geomorphosites in the Lut Desert of Shahdad Region for Potential Geotourism Development. **Land**, v. 11, n. 5, p. 736, 2022. DOI: /10.3390/land11050736

REIS, J. R. L.; FARIA, I.; FRAXE, T. Geoconservação e Geoturismo na Amazônia. **Revista Turismo em Análise - RTA | ECA-USP |ISSN: 1984-4867**, v. 31, n. 1, p. 50 – 76, 2020. DOI: /10.11606/issn.1984-4867.v31i1p50-76

REIS, N.; ALMEIDA, M.; RIKER, S.; FERREIRA, A. (org.). Geologia e recursos minerais do estado do Amazonas. Manaus: CPRM : CIAMA,. Escala 1:1.000.000. Programa Geologia do Brasil - PGB. 2006.

RIBEIRO, L.; TREVISOL, A.; CARVALHO, I.; MACEDO NETO, F.; MARTINS, L.; TEIXEIRA, V. **Geoparque Uberaba-Terra dos Dinossauros (MG): proposta. CPRM**. 2012.

RICHARD, W. Software STERONET v. 11.

RICHARDSON, K.; CARLING, P. **A typology of sculpted forms in open bedrock channels**. Geological Society of America, 2005.

ROCHA, A.; LIMA, E.; SCHOBENHAUS, C. Aplicativo Geossit: nova versão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 48, 2016, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: SBG, 2016. p. 1813.

RODRIGUES, J.; RAMOS, M.; RAMOS, R.; VINAGRE, A.; VINAGRE, H. Geoproducts–Innovative development strategies in UNESCO Geoparks: Concept, implementation methodology, and case studies from Naturtejo Global Geopark, Portugal. **International Journal of Geoheritage and Parks**, v. 9, n. 1, p. 108 – 128, 2021. DOI: 10.1016/j.ijgeop.2020.12.003

ROMANI, J.; RODRIGUEZ, M. Types of granite cavities and associated speleothems: genesis and evolution. **Nature Conservation**. v. 63, p.41 – 46, 2007.

ROMANI, J.; TWIDALE, C. 1998. **Formas y Paisajes Graníticos**. La Coruña, Universidade da Coruña, 411 p.

ROMANI, J.; VILAPLANA, J. Datos preliminares para el estudio de espeleotemas en Cavidades graníticas. **Cuadernos Laboratorio Xeoloxico de Laxe (Coruña)**, v. 7, p. 305 – 324, 1984.

ROMÃO, R.; GARCIA, M. Iniciativas de inventário e quantificação do patrimônio geológico no Brasil: panorama atual. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n 2, p. 250 – 265, 2017. DOI: 10.11137/2017_2_250_265

RSTUDIO Team. RStudio: Integrated Development Environment for R (Version 2023.6.0) [Software].

SAADI, A. Neotectônica da Plataforma Brasileira: esboço e interpretação preliminares. **Geonomos**, 1993. DOI: /10.18285/geonomos.v1i1e2.233

SAADI, A.; DART, R.; MACHETTE, M. Map of quaternary faults and lineaments of Brazil. **Project of international lithosphere program task group II-2, major active faults of the world, University of Minas Gerais and US Geological Survey**, 2002.

SALAZAR, C.; BARBOSA, R.; SOUZA, I.; DAVID, M.; SOARES, A.; VENÂNCIO, D. Marmitas in Sandstones of the Nhamundá Formation, Origin, and Evolution: Amazon Craton. **Journal of South American Earth Sciences**, no prelo.

SANE, K.; THAKKAR, M.; CHAUHAN, G.; AIYAR, D.; BHANDARI, S. Formation of potholes associated with bedrock gorges on Mesozoic sandstone of Khari River, Kachchh Mainland, Western India. **Open Journal of Geology**, v. 10, n. 2, p. 171 – 186, 2020. DOI:/10.4236/ojg.2020.102010

SANTOS, A.; EUGENIO, F.; SOARES, V.; MOREIRA, M.; RIBEIRO, C.; BARROS, K. **Sensoriamento Remoto no ArcGIS 10.2. 2 passo a passo: processamento de imagens orbitais**. 2014. 109 p.

SANTOS, A.; SANTOS, W.; BORGES, M.; SANTOS, O.; PAIXÃO, R.; FREIFELD, F. F. Turismo Espeleológico na Amazônia como Garantia do Desenvolvimento Sustentável: Uma Análise das Cavernas Areníticas do Município de Presidente Figueiredo. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v 41(3), p. 260 – 269, 2018. DOI: 10.11137/2018_3_260_269

SANTOS, J. Geotectônica dos Escudos das Guianas e Brasil Central. In: Bizzi LA, Schobbenhaus C., Vidotti RM, Gonçalves JH (ed.). **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília, CPRM**. Boné. 4, 169-226, 2003.

SANTOS, J. Van BREEMEN, O.; GROVES, D.; HARTMANN, L.; ALMEIDA, M.; MCNAUGHTON, N.; FLETCHER, I. Timing and evolution of multiple Paleoproterozoic magmatic arcs in the Tapajós Domain, Amazon Craton: constraints from SHRIMP and TIMS zircon, baddeleyite and titanite U–Pb geochronology. **Precambrian Research**, v. 131(1-2), p. 73 – 109, 2004. DOI: /10.1016/j.precamres.2004.01.002

SANTOS, J.; FARIA, M.; HARTMANN, L.; MCNAUGHTON, N. Significant presence of the Tapajós-Parima Orogenic Belt in the Roraima Region, Amazon craton based

on SHRIMP U–Pb zircon geochronology. In: SBG, Congr. Bras. Gel., vol. 41. João Pessoa (PB), Anais, p. 336, 2002.

SANTOS, V.; BACCI, D. Educação e aprendizagem social para Geoconservação: proteção de serviços ecossistêmicos e governança ambiental na Macrometrópole Paulista. **Terrae Didática**, v. 15, p. e019047, 2019. DOI: 10.20396/td.v15i0.8657587.

SANTOS, V.; LIMA, R.; CARMO, M.; SANTOS, C. Educação e Aprendizagem Social para a Geoconservação: Reflexões e Possibilidades na Amazônia. **Educamazônia - Educação, Sociedade e Meio Ambiente**, v. 16(1), 2023.

SAURO, F. Structural and lithological guidance in quartz sandstone caves: evidence of the arenisation process. **Geomorphology**, v. 226, p.106-123, 2014.

SAURO, F.; WRAY, R. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. **Earth-Science Reviews**, v. 171, p. 520 – 557, 2017. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.06.008

SCHOBENHAUS, C. **Geoparques do Brasil**. v. 1. Brasília: CPRM, 2012.

SCHOBENHAUS, C.; BERBERT-BORN, M. Cadastro de Geossítios Geológicos (GEOSSIT). Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C. **Geoparques do Brasil**. Serviço Geológico do Brasil-CPRM: Brasília, Brazil, v. 1, p. 14, 2012.

SILVA FILHO, V.; MARACAJÁ, K. Geoturismo: uma alternativa para o desenvolvimento do geoparque Seridó com base nos exemplos dos geoparques Arouca e Naturtejo, **Revista Turydes: Turismo y Desarrollo**, n. 27, 2019.

SILVA, C.; MORALES, N.; CRÓSTA, A.; COSTA, S.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. Analysis of tectonic-controlled fluvial morphology and sedimentary processes of the western Amazon Basin: an approach using satellite images and digital elevation model. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 79(4), p. 693 – 711, 2007. DOI: /10.1590/S0001-37652007000400010

SILVA, C.; POKER-HARA, F. Panorama das publicações desenvolvidas em geoparques e aspirantes a geoparques brasileiros: principais tendências de pesquisa. **Terrae Didática**, v. 18, p. e022042, 2022. DOI: 10.20396/td.v18i00.8671324.

SILVA, D.; CORRÊA, A.; AMORIM, R. Caracterização Morfológica e Dinâmica Ambiental das Marmitas (Weathering Pit) no Distrito de Fazenda Nova, Pernambuco – Nordeste Do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 2, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i2.1062

SILVA, M. **Avaliação Arqueo-Espeleológica das Cavernas da Raiz, Raio, Onça e Batismo do Município de Presidente Figueiredo - Amazonas**. 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Amazonas – UFAM, Manaus, 2007.

SILVA, M. O Geoparque Caçapava Aspirante (RS) como ponto de partida aos termos sustentabilidade, desenvolvimento, território e o produto territorial do Alto Camaquã.

PerCursos, Florianópolis, v. 23, n.52, p.282 -307, maio/ago. 2022. DOI: 10.5965/1984724623522022282 <http://dx.doi.org/10.5965/1984724623522022282>

SILVA, M.; NASCIMENTO, M.; COSTA, S. Geoheritage of a Brazilian Semi-Arid Environment: the Seridó Aspiring UNESCO Geopark. **Geoheritage**, v. 14, n. 1, p. 36, 2022. DOI:/10.1007/s12371-022-00662-3

SILVA, M.; BRICALLI, L. Padrões de Lineamentos e Controle Estrutural, Tectônico e Neotectônico no Relevo da Região de Pancas (Espírito Santo, Sudeste do Brasil). **Sociedade & Natureza**, v. 35, p. e67047, 2023. DOI: /10.14393/SN-v35-2023-67047

SILVA, M.; MAIA, R. Caracterização morfoestrutural do alto curso da bacia hidrográfica do rio Jaguaribe, Ceará-Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 3, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i3.1083

SILVA, T. O icnogênero *Arthropycus*: Taxonomia e implicações paleoambientais para a Formação Nhamundá (Siluriano) da Bacia do Amazonas. Projeto de Iniciação Científica. Relatórios finais de Iniciação Científica - Ciências Exatas e da Terra. 2015.

SILVA, T.; SILVA, C.; MARINS, L. A paisagem no Geopark Aspirante Seridó: roteiro educativo na perspectiva inclusiva à pessoa com deficiência. **Terrae Didactica**, Campinas, SP, v. 17, n. 00, p. e021014, 2021. DOI: 10.20396/td.v17i00.8664047

SINGTUEN, V.; JUNJUER, T. Characterisation of potholes formed on bedrock sandstones at Loei Dun, Phetchabun Geopark, Thailand. **Geologos**, v. 28, n. 1, p. 39 – 50, 2022. DOI: 10.2478/logos-2022-0003.

SOARES, E.; TRUCKENBRODT, W.; NOGUEIRA, A. Fácies litorâneas e subglaciais da Formação Nhamundá (Siluriano inferior), região de Presidente Figueiredo, Bacia do Amazonas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**, v. 2, p. 105 – 132, 2005.

SOUZA, A.; RIBEIRO, A. **Geoparques do Brasil: geoparque Cachoeiras do Amazonas: Presidente Figueiredo, AM: atualização do inventário do patrimônio geológico e sítios da geodiversidade**. v. 1. Brasília: Serviço Geológico do Brasil, 2024.

SOUZA, J.; FARIAS, A.; CUSTÓDIO, M.; BARBOSA, R.; TRINDADE, I. Análise geológica e geomorfológica nas marmitas (weathering pit) da Cachoeira do Mutum, Presidente Figueiredo, Amazonas. In: **Anais do XVI Simpósio de Geologia da Amazônia**, Manaus-Am. 5 p., 2019.

SOUZA, V.; NOGUEIRA, A. Seção geológica Manaus – Presidente Figueiredo (AM), borda norte da Bacia do Amazonas: um guia para excursão de campo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39(1), p. 16 – 29, 2009. DOI: 10.25249/0375-7536.20093911629

SPERANDIO, D.; GOMES, C.; VIÇOZZI, A. Mapa geológico interativo: proposta para ensino de Geociências. **Terrae Didactica**, v. 16, p. 1 – 5, 2020 e020019. DOI: 10.20396/td.v16i0.8658885

STANLEY, M. Geodiversity. **Earth Heritage**, v. 14:15-18, 2000.

STERNBERG, H. Vales tectônicos da planície amazônica. **Revista Brasileira de Geografia**, v 4, 3 – 26, 1950.

STOLZ, J. & MEGERLE, H. Geotrails as a Medium for Education and Geotourism: Recommendations for Quality Improvement Based on the Results of a Research Project in the Swabian Alb UNESCO Global Geopark. **Land** 2022, 11, 1422. DOI: /10.3390/land11091422

ŠTRBA, Ľubomír; PALGUTOVÁ, Silvia. Geoheritage Interpretation Panels in UNESCO Global Geoparks: Recommendations and Assessment. **Geoheritage**, v. 16, n. 4, p. 96, 2024.

TILDEN, Freeman. **Interpreting our heritage**. ReadHowYouWant. com, 2009.

TIMMS, B. Geomorphology of Pit Gnammas in Western Australia. **Journal Royal Society of Western Australia**. v. 96, p. 7 – 16, 2013.

TIMMS, B. Pan Gnammas (Weathering Pits) across Australia: Morphology in Response to Formative Processes. **International Journal of Geosciences**, v. 12, n. 10, p. 984 – 993, 2021. DOI: 10.4236/ijg.2021.1210051

TRAVASSOS, W.; BARBOSA FILHO, C. Tertiary tectonism in the Tapajos River Area, Amazon Basin; Tectonismo terciario na area do Rio Tapajos, Bacia do Amazonas. **Boletim de Geociências da Petrobras**. v. 4, 1990.

TWIDALE, C. 1982. **Granite Landforms**. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing Co., 372 p.

TWIDALE, C.; BOURNE, J. Caves in granitic rocks: types, terminology and origins. **Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña**. v. 33, p. 35 – 57, 2008.

TWIDALE, C.; BOURNE, J. Rock basins (gnammas) revisited. **Géomorphologie: relief, processus, environnement**. v. 24, n. 2, p. 139 – 149, 2018. DOI: /10.4000/geomorphologie.11880

UDOMSAK, S.; CHOOWONG, N.; CHOOWONG, M.; CHUTAKOSITKANON, V. Thousands of Potholes in the Mekong River and Giant Pedestal Rock from North-eastern Thailand: Introduction to a Future Geological Heritage Site. **Geoheritage**, v. 13, n. 5. 2021. DOI: /10.1007/s12371-020-00524-w

UNESCO, Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. **UNESCO Global Geoparks application process**, 2022a.

UNESCO, Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. **Application dossier for UNESCO Global Geoparks**. 2022b.

VON AHN, M. M.; SIMON, Adriano Luis Heck. Geoturismo e Interpretação Ambiental: Análise dos Critérios Técnicos e Estruturais dos Painéis Interpretativos da Rede Global de Geoparques. **Encontro Luso-brasileiro de Património Geomorfológico e Geoconservação**, v. 3, p. 88-102, 2019.

WANDERLEY FILHO, J.; COSTA, J. 1991. Contribuição à evolução estrutural da bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento. III SBG Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, SBG, 1991. p. 244 – 259.

WELTJE, G. Quantitative analysis of detrital modes: statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. **Earth-Science Reviews**, v. 57, p. 211 – 253, 2002. DOI: /10.1016/S0012-8252(01)00076-9

WELTJE, G.; von EYNATTEN, H. Quantitative provenance analysis of sediments: Review and outlook. **Sedimentary Geology**, v. 171(1-4), p. 1 – 11. 2004. DOI: /10.1016/j.sedgeo.2004.05.007

WHIPPLE, K.; HANCOCK, G.; ANDERSON, R. River incision into bedrock: Mechanics and relative efficacy of plucking, abrasion, and cavitation. **Geological Society of America Bulletin**, v. 112, n. 3, p. 490 – 503, 2000. DOI: 10.1130/0016-7606(2000)112<490:RIIBMA>2.0.CO;2

WHITE, W. **Geomorphology and hydrology of karst terrains**. New York: Oxford University Press, 1988.

WOHL, E. The effect of bedrock jointing on the formation of straths in the Cache la Poudre River drainage, Colorado Front Range. **Journal of Geophysical Research Earth Surface**, v. 113, n. F1, 2008. DOI: 10.1029/2007JF000817

WORDEN, R.; BURLEY, S. **Sandstone Diagenesis: the evolution of sand to stone**. In: WORDEN, R. H.; BURLEY, S. D. (Eds.). Sandstones Diagenesis: Recent and Ancient. 1. ed. Blackwell Publishing Ltd, p. 3 – 44. 2003.

WRAY, R. 2010. The Gran Sabana: the world's finest quartzite karst? In: Migoñ, P. (Ed.), Geomorphological Landscapes of the World. Springer, Amsterdam, pp. 79–88.

WRAY, R. **Solutional weathering and karstic landscapes on quartz sandstones and quartzite**. In: Shroder, J. (Editor in Chief), Frumkin, A. (Ed.), Treatise on Geomorphology. Academic Press, San Diego, CA, vol. 6, Karst Geomorphology, p. 463-483. 2013.

WRAY, R.; SAURO, F. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. **Earth-Science Reviews**, v. 171, p. 520 – 557, 2017. DOI: /10.1016/j.earscirev.2017.06.008

WU, Z.; HU, M. Neotectonics, active tectonics and earthquake geology: terminology, applications and advances. **Journal of Geodynamics**. v. 127, p. 1 – 15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.01.007>

ZALÁN, P. V. Evolução fanerozóica das bacias sedimentares brasileiras. In: Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. São Paulo: Beca, 2004. p. 595-612.

ZEN, E.; PRESTEGAARD, K. Possible hydraulic significance of two kinds of *potholes*: Examples from the paleo-Potomac River. **Geology**. v. 22, p. 47 – 50, 1994. DOI: 10.1130/0091-7613(1994) 0222.3.CO;2

APÊNDICE I: Comprovação de Artigo Publicado no Journal of South American Earth Sciences



Journal of South American Earth Sciences

Volume 156, 15 April 2025, 105435



Potholes and shear zones deformation in sandstones: Central Amazon basin

Carlos Alejandro Salazar ^a  , Roberto Cesar de Mendonça Barbosa ^a,
Isabela Apoema Gomes de Souza ^a, Marta Edith Velásquez David ^b,
Andressa Resende Soares ^b, Diego Wenderson Venâncio ^b

[Show more](#) 

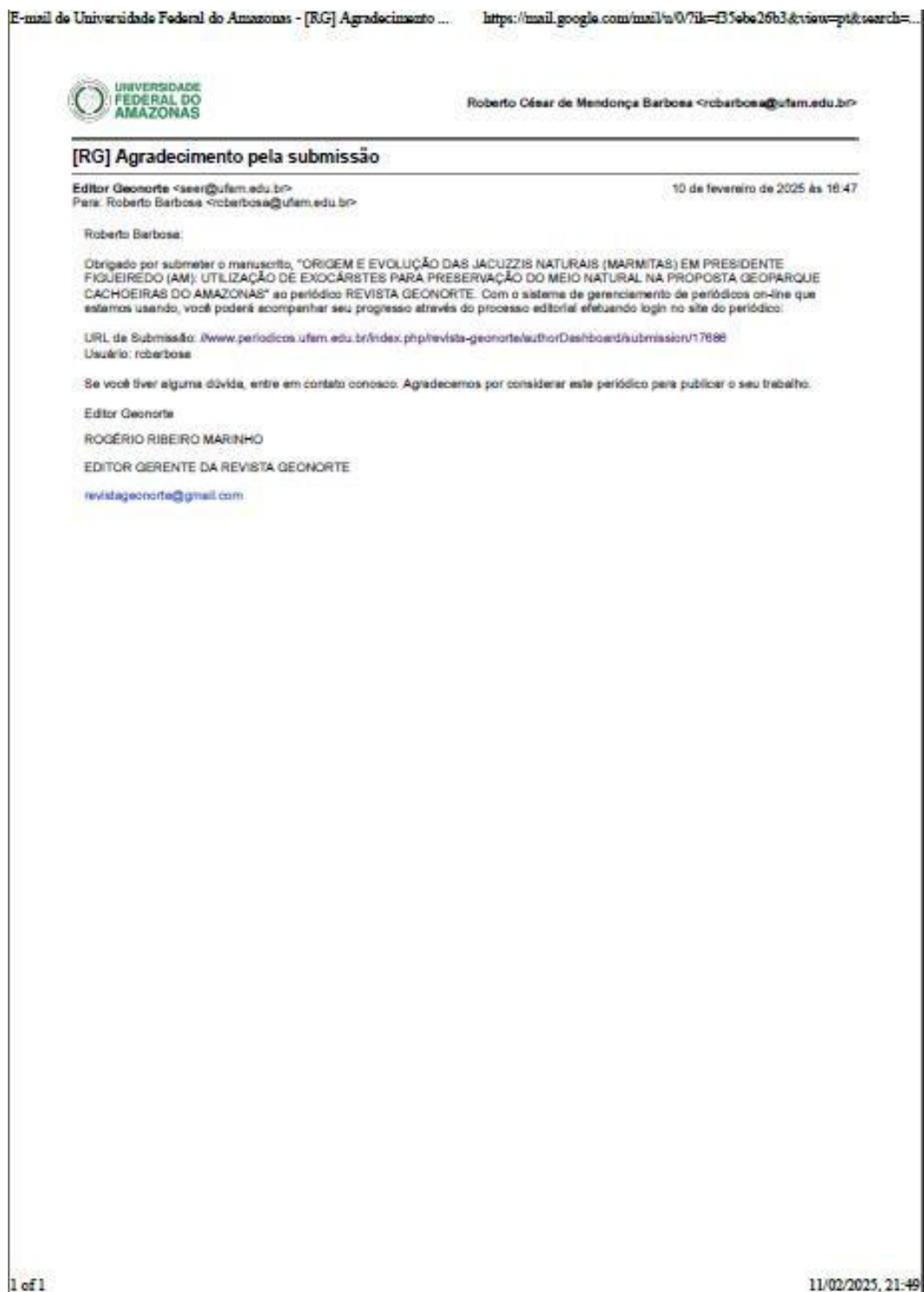
[+ Add to Mendeley](#) [Share](#) [Cite](#)

<https://doi.org/10.1016/j.jsames.2025.105435> 

[Get rights and content](#) 

 [Full text access](#)

APÊNDICE II: Comprovação de Submissão do Artigo na Revista Geonorte



APÊNDICE III: Morfometria das Marmitas e Jacuzzis Naturais

n	a (m)	b (m)	a/b	D (m)	h (m)	D/h	b/h (m)	Local
1	0,460	0,200	2,300	0,303	0,210	1,444	0,952	Lajes
2	1,520	0,785	1,936	1,092	0,310	3,524	2,532	Lajes
3	0,715	0,610	1,172	0,660	0,505	1,308	1,208	Lajes
4	0,236	0,180	1,311	0,206	0,085	2,425	2,118	Lajes
5	0,352	0,244	1,443	0,293	0,182	1,610	1,341	Lajes
6	0,120	0,090	1,333	0,104	0,020	5,196	4,500	Lajes
7	2,370	1,710	1,386	2,013	1,160	1,735	1,474	Lajes
8	1,800	0,960	1,875	1,315	0,310	4,240	3,097	Lajes
9	0,540	0,390	1,385	0,459	0,017	26,995	22,941	Mutum
10	0,110	0,065	1,692	0,085	0,100	0,846	0,650	Mutum
11	0,090	0,070	1,286	0,079	0,190	0,418	0,368	Mutum
12	0,080	0,080	1,000	0,080	0,120	0,667	0,667	Mutum
13	1,470	0,590	2,492	0,931	2,180	0,427	0,271	Mutum
14	1,240	0,880	1,409	1,045	2,080	0,502	0,423	Mutum
15	1,990	1,630	1,221	1,801	2,080	0,866	0,784	Mutum
16	6,550	3,280	1,997	4,635	3,580	1,295	0,916	Mutum
17	5,070	4,120	1,231	4,570	4,080	1,120	1,010	Mutum
18	5,725	3,600	1,590	4,540	3,830	1,185	0,940	Mutum
19	3,780	2,860	1,322	3,288	6,330	0,519	0,452	Mutum
20	1,960	1,780	1,101	1,868	3,520	0,531	0,506	Mutum
21	2,990	2,710	1,103	2,847	3,720	0,765	0,728	Mutum
22	2,300	2,150	1,070	2,224	2,830	0,786	0,760	Mutum
23	1,300	0,940	1,383	1,105	1,450	0,762	0,648	Mutum
24	0,650	0,440	1,477	0,535	1,130	0,473	0,389	Mutum
25	1,460	1,010	1,446	1,214	1,500	0,810	0,673	Mutum
26	2,030	1,560	1,301	1,780	1,740	1,023	0,897	Mutum
27	2,490	1,980	1,258	2,220	4,580	0,485	0,432	Mutum
28	6,020	5,020	1,199	5,497	3,530	1,557	1,422	Mutum
29	5,190	3,880	1,338	4,487	4,080	1,100	0,951	Mutum
30	2,970	2,550	1,165	2,752	2,310	1,191	1,104	Mutum
31	3,280	2,360	1,390	2,782	2,710	1,027	0,871	Mutum
32	1,620	0,880	1,841	1,194	1,410	0,847	0,624	Mutum
33	1,620	0,880	1,841	1,194	2,420	0,493	0,364	Mutum
34	0,470	0,410	1,146	0,439	0,920	0,477	0,446	Mutum
35	1,260	0,730	1,726	0,959	1,420	0,675	0,514	Mutum
36	0,850	0,600	1,417	0,714	0,370	1,930	1,622	Urubuí
37	0,750	0,680	1,103	0,714	0,300	2,380	2,267	Urubuí
38	0,480	0,480	1,000	0,480	0,220	2,182	2,182	Urubuí
39	0,150	0,090	1,667	0,116	0,079	1,471	1,139	Urubuí
40	0,375	0,284	1,320	0,326	0,185	1,764	1,535	Urubuí
41	0,823	0,560	1,470	0,679	0,345	1,968	1,623	Urubuí
42	0,345	0,245	1,408	0,291	0,165	1,762	1,485	Urubuí

43	0,205	0,185	1,108	0,195	0,140	1,391	1,321	Urubuí
44	0,495	0,305	1,623	0,389	0,265	1,466	1,151	Urubuí
45	0,410	0,390	1,051	0,400	0,350	1,142	1,114	Urubuí
46	0,900	0,793	1,135	0,845	0,500	1,690	1,586	Urubuí
47	0,685	0,546	1,255	0,612	0,340	1,799	1,606	Urubuí
48	0,865	0,685	1,263	0,770	0,120	6,415	5,708	Urubuí
49	1,725	1,350	1,278	1,526	0,180	8,478	7,500	Urubuí
50	1,642	1,100	1,493	1,344	0,233	5,768	4,721	Urubuí
51	1,220	0,140	8,714	0,413	0,355	1,164	0,394	Urubuí
52	1,050	0,900	1,167	0,972	0,365	2,663	2,466	Urubuí
53	0,786	0,530	1,483	0,645	0,260	2,482	2,038	Urubuí
54	2,060	0,900	2,289	1,362	0,776	1,755	1,160	Urubuí
55	1,110	0,880	1,261	0,988	0,555	1,781	1,586	Urubuí
56	1,255	1,020	1,230	1,131	0,540	2,095	1,889	Urubuí
57	1,440	0,190	7,579	0,523	0,250	2,092	0,760	Urubuí
58	0,370	0,283	1,307	0,324	0,415	0,780	0,682	Urubuí
59	0,900	0,805	1,118	0,851	0,294	2,895	2,738	Urubuí
60	0,435	0,390	1,115	0,412	0,354	1,164	1,102	Urubuí
61	0,205	0,190	1,079	0,197	0,165	1,196	1,152	Urubuí
62	0,230	0,184	1,250	0,206	0,113	1,821	1,628	Urubuí
63	0,736	0,490	1,502	0,601	0,030	20,018	16,333	Urubuí
64	1,438	0,200	7,190	0,536	0,115	4,663	1,739	Urubuí
65	0,960	0,695	1,381	0,817	0,167	4,891	4,162	Urubuí
66	0,600	0,446	1,345	0,517	0,243	2,129	1,835	Urubuí
67	1,515	0,965	1,570	1,209	0,167	7,240	5,778	Urubuí
68	0,890	0,730	1,219	0,806	0,263	3,065	2,776	Urubuí
69	0,625	0,410	1,524	0,506	0,535	0,946	0,766	Urubuí
70	2,170	1,740	1,247	1,943	0,205	9,479	8,488	Urubuí
71	0,405	0,373	1,087	0,388	0,340	1,142	1,096	Urubuí
72	0,120	0,080	1,500	0,098	0,063	1,555	1,270	Urubuí
73	1,750	0,310	5,645	0,737	0,125	5,892	2,480	Urubuí
74	1,000	0,880	1,136	0,938	0,290	3,235	3,034	Urubuí
75	0,440	0,370	1,189	0,403	0,330	1,223	1,121	Urubuí
76	0,990	0,755	1,311	0,865	0,390	2,217	1,936	Urubuí
77	0,630	0,490	1,286	0,556	0,220	2,525	2,227	Urubuí
78	0,630	0,540	1,167	0,583	0,220	2,651	2,455	Urubuí
79	0,380	0,380	1,000	0,380	0,260	1,462	1,462	Urubuí
80	0,690	0,580	1,190	0,633	0,220	2,876	2,636	Urubuí
81	0,590	0,470	1,255	0,527	0,260	2,025	1,808	Urubuí
82	0,490	0,360	1,361	0,420	0,300	1,400	1,200	Urubuí
83	0,910	0,840	1,083	0,874	0,410	2,132	2,049	Urubuí
84	0,950	0,830	1,145	0,888	0,380	2,337	2,184	Urubuí
85	0,670	0,650	1,031	0,660	0,260	2,538	2,500	Urubuí
86	1,030	0,890	1,157	0,957	0,490	1,954	1,816	Urubuí
87	0,430	0,330	1,303	0,377	0,390	0,966	0,846	Urubuí

88	0,740	0,630	1,175	0,683	0,190	3,594	3,316	Urubuí
89	1,660	1,090	1,523	1,345	0,290	4,638	3,759	Urubuí
90	0,840	0,300	2,800	0,502	0,330	1,521	0,909	Urubuí
91	0,260	0,250	1,040	0,255	0,130	1,961	1,923	Urubuí
92	1,020	0,780	1,308	0,892	0,330	2,703	2,364	Urubuí
93	0,520	0,400	1,300	0,456	0,100	4,561	4,000	Urubuí
94	1,720	1,720	1,000	1,720	0,450	3,822	3,822	Urubuí
95	1,640	1,120	1,464	1,355	0,800	1,694	1,400	Urubuí
96	0,520	0,360	1,444	0,433	0,070	6,181	5,143	Urubuí
97	0,870	0,730	1,192	0,797	0,960	0,830	0,760	Urubuí
98	0,940	0,770	1,221	0,851	0,560	1,519	1,375	Urubuí
99	0,560	0,410	1,366	0,479	0,340	1,409	1,206	Urubuí
100	0,970	0,710	1,366	0,830	0,140	5,928	5,071	Urubuí
101	1,040	0,760	1,368	0,889	0,300	2,963	2,533	Urubuí
102	0,530	0,530	1,000	0,530	0,660	0,803	0,803	Urubuí
103	0,440	0,370	1,189	0,403	0,210	1,921	1,762	Urubuí
104	0,980	0,750	1,307	0,857	0,250	3,429	3,000	Urubuí
105	0,520	0,430	1,209	0,473	0,330	1,433	1,303	Urubuí
106	0,580	0,310	1,871	0,424	0,370	1,146	0,838	Urubuí
107	0,750	0,550	1,364	0,642	0,520	1,235	1,058	Urubuí
108	0,840	0,690	1,217	0,761	0,630	1,208	1,095	Urubuí
109	1,120	1,030	1,087	1,074	1,320	0,814	0,780	Urubuí
110	0,790	0,670	1,179	0,728	0,170	4,280	3,941	Urubuí
111	0,830	0,750	1,107	0,789	1,210	0,652	0,620	Urubuí
112	0,630	0,490	1,286	0,556	0,410	1,355	1,195	Urubuí
113	1,140	1,030	1,107	1,084	1,350	0,803	0,763	Urubuí
114	1,080	0,660	1,636	0,844	0,920	0,918	0,717	Urubuí
115	0,440	0,370	1,189	0,403	0,680	0,593	0,544	Urubuí
116	1,640	1,410	1,163	1,521	0,400	3,802	3,525	Urubuí
117	0,630	0,770	0,818	0,696	1,040	0,670	0,740	Urubuí
118	0,640	0,440	1,455	0,531	0,480	1,106	0,917	Urubuí
119	0,890	0,790	1,127	0,839	0,310	2,705	2,548	Urubuí
120	0,480	0,450	1,067	0,465	0,460	1,010	0,978	Urubuí
121	0,650	0,610	1,066	0,630	0,340	1,852	1,794	Urubuí
122	0,790	0,600	1,317	0,688	1,140	0,604	0,526	Urubuí
123	1,150	0,950	1,211	1,045	0,450	2,323	2,111	Urubuí

Jacuzzis mais profundas

APÊNDICE IV: Dados Estatísticos das Marmitas e Jacuzzis Naturais

Local	Parâmetro	Média (M)	Mediana (Me)	Moda (Mo)
Mutum	eixo A	2,380	1,960	1,620
Mutum	eixo B	1,735	1,560	0,880
Mutum	D	2,023	2,180	2,080
Mutum	h	2,365	1,780	1,194
Mutum	a/b	1,423	1,338	1,841
Mutum	D/h	1,772	0,786	26,995
Mutum	b/h	1,509	1,203	0,760
Mutum	N	27	-	-
Lajes	eixo A	0,947	0,597	0,460
Lajes	eixo B	0,597	0,427	0,200
Lajes	D	0,778	0,495	0,303
Lajes	h	0,348	0,381	0,310
Lajes	a/b	1,444	1,415	2,300
Lajes	D/h	2,685	2,080	1,444
Lajes	b/h	2,153	1,787	0,952
Lajes	N	8	-	-
Urubui	eixo A	0,838	0,788	0,630
Urubui	eixo B	0,616	0,570	0,490
Urubui	D	0,706	0,652	0,403
Urubui	h	0,381	0,330	0,220
Urubui	a/b	1,595	1,248	1,000
Urubui	D/h	2,637	1,942	1,142
Urubui	b/h	2,240	1,303	1,586
Urubui	N	88	-	-
MLU	eixo A	1,184	0,850	0,630
MLU	eixo B	0,859	0,630	0,880
MLU	D	0,998	0,714	0,403
MLU	h	0,815	0,345	0,220
MLU	A/B	1,538	1,286	1,000
MLU	D/h	2,450	1,557	1,142
MLU	b/h	1,930	1,303	0,760
MLU	N	123	-	-

*MLU: Mutum, Lajes e Urubuí

**Medidas em metros (m)

APÊNDICE V: Características das Marmitas e Jacuzzis Naturais

N	a (m)	b (m)	D (m)	h (m)	a/b	D/h	b/h	Local	Borda	Parede interna	Fundo
1	0,460	0,200	0,303	0,210	2,300	1,444	0,952	Lajes	Multiforme /Poligonal	Cilíndrica	Côncava
2	1,520	0,785	1,092	0,310	1,936	3,524	2,532	Lajes	Elíptica	Pan	Côncava
8	1,800	0,960	1,315	0,310	1,875	4,240	3,097	Lajes	Elíptica	Pan	Côncava
5	0,352	0,244	0,293	0,182	1,443	1,610	1,341	Lajes	Elíptica	Pan	Côncava
7	2,370	1,710	2,013	1,160	1,386	1,735	1,474	Lajes	Elíptica	Pan	Convexa
6	0,120	0,090	0,104	0,020	1,333	5,196	4,500	Lajes	Elíptica	Pan	Plano
4	0,236	0,180	0,206	0,085	1,311	2,425	2,118	Lajes	Elíptica	Pan	Côncava
3	0,715	0,610	0,660	0,505	1,172	1,308	1,208	Lajes	Elíptica	Pan	Côncava
13	1,470	0,590	0,931	2,180	2,492	0,427	0,634	Mutum	Multiforme /Poligonal	Cilíndrica	Convexa
16	6,550	3,280	4,635	3,580	1,997	1,295	0,708	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
32	1,620	0,880	1,194	1,410	1,841	0,847	0,737	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
33	1,620	0,880	1,194	2,420	1,841	0,493	0,737	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
35	1,260	0,730	0,959	1,420	1,726	0,675	0,761	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
10	0,110	0,065	0,085	0,100	1,692	0,846	0,769	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
18	5,725	3,600	4,540	3,830	1,590	1,185	0,793	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
24	0,650	0,440	0,535	1,130	1,477	0,473	0,823	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
25	1,460	1,010	1,214	1,500	1,446	0,810	0,832	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
14	1,240	0,880	1,045	2,080	1,409	0,502	0,842	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
31	3,280	2,360	2,782	2,710	1,390	1,027	0,848	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
9	0,540	0,390	0,459	0,017	1,385	26,995	0,850	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
23	1,300	0,940	1,105	1,450	1,383	0,762	0,850	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
29	5,190	3,880	4,487	4,080	1,338	1,100	0,865	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
19	3,780	2,860	3,288	6,330	1,322	0,519	0,870	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
26	2,030	1,560	1,780	1,740	1,301	1,023	0,877	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
11	0,090	0,070	0,079	0,190	1,286	0,418	0,882	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
27	2,490	1,980	2,220	4,580	1,258	0,485	0,892	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
17	5,070	4,120	4,570	4,080	1,231	1,120	0,901	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
15	1,990	1,630	1,801	2,080	1,221	0,866	0,905	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
28	6,020	5,020	5,497	3,530	1,199	1,557	0,913	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
30	2,970	2,550	2,752	2,310	1,165	1,191	0,927	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
34	0,470	0,410	0,439	0,920	1,146	0,477	0,934	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
21	2,990	2,710	2,847	3,720	1,103	0,765	0,952	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
20	1,960	1,780	1,868	3,520	1,101	0,531	0,953	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
22	2,300	2,150	2,224	2,830	1,070	0,786	0,967	Mutum	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
12	0,080	0,080	0,080	0,120	1,000	0,667	1,000	Mutum	Circular	Igual	Côncava
36	0,850	0,600	0,714	0,370	1,417	1,930	1,622	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
37	0,750	0,680	0,714	0,300	1,103	2,380	2,267	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
38	0,480	0,480	0,480	0,220	1,000	2,182	2,182	Urubuí	Circular	Pan	Plano
39	0,150	0,090	0,116	0,079	1,667	1,471	1,139	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
40	0,375	0,284	0,326	0,185	1,320	1,764	1,535	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
41	0,823	0,560	0,679	0,345	1,470	1,968	1,623	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
42	0,345	0,245	0,291	0,165	1,408	1,762	1,485	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
43	0,205	0,185	0,195	0,140	1,108	1,391	1,321	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
44	0,495	0,305	0,389	0,265	1,623	1,466	1,151	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
45	0,410	0,390	0,400	0,350	1,051	1,142	1,114	Urubuí	Subcircular/ Oval	Pan	Plano
46	0,900	0,793	0,845	0,500	1,135	1,690	1,586	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano

47	0,685	0,546	0,612	0,340	1,255	1,799	1,606	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
48	0,865	0,685	0,770	0,120	1,263	6,415	5,708	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
49	1,725	1,350	1,526	0,180	1,278	8,478	7,500	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
50	1,642	1,100	1,344	0,233	1,493	5,768	4,721	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
51	1,220	0,140	0,413	0,355	8,714	1,164	0,394	Urubuí	Multiforme/ Poligonal	Cilíndrica	Convexa
52	1,050	0,900	0,972	0,365	1,167	2,663	2,466	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
53	0,786	0,530	0,645	0,260	1,483	2,482	2,038	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
54	2,060	0,900	1,362	0,776	2,289	1,755	1,160	Urubuí	Multiforme/ Poligonal	Pan	Plano
55	1,110	0,880	0,988	0,555	1,261	1,781	1,586	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
56	1,255	1,020	1,131	0,540	1,230	2,095	1,889	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
57	1,440	0,190	0,523	0,250	7,579	2,092	0,760	Urubuí	Multiforme/ Poligonal	Cilíndrica	Convexa
58	0,370	0,283	0,324	0,415	1,307	0,780	0,682	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
59	0,900	0,805	0,851	0,294	1,118	2,895	2,738	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
60	0,435	0,390	0,412	0,354	1,115	1,164	1,102	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
61	0,205	0,190	0,197	0,165	1,079	1,196	1,152	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
62	0,230	0,184	0,206	0,113	1,250	1,821	1,628	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
63	0,736	0,490	0,601	0,030	1,502	20,018	16,333	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
64	1,438	0,200	0,536	0,115	7,190	4,663	1,739	Urubuí	Multiforme/ Poligonal	Pan	Plano
65	0,960	0,695	0,817	0,167	1,381	4,891	4,162	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
66	0,600	0,446	0,517	0,243	1,345	2,129	1,835	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
67	1,515	0,965	1,209	0,167	1,570	7,240	5,778	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
68	0,890	0,730	0,806	0,263	1,219	3,065	2,776	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
69	0,625	0,410	0,506	0,535	1,524	0,946	0,766	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
70	2,170	1,740	1,943	0,205	1,247	9,479	8,488	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
71	0,405	0,373	0,388	0,340	1,087	1,142	1,096	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
72	0,120	0,080	0,098	0,063	1,500	1,555	1,270	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
73	1,750	0,310	0,737	0,125	5,645	5,892	2,480	Urubuí	Multiforme/ Poligonal	Pan	Plano
74	1,000	0,880	0,938	0,290	1,136	3,235	3,034	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
75	0,440	0,370	0,403	0,330	1,189	1,223	1,121	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
76	0,990	0,755	0,865	0,390	1,311	2,217	1,936	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
77	0,630	0,490	0,556	0,220	1,286	2,525	2,227	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
78	0,630	0,540	0,583	0,220	1,167	2,651	2,455	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
79	0,380	0,380	0,380	0,260	1,000	1,462	1,462	Urubuí	Circular	Pan	Plano
80	0,690	0,580	0,633	0,220	1,190	2,876	2,636	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
81	0,590	0,470	0,527	0,260	1,255	2,025	1,808	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
82	0,490	0,360	0,420	0,300	1,361	1,400	1,200	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
83	0,910	0,840	0,874	0,410	1,083	2,132	2,049	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
84	0,950	0,830	0,888	0,380	1,145	2,337	2,184	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
85	0,670	0,650	0,660	0,260	1,031	2,538	2,500	Urubuí	Subcircular / Oval	Pan	Plano
86	1,030	0,890	0,957	0,490	1,157	1,954	1,816	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
87	0,430	0,330	0,377	0,390	1,303	0,966	0,846	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
88	0,740	0,630	0,683	0,190	1,175	3,594	3,316	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
89	1,660	1,090	1,345	0,290	1,523	4,638	3,759	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
90	0,840	0,300	0,502	0,330	2,800	1,521	0,909	Urubuí	Multiforme/ Poligonal	Cilíndrica	Convexa
91	0,260	0,250	0,255	0,130	1,040	1,961	1,923	Urubuí	Subcircular / Oval	Pan	Plano

92	1,020	0,780	0,892	0,330	1,308	2,703	2,364	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
93	0,520	0,400	0,456	0,100	1,300	4,561	4,000	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
94	1,720	1,720	1,720	0,450	1,000	3,822	3,822	Urubuí	Circular	Pan	Plano
95	1,640	1,120	1,355	0,800	1,464	1,694	1,400	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
96	0,520	0,360	0,433	0,070	1,444	6,181	5,143	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
97	0,870	0,730	0,797	0,960	1,192	0,830	0,760	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
98	0,940	0,770	0,851	0,560	1,221	1,519	1,375	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
99	0,560	0,410	0,479	0,340	1,366	1,409	1,206	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
100	0,970	0,710	0,830	0,140	1,366	5,928	5,071	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
101	1,040	0,760	0,889	0,300	1,368	2,963	2,533	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
102	0,530	0,530	0,530	0,660	1,000	0,803	0,803	Urubuí	Circular	Cilíndrica	Convexa
103	0,440	0,370	0,403	0,210	1,189	1,921	1,762	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
104	0,980	0,750	0,857	0,250	1,307	3,429	3,000	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
105	0,520	0,430	0,473	0,330	1,209	1,433	1,303	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
106	0,580	0,310	0,424	0,370	1,871	1,146	0,838	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
107	0,750	0,550	0,642	0,520	1,364	1,235	1,058	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
108	0,840	0,690	0,761	0,630	1,217	1,208	1,095	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
109	1,120	1,030	1,074	1,320	1,087	0,814	0,780	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
110	0,790	0,670	0,728	0,170	1,179	4,280	3,941	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
111	0,830	0,750	0,789	1,210	1,107	0,652	0,620	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
112	0,630	0,490	0,556	0,410	1,286	1,355	1,195	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
113	1,140	1,030	1,084	1,350	1,107	0,803	0,763	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
114	1,080	0,660	0,844	0,920	1,636	0,918	0,717	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
115	0,440	0,370	0,403	0,680	1,189	0,593	0,544	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
116	1,640	1,410	1,521	0,400	1,163	3,802	3,525	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
117	0,770	0,630	0,696	1,040	1,222	0,670	0,606	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
118	0,640	0,440	0,531	0,480	1,455	1,106	0,917	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
119	0,890	0,790	0,839	0,310	1,127	2,705	2,548	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano
120	0,480	0,450	0,465	0,460	1,067	1,010	0,978	Urubuí	Subcircular / Oval	Cilíndrica	Convexa
121	0,650	0,610	0,630	0,340	1,066	1,852	1,794	Urubuí	Subcircular / Oval	Pan	Plano
122	0,790	0,600	0,688	1,140	1,317	0,604	0,526	Urubuí	Elíptica	Cilíndrica	Convexa
123	1,150	0,950	1,045	0,450	1,211	2,323	2,111	Urubuí	Elíptica	Pan	Plano

Tipo	Borda	a/b		Tipo	Parede interna	b/h		n	número
1	Circular	a=b	0 a 1	1	Pan	b>h	>3	a	eixo maior
2	Subcircular Oval	a>b, sendo a≈b	1,01 a 1,05	2	Cilindrica	b<h	1,1 a 3	b	eixo menor
3	Elíptica	a>b	>1,06	3	Pit	b=h	1	D	diâmetro
4	Multiforme Poligonal	>2		4	Pit	b≈h	0,9 a 1	h	profundidade

APÊNDICE VI: Orientações dos Eixos Maiores (a) das Marmitas e Jacuzzis Naturais

N	Estrutura	Direção	Azimute	Local
1	EAP	315	AZ	Lajes
2	EAP	315	AZ	Lajes
3	EAP	295	AZ	Lajes
4	EAP	295	AZ	Lajes
5	EAP	355	AZ	Lajes
6	EAP	346	AZ	Lajes
7	EAP	122	AZ	Lajes
8	EAP	122	AZ	Lajes
9	DIP	122	AZ	Lajes
10	DIP	122	AZ	Lajes
11	DIP	171	AZ	Lajes
12	DIP	172	AZ	Lajes
13	EAP	312	AZ	Mutum
14	EAP	328	AZ	Mutum
15	EAP	314	AZ	Mutum
16	EAP	339	AZ	Mutum
17	EAP	165	AZ	Mutum
18	EAP	150	AZ	Mutum
19	EAP	165	AZ	Mutum
20	EAP	140	AZ	Mutum
21	EAP	120	AZ	Mutum
22	EAP	120	AZ	Mutum
23	EAP	155	AZ	Mutum
24	EAP	155	AZ	Mutum
25	EAP	130	AZ	Mutum
26	EAP	145	AZ	Mutum
27	EAP	132	AZ	Mutum
28	EAP	136	AZ	Mutum
29	EAP	324	AZ	Mutum
30	EAP	324	AZ	Mutum
31	EAP	320	AZ	Mutum
32	EAP	338	AZ	Mutum
33	EAP	60	AZ	Mutum
34	EAP	104	AZ	Mutum
35	EAP	315	AZ	Mutum
36	EAP	315	AZ	Mutum
37	EAP	315	AZ	Mutum
38	EAP	245	AZ	Mutum
39	EAP	263	AZ	Urubuí
40	EAP	321	AZ	Urubuí
41	EAP	180	AZ	Urubuí
42	EAP	215	AZ	Urubuí
43	EAP	231	AZ	Urubuí

44	EAP	231	AZ	Urubuí
45	EAP	012	AZ	Urubuí
46	EAP	122	AZ	Urubuí
47	EAP	193	AZ	Urubuí
48	EAP	303	AZ	Urubuí
49	EAP	305	AZ	Urubuí
50	EAP	040	AZ	Urubuí
51	EAP	84	AZ	Urubuí
52	EAP	130	AZ	Urubuí
53	EAP	130	AZ	Urubuí
54	EAP	130	AZ	Urubuí
55	EAP	105	AZ	Urubuí
56	EAP	80	AZ	Urubuí
57	EAP	100	AZ	Urubuí
58	EAP	98	AZ	Urubuí
59	EAP	100	AZ	Urubuí
60	EAP	101	AZ	Urubuí
61	EAP	130	AZ	Urubuí
62	EAP	130	AZ	Urubuí
63	EAP	130	AZ	Urubuí

EAP: eixo maior da pothole

DIP: Direção interna da pothole

APÊNDICE VII: Avaliação Quantitativa dos LIG's via GEOSSIT

VALOR CIENTÍFICO (VC)

LIG's	Representa-tividade	Local Tipo	Conhecimen-to Científico	Integridad-e	Diversidad-e geológica	Raridad-e	Limitaçõe-s de Uso	VC	Relevância (Internacion-al, nacional, regional)
Corredeira do Urubuí	2	0	4	2	4	2	4	200	Nacional
Corredeira das Lajes	1	0	1	2	4	2	2	135	Regional/Local
Cachoeira Princesinha do Urubuí	4	0	1	4	4	2	4	275	Nacional
Cachoeira do Mutum	4	0	2	4	4	4	2	290	Nacional

RISCO DE DEGRADAÇÃO (RD)

LIG's	Deterioração de conteúdos	Proximidade a zonas degradadoras	Proteção Legal	Acessibilidade	Densidade demográfica	RD	RD Intervalo (baixo, moderado, alto)
Corredeira do Urubuí	4	4	2	4	1	330	RD Alto
Corredeira das Lajes	3	4	3	4	1	315	RD Alto
Cachoeira Princesinha do Urubuí	2	3	2	0	1	180	RD Baixo
Cachoeira do Mutum	2	3	3	2	1	230	RD Médio

POTENCIAIS DE USO EDUCATIVO E TURISTICO (PUE e PUT)

LIG's	Deterioração de conteúdos	Proximidade a zonas degradadoras	Proteção Legal	Acessibilidade	Densidade demográfica	RD	RD Intervalo (baixo, moderado, alto)
Corredeira do Urubuí	4	4	2	4	1	330	RD Alto
Corredeira das Lajes	3	4	3	4	1	315	RD Alto
Cachoeira Princesinha do Urubuí	2	3	2	0	1	180	RD Baixo
Cachoeira do Mutum	2	3	3	2	1	230	RD Médio

LIG's	USO EDUCATIVO (PUE)			USO TURÍSTICO (PUT)			
	Potencial Didático	Diversidade Geológica	PUE	Potencial para divulgação	Nível Econômico	Proximidade a atrações recreativas	PUT
Corredeira do Urubuí	4	3	295	4	2	4	270
Corredeira das Lajes	4	3	285	4	2	4	240
Cachoeira Princesinha do Urubuí	4	3	270	4	2	4	240
Cachoeira do Mutum	4	3	280	3	2	4	255

LIGs	Prioridade de Proteção Global	Prioridade de Proteção Global	Prioridade de Proteção Edu	Prioridade de Proteção Edu	Prioridade de Proteção Tur	Prioridade de Proteção Tur	Prioridade de Proteção Científica	Prioridade de Proteção Científica
Corredeira do Urubuí	585	Curto prazo	625	Curto prazo	600	Curto prazo	530	Médio prazo
Corredeira das Lajes	535	Médio prazo	600	Curto prazo	555	Curto prazo	450	Médio prazo
Cachoeira Princesinha do Urubuí	442	Médio prazo	450	Médio prazo	420	Médio prazo	455	Médio prazo
Cachoeira do Mutum	505	Médio prazo	510	Médio prazo	485	Médio prazo	520	Médio prazo