

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

VIVIAN LARISSA GONÇALVES CAVALCANTE

MAPA DE ÍNDICE DA GEODIVERSIDADE DO MUNICÍPIO DE
PRESIDENTE FIGUEIREDO/AM

MANAUS

2025

VIVIAN LARISSA GONÇALVES CAVALCANTE

MAPA DE ÍNDICE DA GEODIVERSIDADE DO MUNICÍPIO DE
PRESIDENTE FIGUEIREDO/AM

Dissertação submetida à avaliação como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geociências no Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Ciências Exatas.

Orientador:

Raimundo Humberto Cavalcante Lima

Co-orientadora:

Solange dos Santos Costa

MANAUS

2025

Ficha Catalográfica

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

C376m Cavalcante, Vivian Larissa Gonçalves
Mapa de Índice da Geodiversidade do município de Presidente
Figueiredo/AM / Vivian Larissa Gonçalves Cavalcante. - 2025.
82 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Raimundo Humberto Cavalcante Lima.
Coorientador(a): Solange dos Santos Costa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa
de Pós-Graduação em Geociências, Manaus, 2025.

1. Geoconservação. 2. Amazônia Ocidental. 3. Planejamento territorial.
4. Geoparque. I. Lima, Raimundo Humberto Cavalcante. II. Costa, Solange
dos Santos. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-
Graduação em Geociências. IV. Título

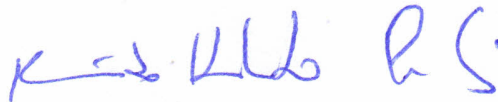
VIVIAN LARISSA GONÇALVES CAVALCANTE

MAPA DE ÍNDICE DA GEODIVERSIDADE DO MUNICÍPIO DE
PRESIDENTE FIGUEIREDO/AM

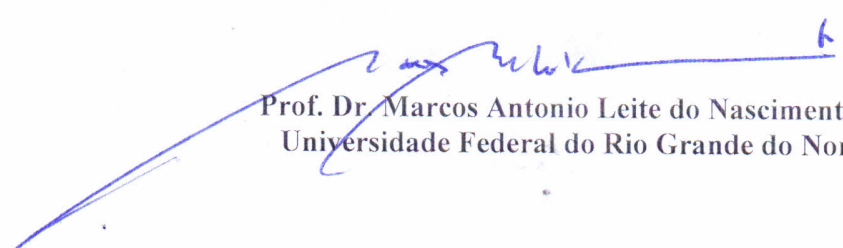
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geociências.

Aprovada em: 29 de abril de 2025.

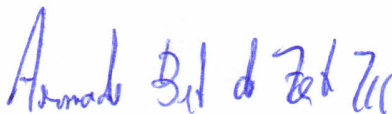
BANCA EXAMINADORA



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



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



Prof. Dr. Armando Brito da Frota Filho, Membro.
Universidade Federal do Amazonas, PPGGEO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Izac e Mara, que desde cedo me ensinaram que a educação é o melhor caminho e por me apoiarem incondicionalmente. Sem eles, nada disso seria possível.

Aos meus irmãos, Leo e Victória, por compartilharem a vida comigo e por sempre acreditarem nas minhas escolhas.

Aos meus queridos orientadores, Raimundo Humberto Cavalcante Lima e Solange dos Santos Costa, que nesse caminho se tornaram grandes parceiros. Agradeço pela paciência, pela liberdade a mim concedida, por confiarem no meu processo e por tornarem essa jornada mais tranquila.

Aos demais professores que fizeram parte da minha formação como mestre.

Aos colegas do PPGGEO, por quem carrego profunda admiração e por me servirem de inspiração e motivação inesgotável.

À Bia, minha parceira de vida e confidente, que acompanhou de perto todos os momentos e que me apoiou sempre que eu precisei.

Aos meus amigos da geologia e da vida, que estiveram comigo e que me ajudaram de diversas formas, sem nem ao menos saberem. Cada gesto, palavra e encontro fizeram parte disso.

À minha psicóloga, Catarine, que me acompanha desde o início do mestrado e que fez com que eu conseguisse enxergar as minhas conquistas com mais carinho.

E, por fim, agradeço a mim mesma por não desistir.

*Estou certa de que a distância esclarece vínculos. A falta
é geradora de novos caminhos. A solidão é amiga da
saudades. E a dor também é mãe do crescimento.*

Tamara Klink

RESUMO

O avanço dos estudos teóricos em geodiversidade nas últimas décadas tem sido acompanhado pelo desenvolvimento de novas metodologias voltadas à sua avaliação e à compreensão de sua correlação com diversos aspectos do meio natural e antrópico. Neste contexto, o presente estudo aplicou uma metodologia de elaboração do Mapa de Índice da Geodiversidade (MIG) no município de Presidente Figueiredo, no estado do Amazonas — uma região caracterizada por significativa variedade de elementos naturais, que conferem elevado potencial para iniciativas de geoconservação. A construção do MIG baseou-se na integração de quatro subíndices (geológico, pedológico, geomorfológico e hidrográfico), a partir de dados públicos de acesso livre. Os resultados revelam que os maiores valores de geodiversidade concentram-se na porção sul do município, correspondente à zona de transição entre a Bacia Sedimentar Amazônica e o Cráton Amazônico. Já os menores valores foram observados na área do reservatório de Balbina, onde as feições geológicas e geomorfológicas encontram-se ocultas pela lâmina d'água. Em contrapartida, a porção norte do município apresentou elevada geodiversidade, associada à presença de estruturas geológicas lineares, depósitos aluviais e gleissolos de várzea. A análise integrada com o mapa de uso e ocupação do solo evidenciou uma correlação entre áreas de maior valor de geodiversidade e maior intensidade de ocupação antrópica, revelando como os elementos naturais influenciam diretamente a organização social, econômica e cultural do território. Os resultados obtidos demonstram a efetividade dos MIGs como ferramenta para visualização e interpretação de dados geoespaciais complexos, reforçando sua aplicabilidade em estratégias de planejamento ambiental e conservação em regiões ecologicamente sensíveis.

Palavras-chave: Geoconservação, Amazônia Ocidental, Planejamento Territorial, Geoparque.

ABSTRACT

The progress of theoretical studies into geodiversity in recent decades has been accompanied by the development of new methodologies aimed at evaluating it and understanding its correlation with various aspects of the natural and man-made environment. In this context, this study applied a methodology for drawing up the Geodiversity Index Map (GIM) in the municipality of Presidente Figueiredo, in the state of Amazonas - a region characterized by a significant variety of natural elements, which provide high potential for geoconservation initiatives. The construction of the MIG was based on the integration of four sub-indices (geological, pedological, geomorphological and hydrographical), based on open-access public data. The results show that the highest geodiversity values are concentrated in the southern part of the municipality, corresponding to the transition zone between the Amazon Sedimentary Basin and the Amazon Craton. The lowest values were observed in the Balbina reservoir area, where the geological and geomorphological features are hidden by the water. On the other hand, the northern part of the municipality showed high geodiversity, associated with the presence of linear geological structures, alluvial deposits and floodplain gleissols. The analysis integrated with the land use and occupation map showed a correlation between areas of higher geodiversity value and greater intensity of anthropogenic occupation, revealing how natural elements directly influence the social, economic and cultural organization of the territory. The results obtained demonstrate the effectiveness of GIMs as a tool for visualizing and interpreting complex geospatial data, reinforcing their applicability in environmental planning and conservation strategies in ecologically sensitive regions.

Keywords: Geoconservation, Western Amazon, Land Planning, Geopark.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da área de estudo.	16
Figura 2 – Compartimentação do Cráton Amazônico em Províncias Geocronológicas. .	18
Figura 3 – Mapa de Unidades Litoestratigráficas do município de Presidente Figueiredo. Base de dados adaptada do Serviço Geológico do Brasil e da plataforma BDiA do IBGE	20
Figura 4 – Domínios geomorfológicos do Estado do Amazonas	23
Figura 5 – Mapa de solos do município de Presidente Figueiredo.	26
Figura 6 – Subdivisão das sub-bacias hidrográficas do município de Presidente Figuei- redo e principais drenagens.	27
Figura 7 – Gráfico representando as temperaturas, em vermelho, e a pluviosidade, em azul, do município de Presidente Figueiredo ao longo do ano.	28
Figura 8 – Classes de vegetação do município de Presidente Figueiredo.	29
Figura 9 – Imagem ilustrativa acerca da criação de habitats sustentada pela abundância de elementos da geodiversidade.	31
Figura 10 – A geodiversidade, como componente do meio físico natural, está compreen- dida no escopo da conservação da natureza, junto à biodiversidade.	33
Figura 11 – Geossítios catalogados no município de Presidente Figueiredo.	36
Figura 12 – Etapas metodológicas envolvidas no estudo.	41
Figura 13 – Dados de submissão do artigo científico à revista <i>Geoheritage</i>	42
Figura 14 – Complexo de Grutas Salto do Ipy. a) Grutas abertas; b) Grutas fechadas for- mando salões e com presença de feições erosivas; c) Estalagmites ferruginosas formadas nos arenitos da Formação Nhamundá.	63

Figura 15 – Afloramentos localizados na Cachoeira das Orquídeas. a) Amostra de rocha com icnofósseis bem preservados do gênero <i>Arthropycus</i> ; b) Icnofósseis já desgastados pela intensa movimentação de pessoas no local; c) Marcas onduladas preservadas e expostas.	64
Figura 16 – Afloramentos localizados na Cachoeira Natal. a) e b) Aspecto das camadas bioturbadas nos arenitos da Formação Nhamundá; c) Icnofóssil observado em um bloco rolado; d) Bloco rolado de uma camada intensamente bioturbada, localizada às margens do igarapé e visível no período de águas baixas; e) Icnofósseis perpendiculares ao sentido de deposição da camada, possivelmente <i>Skolithos</i>	65
Figura 17 – a) Perfil de Latossolo formado sobre arenito da Formação Nhamundá na Cachoeira Natal; b) Área de campinarana, caracterizada pelos solos arenosos e vegetação aberta.	66
Figura 18 – Afloramentos rochosos na Cachoeira do Micade. a) Falhas e fraturas destacadas em vermelho determinam zonas de fraqueza com direção NE/SW, se desprendem blocos de rocha; b) O deslizamento de blocos ocorre preferencialmente nos planos de falhas, destacados em vermelho.	67
Figura 19 – Aspecto do Lago Paraíso Azul. a) Visão do Lago principal, com nível baixo de água que permite visualização do solo; b) Nascente do lago.	68
Figura 20 – Infográfico da Geodiversidade de Presidente Figueiredo.	68
Figura 21 – a) Mapa de Índice da Geodiversidade; b) Unidades de Conservação e Terras Indígenas; c) Geossítios e Atrativos Naturais; d) Uso e ocupação do solo no município de Presidente Figueiredo.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição das classes de solo e relação do seu modo de ocorrência com a geomorfologia da região.	25
Tabela 2 – Base de dados utilizadas para o cálculo dos índices de geodiversidade	39
Tabela 3 – Lista de Geossítios do município de Presidente Figueiredo, segundo Souza e Ribeiro (2024)	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
1.2	Organização do Trabalho	13
2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
2.1	Localização da Área de Estudo	15
2.2	O Meio Abiótico	16
2.2.1	Geologia	16
2.2.1.1	Unidades Litoestratigráficas	19
2.2.2	Geomorfologia	22
2.2.3	Pedologia	24
2.2.4	Hidrologia	26
2.2.5	Clima	28
2.3	O Meio Biótico	29
2.3.1	Vegetação e Ecossistemas	29
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1	Geodiversidade, Patrimônio Geológico e Geoconservação	31
3.2	Avaliação da Geodiversidade	34
3.3	Geodiversidade na Amazônia	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
5	RESULTADOS	42
5.1	Artigo Submetido: <i>Geodiversity Index Map as a Tool for Spatial Analysis: Methodological Approaches and Applications in the Western Amazon</i> . . .	42
5.2	A Geodiversidade em Presidente Figueiredo	62
5.3	Aplicações à Área de Estudo	68

6	DISCUSSÕES	71
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
	Referências	77

1

INTRODUÇÃO

Os primeiros conceitos sobre geodiversidade, tal como são compreendidos atualmente, emergiram na década de 1990, no contexto de debates crescentes sobre geoconservação. A definição mais amplamente adotada foi proposta por Gray (2013), que descreve a geodiversidade como "a extensão natural (diversidade) de componentes geológicos (rochas, minerais, fósseis), de características geomorfológicas (relevos, processos físicos), dos solos e hidrológicos, incluindo suas assembleias, estruturas e contribuições para a paisagem".

Trata-se de uma definição abrangente, que reflete a complexidade conceitual do termo e os desafios para sua aplicação prática, o que ainda hoje é motivo de discussões teóricas. O crescente interesse dos estudos em geodiversidade provém do reconhecimento de que os elementos que a constituem são essenciais para a manutenção dos ecossistemas e dos serviços ecossistêmicos que sustentam a vida humana (GRAY, 2013; HJORT *et al.*, 2015).

A geoconservação surgiu, a partir dessa perspectiva, como um campo voltado ao estudo e definição de medidas protetivas para áreas onde a geodiversidade apresenta significativo valor científico, educativo, turístico ou cultural (HENRIQUES *et al.*, 2011; GARCIA *et al.*, 2022). Para garantir que a geoconservação seja efetiva nessas localidades, é necessária a implementação de um conjunto de ações que viabilizem o reconhecimento do patrimônio geológico e a compreensão do contexto ambiental, territorial e socioeconômico em que estão inseridos (BRILHA, 2018a).

No caso do município de Presidente Figueiredo, é reconhecido um elevado potencial turístico, impulsionado pela configuração e riqueza de seus elementos naturais. Embora alguns sítios representativos da geodiversidade regional já tenham sido identificados, esses dados ainda não foram plenamente integrados a estratégias mais amplas de conservação. A inventariação do patrimônio geológico constitui uma etapa fundamental nesse processo, no entanto, é igualmente necessário promover uma integração mais abrangente com outros aspectos territoriais.

Nesse sentido, torna-se imprescindível compreender a distribuição espacial dos elementos da geodiversidade e suas inter-relações com os aspectos sociais, econômicos e culturais da região.

Compreender a relação entre as populações humanas e a geodiversidade é, portanto, uma questão central para a valorização e preservação do ambiente natural. O entendimento dessa dinâmica é um passo fundamental para subsidiar a gestão integrada de recursos naturais e de fomento a novas iniciativas de geoconservação.

1.1. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a aplicabilidade do Mapa de Índice da Geodiversidade como uma ferramenta de análise espacial e de interpretação dos elementos que compõem a geodiversidade no município de Presidente Figueiredo, estado do Amazonas. Para alcançar o objetivo proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Construir uma base de dados georreferenciada para o estudo da geodiversidade na área de estudo;
- Estabelecer parâmetros para a definição de subíndices da geodiversidade;
- Indicar possibilidades de aplicação do Mapa de Índice da Geodiversidade na região;
- Investigar a correlação dos valores de índice da geodiversidade com outros parâmetros (uso e ocupação do solo, indicadores socioeconômicos, etc.).

1.2. Organização do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, que abrangem desde a contextualização do tema até a apresentação das conclusões.

O Capítulo 1 introduz o trabalho, apresentando a problemática, a justificativa e os objetivos da pesquisa.

O Capítulo 2 trata da caracterização da área de estudo, abordando sua localização, contexto geológico e principais aspectos fisiográficos.

O Capítulo 3 corresponde à fundamentação teórica, trazendo os conceitos centrais relacionados à geodiversidade, um panorama dos estudos realizados na região amazônica e uma revisão das metodologias aplicadas na avaliação da geodiversidade.

O Capítulo 4 descreve a metodologia adotada para a elaboração do Mapa de Índice da Geodiversidade.

O Capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e inclui o artigo submetido à revista *Geoheritage*.

O Capítulo 6 é dedicado à discussão dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 7 traz as considerações finais, apontando as contribuições do trabalho, suas limitações e sugestões para investigações futuras.

2

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1. Localização da Área de Estudo

O município de Presidente Figueiredo está localizado no estado do Amazonas, aproximadamente 107 km ao norte de Manaus, capital do estado. Limita-se ao norte com o estado de Roraima, sendo interligado pela rodovia BR - 174, que proporciona acesso a outras vias importantes, como a AM - 240, rodovia estadual que leva à vila de Balbina, e o ramal de acesso à Vila Pitinga, onde está localizada a Mina de Pitinga (Figura 1). O município possui uma área territorial de aproximadamente 25.459 km², sendo recoberto por uma área inundada de aproximadamente 2.360 km², que forma o Lago da Usina Hidrelétrica de Balbina.

O município tem uma população estimada de 33 mil habitantes, conforme dados do IBGE de 2024, o que configura densidade demográfica de 1,20 hab/km². Dentre as principais atividades econômicas, está o turismo, impulsionado pela presença de diversos atrativos naturais, e voltado principalmente para os segmentos de turismo de aventura, turismo ecológico e até mesmo turismo espeleológico. Existe na região um projeto de geoparque, denominado Geoparque Cachoeiras do Amazonas (LUZARDO, 2012), que conta atualmente com 18 geossítios e 2 sítios da geodiversidade catalogados (SOUZA; RIBEIRO, 2024).

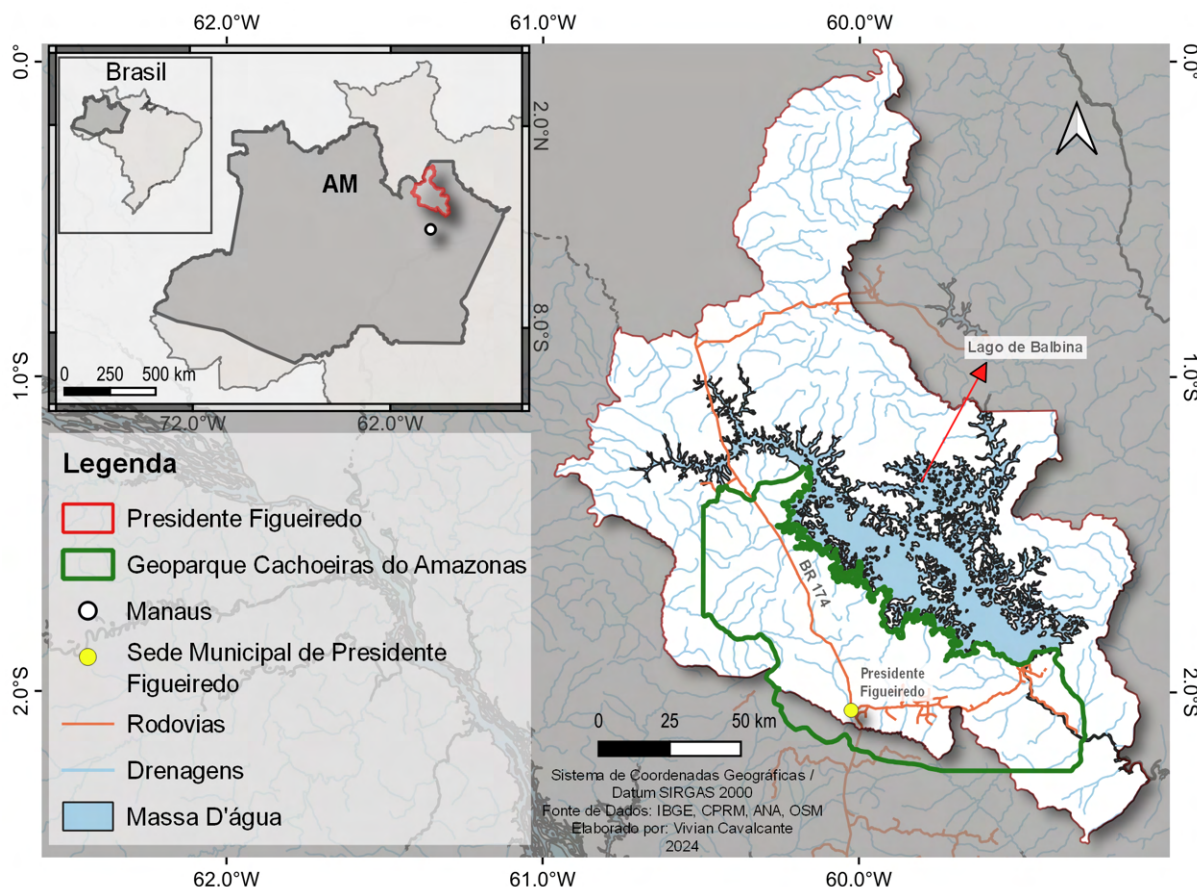


Figura 1 – Localização da área de estudo.

Fonte: A autora (2025).

2.2. O Meio Abiótico

2.2.1. Geologia

A área de estudo situa-se em um contexto geológico de transição entre a Bacia do Amazonas e o Escudo das Guianas, o qual integra a porção setentrional do Cráton Amazônico. O Cráton Amazônico, reconhecido como um dos maiores crátons existentes no planeta, constitui um elemento fundamental da Plataforma Sul-Americana e é formado por dois escudos arqueanos a paleoproterozoicos – o Escudo das Guianas e o Escudo Brasil Central –, parcialmente recobertos por sequências sedimentares fanerozoicas da Bacia do Amazonas (ALMEIDA *et al.*, 1981; TEIXEIRA *et al.*, 1989; TASSINARI; MACAMBIRA, 1999). Esses domínios cratônicos encontram-se delimitados por cinturões orogênicos proterozoicos, cuja estabilização tectônica ocorreu aproximadamente há 1 Ga (WANDERLEY-FILHO *et al.*, 2010).

Os principais modelos reconstitutivos da evolução do cráton postulam que as províncias cratônicas resultaram de episódios sucessivos de acreção crustal durante o Proterozoico, com formação de extensas faixas móveis e sistemas orogênicos (TEIXEIRA *et al.*, 1989; TASSINARI;

MACAMBIRA, 1999; SANTOS *et al.*, 2000).

Com base em dados isotópicos (U-Pb, Sm-Nd) e evidências geológicas, o Cráton Amazônico pode ser subdividido em seis províncias geocronológicas principais (TASSINARI; MACAMBIRA, 1999): (i) Amazônia Central, (ii) Maroni-Itacaiúnas, (iii) Ventuari-Tapajós, (iv) Rio Negro-Juruena, (v) Rondoniana-San Ignácio e (vi) Sunsás.

Santos *et al.* (2000) propuseram posteriormente, com base em dados geocronológicos atualizados, uma subdivisão do Cráton Amazônico em sete províncias geotectônicas distintas e um importante cinturão de cisalhamento: (i) Carajás-Imataca, (ii) Transamazônica, (iii) Tapajós-Parima, (iv) Amazônia Central, (v) Rio Negro, (vi) Rondônia-Juruena, (vii) Sunsás, além do (viii) cinturão K'Mudku.

Estas províncias, caracterizadas por assinaturas geocronológicas distintas e evoluções crustais particulares, encontram-se delimitadas por cinturões orogênicos neoproterozoicos relacionados aos ciclos Brasiliano-Pan Africano (900-500 Ma) (TASSINARI; MACAMBIRA, 1999; SANTOS *et al.*, 2003; CORDANI *et al.*, 2009).

O município de Presidente Figueiredo está inserido no contexto da Província Tapajós-Parima, que compreende uma faixa NW-SE, limitada a leste pela Província Amazônia Central e a sul pela Bacia Sedimentar do Amazonas (SIMÕES *et al.*, 2019), como mostrado na Figura 2

Desenvolvida sobre a plataforma estável do Cráton Amazônico está a Bacia do Amazonas, que constitui uma estrutura do tipo sinéclise, com forma alongada na direção WSW-ENE. Esta província sedimentar intracontinental apresenta um registro estratigráfico contínuo desde o Paleozoico Inferior até o Cenozoico, abrangendo sequências siliciclásticas, carbonáticas e vulcanossedimentares (PUTZER, 1984; ALMEIDA *et al.*, 1981). A Bacia é delimitada a leste pelo Arco Gurupá, que a separa da Bacia do Marajó, a oeste pelo Arco do Purus, que a separa da Bacia do Solimões, a norte pelo Escudo das Guianas e a sul pelo Escudo Brasil Central. A atividade tectônica desses escudos condicionou processos de erosão e sedimentação na bacia (WANDERLEY-FILHO *et al.*, 2010).

A coluna estratigráfica da Bacia do Amazonas se desenvolveu em dois grandes ciclos deposicionais de primeira ordem (CUNHA *et al.*, 2007). O primeiro ciclo, de idade paleozoica (Ordoviciano-Permiano), ocorreu em um contexto geodinâmico resultante da colisão dos supercontinentes Gondwana e Laurasia. Essa megasequência, notavelmente mais espessa que as unidades meso-cenozoicas, compreende quatro sequências deposicionais de segunda ordem: i) o Grupo Trombetas (Ordoviciano-Siluriano), representando sistemas marinhos rasos; ii) os Grupos Urupadi e Curuá (Devoniano), com depósitos deltaicos; iii) a Formação Faro (Carbonífero), com

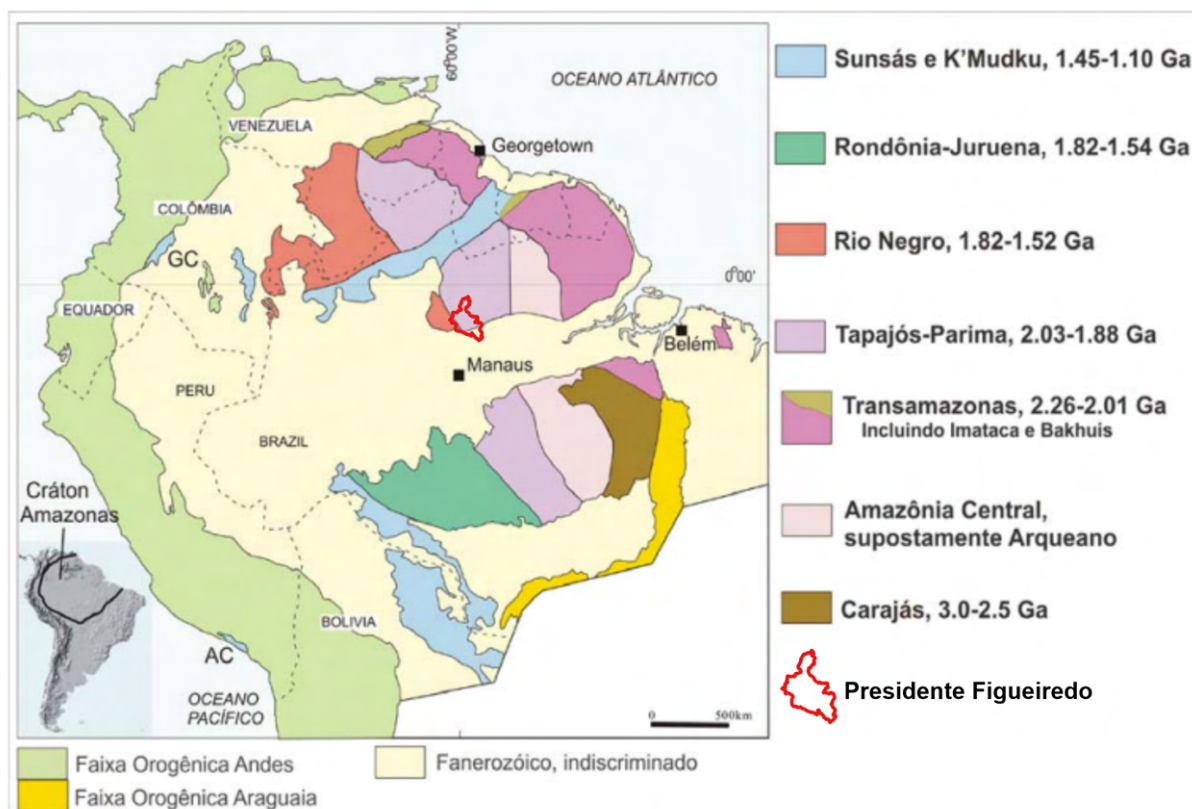


Figura 2 – Compartimentação do Cráton Amazônico em Províncias Geocronológicas.

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2006)

registros de sedimentação glacial; e iv) o Grupo Tapajós (Permiano), caracterizado por sistemas fluvio-deltaicos (CUNHA *et al.*, 2007).

O segundo ciclo, meso-cenozoico, reflete um contexto geodinâmico diferente, com influência dos processos pós-rifte e da tectônica andina, resultando em sistemas deposicionais predominantemente continentais. A estabilização crustal das bacias amazônicas está associada aos primeiros estágios de fragmentação do supercontinente Gondwana durante o Mesozoico, processo que gerou uma extensa superfície de discordância regional, marcando um hiato sedimentar entre o Triássico e parte do Cretáceo (WANDERLEY-FILHO *et al.*, 2010). A sedimentação foi retomada apenas no Cretáceo Superior, com a deposição da Formação Alter do Chão, que representa o início do sistema fluvial proto-amazônico com drenagem de oeste para leste (COSTA *et al.*, 1996; HOORN *et al.*, 2010). Esse padrão de drenagem reflete a nova configuração paleogeográfica resultante da abertura do Oceano Atlântico e da fragmentação final do Pangea (HOORN, 1994; HOORN *et al.*, 1995; HOORN *et al.*, 2010).

A configuração hidrográfica atual da bacia é o resultado de um evento tectônico significativo ocorrido no Mioceno Superior: o rápido soerguimento do orógeno andino. Esse evento promoveu a inversão do sistema de drenagem e a conexão definitiva entre as Bacias do Amazonas

e Solimões (HOORN *et al.*, 1995; HOORN *et al.*, 2010). Os estudos neotectônicos revelam um regime deformacional transcorrente ativo, caracterizado por falhas reversas e dobras com orientações preferenciais NE-SW e NNE-SSW (COSTA *et al.*, 1996), que controlam os processos atuais de morfogênese e sedimentação.

A evolução geomorfológica pós-deposicional é marcada pela formação de perfis lateríticos em dois episódios distintos: (1) durante o Eoceno-Oligoceno e (2) no Pleistoceno (COSTA, 1991; COSTA *et al.*, 1996). Estas crostas ferruginosas representam marcadores importantes de estabilidade tectônica e climática, intercalados entre pulsos de atividade neotectônica. A distribuição espacial e as características composicionais dessas crostas fornecem valiosas informações sobre as condições paleoambientais e a evolução geomorfológica da bacia durante o Cenozoico.

2.2.1.1. Unidades Litoestratigráficas

As unidades aflorantes na área de estudo estão descritas nas seções a seguir, separadas em unidades pertencentes ao embasamento cristalino e à Bacia Sedimentar do Amazonas, conforme Figura 3.

A porção mais antiga do substrato da região é composta pelas rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé, representada por riolitos, riodacitos, traquitos e ignimbritos com idades entre 1,88 e 1,89 Ga (COSTI *et al.*, 2000). Essa unidade é intrudida pelas rochas da Suíte Água Branca e da Suíte Mapuera, desenvolvidas contemporaneamente (SIMÕES *et al.*, 2019).

Suíte Água Branca representa um conjunto de rochas graníticas, variando de monzogranitos a granodioritos, associadas também a fácies subvulcânicas, com idades de cristalização estabelecidas entre 1,9 e 1,87 Ga (SIMÕES *et al.*, 2019; ALMEIDA, 2006; VALÉRIO *et al.*, 2006).

A Suíte Mapuera, por outro lado, é formada por corpos graníticos irregulares e intrusivos às rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé e nos granitoides da Suíte Água Branca, compostos por sienogranitos, monzogranitos e álcali-feldspato granito (SIMÕES *et al.*, 2019). Dentre os corpos intrusivos associados a esta unidade, incluem-se o Granito Simão, Granito Abonari, Granito São Gabriel, cujas idades obtidas indicam contemporaneidade com o Grupo Iricoumé (FERRON *et al.*, 2006; LOMBELLO, 2011; SIMÕES *et al.*, 2019).

O Gabro Taxista é uma unidade que reúne gabros, olivina gabros e leucograbos, que mantêm relação de intrusão com a Suíte Água Branca, cuja datação demonstrou contemporaneidade com a Suíte Mapuera (SIMÕES *et al.*, 2019).

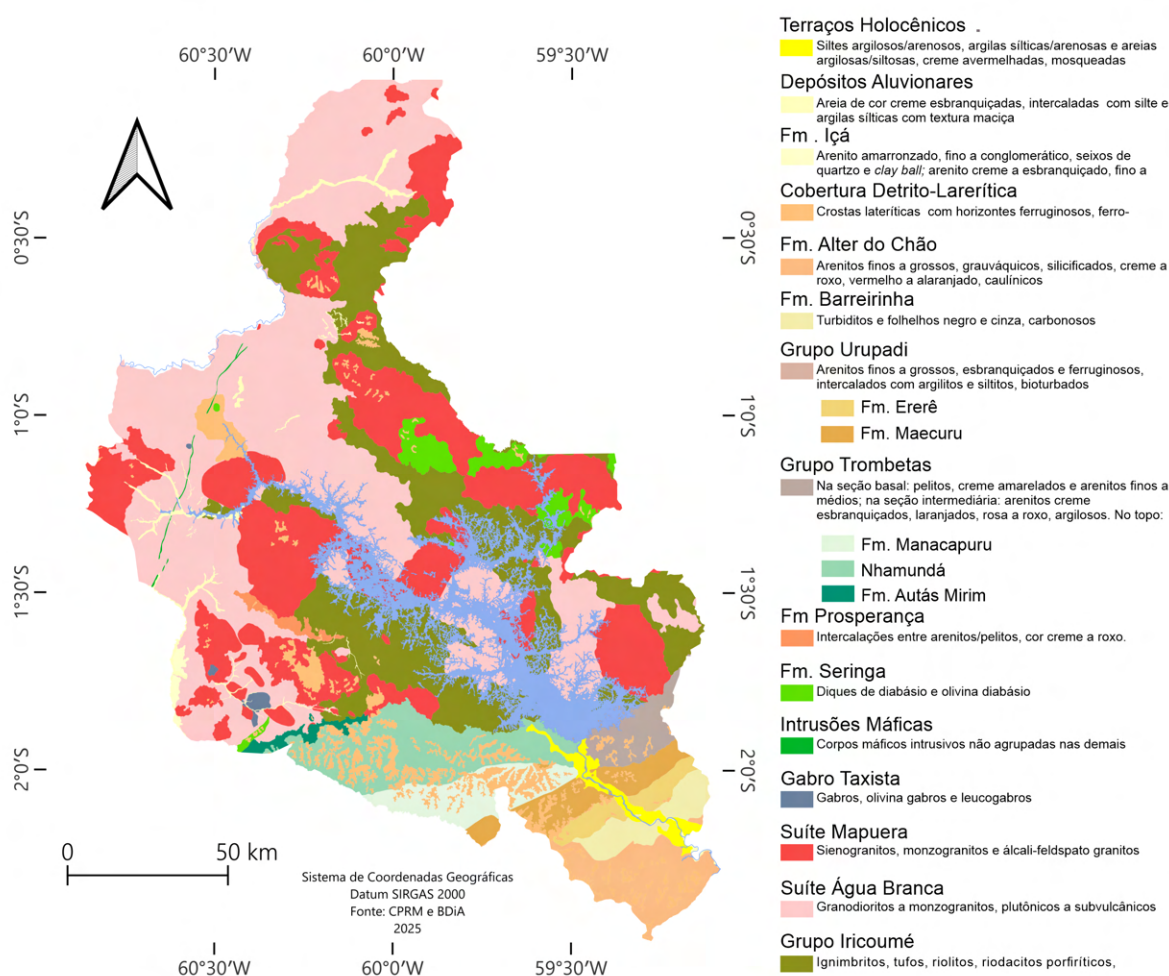


Figura 3 – Mapa de Unidades Litoestratigráficas do município de Presidente Figueiredo. Base de dados adaptada do Serviço Geológico do Brasil e da plataforma BDIA do IBGE

Fonte: A autora (2025)

A Suíte Madeira, não mapeada na escala utilizada, reúne uma série de corpos graníticos onde ocorrem mineralizações de Sn Nb e Ta, como é o caso dos Granitos Água Boa e Madeira, que afloram na região da Mina do Pitinga (SIMÕES *et al.*, 2019), região norte do município. As idades obtidas apontam para a formação desses corpos entre 1,83 e 1,74 Ga (FERRON *et al.*, 2006; NETO *et al.*, 2014; SIMÕES *et al.*, 2019).

Foram reunidos na Formação Seringa um grupo de derrames basálticos e diques de diabásio, associados a uma fase extensional que provocou rifteamento e possibilitou a deposição da Formação Prosperança a partir do Mesoproterozoico (SIMÕES *et al.*, 2019).

A Formação Prosperança foi depositada antes da instalação da sinéclise que originou a Bacia do Amazonas e representa um ambiente de planície deltaica a mar raso (NOGUEIRA, 1999). Essa unidade aflora de maneira discordante com as rochas da silurianias da Formação

Nhamundá do Grupo Trombetas (VALÉRIO *et al.*, 2009).

Afloram na região de Presidente Figueiredo as rochas mais antigas que compõem a coluna estratigráfica da Bacia do Amazonas, reunidas no Grupo Trombetas (CUNHA *et al.*, 2007). Essa unidade consiste em uma sequência sedimentar ordovício-devoniana depositada em um contexto de instalação de um sistema marinho, compreendendo 3 unidades na área de estudo: Formação Autás-Mirim, Formação Nhamundá e Formação Manacapuru.

A Formação Autás-Mirim compõe a base da sequência sedimentar do Grupo Trombetas, formada em um ambiente fluvio-estuarino a praias de caráter transgressivo, com presença de depósitos eólicos (SIMÕES *et al.*, 2019). Ocorrem na região principalmente folhelhos de idade neo-ordoviciano (GRAHN, 2005).

A Formação Nhamundá é formada predominantemente por quartzos arenitos bioturbados e com presença de estruturas sedimentares, como estratificações plano-paralelas e preservação de marcas onduladas, associados também a arenitos finos e pelitos com estratificação cruzada tipo hummocky, característicos de ambiente litorâneo (REIS *et al.*, 2006; SIMÕES *et al.*, 2019). A ocorrência associada de diamictitos indica influência glaciogênica (NOGUEIRA *et al.*, 1999).

A Formação Manacapuru, unidade de topo do Grupo Trombetas, representa uma deposição sedimentar em ambiente nerítico, onde afloram folhelhos fossilíferos, com ocorrência de braquiópodes (REIS *et al.*, 2006).

Grupo Urupadi reúne as Formações Maecuru, composta por arenitos e pelitos neríticos e deltaicos, e Ererê, composta por siltitos, folhelhos e arenitos neríticos a deltaicos, formados a partir de um ciclo transgressivo-regressivo ao longo do Devoniano-Carbonífero (REIS *et al.*, 2006; CUNHA *et al.*, 2007).

Afloram também na região as rochas da Formação Barreirinha, pertencente ao Grupo Curuá, formada principalmente por folhelhos carbonosos de origem marinha (REIS *et al.*, 2006; CUNHA *et al.*, 2007).

A Formação Alter do Chão corresponde à sequência sedimentar cretácea que marca a instalação de um sistema fluvial de alta energia, que foi descontinuado durante o Paleogeno (REIS *et al.*, 2006; CUNHA *et al.*, 2007; HOORN *et al.*, 2010). Na região de Presidente Figueiredo, a unidade foi depositada em grábens isolados sobre sedimentos da Formação Nhamundá, representativos de depósitos de um sistema fluvial entrelaçado e leques aluviais com fonte cratônica (REIS *et al.*, 2006).

A Formação Içá reúne um conjunto de arenitos finos a conglomeráticos, depositados em ambiente fluvial de alta energia, com registros de fauna e flora pleistocênicas (REIS *et al.*, 2006).

São identificados dois períodos de lateritização na Amazônia, segundo Costa (1991). O primeiro período ocorreu no Eoceno-Oligoceno, caracterizado por lateritos maduros, com perfis profundos e bem desenvolvidos, que formam horizontes ferruginosos, ferro-aluminosos, bauxíticos ou bauxítico-fosfáticos (COSTA, 1991; COSTA *et al.*, 1996). O segundo período de lateritização ocorreu durante o Pleistoceno, no qual se formaram os lateritos mais jovens, denominados lateritos imaturos, com perfis pouco evoluídos e com característica ferro-alumino-argilosa, não apresentando horizontes bauxíticos ou bauxítico-fosfáticos. Esses lateritos imaturos foram expostos a esforços neotectônicos e podem apresentar deformações, segmentações ou rotações de seus perfis (COSTA *et al.*, 1996). Na área de estudo, foram identificadas três superfícies de aplainamento no trecho entre Presidente Figueiredo e a Vila de Balbina, ao longo da AM-240 (HORBE *et al.*, 2001).

2.2.2. Geomorfologia

A geomorfologia do estado do Amazonas foi definida por processos geológicos e geomorfológicos que ocorreram desde o início do Fanerozoico, de forma que o relevo e padrões de drenagem atuais são resultado dos processos de soerguimento e subsidência que se sucederam no contexto da formação e estabilização do Cráton Amazônico (KROONENBERG; ROEVER, 2010). As feições encontradas estão associadas principalmente aos eventos de fragmentação do Cráton Amazônico e abertura da Bacia do Amazonas (MAIA; MARMOS, 2010). Além disso, os processos intempéricos que ocorreram no Paleógeno e Neógeno também atuaram como agentes na definição da geomorfologia atual por meio da formação de extensos perfis lateríticos, que definem superfícies de aplanamento responsáveis pela sustentação dos extensos platôs da região (COSTA, 1991; COSTA *et al.*, 1996; HORBE *et al.*, 2001). A neotectônica se aproveitou de estruturas antigas formadas no pré-cambriano, que delinearam zonas de fraqueza dentro do cráton (COSTA *et al.*, 1996).

A região de Presidente Figueiredo se encontra no contexto do contato geológico entre o embasamento cristalino e as unidades sedimentares da Bacia do Amazonas, o que reflete na sua configuração geomorfológica. A área de estudo se enquadra, em sua porção sul, nos domínios de Baixos Platôs da Amazônia Centro-Oriental e, em sua porção norte, nas Superfícies Aplainadas do Norte da Amazônia e, a nordeste, no Planalto Residual do Norte da Amazônia, como indicado na Figura 4.

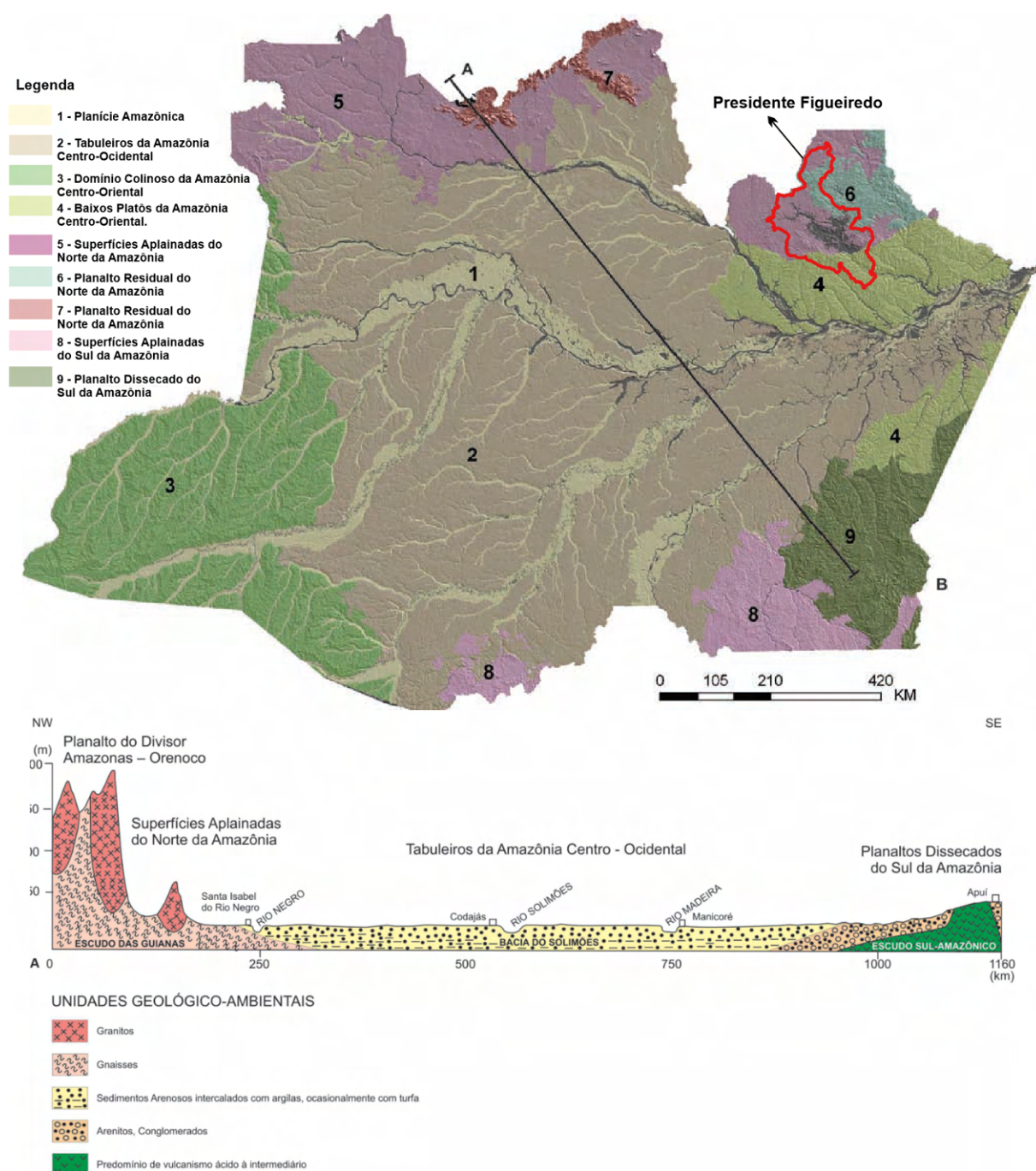


Figura 4 – Domínios geomorfológicos do Estado do Amazonas

Fonte: Adaptado de Maia e Marmos (2010)

Os Baixos Platôs da Amazônia Centro-Ocidental são caracterizados por feições tabulares, formadas sobre as rochas sedimentares paleozóicas do Grupo Trombetas e sobre as rochas cretáceas da Formação Alter do Chão, em decorrência dos processos de formação de perfis lateríticos e desenvolvimento de superfícies de aplainamento.

As Superfícies Aplainadas do Norte da Amazônia variam entre extensas áreas aplainadas e regiões com relevo colinoso de baixa amplitude, com diversas ocorrências de inselbergs e outras

feições residuais (MAIA; MARMOS, 2010). Formaram-se sobre o substrato que corresponde ao embasamento cristalino, onde ocorrem rochas paleoproterozóicas do Complexo Jauaperi, da Suíte Água Branca e do Grupo Iricoumé.

O Planalto Residual do Norte da Amazônia corresponde a áreas com maiores elevações, com cotas entre 200 e 400 m, em forma de curtos platôs que representam uma superfície contínua pretérita (MAIA; MARMOS, 2010). Foram esculpidos nas rochas do embasamento que formam as Suítes Intrusivas Mapuera e Madeira, concentrados a norte do Lago de Balbina.

A neotectônica tem uma forte influência na geomorfologia de Presidente Figueiredo, sendo um fator determinante na formação das cachoeiras e corredeiras da região, definidas preferencialmente segundo falhas e fraturas com direção NE-SW e, subordinadamente, com controle pseudocárstico, formando grutas e cavernas em arenitos (NOGUEIRA; SARGES, 2001).

2.2.3. *Pedologia*

Os solos apresentam uma forte relação com a geomorfologia da região (Tabela 1), destacando, na porção sul, a predominância de profundos perfis de Latossolo Amarelo desenvolvidos sobre rochas do Grupo Trombetas e da Formação Alter do Chão (MAIA; MARMOS, 2010), como mostrado na Figura 5.

Tabela 1 – Descrição das classes de solo e relação do seu modo de ocorrência com a geomorfologia da região.

Classe de Solo	Descrição	Modo de Ocorrência
Latossolos Amarelos	Solos minerais não-hidromórficos, profundos, muito intemperizados, completa ou quase completa ausência de minerais primários, boa drenagem, acidez elevada.	Baixos platôs, formados sobre rochas sedimentares da Formação Alter do Chão e do Grupo Trombetas, sob mata de terra firme.
Latossolos Vermelho-amarelos	Solos minerais não-hidromórficos, profundos, muito intemperizados, completa ou quase completa ausência de minerais primários, boa drenagem, acidez elevada.	Áreas de relevo suave ondulado a ondulado, sob floresta densa e formados como produto do intemperismo de rochas do embasamento cristalino.
Argissolos Amarelos	Solos minerais não-hidromórficos, profundos, acentuada diferenciação entre os horizontes A (orgânico) e B (argílico), drenagem, predominantemente distróficos.	Planaltos e superfícies aplainadas, relevos ondulado a forte ondulado, formados sobre rochas do embasamento cristalino.
Cambissolos Háplicos	Solos minerais não-hídricos, diferenciados intermediários de formação, rasos e medianamente intemperizados, acidez elevada ou muito ácidos.	Formados em áreas susceptíveis a erosão hídrica.
Gleissolos Háplicos	Solos minerais hidromórficos, com presença de horizonte glei em decorrência da saturação por água, mal drenados, com elevada fertilidade.	Planícies aluviais em regime de inundação frequente, sob vegetação de floresta de várzea, geralmente em associação com Argissolos e em proximidades de cursos d'água.
Plintossolos Pétricos	Solos minerais com horizonte plíntico (rico em óxidos de ferro), com concreções ferruginosas, reduzida drenagem, distróficos.	Relevo suave ondulado a ondulado, áreas de encosta, planícies aluviais e trechos inferiores de encostas.
Espodossolos	Solos derivados de material parento arenoso, com acúmulo de matéria orgânica, drenagem limitada, excessivamente ácidos.	Áreas de vales e depressões, sob vegetação de campinaranas.
Neossolos	Solos minerais pouco desenvolvidos, resistentes ao intemperismo devido a sua composição primária.	Ocorrem de maneira subordinada na porção central do Lago de Balbina e em áreas de campinaranas.

Na região onde se estendem as superfícies aplainadas, compostas por rochas do embasamento cristalino, afloram perfis de Argissolos e Latossolos Vermelho-amarelos. Subordinadamente, encontram-se Espodossolos associados a regiões de campinaranas, além de Neossolos, que representam perfis menos desenvolvidos, com maior resistência aos processos intempéricos (MAIA; MARMOS, 2010).

Destaca-se ainda a presença de coberturas lateríticas desenvolvidas em ambiente de clima tropical durante o Cenozoico. A presença de lateritos mais jovens é marcada por horizontes ferro-alumino-argilosos, pouco evoluídos, menos profundos e desprovidos de horizonte bauxítico identificados em áreas topograficamente mais baixas (COSTA, 1991).

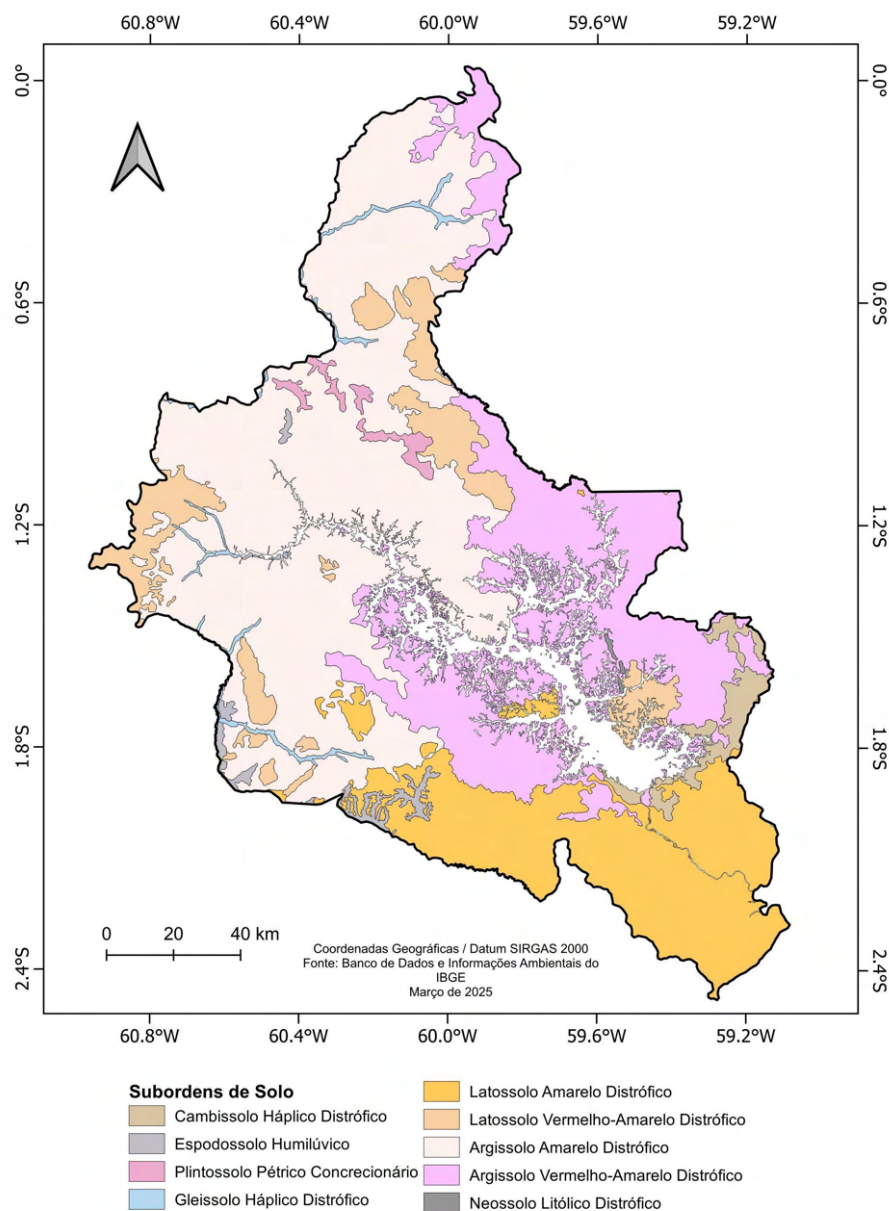


Figura 5 – Mapa de solos do município de Presidente Figueiredo.

Fonte: A autora (2025)

2.2.4. Hidrologia

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Amazonas, abrangendo de forma mais expressiva a sub-bacia do Rio Uatumã, alimentada por diversos afluentes, como o Rio Santo Antônio do Abonari e o Rio Pitinga (Figura 6).



Figura 6 – Subdivisão das sub-bacias hidrográficas do município de Presidente Figueiredo e principais drenagens.

Fonte: A autora (2025)

Parte do curso do Rio Uatumã foi alterada pela construção da barragem da UHE Balbina, que resultou na formação de um reservatório artificial com área inundada de aproximadamente 2.360 km² dentro do município, constituindo o Lago de Balbina. Outra sub-bacia expressiva é a do Rio Urubu, cujas nascentes localizam-se no interior do município, sendo alimentada por cursos d'água como o Igarapé Santa Cruz e o Igarapé Mutum.

As drenagens da região apresentam predominantemente padrão dendrítico, com arranjos paralelos e fluxo preferencial em direção sudeste, controlado por estruturas neotectônicas. Os corpos hídricos locais são, em sua maioria, compostos por águas escuras, e a dinâmica fluvial é fortemente influenciada pelo regime pluviométrico, com maior descarga hídrica concentrada

entre os meses de dezembro e maio.

O Rio Uatumã apresenta curso paralelo à direção das falhas normais NW-SE, alternadas entre estruturas do tipo graben e horst. A configuração geomorfológica da região, incluindo a rede de drenagem e o relevo, está diretamente relacionada a eventos neotectônicos extensionais e transpressivos ocorridos ao longo do Quaternário (COSTA *et al.*, 1996).

2.2.5. Clima

A região de Presidente Figueiredo se encaixa na classificação Af, segundo critérios de Köppen, que indica a zona de predominância do clima tropical úmido, estabelecido pelo menos desde o Neógeno (HOORN, 1994). Apresenta elevado índice pluviométrico, com médias anuais entre 2200 e 2600 mm, e temperaturas médias anuais entre 24° e 26°C, e maiores índices de precipitação entre dezembro e maio (Figura 7).

Segundo Moura et al. (2004), a existência de uma superfície inundada nas dimensões do Lago de Balbina estabelece um regime de brisas na região, onde os autores constataram uma alta concentração de ozônio.

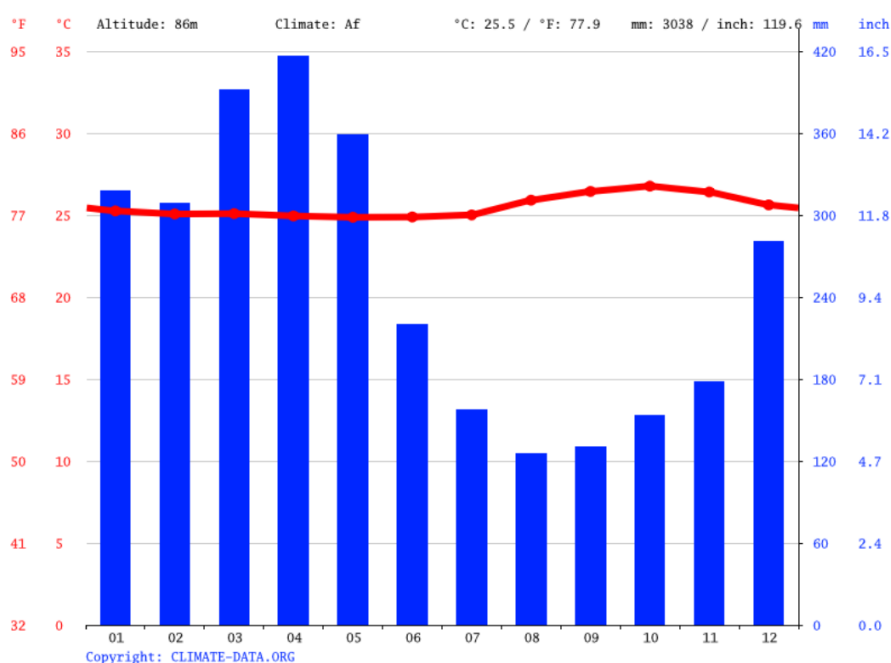


Figura 7 – Gráfico representando as temperaturas, em vermelho, e a pluviosidade, em azul, do município de Presidente Figueiredo ao longo do ano.

Fonte: Climate-Data.org (2024)

2.3. O Meio Biótico

2.3.1. Vegetação e Ecossistemas

De modo geral, a Amazônia é amplamente reconhecida por suas densas florestas, no entanto, trata-se de um bioma extremamente diverso, abrigando também áreas pantanosas, savanas, campinaranas, entre outros tipos de formações vegetais. Inserido nesse contexto, o município de Presidente Figueiredo está predominantemente coberto por florestas ombrófilas densas, que compõem a paisagem vegetal principal da região (Figura 8).

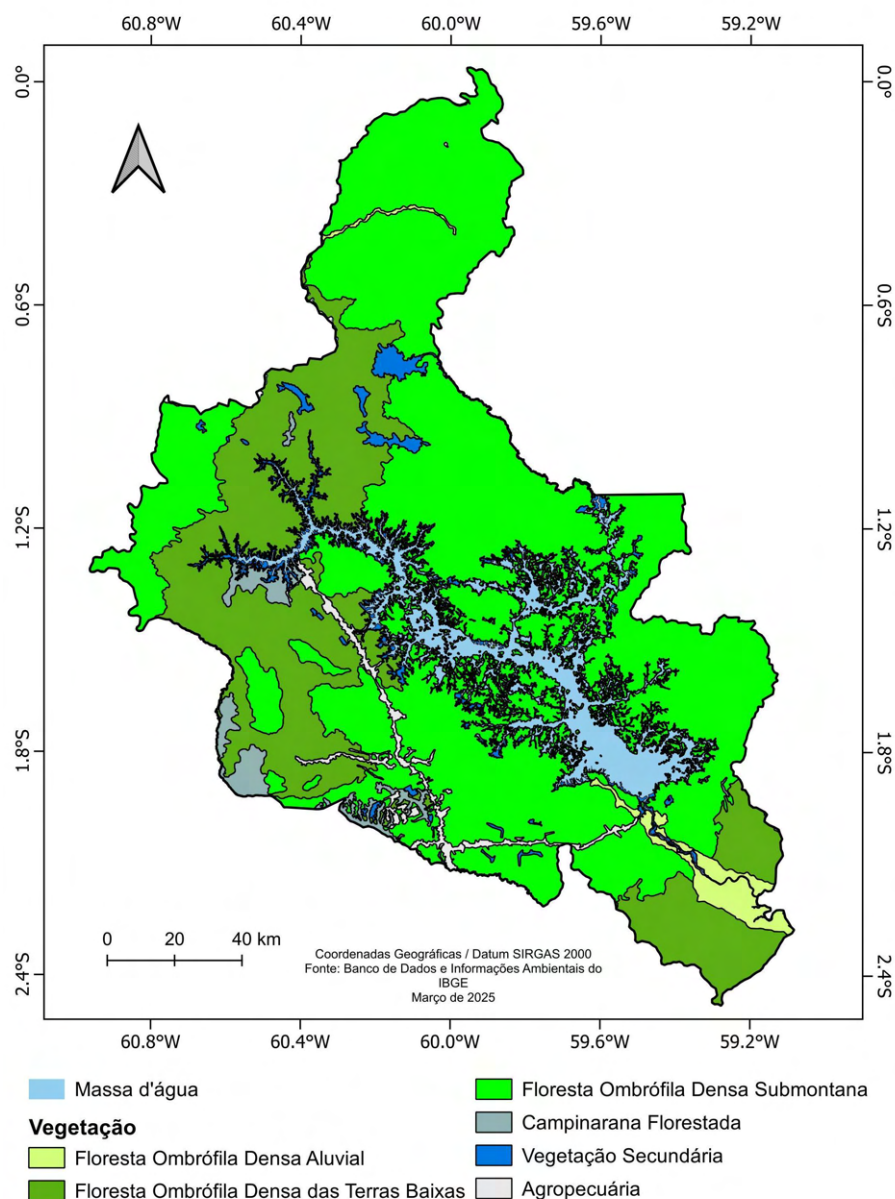


Figura 8 – Classes de vegetação do município de Presidente Figueiredo.

Fonte: A autora (2025)

De forma subordinada, destacam-se as áreas de campinaranas, também conhecidas como

caatingas amazônicas, desenvolvidas sobre solos arenosos e com formação florística característica. Podem ser divididas em três tipos, de acordo com o porte da vegetação: campinaranas abertas, arbustivas ou arborescentes. Esses ambientes constituem verdadeiros ecossistemas diferenciados inseridos no interior da floresta amazônica, representando importantes interfaces entre geodiversidade e biodiversidade.

Nos baixos platôs predominam as Matas de Terra Firme e na região do Planalto Residual, a norte do Lago de Balbina, predomina a Floresta Amazônica preservada. Os ecossistemas formados pela Floresta Amazônica são essenciais na manutenção da biodiversidade, do ciclo da água e dos estoques globais de carbono (FEARNSIDE, 2008), os quais estão sendo ameaçados pelas atividades de ocupação antrópica (FEARNSIDE, 2019).

3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Geodiversidade, Patrimônio Geológico e Geoconservação

O conceito de geodiversidade, tal como é amplamente reconhecido na atualidade, consolidou-se a partir da década de 1990, em meio aos crescentes debates sobre a conservação do patrimônio natural. A definição mais difundida é aquela proposta por Gray (2013), que descreve a geodiversidade como a variedade natural de componentes geológicos (rochas, minerais, fósseis), geomorfológicos (formas de relevo e processos) e pedológicos (solos), abrangendo suas propriedades, interações, relações e sistemas.

A geodiversidade, portanto, constitui a base física dos ecossistemas, desempenhando papel essencial na formação de habitats, na sustentação da fauna e da flora e no desenvolvimento da biodiversidade como um todo (Figura 9). Esses dois elementos - a geodiversidade e a biodiversidade - estão inerentemente conectados, compondo juntos a diversidade dos elementos naturais no planeta (PEREIRA, 2010).

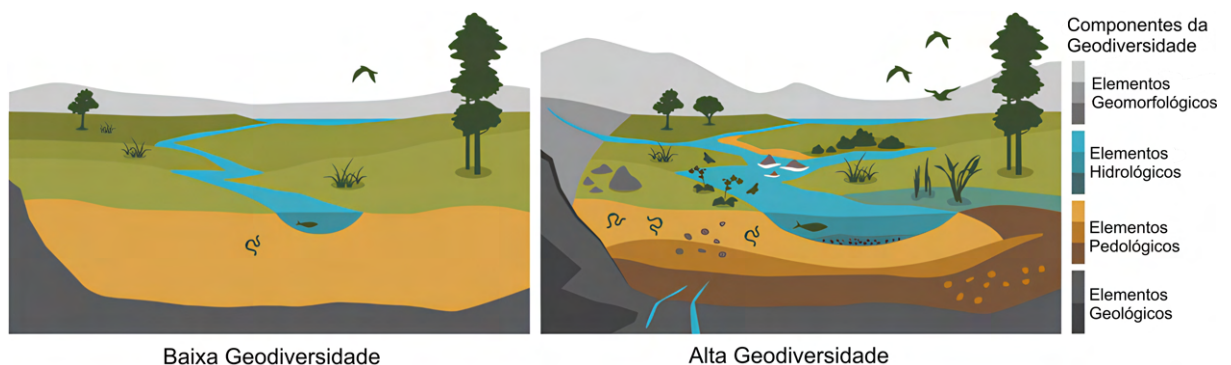


Figura 9 – Imagem ilustrativa acerca da criação de habitats sustentada pela abundância de elementos da geodiversidade.

Fonte: Adaptado de Maliniemi *et al.* (2024)

A natureza muitas vezes é retratada apenas pelos seus componentes bióticos, enquanto

a importância da geodiversidade segue negligenciada nos estudos ambientais (GARCIA *et al.*, 2022; ALAHUHTA *et al.*, 2022). A sua incorporação é, no entanto, essencial para a compreensão de ameaças ambientais, das mudanças climáticas e até mesmo de aspectos relacionados ao bem-estar e à saúde humana (HJORT *et al.*, 2015; ALAHUHTA *et al.*, 2022).

Diante disso, diversos estudos têm reconhecido a importância dessa integração, voltando esforços para a compreensão da relação da geodiversidade com esses outros fatores. Um dos enfoques reconhecidos é o papel desempenhado pela geodiversidade na provisão de serviços ecossistêmicos, por meio da sua integração com os elementos bióticos (GRAY, 2011; GORDON; BARRON, 2013; ALAHUHTA *et al.*, 2018). Ao modelar o meio natural abiótico, incluindo a distribuição de tipos de solo, formações geológicas e habitats, a geodiversidade fornece recursos para o desenvolvimento científico, educacional, cultural e econômico (PROSSER, 2013).

O reconhecimento da importância da geodiversidade nesses cenários impulsionou o desenvolvimento do conceito de geoconservação, entendido como um conjunto de ações destinadas à identificação, avaliação, proteção, gestão, promoção e interpretação do conhecimento sobre a geodiversidade (PROSSER, 2013). Seu objetivo vai além da conservação de sítios de relevância geológica, buscando também oferecer subsídios para a mitigação de impactos ambientais e para o uso sustentável dos recursos naturais (HENRIQUES *et al.*, 2011).

Sob essa ótica, o patrimônio geológico pode ser definido como a parcela da geodiversidade que apresenta um valor excepcional reconhecido pela sociedade — seja este de natureza científica, educativa, turística ou cultural (Figura 10) — e que, por essa razão, demanda ações específicas de conservação (BRILHA, 2018a; GARCIA *et al.*, 2022). O processo de reconhecimento do patrimônio geológico deve ir além do simples levantamento geológico, englobando também a valoração dos locais identificados e a comparação entre diferentes áreas, com o objetivo de determinar seu grau de relevância e prioridade de conservação (PEREIRA, 2010). É importante destacar que atividades antrópicas podem comprometer significativamente a integridade da geodiversidade, seja por meio do ocultamento de afloramentos geológicos, da interrupção de processos naturais dinâmicos ou ainda por ações que resultem na perda de informações geocientíficas e de espécies associadas (PROSSER, 2013).

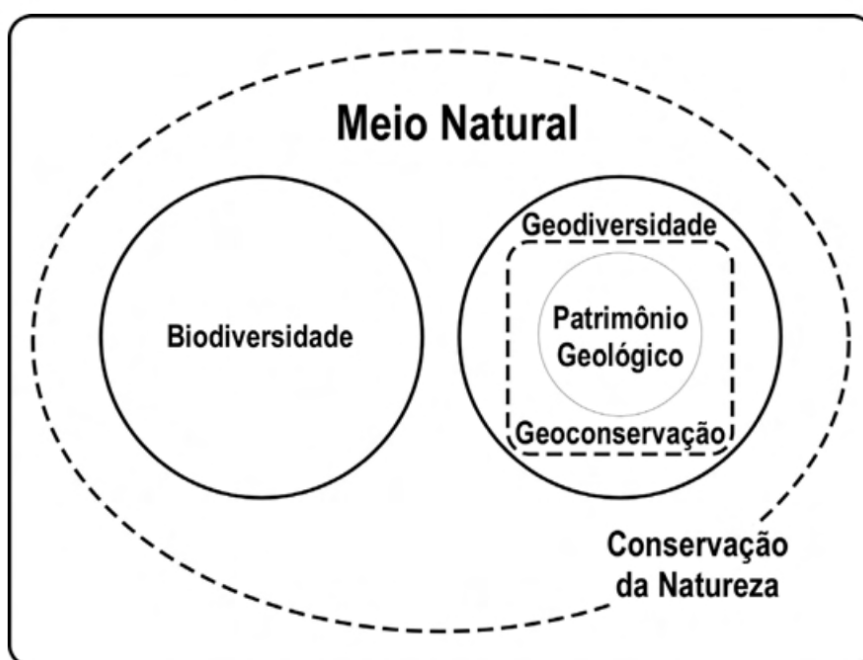


Figura 10 – A geodiversidade, como componente do meio físico natural, está compreendida no escopo da conservação da natureza, junto à biodiversidade.

Fonte: Pereira (2010)

Uma das principais estratégias adotadas para a valorização e proteção da geodiversidade é a implementação de geoparques. Esses territórios têm como finalidade promover o desenvolvimento sustentável por meio da conservação do patrimônio geológico, integrando ações de educação ambiental e atividades turísticas (BRILHA, 2018b). O processo de reconhecimento de um território como geoparque envolve diversas etapas e requer o engajamento de múltiplos atores sociais e institucionais (BRILHA, 2018b), o que pode se tornar uma tarefa desafiadora.

Paralelamente à criação de geoparques, outras abordagens de geoconservação podem ser aplicadas, de acordo com as especificidades e necessidades de cada região. Como exemplo disso, destaca-se a incorporação dos princípios de geoconservação em unidades de conservação já existentes, bem como a adoção de metodologias participativas, como a realização de workshops, capacitações e treinamentos voltados às comunidades locais e demais interessados nos sítios geológicos de relevância (GORDON, 2018; SANCHEZ-CORTEZ *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o geoturismo desponta como uma atividade estratégica, ao unir a interpretação geológica ao turismo responsável. Essa prática não apenas contribui para a difusão do conhecimento sobre a geodiversidade, como também fortalece a valorização das paisagens naturais e estimula o desenvolvimento de iniciativas sustentáveis nas localidades envolvidas (GORDON, 2018). No Brasil, os estudos voltados à geodiversidade ainda apresentam desafios significativos. Conforme apontado por Garcia *et al.* (2022), a maioria das pesquisas concentra-se

nas fases de diagnóstico e promoção, enquanto as iniciativas de conservação permanecem pouco desenvolvidas.

3.2. Avaliação da Geodiversidade

Embora o conceito de geodiversidade venha sendo discutido há mais de três décadas, seu estudo ainda enfrenta diversos desafios, especialmente no que diz respeito à definição de metodologias eficazes e amplamente aplicáveis de avaliação (ZWOLINSKI *et al.*, 2018).

Os métodos de avaliação qualitativa da geodiversidade, por exemplo, baseiam-se em conhecimentos subjetivos e são adequados para abordagens descritivas, com diferentes escalas e focos. Eles podem envolver descrições verbais, relatórios técnicos, registros fotográficos, diagramas e outras ferramentas voltadas à caracterização de uma área. Normalmente, essas análises são conduzidas por especialistas capazes de atribuir valores à geodiversidade com base em sua expertise (ZWOLINSKI *et al.*, 2018).

Com o avanço tecnológico, especialmente o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e softwares de geoprocessamento, surgiram novas possibilidades para a avaliação quantitativa. Esse enfoque objetiva quantificar os elementos da geodiversidade por meio de dados numéricos e métricas espacializadas, minimizando a influência subjetiva e ampliando a aplicabilidade dos resultados. As primeiras iniciativas nesse sentido começaram a se consolidar no final dos anos 1990, inspiradas nos métodos já utilizados para avaliação da biodiversidade (BURNETT *et al.*, 1998).

Uma das metodologias mais difundidas para quantificação da geodiversidade é a construção de Mapas de Índice de Geodiversidade, baseados na sobreposição de uma malha regular de quadrículas sobre a área de estudo. A abordagem proposta por (PEREIRA *et al.*, 2013), ao desenvolver o Mapa Índice da Geodiversidade do estado do Paraná, tornou-se referência nesse campo. Nela, o índice geral é composto por cinco subíndices, cada um representando diferentes componentes da geodiversidade. Essa metodologia busca não apenas avaliar a distribuição espacial da geodiversidade, mas também indicar áreas de interesse prioritário para conservação e planejamento.

Os estudos mais recentes vêm propondo novas interpretações sobre o uso desses mapas. De acordo com Scammacca *et al.* (2022), o Mapa Índice da Geodiversidade deve ser entendido como uma ferramenta de análise territorial, cuja aplicabilidade vai além da simples hierarquização de áreas com base nos valores atribuídos à geodiversidade. Isso porque a presença de elevada geodiversidade em uma determinada região não implica, necessariamente, em alta funcionalidade

ecológica ou relevância social.

Com base nisso, estudos recentes têm promovido o uso do termo geofuncionalidade para se referir às diversas funções desempenhadas pela geodiversidade (SCAMMACCA *et al.*, 2024; SCAMMACCA *et al.*, 2023). Dessa forma, os padrões espaciais revelados pelo índice podem oferecer insights relevantes sobre a dinâmica do território e devem ser integrados a outras dimensões ambientais, culturais e socioeconômicas.

3.3. Geodiversidade na Amazônia

No Brasil, os primeiros esforços voltados à compreensão da geodiversidade na Amazônia Ocidental partiram de iniciativas do Serviço Geológico do Brasil (SGB), responsável pela elaboração do Mapa de Geodiversidade em escala nacional (1:2.500.000) e, posteriormente, pelos mapeamentos estaduais do Amazonas (MAIA; MARMOS, 2010), Rondônia (ADAMY, 2010), Pará (JOÃO *et al.*, 2013), Roraima (HOLANDA *et al.*, 2014), Acre (ADAMY, 2015) e Amapá (JOÃO; TEIXEIRA, 2016), com escalas variando entre 1:500.000 e 1:1.000.000.

Esses produtos integram o Programa Levantamento da Geodiversidade, iniciado em 2006 com o objetivo de subsidiar a gestão territorial por meio da identificação de áreas prioritárias para conservação, zonas de risco geológico, sítios com potencial para o geoturismo e a ampliação do conhecimento sobre o meio físico.

Nesse contexto, como estratégia para identificar áreas com elevada geodiversidade e potencial turístico, educativo e científico, o Serviço Geológico do Brasil (SGB) iniciou, ainda em 2006, o Projeto Geoparques. Como um dos principais produtos dessa iniciativa, foi feita a publicação Geoparques do Brasil (SCHOBENHAUS; SILVA, 2011), consolidando conceitos e propostas voltadas à valorização do patrimônio geológico nacional. Na Região Norte, o único projeto de geoparque proposto até o momento está localizado no estado do Amazonas, no município de Presidente Figueiredo, denominado Geoparque Cachoeiras do Amazonas (LUZARDO, 2012). O projeto resultou na elaboração do primeiro inventário de geossítios da região, atualizado apenas recentemente, em 2024 (SOUZA; RIBEIRO, 2024). Atualmente, encontram-se inventariados 18 geossítios e 2 sítios da geodiversidade no município, com sua distribuição exibida na Figura 11.

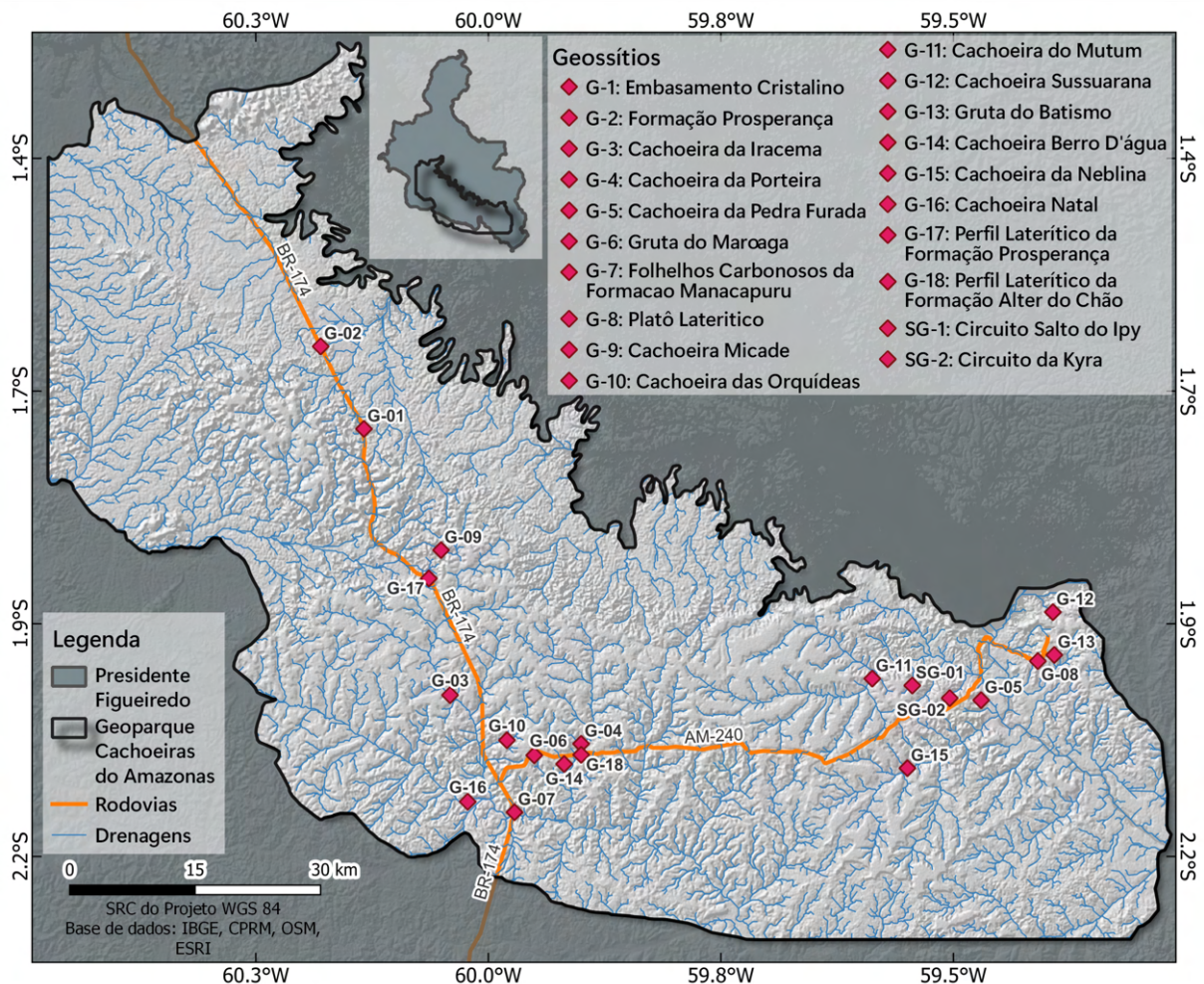


Figura 11 – Geossítios catalogados no município de Presidente Figueiredo.

Fonte: A autora (2025)

No contexto da avaliação da geodiversidade na região amazônica, um dos primeiros trabalhos a propor um mapa índice foi desenvolvido por Silva *et al.* (2015), que utilizaram a metodologia proposta por Pereira *et al.* (2013) para gerar o Mapa de Índice da Geodiversidade da Bacia do Rio Xingu. Posteriormente, Silva *et al.* (2021) elaboraram o Mapa de Índice da Geodiversidade do Brasil, em escala nacional. De acordo com os autores, as áreas de menor valor de geodiversidade no território brasileiro estão majoritariamente concentradas nas grandes bacias sedimentares, como é o caso da Bacia Sedimentar do Amazonas.

Na Amazônia equatorial, os estudos têm tido enfoque principalmente na província de Napo, onde está localizado o Geoparque Mundial da UNESCO Napo Sumaco, com temas voltados para a geoconservação e o geoturismo (SIMBAÑA-TASIGUANO *et al.*, 2024b; SIMBAÑA-TASIGUANO *et al.*, 2024a; SALAZAR-DEL-POZO *et al.*, 2025). Com o objetivo de avaliar a geodiversidade dessa região, alguns autores aplicaram metodologias de análise de índices espaciais, contribuindo para a identificação de áreas prioritárias para a conservação e para o

desenvolvimento de estratégias de valorização do patrimônio geológico (CARRIÓN-MERO *et al.*, 2022; VERA *et al.*, 2023).

Por meio de uma meta-análise e uma revisão da literatura acerca do conhecimento produzido no contexto da Bacia Amazônica, Alsbach *et al.* (2024) identificaram dois fatores determinantes para a configuração da geodiversidade na região: a geologia, representada principalmente pela diversidade litológica e pelas estruturas tectônicas, e a hidrologia, cujos processos exercem forte influência sobre a geomorfologia e a diversidade pedológica. Com base nessas variáveis, os autores propuseram uma subdivisão da Bacia Amazônica em três grandes regiões, segundo as características predominantes de geodiversidade: (i) o Cinturão Orogênico e a Amazônia Ocidental; (ii) os crátons e a Amazônia Oriental; e (iii) o sistema fluvial Solimões-Amazonas.

4

MATERIAIS E MÉTODOS

De acordo com (ZWOLINSKI *et al.*, 2018), a seleção de um método específico de avaliação de geodiversidade depende de três fatores principais: i) o objetivo da avaliação; ii) o tipo de região a ser estudada e suas dimensões espaciais; e iii) a disponibilidade de dados espaciais adequados. Diante disso, a metodologia foi escolhida de acordo com as necessidades identificadas em Presidente Figueiredo. Existe um conjunto de dados geológicos na região, mas ele provém de diferentes escalas e fontes. Isso ressaltou a necessidade de consolidar os dados geocientíficos como uma etapa importante nos estudos sobre a geodiversidade da região.

A pesquisa, portanto, foi baseada na metodologia para elaboração do Mapa de Índice de Geodiversidade, originalmente proposta por Pereira *et al.* (2013) e adaptada por diversos autores (ARAUJO; PEREIRA, 2018; DIAS *et al.*, 2021; SCAMMACCA *et al.*, 2022). Essa metodologia apresenta vantagens quando aplicada a uma região como Presidente Figueiredo, um município com uma vasta área territorial, onde muitos locais são de difícil acesso e, portanto, difíceis de serem avaliados.

A abordagem metodológica inclui a definição de uma grade regular, que é sobreposta a múltiplos mapas temáticos cobrindo os principais aspectos da geodiversidade local. Operações algébricas foram realizadas célula por célula em cada mapa, a fim de determinar valores denominados subíndices. A soma desses subíndices representa os valores do Índice de Geodiversidade. Nesse sentido, o Mapa de Índice de Geodiversidade proposto aqui é a representação gráfica do resultado da soma de 4 subíndices: (1) geológico, (2) pedológico, (3) geomorfológico e (4) hidrográfico. Os subíndices adotados levaram em consideração as características específicas da região e a disponibilidade de dados. Devido à disponibilidade limitada de registros nas bases de dados, elementos relacionados à paleontologia e aos recursos minerais não foram incluídos.

Tabela 2 – Base de dados utilizadas para o cálculo dos índices de geodiversidade

Subíndice	Dados	Tipo de Dado	Escala/Resolução	Fonte dos Dados
Geológico	Unidades litoestratigráficas	Vetorial (polígono)	1:250.000	SGB (RIKER <i>et al.</i> , 2014a; RIKER <i>et al.</i> , 2014b; RIKER <i>et al.</i> , 2016), BDIA
	Estruturas geológicas	Vetorial (linha)	1:250.000	Extraído do MDS
Pedológico	Grupos de solo	Vetorial (polígono)	1:250.000	BDIA
Geomorfológico	Unidades geomorfológicas	Vetorial (polígono)	1:250.000	BDIA
	Elevação	Raster	30 m	MDS
	Declividade	Raster	30 m	MDS
Hidrográfico	Ordem de Strahler	Vetorial (linha)	1:250.000	Extraído do MDS
	Densidade de drenagem	Vetorial (linha)	1:250.000	Extraído do MDS
	Densidade de nascentes	Vetorial (ponto)	1:250.000	Extraído do MDS

A pesquisa foi realizada na escala de 1:250.000 devido à disponibilidade de informações consistentes nas bases de dados existentes. Após testes comparativos iniciais com diferentes formatos de grade, optou-se por um sistema com células de 4,5 x 4,5 km, o que proporcionou uma melhor visualização dos valores espaciais, gerando mapas com 1406 células. Todo o processamento dos dados foi realizado no *software QGIS Desktop 3.34*, com o auxílio dos *plugins OpenTopography DEM Downloader* e *Processing Saga NextGen Provider*.

Após a consolidação da base de dados, os elementos da geodiversidade — geologia, pedologia, hidrografia e geomorfologia — foram organizados em mapas individuais para análise. A grade foi sobreposta aos mapas utilizando a ferramenta *Spatial Join* para os dados vetoriais e a ferramenta para os dados .

Para compor o *Índice Geológico*, foram adicionados dois componentes principais: a diversidade litológica, obtida pela contagem das unidades litoestratigráficas presentes em cada célula, e a diversidade estrutural, determinada pelo cálculo da densidade de linhas extraídas do padrão de drenagem e relevo, resultando em um arquivo *raster* representando a densidade de estruturas lineares.

O *Subíndice Pedológico* foi obtido a partir da diversidade dos subordens de solo, calculada de forma semelhante à diversidade dos elementos litológicos. O Subíndice Pedológico, portanto, representa a diversidade de solos no nível de subordem, determinado pela contagem em cada célula da grade.

O *Subíndice Geomorfológico* é composto pela diversidade dos seguintes elementos:

unidades geomorfológicas, altimetria e declividade. A diversidade das unidades de relevo foi calculada pela contagem das unidades por célula, assim como foi feito para a diversidade litológica e pedológica. Para a variação de altimetria e declividade, representadas em arquivos *raster*, o intervalo entre os maiores e menores valores em cada célula foi calculado utilizando a ferramenta *Zonal Statistics*. O Subíndice Geomorfológico foi, portanto, calculado com base na classificação e soma desses três elementos.

O *Subíndice Hidrográfico*, por sua vez, é o resultado do cálculo da diversidade a partir dos seguintes três elementos: ordem de Strahler, densidade de drenagem e densidade de nascentes. A ordem máxima de Strahler em cada célula foi calculada e dividida por 2 a partir do arquivo vetorial das drenagens de linha simples. A densidade de drenagem e de nascentes foi obtida calculando a densidade de linhas e pontos, respectivamente. Essa operação gerou um arquivo *raster*, que foi submetido ao cálculo da densidade média por célula utilizando a ferramenta *Zonal Statistics*, resultando em arquivos vetoriais que puderam, então, ser somados.

Todos os subíndices foram reclassificados utilizando o método de Quebras Naturais de Jenks, distribuídos em 5 classes de magnitude: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Este método de classificação é amplamente utilizado em análises espaciais, pois consiste em uma forma de agrupamento de dados que minimiza a variância dentro de cada classe e maximiza a variância entre diferentes classes (ZWOLINSKI *et al.*, 2018). Essas categorias receberam os valores de 1 a 5, respectivamente, para o cálculo final do índice de geodiversidade. Essa atribuição de valores foi usada como forma de normalização entre os parâmetros. O Mapa de Índice de Geodiversidade foi, portanto, obtido a partir da soma dos 4 subíndices e também reclassificado para a representação visual. Foi aplicada a interpolação por Vizinhos Naturais tanto aos mapas de subíndices quanto ao Mapa de Índice da Geodiversidade, de modo a proporcionar uma visualização espacial mais contínua e adequada dos dados.

Com os produtos obtidos, foram realizadas sobreposições de dados com o objetivo de interpretar a distribuição e os padrões da geodiversidade na região. Para isso, utilizou-se o Mapa de Uso e Ocupação do Solo, disponibilizado pelo portal TerraClass do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), referente ao ano de 2022, além dos limites das Unidades de Conservação, inventários de atrativos naturais (REIS *et al.*, 2020) e de geossítios (LUZARDO, 2012; SOUZA; RIBEIRO, 2024), bem como dados de processos minerários cadastrados na plataforma SIGMINE da Agência Nacional de Mineração (ANM).

Como forma de avaliação da geodiversidade *in situ*, foi realizado trabalho de campo na região para a descrição dos elementos da geodiversidade, aquisição de registros fotográficos e

demais avaliações referentes ao estágio de conservação da geodiversidade local. A Figura 12 exibe de maneira gráfica as etapas envolvidas para a realização deste estudo.

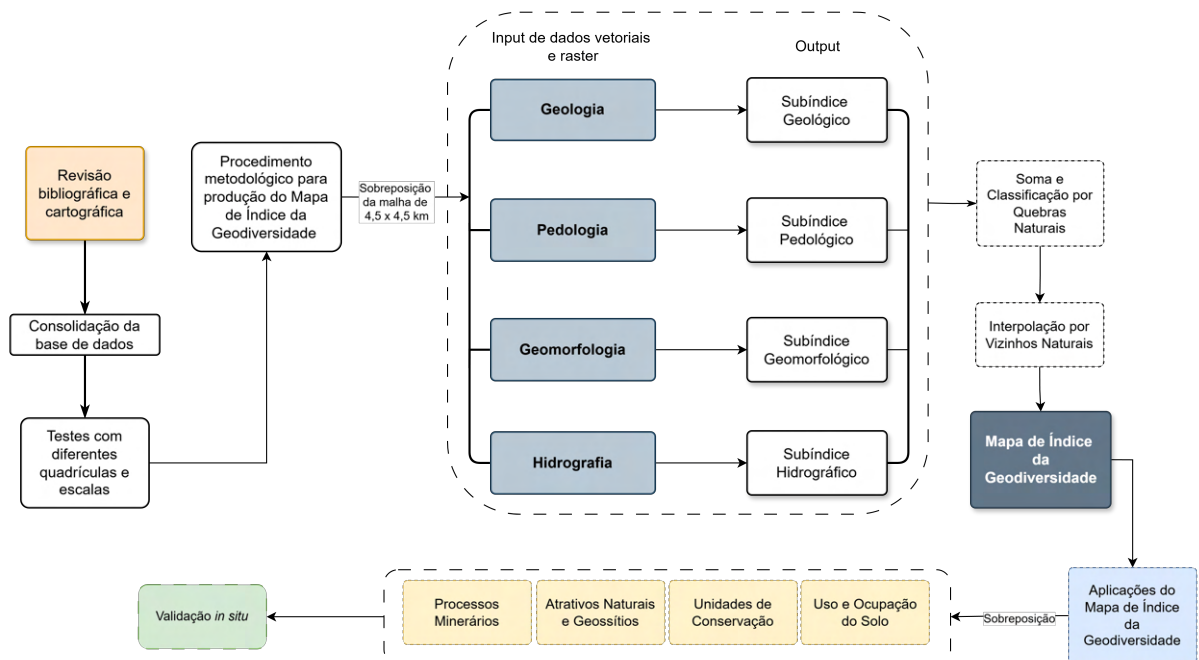


Figura 12 – Etapas metodológicas envolvidas no estudo.

Fonte: A autora (2025)

5

RESULTADOS

5.1. Artigo Submetido: *Geodiversity Index Map as a Tool for Spatial Analysis: Methodological Approaches and Applications in the Western Amazon*

Esta seção compreende de maneira integral o artigo submetido à revista *Geoheritage* (Figura 13).

Geoheritage
Geodiversity Index Map as a Tool for Spatial Analysis: Methodological Approaches and Applications in the Western Amazon
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	GEOH-D-25-00113	
Full Title:	Geodiversity Index Map as a Tool for Spatial Analysis: Methodological Approaches and Applications in the Western Amazon	
Article Type:	Original Article	
Corresponding Author:	Vivian Larissa Gonçalves Cavalcante Universidade Federal do Amazonas Manaus, Amazonas BRAZIL	
Corresponding Author Secondary Information:		
Corresponding Author's Institution:	Universidade Federal do Amazonas	
Corresponding Author's Secondary Institution:		
First Author:	Vivian Larissa Gonçalves Cavalcante	
First Author Secondary Information:		
Order of Authors:	Vivian Larissa Gonçalves Cavalcante	
	Raimundo Humberto Cavalcante Lima, PhD	
	Solange dos Santos Costa, PhD	
Order of Authors Secondary Information:		
Funding Information:	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (407726/2023-3 universal-CNPq/MCTI)	Not applicable

Figura 13 – Dados de submissão do artigo científico à revista *Geoheritage*

Geodiversity Index Map as a Tool for Spatial Analysis: Methodological Approaches and Applications in the Western Amazon

Vivian Larissa Gonçalves Cavalcante^{1*}, Raimundo Humberto Cavalcante Lima¹
and Solange dos Santos Costa¹

¹Federal University of Amazonas, Manaus, 69077-000, Amazonas, Brazil.

*Corresponding author(s). E-mail(s): vivian.lgcavalcante@gmail.com;
Contributing authors: humbertoclima@ufam.edu.br; solangecosta@ufam.edu.br;

Abstract

Recent advances in geodiversity studies have underscored the necessity for methodologies that can assess its spatial distribution and correlation with biodiversity and cultural heritage. Existing approaches, such as Geodiversity Index Maps (GIMs), provide a robust framework for comprehensive and objective evaluations, particularly in vast and logistically remote regions like the Amazon. This study applies an adapted GIM methodology to the municipality of Presidente Figueiredo, northern Amazonas, Brazil, integrating four sub-indices (geological, pedological, geomorphological and hydrographic) using open-access data. geological, pedological, geomorphological and hydrographic sub-indices. The results show that the highest geodiversity values are found in the southern region, within the transition zone between the Amazon Sedimentary Basin and the Amazon Craton, while the lowest values are found in the Balbina reservoir, where geological and geomorphological features are masked by the mass of water. In contrast, northern areas exhibit high geodiversity associated with linear geological structures, alluvial deposits, and floodplain gleysols. The study demonstrates the efficacy of GIMs in identifying priority areas for territorial management and their value as a tool for visualising complex geospatial data in diverse environments. The observed spatial correlation between high/low geodiversity zones and endemic species distribution raises a key question: to what extent does geodiversity sustain Amazonian biodiversity? The findings of this study contribute to geoheritage assessments and support sustainable land-use planning in ecologically sensitive regions.

Keywords: Brazilian Amazon, Presidente Figueiredo, Geodiversity Assessment

Introduction

Since its conceptual problematization in the 1990s, geodiversity has established itself as a structuring element for understanding natural systems and maintaining biodiversity (Serrano and Ruiz-Flaño 2007), gaining even greater relevance in the current scenario of global climate change

(IPCC 2022). To date, the most accepted and widespread definition of geodiversity has been proposed by Gray (2013), who describes it as the natural variety of geological, geomorphological, pedological and hydrological elements, including their assemblages, structures, systems and contributions to natural landscapes.

The acceptance of the term has gained prominence by demonstrating its integrative role between physical and biological systems, in which geodiversity serves as a support for the development of ecosystems (Gray 2013; Hjort et al. 2015). This interconnection has led to new approaches to analyzing its spatial variability on different scales. However, due to the breadth of elements and the complexities that exist in each region, there is no consensus on the formulation of methodologies to assess geodiversity.

Over the last two decades, different approaches have been developed, which can be classified into three main categories: i) qualitative methods; ii) quantitative methods; and iii) qualitative-quantitative methods (Zwolinski et al. 2018). Qualitative methods are usually descriptive and use nominal or ordinal data, based on expert knowledge, applied, for example, in the production of geological heritage inventories and the promotion of geoconservation strategies (Brilha 2015). Quantitative methods, on the other hand, use algorithms to process data from multiple sources, including field measurements, vector and raster databases, and other geospatial products, making this approach more widely used (Zwolinski et al. 2018; Crisp et al. 2021). The processing of this data has been carried out using different approaches, especially the development of indices, often linked to the generation of maps resulting from algebraic operations, called Geodiversity Index Maps (Pereira et al. 2013; Forte 2014; Araujo and Pereira 2018).

The Geodiversity Index Map was developed as a way to quantify the elements of geodiversity in a broad and objective way, covering all its fundamental aspects (Pereira et al. 2013), which can be used as a tool for territorial planning, defining priority areas for conservation, as well as having the potential to guide the creation of geoparks, economic-ecological zoning and geoconservation actions in traditional communities and indigenous land, areas where geodiversity is also a cultural heritage (Gravis et al. 2016).

Although quantitative methods have already been applied in the southeast, south and northeast regions of Brazil (Araujo and Pereira 2018; Silva et al. 2019; Pizani and Ruchkys 2020; Manosso et al. 2021; Torlay et al. 2022), their application in the Amazon faces unique challenges, such

as the scarcity of field data and the complexity of dynamic landscapes (Andrade et al. 2021). Recent studies have questioned the direct applicability of these index maps, demonstrating through comparative analyses that qualitative methodologies show greater adjustment to natural and anthropogenic elements, suggesting their use as a complementary tool (Torlay et al. 2022; Gonçalves et al. 2022; Scammacca et al. 2022).

In the Amazon region, such initiatives are still scarce, focusing on specific studies, such as methodological applications in the Brazilian Amazon (Silva et al. 2024) and the analysis of the Xingu River Basin (Silva et al. 2013, 2015). In the international Amazon, research has been carried out in the Aspirante Napo Sumaco Geopark in Ecuador (Vera et al. 2023) and in French Guiana, where it was used to assess the country's geodiversity (Scammacca et al. 2022). The other studies follow a qualitative approach, similar to what has been done by the Geological Survey of Brazil, through the Geodiversity Survey Program, which began in 2006. Among the products generated by this program is the Geoparks Project, from which proposals for the creation of geoparks throughout Brazil originated (Schobbenhaus and Silva 2011). The only one representing the Amazon region was the Cachoeiras do Amazonas Geopark project, located in the municipality of Presidente Figueiredo, in the state of Amazonas. However, since the proposal was first put forward, little progress has been made towards consolidating the project, the most important work being focused on inventorying the 18 geosites and 2 geodiversity sites that have been cataloged so far (Souza and Ribeiro 2024). In this sense, efforts to describe the geodiversity of the municipality of Presidente Figueiredo are limited to studies aimed at cataloging geosites carried out exclusively in the region proposed for the geopark.

One of the challenges for progress in this kind of study is the issue of logistics in the Amazon, which comprises remote regions that are difficult to access and, consequently, poorly mapped. Analysis of the region's geodiversity is therefore limited to the availability of consolidated data or the execution of large mapping projects.

In this light, this article presents a Geodiversity Index Map model developed for the Amazon, which integrates remote sensing and participatory validation with local communities, in order to

overcome the logistical and methodological limitations highlighted in the literature. Through this study, a spatial analysis of the municipality of Presidente Figueiredo (AM) was carried out, using the cartographic products generated as a subsidy for the interpretation of regional geodiversity and its application in territorial planning processes. As a contribution, the first Geodiversity Index Map of the area was drawn up, and a replicable protocol was defined for other regions, combining data from open databases with traditional knowledge about the Amazonian context.

Geological Background

The municipality of Presidente Figueiredo is located in the state of Amazonas, in the northern region of Brazil. It covers an area of approximately 25,500 km², with the municipal headquarters located approximately 120 km north of the capital Manaus, accessible by the federal highway BR-174 (Figure 1).

Geologically, the study area is located in the Guyana Shield, the northern component of the Precambrian Amazon Craton (Almeida et al. 1981) and partially covered to the south by the rocks of the Amazon Sedimentary Basin. The region is part of the Tapajós-Parima Geochronological Province (Santos et al. 2000), which comprises an orogenic belt running NW-SE, and the Uatumã-Anauá tectonostratigraphic domain (Reis et al. 2006), the latter representing a large area where Proterozoic rocks outcrop in the region of the Uatumã River Basin.

Rocks representing three acid to intermediate volcanic-plutonic events are found in the region, which are organized into four units: i) Iricoumé Group (1.90-1.88 Ga); ii) Água Branca Suite (1.90-1.87 Ga); iii) Mapuera Suite (1.88-1.86Ga); iv) Madeira Suite (1.83-1.74 Ga) (Simões et al. 2019).

The Iricoumé Group is represented by a group of volcanic rocks with variable compositions and textures, generally acidic to intermediate pyroclastic and effusive rocks, such as ignimbrites, tuffs, rhyolites, andesites and latites (Reis et al. 2006; Simões et al. 2019). These rocks are part of a large anorogenic magmatic event called the Uatumã magmatism (Pierosan et al. 2011; Teixeira et al. 2018).

The Água Branca Suite is made up of granitic rocks, generally monzogranites, granodiorites and quartz diorites, as well as subvolcanic rocks such as dacites, andesites and quartz latites (Simões et al. 2019). This unit is linked to a post-orogenic context followed by intraplate magmatism that formed the Madeira Suite (Valério et al. 2009).

The Mapuera and Madeira suites were formed from post-orogenic to anorogenic granitogenesis, with an intrusion relationship with the rocks of the Iricoumé Group (Reis et al. 2006). The Mapuera Suite is made up of granitic bodies intrusive in the volcanic rocks of the Iricoumé Group and in the granites of the Água Branca Suite, formed by syenogranites, monzogranites and alkali-feldspar granites (Simões et al. 2019). The Madeira Suite, in turn, is made up of granitic intrusive bodies with elongated to subcircular shapes, formed by the reactivation of a caldera system, including the Europa, Água Boa, Madeira and Paulista granites (Bastos Neto et al. 2014). These granitoids were separated based on the definition of facies and are carriers of Sn, Nb, Ta and F mineralizations (Bettencourt et al. 2016; Simões et al. 2019).

The Taxista Gabbro corresponds to a body with an elliptical to circular shape, which occurs as intrusions in the rocks of the Água Branca Suite, composed of gabbros to leucogabbros (Simões et al. 2019).

The Seringa Formation contains a group of rocks from Neoproterozoic basaltic flows, related to an extensional phase that gave rise to the sedimentation of the Prosperança Formation (Costi et al. 1984; Reis et al. 2006). The structures related to the emplacement of this body show distensional tectonic efforts in a NW-SE direction.

The Prosperança Formation comprises Neoproterozoic deposits of Arcosean sandstones, conglomerates and pelites formed in a deltaic environment at the mouth of a shallow sea, which outcrop over the volcanic rocks of the Iricoumé Group (Nogueira 1999; Barbosa and Nogueira 2011).

As from the Phanerozoic, the Amazon Sedimentary Basin system was installed on the craton, characterized as an intracontinental syncline where sedimentary and volcanic sequences were deposited (Cunha et al. 2007; Wanderley-Filho et al. 2010). The following units make up the framework of the Amazon Sedimentary Basin in the Presidente Figueiredo region: i) the Trombetas

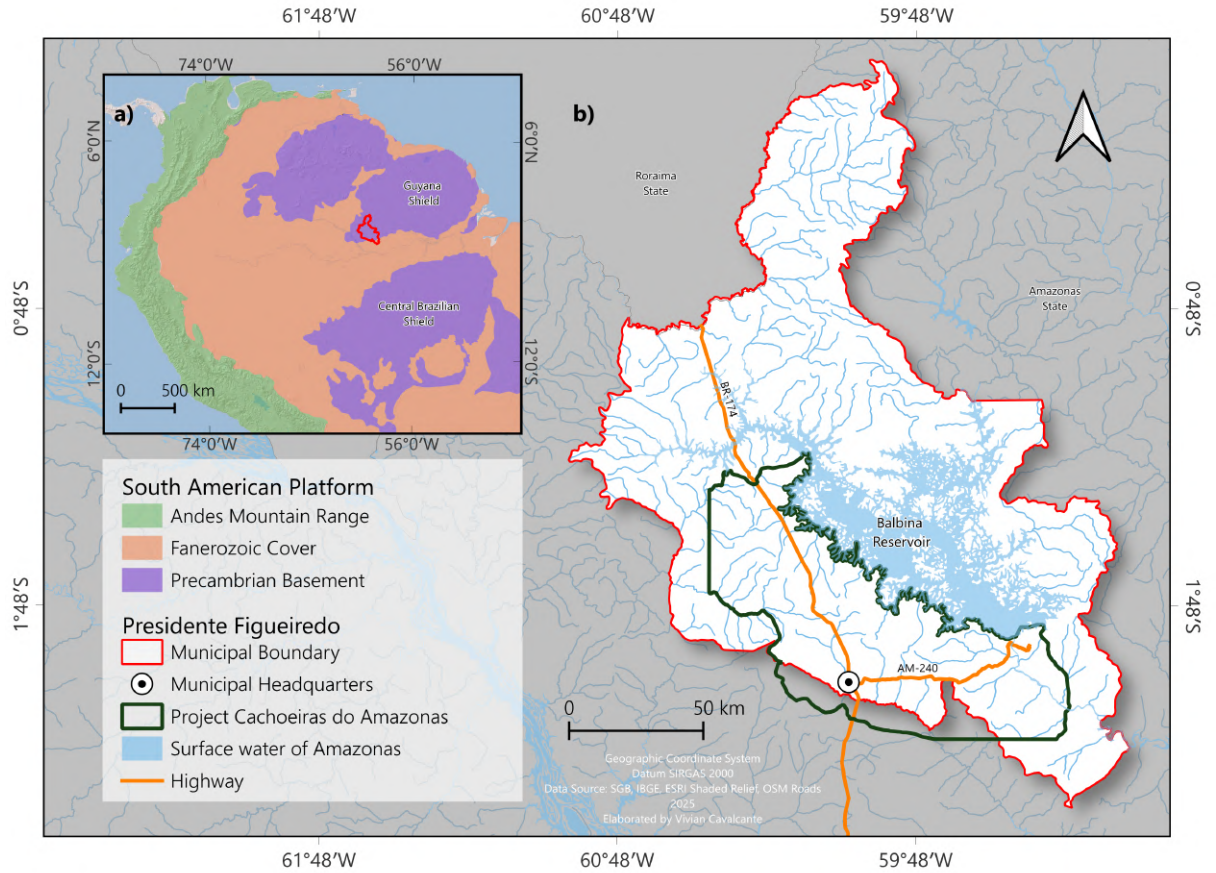


Fig. 1 Location map of the study area. a) Context on the South American Platform; b) Emphasis on the municipality of Presidente Figueiredo.

Group, which includes the Autás Mirim, Manacapuru and Nhamundá Formations; ii) the Urupadi Group; iii) the Curuá Group; and iii) the Alter do Chão Formation.

The Trombetas Group is formed by a sedimentary sequence of Ordovician-Devonian age (Grahm 2005) that was deposited in the early stages of the formation of the basin's syncline (Cunha et al. 2007). At its base is the Autás-Mirim Formation, formed by intercalations between sandstones, siltstones and shales, called rhythmites, belonging to a transgressive depositional sequence in a fluvial-estuarine and prairie environment, with eolian activity (Simões et al. 2019).

The Nhamundá Formation, in turn, is made up of quartz sandstones, bioturbated sandstones, with tabular cross-stratifications, wave marks, as well as fine sandstones and pelites with hummocky

cross-stratifications, characteristic of a sublittoral environment (Nogueira et al. 1999). The area of occurrence of the Nhamundá Formation delimits a zone of occurrence of sandstone caves (Nogueira and Sarges 2001).

The Manacapuru Formation, the top unit of the Trombetas Group, corresponds to sedimentary deposits formed in an offshore environment, inserted in a shallow marine platform influenced by storms, which emerge in the region as fossiliferous shales, with the presence of Lingulida brachiopods (Rocha et al. 2019).

The neotectonics imposed on the region are related to the current geomorphological configuration, and are a determining factor in the formation of the region's waterfalls and rapids, defined preferentially by faults and fractures in a NE-SW direction and, subordinately, with pseudo-castic

control, forming caves and caverns in sandstones (Nogueira and Sarges 2001).

Lateritic profiles formed on the region's rocks in two distinct periods, marking periods of stability between the neotectonic pulses (Costa 1991): i) in the Eocene-Oligocene, characterized by mature profiles with ferruginous, ferro-aluminous, bauxitic or bauxitic-phosphatic horizons; and ii) in the Pleistocene, with the formation of immature laterites, with poorly evolved profiles of ferro-aluminous-clay composition (Costa 1991; Costa et al. 1996). In the southern part of the municipality, where the substrate is made up of sedimentary rocks from the Amazon Basin, the relief is characterized by tabular features due to the formation of flattened surfaces by these lateritization processes (Horbe et al. 2001). In the central part of the municipality, where the rocks of the Amazon Craton outcrop, there is flattened relief associated with low-amplitude hilly areas, the occurrence of inselbergs and residual features, while in the northernmost part dissected plateaus replace these flattened surfaces and present the highest elevations in the region, with heights between 200 and 400 m (Maia and Marmos 2010).

Materials and Methods

According to Zwolinski et al. (2018), the selection of a specific geodiversity assessment method depends on 3 main factors: i) the purpose of the assessment; ii) the type of region to be studied and its spatial dimensions; and iii) the availability of appropriate spatial data. Given this, the methodology was selected according to the needs identified in Presidente Figueiredo. There is a set of geological data in the region, but it comes from different scales and sources. This emphasized the need to consolidate geoscientific data as an important stage in studies of the region's geodiversity.

This research was therefore based on the methodology for drawing up the Geodiversity Index Map, originally proposed by Pereira et al. (2013) and adapted by various authors (Araujo and Pereira 2018; Dias et al. 2021; Scammacca et al. 2022). This methodology has advantages when applied to a region such as Presidente Figueiredo, a municipality with an extensive territorial area, where many sites are difficult to reach and thus difficult to assess.

The methodological approach includes the definition of a regular grid, which is superimposed on multiple thematic maps covering the main aspects of local geodiversity. Algebraic operations were carried out cell by cell on each map in order to determine values called subindices. The sum of these subindices represents the Geodiversity Index values. In this sense, the Geodiversity Index Map proposed here is the graphic representation of the result of the sum of 4 subindices: (1) geological, (2) pedological, (3) geomorphological and (4) hydrographical. The subindices adopted took into account the specific characteristics of the region and the availability of data. Due to the limited availability of records in the databases, elements related to paleontology and mineral resources were not included.

To acquire the vector data on geology, pedology and geomorphology, the databases of the Geological Survey of Brazil (SGB) and the Environmental Data and Information Bank (BDiA) of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) were used. In addition to these sources, the Copernicus Digital Surface Model (DSM) with 30 m spatial resolution was used, from which information was obtained on geomorphology - altimetry and slope - and hydrography - drainages and springs. Table 1 shows the respective data used to obtain the subindices.

The research was carried out on a scale of 1:250,000 due to the availability of consistent information in existing databases. After initial comparative tests with different grid formats, we opted for a system with cells measuring 4.5 x 4.5 km, which provided better visualization of spatial values, generating maps with 1406 cells. All data processing was performed in the QGIS Desktop 3.34 software, with the aid of the OpenTopography DEM Downloader and Processing Saga NextGen Provider plugins.

Methodological Procedure for Generating Indices

After consolidating the database, the geodiversity elements - geology, pedology, hydrography and geomorphology - were organized into individual maps for analysis. The grid was superimposed on the maps using the Spatial Join Tool for the vector data shown in Figure 2, and the Zonal Statistics tool for the raster data shown in Figure 3. Figure 4

Table 1 Description of the elements used to calculate the geodiversity subindices.

Subindice	Data	Type of Data	Resolution	Data Source
Geological	Unidades Litoestratigráficas	Vector (poligon)	1:250.000	SGB (Riker et al. 2014a,b, 2016), BDIA
	Geological Structures	Vector (line)	1:250.000	Extracted from Copernicus DSM
Pedological	Soil Group	Vector (poligon)	1:250.000	BDIA
Geomorphological	Geomorphological units	Vector (poligon)	1:250.000	BDIA
	Elevation	Raster	30 m	Copernicus DSM
	Slope	Raster	30 m	Copernicus DSM
Hydrographic	Strahler Order	Vetorial (linha)	1:250.000	Extracted from Copernicus DSM
	Drainage density	Vector (line)	1:250.000	Extracted from Copernicus DSM
	Spring Density	Vector (point)	1:250.000	Extracted from Copernicus DSM

illustrates the entire methodological process used to obtain the geodiversity indices.

To compose the *Geological Index*, two main components were added: lithological diversity, obtained by counting the lithostratigraphic units present in each cell, and structural diversity, determined by calculating the density of lines extracted from the drainage and relief pattern, resulting in a raster file representing the density of linear structures.

The *Pedological Subindex* was obtained from the diversity of soil suborders, calculated in a similar way to the diversity of lithological elements. The Pedological Subindex therefore represents the diversity of soils at suborder level, determined from the count in each grid cell.

The *Geomorphological Subindex* is made up of the diversity of the elements: geomorphological units, altimetry and slope. The diversity of relief units was calculated by counting the units per cell, as was done for lithological and pedological diversity. For the variation in altimetry and slope, represented in raster files, the interval between the highest and lowest values in each cell was calculated using Zonal Statistics. The Geomorphological Subindex was therefore calculated

using the classification and sum of these three elements.

The *Hydrographic Subindex*, in turn, is the result of calculating diversity from the following three elements: Strahler order, drainage density and density of springs. The maximum Strahler order in each cell was calculated and divided by 2 from the vector file of single-line drainages. Drainage and spring density are obtained by calculating line and point density respectively. This operation generated a raster file, which was subjected to the calculation of the average density per cell by Zonal Statistics, resulting in vector files that could then be added together.

All the subindices were reclassified using the Jenks Natural Breaks Classification method, distributed into 5 magnitude classes: very low, low, medium, high and very high. The Jenks Natural Breaks method, widely used in spatial analysis, consists of a form of data grouping that minimizes the variance in each class and maximizes the variance between different classes (Zwolinski et al. 2018). These categories were assigned values from 1 to 5 respectively for the final calculation of the geodiversity index. This assignment of values was used as a form of normalization between the parameters. The Geodiversity Index

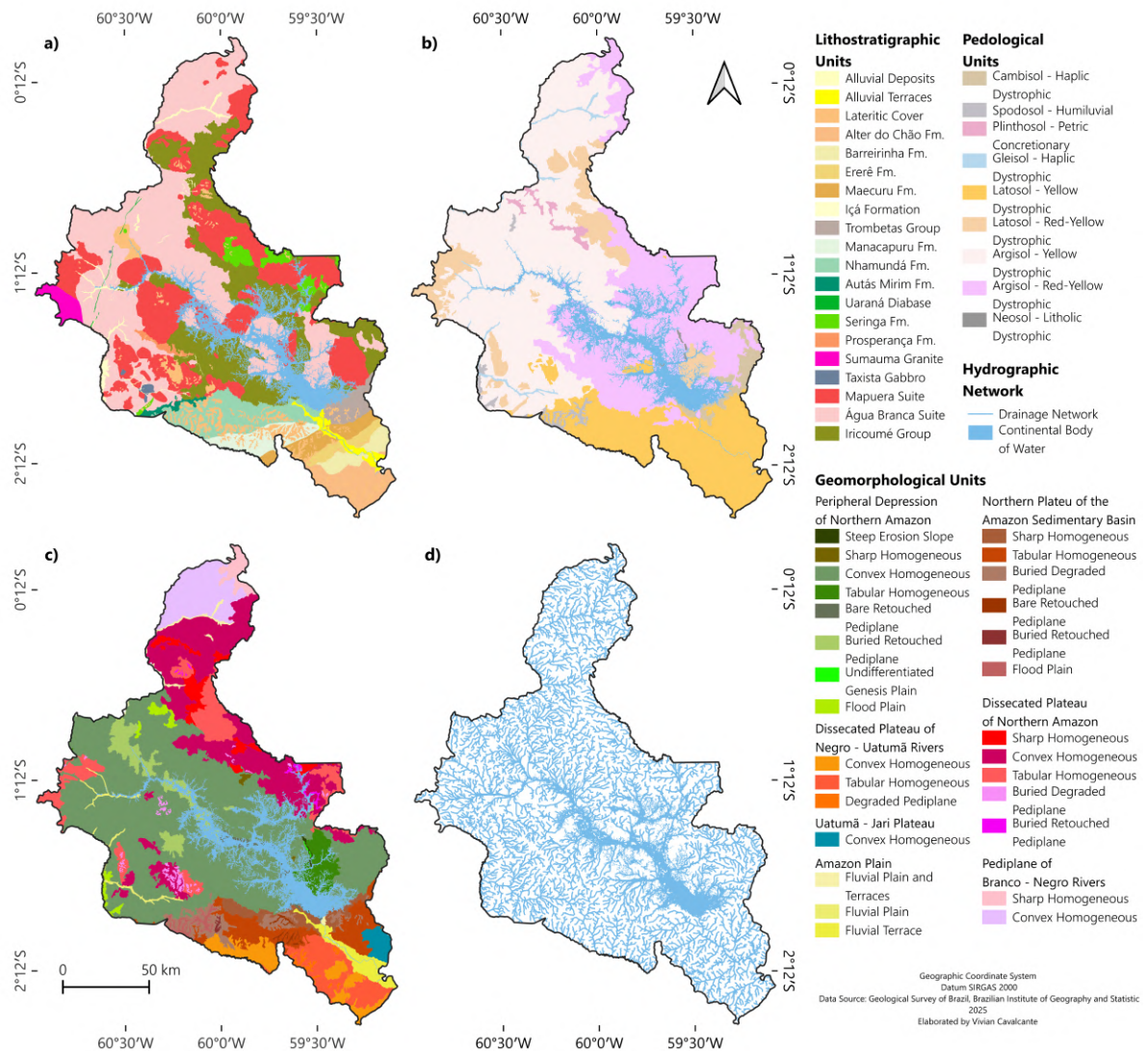


Fig. 2 Vector data used to compose the 4 geodiversity subindices. a) Lithostratigraphic units; b) Pedological units; c) Geomorphological units; and d) Drainage network.

Map was therefore obtained from the sum of the 4 subindices and also reclassified for visual representation.

Results

Subindices

The results from the study made it possible to establish 4 Geodiversity subindices, which represent the diversity of geological, pedological, geomorphological and hydrographical elements in the municipality of Presidente Figueiredo, on a

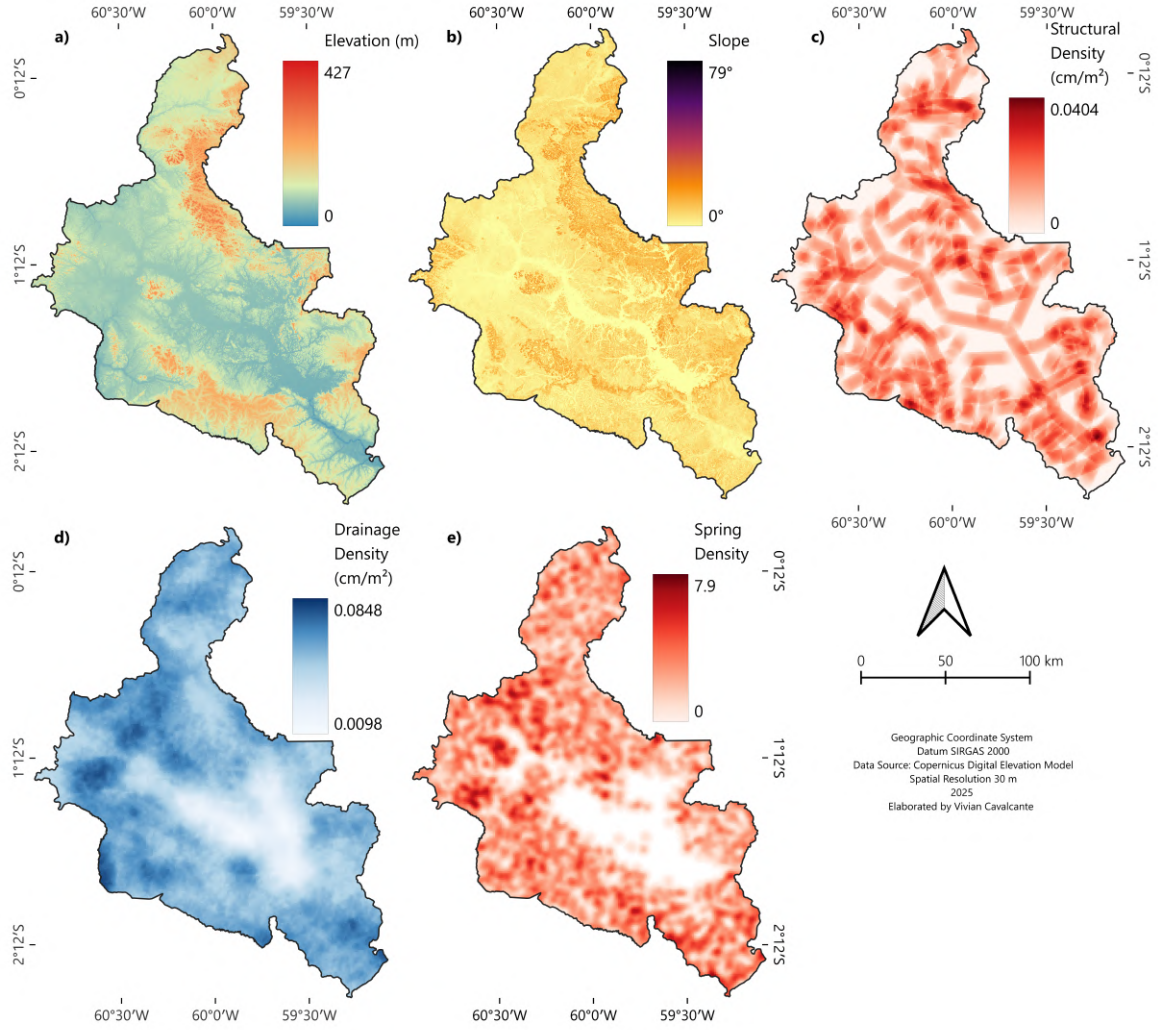


Fig. 3 Raster data obtained from the Copernicus DSM with a spatial resolution of 30 m was used to compose the Geological, Geomorphological and Hydrographic Subindices. a) Elevation; b) Slope; c) Density of linear structures; d) Density of drainage; and e) Density of springs.

scale of 1:250,000. These indicators were calculated according to the methodological parameters systematized in Figure 5.

The Geological Subindex, representative of lithological diversity and geological structures, showed higher values in 3 specific regions: i) in the southern portion of the municipality, where the sequence of sedimentary units of the Amazonas Basin is represented; ii) in the transition zone between the sedimentary basin region, represented by the Autás Mirim Formation, and the

units of the Amazonas Craton, in the southwestern portion of the study area; and iii) to the north, in areas where the cratonic units of the Mapuera Intrusive Suite and the Iricoumé Group are covered by recent sediments and lateritic crusts. Alluvial depositional systems (terraces and flood plains) and structural features (faults and lineaments) made a significant contribution to increasing the geodiversity indices in the three analysis units.

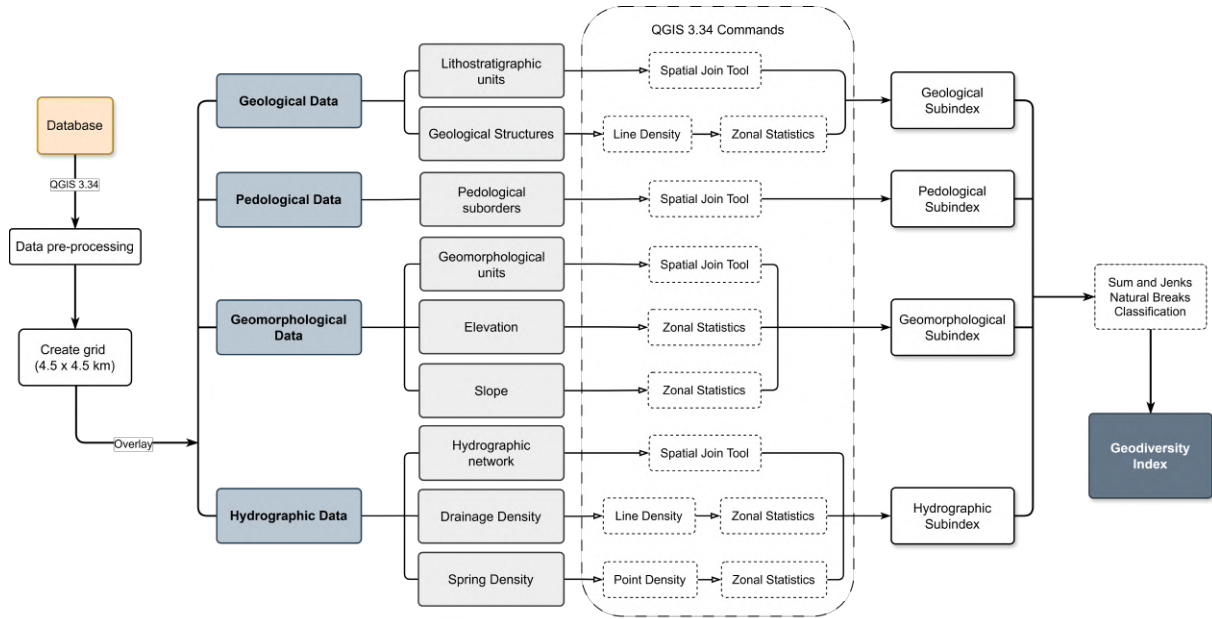


Fig. 4 Methodological procedures for acquiring the geological, pedological, geomorphological and hydrographical subindices using QGIS 3.34 software.

The Pedological Subindex, represented by the diversity of soils at suborder level, showed high values in the transitional zone between the Yellow Latosol, which is formed predominantly on the sedimentary units of the Amazon Basin, and the Cambissolos and Argissolos. Pedological analyses identified a greater diversity of soils in the southwestern sector of the municipality, with a significant occurrence of Gleissols and Spodosols, as classified in the Pedology Technical Manual (IBGE 2015). In the other areas, soils with low pedogenetic variability predominated, reflected in consistently lower geodiversity indices, characterizing more homogeneous geomorphological environments.

The Geomorphological Subindex, generated from the sum of the diversity of geomorphological units and the variation in elevation and slope, had its high and very high indices marking a contact zone between the edge of the Amazon Sedimentary Basin and the Amazon Craton, in the central-southern region of the municipality, forming a NW-SE band of high indices. Below this band, average values predominate in the Plateaus of the Amazon Basin and the Negro and Uatumbá Rivers, with medium to low altimetry and slope variations. To the north of this strip, medium to

low indices predominate, located in the Peripheral Depressions of Northern Amazonia, a region with less variation in elevation and slope, forming features of valleys and plains, where the water body of Lake Balbina is also concentrated. In the north-eastern part of the municipality, the high indices are a response to the greater variations in elevation and slope in a relief of Dissected Plateaus formed on rocks of the crystalline shield.

In the Hydrographic Subindex, there was clear spatial variability, with distinct patterns observed in different sectors of the area. The southern region stood out for its higher values (classified as “very high”), directly associated with the drainage system of the Uatumbá River, the main water-course in the area. In contrast, Lake Balbina - formed by the damming of this same river - had the lowest indices (ranging from low to very low), showing the negative impact of artificial dams on hydrographic diversity. Intermediate patterns were identified in other geomorphological units: the southwestern region showed high values, particularly associated with the Igarapé Canoa and Rio Pardo systems, while the northeastern portion showed high indices (high to very high) along the northern stretch of the Uatumbá River. The

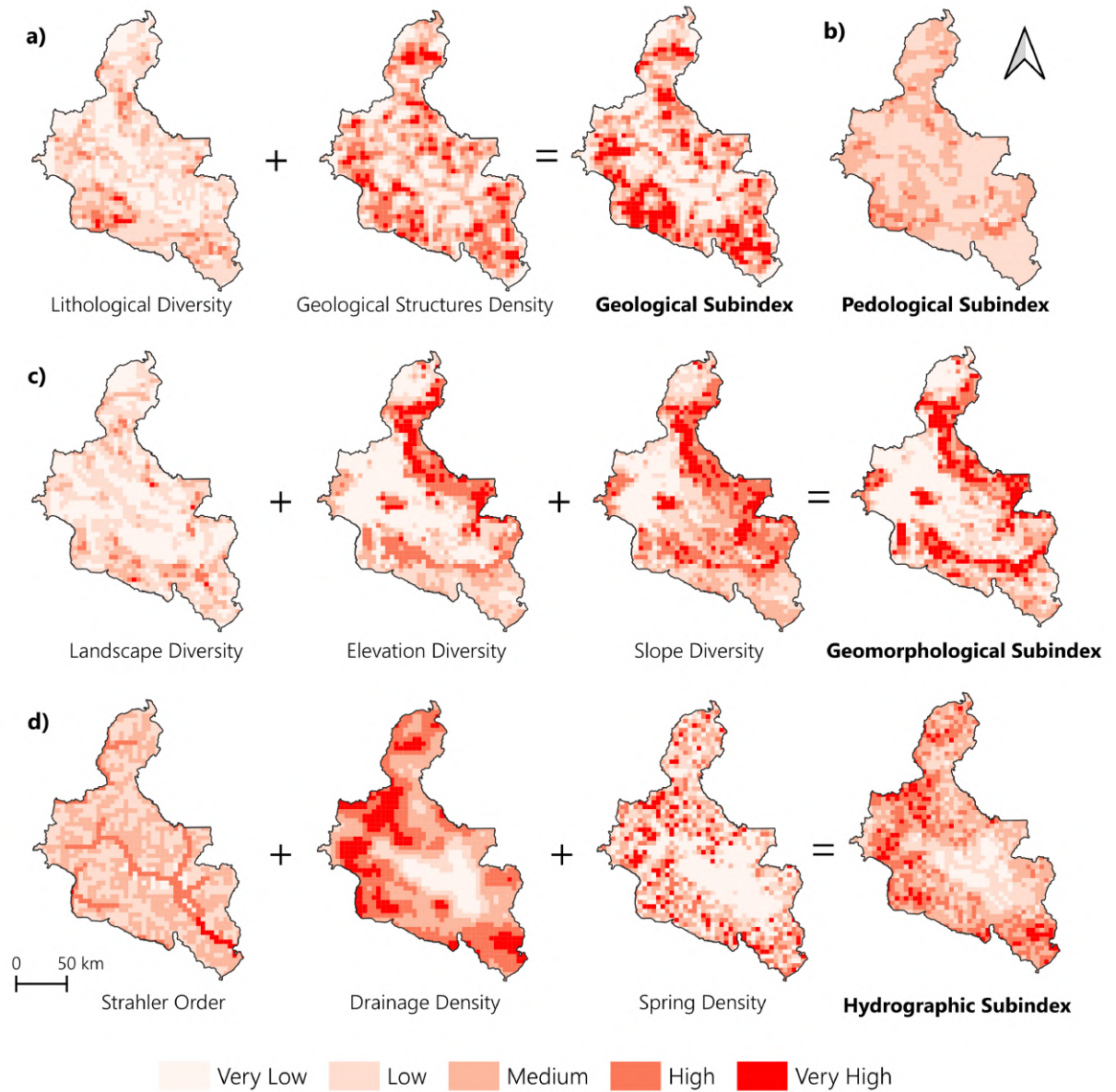


Fig. 5 a) The Geological Subindex represents the sum of the lithological diversity and the geological structures density; b) The Pedological Subindex is composed by the diversity of soil suborders; c) The Geomorphological Subindex is the sum of the geomorphological units (landscape) diversity; and d) The Hydrographic Subindex consists in the sum of the values obtained with the Strahler Order of the hydrographic network, the drainage density and the spring density.

integrated analysis of these patterns showed a significant spatial correlation between the density of springs and the subindex values, indicating that areas with a higher concentration of springs tend to have greater hydrographic diversity.

Figure 6 shows the Geodiversity Subindices after interpolation by Natural Neighbors, which

provided a better visualization of the results and serves as a basis for overlapping in future analyses.

Geodiversity Index Map

The Geodiversity Index Map (Figura 7) is obtained by combining relevant factors to understand the context of the municipality of Presidente

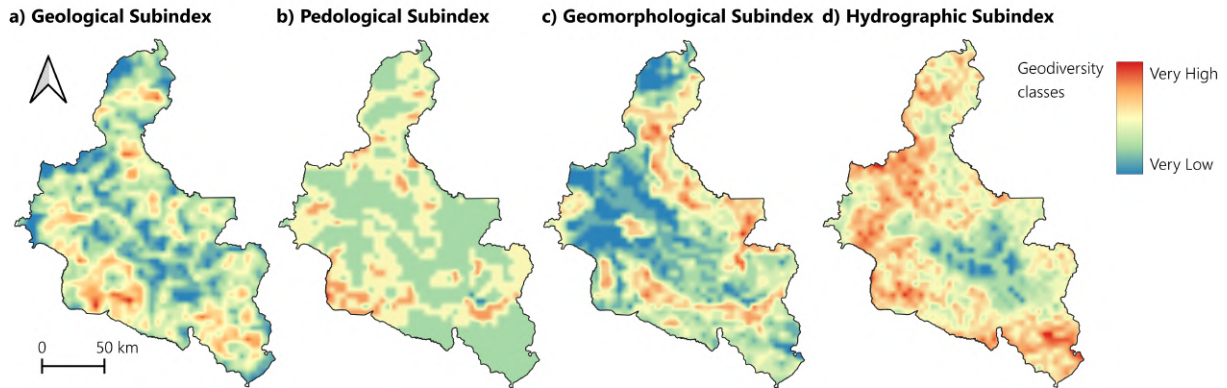


Fig. 6 Subindex maps interpolated with the Natural Neighbors algorithm.

Figueiredo, represented by the subindex maps. High indices are mainly concentrated along two areas: i) a NW-SE strip in the central-southern part of the municipality, characterizing a geological, pedological and geomorphological transition zone between the Amazon Sedimentary Basin and the Amazon Craton; ii) the north-northeast region, characterized predominantly by granitic rocks of the Mapuera Intrusive Suite and volcanic rocks of the Iricoumé Group, affected by recent sedimentary deposits, developed on a plateau relief with the highest altimetric amplitudes in the region. Low to very low indices delimit a central area in Presidente Figueiredo, reflecting the influence of Lake Balbina on this representation. Geomorphologically, it is characterized by depressions and plains with little variation in elevation and slope. In contrast, other areas drained by the Uatumã River have high to very high indices.

Discussion

The following discussions address critical issues and limitations inherent to the study in Amazonian environments, as well as the strategies adopted to minimize uncertainties, with a view to improving future geodiversity mapping in similar contexts.

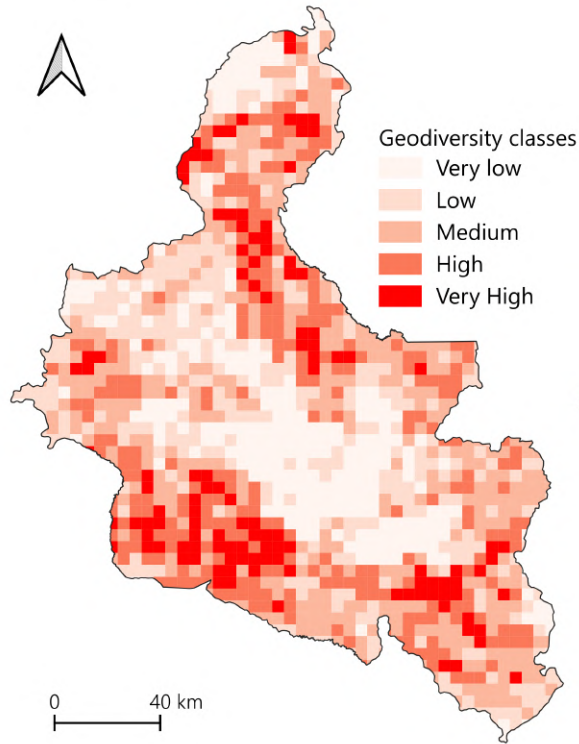
To develop a representative response to local geodiversity, a variety of databases and types of cartographic products were integrated at a scale of 1:250,000. The determination of this scale relied on consultations with the country's

main data sources, including the Geological Survey of Brazil (SGB), the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), the National Water Agency (ANA), the Brazilian Agricultural Research Corporation (EMBRAPA), among other studies published in scientific journals.

The SGB is one of the main entities responsible for research, mapping and the dissemination of scientific data in Brazil, especially in the Amazon, a region that faces logistical challenges due to its high forest density and access routes that are often limited to waterways. Systematic mapping is carried out in all Brazilian states, resulting in various reports, maps and vector products. In the municipality of Presidente Figueiredo, a map is available with complete coverage at a scale of 1:1,000,000, from the reports *Geology and Mineral Resources of the State of Amazonas* (Reis et al. 2006) and *Geodiversity of the State of Amazonas* (Maia and Marmos 2010), providing data on geology, pedology, geomorphology and hydrography, while mapping at a scale of 1:250,000 scale mapping only partially covers the area, with three geological sheets: Novo Airão (Riker et al. 2014a), Rio Uatumã (Riker et al. 2014b) and Rio Curiuaú (Riker et al. 2016).

The initial scale of 1:1,000,000, available in the full coverage of the SGB, was initially adopted for the study. However, preliminary tests revealed low variance between the classes analyzed, which prompted the adoption of a scale more suited to the characteristics of the region. To this end, some

a) Geodiversity Index Map



b) Interpolated Geodiversity Index Map

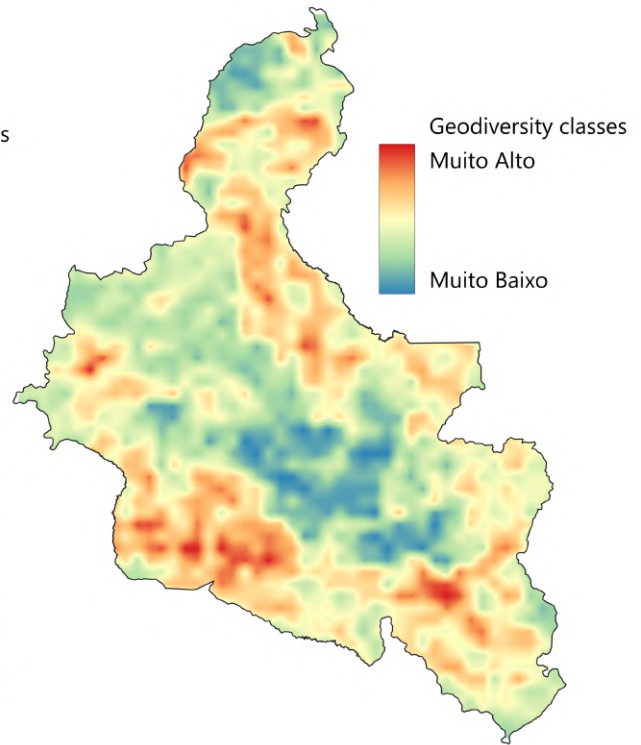


Fig. 7 a) Geodiversity Index Map resulting from the sum of the 4 subindices; and b) Geodiversity Index Map interpolated with the Natural Neighbors algorithm.

adjustments had to be made in order to build a database that could be applied.

To make up the scope of the work, we also used the data available in the IBGE's Environmental Data and Information Database (BDiA), which provides coverage at varying scales from 1:5,000,000 to 1:250,000 across the whole of Brazil. This database was built by compiling data from studies carried out since the 1970s, starting with the RADAMBRASIL project, which aimed to collect data on natural resources in Brazil, specifically on geology, geomorphology, pedology and land use, using radar images and field data (IBGE 2023).

Geological Data

The geological data was obtained by analyzing and combining the SGB and BDiA data, which resulted in an adapted geological map proposed in

this study. The use of an adapted map was necessary to overcome some of the limitations of the two databases used.

On the one hand, the data presented by the SGB, produced through systematic mapping, represents a reliable source which, however, only partially covers the study area at the desired scale. On the other hand, the BDiA represents good coverage, but with some inconsistencies in the data set. This is because this database is produced by compiling data from a variety of study sources and is constantly evolving. However, for application in the production of the Geodiversity Index Map, this data was adjusted, using the available SGB data as a form of validation when possible.

In order for this geological map to be compatible with the scale of the study, the lithostratigraphic hierarchy was used at Formation and Member level for sedimentary and volcanic units, and at Suite and Body level for intrusive

and metamorphic igneous units, according to the Stratigraphic Nomenclature Guide of [Petri et al. \(1986\)](#). This procedure resulted in a map with 19 lithostratigraphic units.

Pedological Data

The available pedological data can be found in the SGB, BDIA and EMBRAPA databases. EMBRAPA is a reference in the study of soils in Brazil, however, its mapped coverage is on a scale of 1:5,000,000, available on the Soil Map of Brazil. This map shows the soil units in hierarchical order. The SGB has mapping on a scale of 1:1,000,000, available in the report Geodiversity of the State of Amazonas, with details at suborder level. The BDIA database currently has pedological data at a scale of 1:250,000, with details of order, suborder and major pedological group, and was therefore used to compose the Pedological Subindex map, represented by 9 soil classes.

Geomorphological Data

BDIA platform provides geomorphological mapping data that includes up to the fourth taxonomic level, defined according to the Technical Manual of Geomorphology ([IBGE 2009](#)) as Relief Modeling, here called geomorphological units. To compose the geomorphological assessment, this geomorphological compartmentalization data was combined with elevation and slope variation analyses.

Hydrographic Data

A very important point in Presidente Figueiredo is the existence of the Balbina reservoir, which covers an area of around 2360 km², occupying almost 10% of the municipality. This reservoir was formed by the damming of the Uatumã River for the construction of the Balbina Hydroelectric Power Plant (HPP), which was completed in 1989. Thus, the presence of an artificially accumulated body of water influences the way geodiversity is assessed. As a result, there is a gap in the representativeness of the physical parameters in the area covered by the lake, which can be seen in the maps of the region. Regarding the hydrographic parameter, therefore, the drainage density analysis focused on using the single drainages extracted from the DSM, compared with the [Venticinque et al. \(2016\)](#) database. To remove the bias of the

large body of water, its influence was analyzed and discussed separately.

ANA maintains a metadata catalog where it provides hydrographic information for the entire country, including natural and artificial water bodies and bifilar watercourses. This data was used to spatialize Lake Balbina. The single-line drainages were obtained from the DSM, using SAGA Gis, comprising river channels up to Strahler order 7 ([Strahler 1952](#)). Strahler's order is used in geodiversity studies as a way of identifying major river channels and understanding the complexity of drainage networks. [Pereira et al. \(2013\)](#) and other authors ([Scammacca et al. 2022](#)) make a direct link between the highest geodiversity values and the highest Strahler Order values and the presence of bodies of water. However, there is still a knowledge gap regarding the relationship between the presence of artificial reservoirs and geodiversity. Therefore, as a way of analyzing the surface waters of the study area, the densities of drainages and springs present in the region were analyzed.

Applications in the Western Amazon

Previous studies ([Pereira et al. 2013](#); [Silva et al. 2015](#)) suggest applying the Geodiversity Index Map as a tool to aid urban planning and land management. However, the specialized literature records limited examples of the practical application of this methodology, both in national and international Amazonian contexts, such as the study by [Bétard and Peulvast \(2019\)](#) who defined hotspots to define priority areas for geoconservation based on geodiversity indices. Another example was shown by [Santos et al. \(2017\)](#), by overlaying the Geodiversity Index Map and urban growth as a way of identifying regions most impacted by urbanization.

The lack of comparative studies in the region highlights a significant gap in the understanding of geodiversity patterns in humid tropical ecosystems. The Amazon is a heterogeneous and complex biome, which encompasses not only geological, but also biological, cultural and social diversity ([Hoorn et al. 2010](#); [Val et al. 2022](#)). In this scenario, understanding the territories within this area represents a significant challenge, including the municipality of Presidente Figueiredo. Despite its remarkable tourism potential due to

the diversity of its natural attractions, there is a lack of integration of these aspects in urban planning and land use (Reis et al. 2020).

The following proposes alternatives for applying the Geodiversity Index Map as a tool for integrated spatial analysis.

Data Visualization

Previous studies have highlighted that one of the main applications of the Geodiversity Index Map is territorial planning. One of the ways found to apply the results obtained involves transforming technical data into information accessible to different audiences. One strategy adopted to communicate this information was to select points of interest within the Index Map and integrate them into a thematic map. This approach makes visualization more attractive and can be adapted to different types of data, from a broader scenario, using the geodiversity index, to a more specific application, with subindex maps. In this application, both high and low indices were able to provide insights for the interpretation of geodiversity, as shown in Figure 8.

Identification of Priority Areas for Territorial Management and Future Research

The results obtained using the Geodiversity Index Map show that low and very low indices predominate in the area occupied by the Lake Balbina body of water. In a superficial analysis, this result could simply demonstrate the presence of an area with less influence from geodiversity elements. However, it is essential that this interpretation takes into account the anthropogenic effect of environmental homogenization caused by the damming of the Uatumã River in the region.

This damming took place as part of the construction of the Balbina Hydroelectric Power Plant, completed in 1989, with the aim of meeting the energy needs of the city of Manaus. As a result, in the mapping work that followed, the lake was identified as a “continental body of water”, with no subsequent geological or pedological records. The presence of low geodiversity indices may therefore reflect a gap in knowledge or, in the case of Presidente Figueiredo, an intervention in the landscape, the consequences of which have been

the loss of geomorphological connectivity characteristic of the natural systems of the Amazon and the masking of geological and pedological elements. The consequences of the formation of this lake have been studied in terms of the loss of biodiversity, which has formed a catastrophic environmental scenario due to the large amount of greenhouse gases generated, with the release of around 5.2 million tons of methane per year (Fearnside 1995). In addition to the loss of around 236,000 hectares of primary forest through deforestation, the construction of the plant also caused the death of wildlife and flooded indigenous and riverine lands (Gribel 1989). On the other hand, there are still no answers about the loss of geodiversity. The results therefore highlight the need for a deeper understanding of the connection between the loss of biodiversity and geodiversity caused by the creation of the reservoir, as well as its impacts on traditional populations.

Conclusion

The systematic integration of the databases made it possible to fill in the information gaps, resulting in complete cartographic coverage of the municipality at a scale of 1:250,000. This scale proved to be ideal for the study, as it offered an adequate level of detail to characterize local geodiversity, unlike the 1:1,000,000 scale, which proved to be insufficiently representative for the research objectives.

The Geodiversity Index Map of the municipality of Presidente Figueiredo showed that the highest geodiversity indices are associated with the transition region between the Amazon Sedimentary Basin and the Amazon Craton, which mark significant changes in the geology, pedology and geomorphology of the region. Other areas with high indices are associated with the presence of recent sedimentary deposits and geological structures that define the relief and drainage patterns.

On the other hand, the lowest indices were concentrated in the central region of the municipality, which stands out due to the extensive presence of Lake Balbina. The results indicate not only a homogenization of the flooded area, but also a gap in geological knowledge. Although the ecological impacts caused by the construction of the dam have been widely documented, the consequences

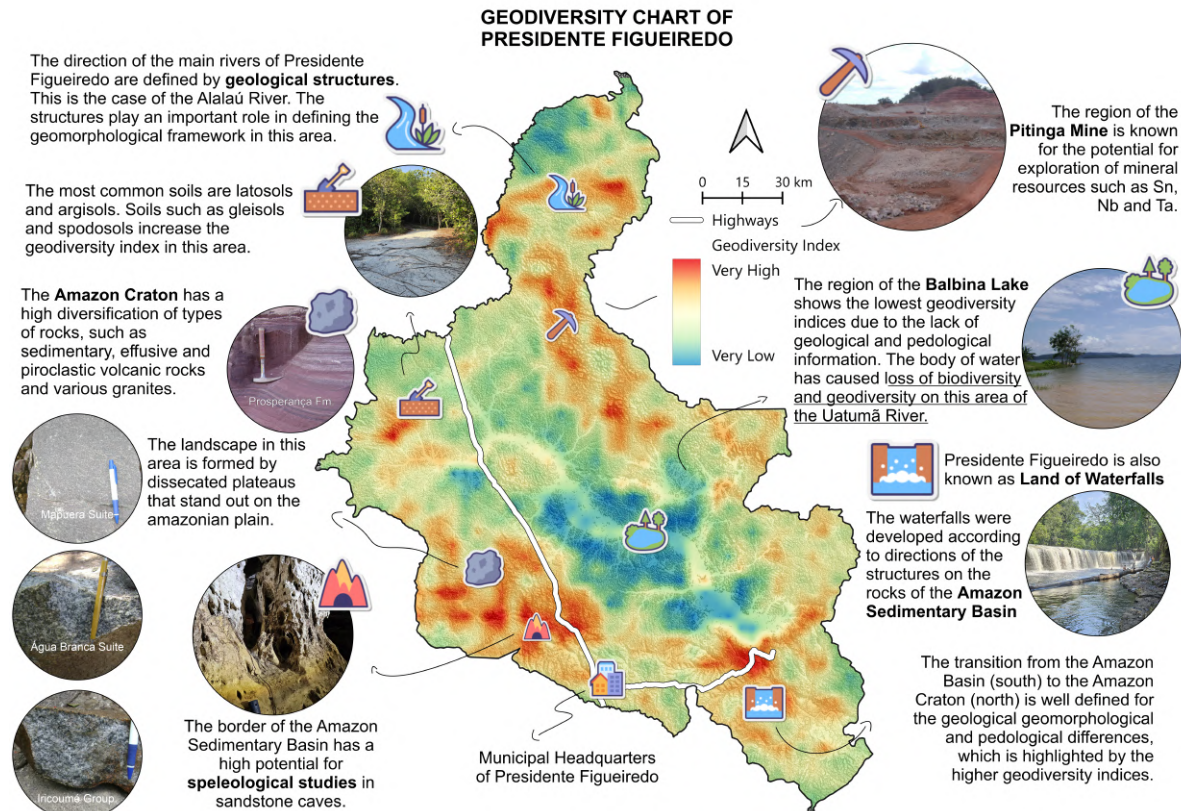


Fig. 8 Thematic map created from the results obtained in the Geodiversity Index Map calculations, highlighting the most important elements in Presidente Figueiredo's geodiversity through icons and simplified language.

for the loss of geodiversity constitute a gap in scientific knowledge. This is mainly due to the lack of studies that combine the joint assessment of biodiversity and geodiversity in the Amazon, which makes it difficult to define consistent parameters for a broad understanding of this scenario.

In summary, the methodology developed has significant advantages for application in the Amazon, as it allows for the combination of a variety of different types of data, adaptability to other regions and scales, and reaching places that are difficult to access. In addition, the Geodiversity Index Map is a product that can be easily compared with other data through overlay, which can be used in a combined manner to promote qualitative-quantitative assessments. However, the results show that the mere quantification of geodiversity elements, without spatial contextualization or defined objectives, is of limited use, reinforcing the need for critical interpretation of the results. The main limitation of

using an index map is the dependence on reliable databases. However, it should be noted that this study proposes an initial model for a product that is subject to constant adaptation and updating. In future studies, it is hoped that the interaction between geodiversity and biodiversity can be further explored in the Presidente Figueiredo region, so that new geoconservation proposals can be promoted.

Acknowledgements. We gratefully acknowledge CAPES and CNPQ (Process No. 407726/2023-3 universal-CNPq/MCTI) for their financial support and professors Marcos Antonio Leite do Nascimento and Armando Brito da Frota Filho for their support and guidelines during the process of formulating this research.

Funding. This study was supported by the Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) Grant 407726/2023-3 universal-CNPq/MCTI. Vivian Larissa Gonçalves

Cavalcante also acknowledges Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) for the master's scholarship - Finance Code 001.

Conflict of Interest. The authors declare no competing interests.

Author Contribution. Vivian Larissa Gonçalves Cavalcante: Conceptualization, Investigation, Visualization, Writing – original draft.

Raimundo Humberto Cavalcante Lima: Supervision, Funding acquisition, Project administration, Writing – review and editing.

Solange dos Santos Costa: Supervision, Validation, Writing – review and editing.

All authors contributed to fieldwork design and data interpretation. The final manuscript was reviewed and approved by all authors.

References

- Almeida FFM, Hasui Y, Brito Neves BB, et al (1981) Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews* 17(1-2):1–29. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9)
- Andrade MMN, Espirito-Santo CM, Lopes WF, et al (2021) Amazon geodiversity state of art. *Fronteiras* 10(1):380–405. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2021v10i1.p380-405>
- Araujo A, Pereira D (2018) A new methodological contribution for the geodiversity assessment: Applicability to ceará state (brazil). *Geoheritage* 10(4):591–605. <https://doi.org/10.1007/s12371-017-0250-3>
- Barbosa RCM, Nogueira ACR (2011) Paleoambiente da formação prosperança, embasamento neoproterozóico da bacia do amazonas. *Revista Brasileira de Geociências* 41(1):01–17. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.20114110117>
- Bastos Neto AC, Ferron JT, Chauvet A, et al (2014) U–pb dating of the madeira suite and structural control of the albite-enriched granite at pitinga (amazonia, brazil): Evolution of the a-type magmatism and implications for the genesis of the madeira sn–ta–nb (ree, cryolite) world-class deposit. *Precambrian Research* 243:181–196. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.021>
- Bettencourt JS, Juliani C, Xavier RP, et al (2016) Metallogenic systems associated with granitoid magmatism in the amazonian craton: An overview of the present level of understanding and exploration significance. *Journal of South American Earth Sciences* 68:22–49. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.014>
- Brilha J (2015) Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage* 8(2):119–134. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>
- Bétard F, Peulvast J (2019) Geodiversity hotspots: Concept, method and cartographic application for geoconservation purposes at a regional scale. *Environmental Management* 63(6):822–834. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01168-5>
- Costa BSC, Bemerguy LR, Hasui Y, et al (1996) Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *GEONOMOS* 4(2):23–44
- Costa ML (1991) Aspectos geológicos dos lateritos da amazônia. *Revista Brasileira de Geociências* 21(2):146–160. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1991146160>
- Costi HT, Santiago AF, Pinheiro SS (1984) Projeto Uatumã / Jatapu: relatório final. CPRM
- Crisp J, Ellison J, Fischer A (2021) Current trends and future directions in quantitative geodiversity assessment. *Progress in Physical Geography* 45(4):514–540. <https://doi.org/10.1177/0309133320967219>
- Cunha PRC, Melo JHG, Silva OB (2007) Bacia do amazonas. *Boletim de Geociências - Petrobras* 15(2):227–251
- Dias M, Domingos J, Costa S, et al (2021) Geodiversity index map of rio grande do norte state,

- northeast brazil: Cartography and quantitative assessment. *Geoheritage* 13(1):1–15. <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00532-4>
- Fearnside PM (1995) Hydroelectric dams in the brazilian amazon as sources of 'greenhouse' gases. *Environmental Conservation* 22(1):7–19. <https://doi.org/10.1017/s0376892900034020>
- Forte J (2014) Avaliação quantitativa da geodiversidade: desenvolvimento de instrumentos metodológicos com aplicação ao ordenamento do território. Master's thesis, Universidade do Minho
- Gonçalves J, Mansur K, Santos D, et al (2022) Is it worth assessing geodiversity numerically? a comparative analysis between quantitative and qualitative approaches in miguel pereira municipality, rio de janeiro, brazil. *Geosciences (Switzerland)* 12(9):347. <https://doi.org/10.3390/geosciences12090347>
- Grahn Y (2005) Silurian and lower devonian chitinozoan taxonomy and biostratigraphy of the trombetas group, amazonas basin, northern brazil. *Bulletin of Geosciences* 80(4):245–276
- Gravis I, Németh K, Procter JN (2016) The role of cultural and indigenous values in geosite evaluations on a quaternary monogenetic volcanic landscape at ihumātao, auckland volcanic field, new zealand. *Geoheritage* 9(3):373–393. <https://doi.org/10.1007/s12371-016-0198-8>
- Gray M (2013) *Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature*, 2nd edn. Wiley-Blackwell
- Gribel R (1989) The balbina disaster: the need to ask why? *Ecologist* 20(4):133–135
- Hjort J, Gordon JE, Gray M, et al (2015) Why geodiversity matters in valuing nature's stage: Why geodiversity matters. *Conservation Biology* 29(3):630–639. <https://doi.org/10.1111/cobi.12510>
- Hoorn C, Wesselingh FP, Ter Steege H, et al (2010) Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity. *Science* 330(6006):927–931. <https://doi.org/10.1126/science.1194585>
- Horbe AMC, Nogueira ACR, Horbe MA, et al (2001) A lateritização na gênese das superfícies de aplanamento da região de Presidente Figueiredo Balbina, Nordeste do Amazonas, vol 2, Sociedade Brasileira de Geologia Núcleo Norte, pp 145–176
- IBGE (2009) Manual técnico de geomorfologia, 2nd edn. IBGE
- IBGE (2015) Manual técnico de pedologia, 3rd edn. IBGE
- IBGE (2023) Banco de dados e informações ambientais (bdia)
- IPCC (2022) Summary for policymakers. In: Pörtner HO, Roberts D, Poloczanska E, et al (eds) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>
- Maia MAM, Marmos JL (2010) Geodiversidade do Estado do Amazonas. CPRM
- Manosso F, Zwoliński Z, Najwer A, et al (2021) Spatial pattern of geodiversity assessment in the marrecas river drainage basin, paraná, brazil. *Ecological Indicators* 126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107703>
- Nogueira ACR (1999) Depósitos costeiros neoproterozóicos da formação prosperança, município de presidente figueiredo, estado do amazonas. In: VI Simpósio de Geologia da Amazônia, pp 412–415
- Nogueira ACR, Sarges RR (2001) Characterization and genesis of waterfalls of the presidente figueiredo region, northeast state of amazonas, brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 73(2):287–301. <https://doi.org/10.1590/s0001-37652001000200012>
- Nogueira ACR, Truckenbrodt W, Soares EAA (1999) O icnogênero arthropycus de depósitos

- sublitorâneos da formação nhamundá (siluriano inferior) da bacia do Amazonas, região de presidente figueiredo. *Brazilian Journal of Geology* 29(2):135–140
- Pereira D, Pereira P, Brilha J, et al (2013) Geodiversity assessment of paraná state (brazil): An innovative approach. *Environmental Management* 52(3):541–552. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>
- Petri S, Coimbra AM, Amaral G, et al (1986) Guia de nomenclatura estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências* 16:376–415
- Pierosan R, Lima EF, Nardi LV, et al (2011) Paleoproterozoic (1.88ga) felsic volcanism of the iricoumé group in the pitinga mining district area, amazonian craton, brazil: insights in ancient volcanic processes from field and petrologic data. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 83(3):921–937. <https://doi.org/10.1590/s0001-37652011000300012>
- Pizani FMC, Ruchkys U (2020) Quantificação da geodiversidade e suas implicações para a geoconservação da estrada real – porção centro-norte do caminho dos diamantes. *Geography Department University of Sao Paulo* 40:191–202. <https://doi.org/10.11606/rdg.v40i0.166410>
- Reis JRL, Faria IF, Fraxe TJP (2020) Geoconservação e geoturismo na amazônia: contexto e perspectivas no geoparque cachoeiras do Amazonas. *Revista Turismo em Análise* 31(1):50–76. <https://doi.org/10.11606/ISSN.1984-4867.V31I1P50-76>
- Reis NJ, Almeida ME, Lopes S, et al (2006) *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas*. CPRM
- Riker SRL, Lima FJC, Motta MB, et al (2014a) Carta geológica da folha rio uatum  sa-21-y-a
- Riker SRL, Lima FJC, Motta MB, et al (2014b) Carta geológica da folha rio uatum  sa-21-y-a
- Riker SRL, Lima FJC, Motta MB, et al (2016) Carta geológica da folha rio curiuau  sa-20-x-d
- Rocha PF, Silveira RRd, Barbosa RCdM (2019) Age and palaeoenvironments of the manacapuru formation, presidente figueiredo (am) region, lochkovian of the Amazonas basin. *Brazilian Journal of Geology* 49(4). <https://doi.org/10.1590/2317-4889201920180130>
- Santos D, Mansur K, Gonçalves J, et al (2017) Quantitative assessment of geodiversity and urban growth impacts in armação dos búzios, rio de janeiro, brazil. *Applied Geography* 85:184–195. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.03.009>
- Santos JOS, Hartmann LA, Gaudette HE, et al (2000) A new understanding of the provinces of the amazon craton based on integration of field mapping and u-pb and sm-nd geochronology. *Gondwana Research* 3(4):453–488. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70755-3](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70755-3)
- Scammacca O, Bétard F, Aertgeerts G, et al (2022) Geodiversity assessment of french guiana: Challenges and implications for sustainable land planning. *Geoheritage* 14(3). <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00716-6>
- Schobbenhaus C, Silva CR (2011) *Geoparques do Brasil: propostas*. CPRM
- Serrano E, Ruiz-Fla o R (2007) Geodiversity: Concept, assessment and territorial application. the case of tiermes-caracena (soria). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Espa oles* 45(45):389–393
- Silva J, Rodrigues C, Pereira D (2015) Mapping and analysis of geodiversity indices in the xingu river basin, amazonia, brazil. *Geoheritage* 7(4):337–350. <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0134-8>
- Silva JMF, Silva JP, Manosso FC (2024) Evaluation of geodiversity in the brazilian amazon using different quantification methodologies. *Geomorphology* 466. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2024.109441>
- Silva JP, Pereira DI, Aguiar AM, et al (2013) Geodiversity assessment of the xingu drainage basin. *Journal of Maps* 9(2):254–262. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.775085>

- Silva M, Nascimento M, Mansur K (2019) Quantitative assessments of geodiversity in the area of the seridó geopark project, north-east brazil: Grid and centroid analysis. *Geoheritage* 11(3):1177–1186. <https://doi.org/10.1007/s12371-019-00368-z>
- Simões MS, Lisboa TM, Almeida ME, et al (2019) Projeto Uatumã Abonari: geologia e recursos minerais das folhas Igarapé Canoa - SA.20-X-D-VI, Santo Antônio do Abonari - SA.20-X-D-III e Vila do Pitinga - SA.20-B-VI, Estado do Amazonas. CPRM
- Souza AGH, Ribeiro LMA (2024) Geoparques do Brasil: geoparque Cachoeiras do Amazonas: Presidente Figueiredo, AM: atualização do inventário do patrimônio geológico e sítios da geodiversidade. Serviço Geológico do Brasil
- Strahler AN (1952) Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin* 63(11):1117. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2)
- Teixeira W, Reis NJ, Bettencourt JS, et al (2018) Intraplate Proterozoic Magmatism in the Amazonian Craton Reviewed: Geochronology, Crustal Tectonics and Global Barcode Matches, Springer Singapore, pp 111–154. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1666-1_4
- Torlay R, Nolasco M, Castro P (2022) Analysis of quantitative methods for geodiversity in chapada diamantina, bahia, brazil. *Boletim de Ciencias Geodesicas* 28(3):e00014. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702022000300014>
- Val P, Figueiredo J, Melo G, et al (2022) Geological History and Geodiversity of the Amazon, UN Sustainable Development Solutions Network (SDSN), chap 1, pp 1–41. <https://doi.org/10.55161/pofe6241>
- Valério CS, Souza VS, Macambira MJB (2009) The 1.90–1.88ga magmatism in the southernmost guyana shield, amazonas, brazil: Geology, geochemistry, zircon geochronology, and tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences* 28(3):304–320. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.04.001>
- Venticinque E, Forsberg B, Barthem R, et al (2016) An explicit gis-based river basin framework for aquatic ecosystem conservation in the amazon. *Earth System Science Data* 8(2):651–661. <https://doi.org/10.5194/essd-8-651-2016>
- Vera D, Simbaña-Tasiguan M, Guzmán O, et al (2023) Quantitative assessment of geodiversity in ecuadorian amazon—case study: Napo sumaco aspiring unesco geopark. *Geoheritage* 15(1). <https://doi.org/10.1007/s12371-023-00792-2>
- Wanderley-Filho JR, Eiras JF, Cunha PRC, et al (2010) The Paleozoic Solimões and Amazonas basins and the Acre foreland basin of Brazil, Blackwell Publishing, p 447
- Zwolinski Z, Najwer A, Giardino M (2018) Methods for assessing geodiversity, Elsevier, pp 27–52. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809531-7.00002-2>

5.2. A Geodiversidade em Presidente Figueiredo

Na porção sul do município, os elementos da geodiversidade deram origem a uma região propícia à formação de atrativos naturais, como cachoeiras, corredeiras e grutas. Isto deve-se à neotectônica superimposta, observada nas estruturas geológicas, como falhas e fraturas, associadas à composição litológica das rochas sedimentares do Grupo Trombetas e ao contexto geomorfológico característico da borda da Bacia Sedimentar do Amazonas. Alguns desses atrativos naturais foram inventariados por Souza e Ribeiro (2024), utilizando a metodologia de Brilha (2016), como forma de representar o contexto geológico regional e avaliar os valores científico, turístico e educacional, o que permitiu a definição de 18 geossítios e 2 sítios da geodiversidade, com interesses principais nas categorias de sedimentologia, geomorfologia, pedologia, paleoambiental, vulcanismo e plutonismo, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Lista de Geossítios do município de Presidente Figueiredo, segundo Souza e Ribeiro (2024)

	Geossítio	Unidade aflorante	Interesse
G-1	Embasamento Cristalino	Suíte Mapuera	Plutonismo
G-2	Formação Prosperança	Formação Prosperança	Paleoambiental
G-3	Cachoeira da Iracema	Formação Nhamundá	Sedimentologia
G-4	Cachoeira da Porteira	Formação Nhamundá	Sedimentologia
G-5	Cachoeira da Pedra Furada	Formação Nhamundá	Geomorfologia
G-6	Gruta do Maroaga	Formação Nhamundá	Geomorfologia
G-7	Folhelhos Carbonosos da Formação Manacapuru	Formação Manacapuru	Sedimentologia
G-8	Platô Laterítico: Latossolos da Amazônia	Coberturas Detrito-lateríticas	Pedologia
G-9	Cachoeira Micade	Grupo Iricoumé	Vulcanismo
G-10	Cachoeira das Orquídeas	Formação Nhamundá	Sedimentologia
G-11	Cachoeira do Mutum	Formação Nhamundá	Geomorfologia
G-12	Cachoeira Sussuarana	Formação Nhamundá	Sedimentologia
G-13	Gruta do Batismo	Formação Nhamundá	Geomorfologia
G-14	Cachoeira Berro D'Água	Formação Nhamundá	Sedimentologia
G-15	Cachoeira da Neblina	Formação Nhamundá	Sedimentologia
G-16	Cachoeira Natal	Formação Nhamundá	Sedimentologia
G-17	Perfil Laterítico da Formação Prosperança	Coberturas Detrito-lateríticas	Pedologia
G-18	Perfil Laterítico da Formação Alter do Chão	Coberturas Detrito-lateríticas	Pedologia
SG-1	Circuito Salto do Ipy	Formação Nhamundá	Geomorfologia
SG-2	Circuito da Kyra	Formação Nhamundá	Sedimentologia

A ocorrência de cachoeiras e grutas está relacionada, primordialmente, com afloramentos areníticos da Formação Nhamundá, nomeadamente: Cachoeira da Iracema (G-3), Cachoeira da Porteira (G-4), Cachoeira da Pedra Furada (G-5), Gruta do Maroaga (G-6), Cachoeira das Orquídeas (G-10), Cachoeira do Mutum (G-11), Cachoeira Sussuarana (G-12), Gruta do Batismo (G-13), Cachoeira Berro D'Água (G-14), Cachoeira da Neblina (G-15), Cachoeira Natal (G-16), Circuito Salto do Ipy (SG-1) e Circuito da Kyra (SG-2).

A Formação Nhamundá, nessas localidades, é constituída por arenitos finos, esbranquiçados, com elevado grau de seleção e arredondamento dos grãos, apresentando friabilidade variável. Em contextos cavernosos, essas rochas tendem a exibir maior friabilidade, integrando feições cársticas em arenitos que condicionam a formação de extensos complexos espeleológicos. Nessas estruturas, observa-se a gênese de cavidades que evoluem desde abrigos isolados até sistemas de galerias mais desenvolvidos. Tais complexos estão frequentemente associados à ocorrência de nascentes, sugerindo a proximidade do lençol freático à superfície, o que favorece processos de intemperismo químico. Essa dinâmica é atestada pontualmente pela precipitação de estalagmites ferruginosas (Figura 14). O intemperismo químico, em associação com processos erosivos, desempenha um papel fundamental na evolução desses sistemas, cuja origem está vinculada ao fenômeno de *pipping* – mecanismo descrito por Nogueira e Sarges (2001) como fundamental para o desenvolvimento de feições pseudocársticas na região.

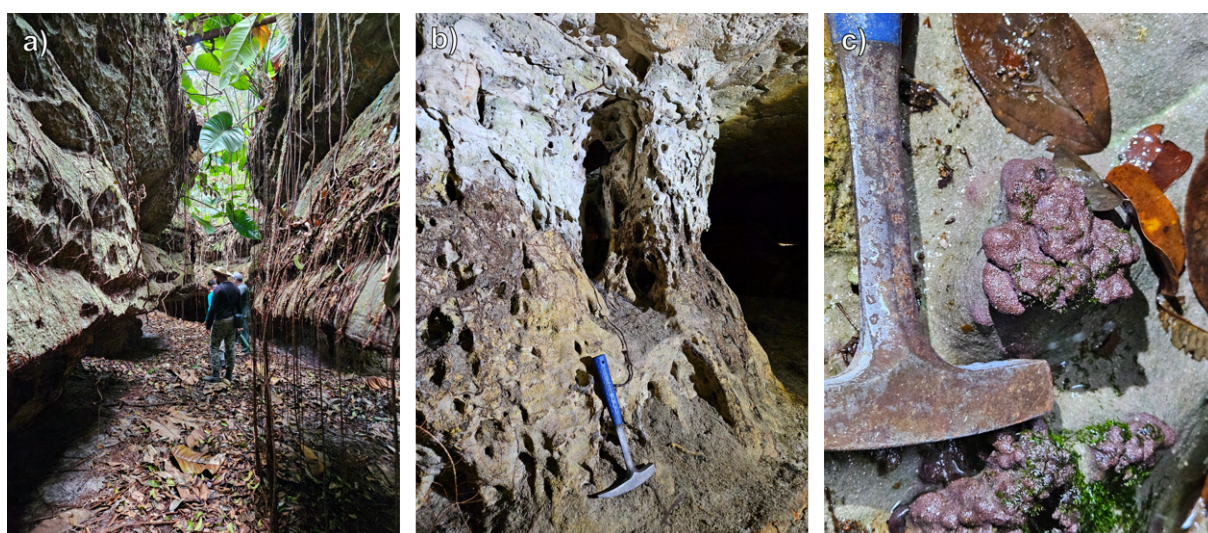


Figura 14 – Complexo de Grutas Salto do Ipy. a) Grutas abertas; b) Grutas fechadas formando salões e com presença de feições erosivas; c) Estalagmites ferruginosas formadas nos arenitos da Formação Nhamundá.

Fonte: A autora (2025)

Afloramentos da Formação Nhamundá exibem camadas com expressiva bioturbação

preservada, registrando a ocorrência do icnogênero *Arthropycus*, descrito na literatura por Nogueira *et al.* (1999). Um dos principais sítios de exposição desses registros é a Cachoeira das Orquídeas, localizada no Parque Municipal homônimo, acessível a partir da sede do município de Presidente Figueiredo. Nessa localidade, os icnofósseis associam-se a estruturas sedimentares primárias, como marcas onduladas, as quais constituem importantes indicadores paleoambientais para a unidade. No entanto, apesar do relevante valor científico, esses elementos não dispõem de estratégias de conservação, estando sujeitos a processos intempéricos e à ação antrópica, cujos impactos já são evidentes em determinados setores do afloramento (Figura 15).



Figura 15 – Afloramentos localizados na Cachoeira das Orquídeas. a) Amostra de rocha com icnofósseis bem preservados do gênero *Arthropycus*; b) Icnofósseis já desgastados pela intensa movimentação de pessoas no local; c) Marcas onduladas preservadas e expostas.

Fonte: A autora (2025)

Um contexto semelhante é observado na Cachoeira Natal, onde se identificaram estratos com desenvolvimento preferencial de bioturbação, expostos apenas durante o período de estiagem na região. Neste sítio, os níveis bioturbados ocorrem sob a forma de blocos rolados, que apresentam notável preservação, porém encontram-se suscetíveis a processos degradacionais (Figura 16). Registrou-se a ocorrência de *Skolithos* e demais icnofósseis que necessitam de caracterização sistemática, os quais se mantêm in situ em área de intensa visitação turística, configurando um cenário de potencial comprometimento de sua integridade paleontológica.



Figura 16 – Afloramentos localizados na Cachoeira Natal. a) e b) Aspecto das camadas bioturbadas nos arenitos da Formação Nhamundá; c) Icnofóssil observado em um bloco rolado; d) Bloco rolado de uma camada intensamente bioturbada, localizada às margens do igarapé e visível no período de águas baixas; e) Icnofósseis perpendiculares ao sentido de deposição da camada, possivelmente Skolithos.

Fonte: A autora (2025)

A Formação Manacapuru (G-7) constitui outra unidade estratigráfica de relevância paleontológica, representada por um único afloramento conhecido na área de estudo, situado em corte de estrada às margens do Rio Urubu. Neste local, registram-se ocorrências de braquiópodes, cuja associação faunística corrobora a interpretação de um paleoambiente marinho raso. Apesar de seu reconhecimento como geossítio devido ao seu valor sedimentológico e paleontológico, não há qualquer tipo de medida de conservação voltada para o local.

Sobre as rochas da Bacia Sedimentar do Amazonas desenvolvem-se predominantemente Latossolos, caracterizados por perfis profundos e coloração variando entre tons avermelhados e amarelos. Esses solos ocorrem em relevo composto por extensos planaltos com baixa amplitude topográfica. De forma mais restrita, observam-se áreas de campinarana, marcadas por um

horizonte superficial arenoso e vegetação esparsa, em contraste com as formações florestais densas associadas aos Latossolos (Figura 17). Essas áreas de campinaranas estão associadas tipicamente ao desenvolvimento de processos erosivos sobre rochas quartzoareníticas, formando Neossolos Quartzarênicos ou Espodossolos, de acordo com as características de drenagem do solo e do grau de desenvolvimento. Estudos anteriores demonstram que esses locais apresentam alto endemismo para espécies da flora e da fauna, compondo ecossistemas únicos dentro da Amazônia (ADENEY *et al.*, 2016).



Figura 17 – a) Perfil de Latossolo formado sobre arenito da Formação Nhamundá na Cachoeira Natal; b) Área de campinarana, caracterizada pelos solos arenosos e vegetação aberta.

Fonte: A autora (2025)

No contexto do Projeto Geoparque Cachoeiras do Amazonas, registram-se ainda perfis lateríticos relevantes, catalogados nos seguintes geossítios: Platô Laterítico (G-8), Perfil Laterítico da Formação Prosperança (G-17) e Perfil Laterítico da Formação Alter do Chão (G-18). Esses afloramentos são essenciais para a compreensão da evolução geológica regional, pois registram períodos de estabilidade tectônica e condições paleoclimáticas favoráveis à lateritização.

A norte dessas exposições da Formação Nhamundá, ainda na área do projeto do geoparque, afloram rochas vulcânicas que compõem o embasamento cristalino, representadas pelo Grupo Iricoumé na Cachoeira Micade (G-9). Neste afloramento há ocorrência de riolitos pórfiros, com intenso fraturamento, que define zonas de fraqueza de onde se desprendem blocos de rocha em uma direção preferencial NE/SW, formando planos de deslizamento e patamares na cachoeira, modelando assim a geomorfologia local (Figura 18).

Outros afloramentos de interesse plutônico são observados em pedreiras ao longo da BR-174, como é o caso do Geossítio Embasamento Cristalino (G-1), localizado em uma pedreira desativada no km 151, o qual exhibe rochas graníticas cortadas por diques sin-plutônicos

(LUZARDO, 2012). Atualmente existem outras pedreiras ativas, como a Amazônia Mucajaí, a Pedreira Samauma e a EBAM, que desenvolvem lavra a céu aberto com exploração de brita para construção civil. Essas localidades representam afloramentos importantes para a compreensão do plutonismo proterozoico que ocorreu na região.



Figura 18 – Afloramentos rochosos na Cachoeira do Micade. a) Falhas e fraturas destacadas em vermelho determinam zonas de fraqueza com direção NE/SW, se desprendem blocos de rocha; b) O deslizamento de blocos ocorre preferencialmente nos planos de falhas, destacados em vermelho.

Fonte: A autora (2025)

Além dos geossítios e sítios da geodiversidade catalogados, foram identificadas outras regiões com características singulares, que carecem ainda de estudos quanto à sua relevância no contexto da geodiversidade regional. Um exemplo disso se encontra no complexo de lagoas localizado no Ramal Nova Esperança, com ocorrência conhecida de pelo menos 4 lagoas com águas azuis cristalinas, conhecidas como Lagoa Azul Jungle, Fervedouro do Maranhão, Lagoa Azul Park e Lagoa Paraíso Azul. Essas lagoas distinguem-se das drenagens típicas da região, que apresentam águas escuras fluindo diretamente sobre o substrato rochoso, enquanto sua ocorrência está associada a solos espessos, com coloração esbranquiçada e textura argilosa (Figura 19).

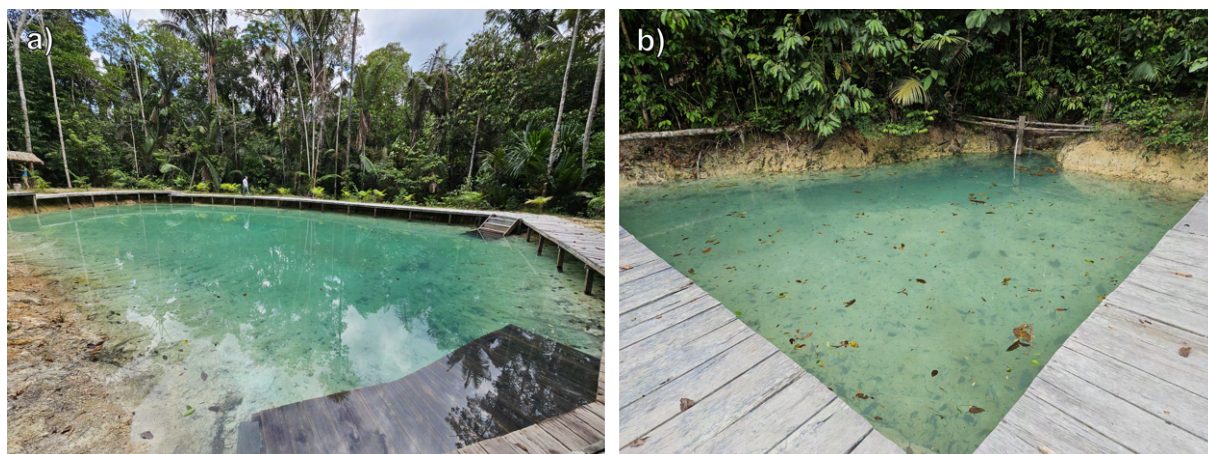


Figura 19 – Aspecto do Lago Paraíso Azul. a) Visão do Lago principal, com nível baixo de água que permite visualização do solo; b) Nascente do lago.

Fonte: A autora (2025)

5.3. Aplicações à Área de Estudo

Os resultados obtidos foram resumidos em um infográfico da geodiversidade de Presidente Figueiredo, como forma de visualização simplificada (Figura 20).

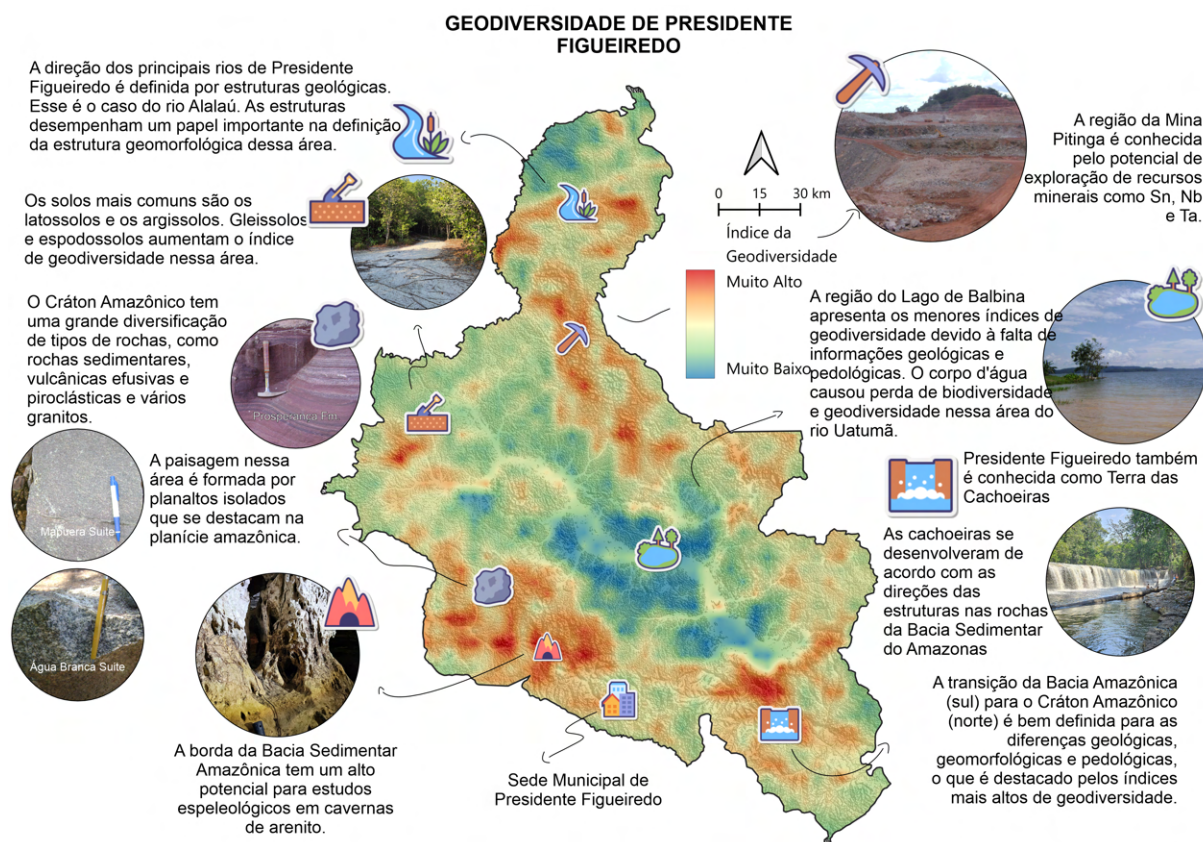


Figura 20 – Infográfico da Geodiversidade de Presidente Figueiredo.

Fonte: A autora (2025)

Foi realizada ainda sobreposição de outros dados ao Mapa de Índice da Geodiversidade,

abordando aspectos de ocupação territorial, uso e ocupação do solo, exploração mineral e potencial turístico, como mostrado na Figura 21. O mapa de uso e ocupação do solo, associado aos limites das Unidades de Conservação, indicou predominância de ocupação antrópica ao longo das principais rodovias, a BR-174, que liga Manaus a Boa Vista, e a AM-240, que liga a sede municipal à Vila de Balbina, parcialmente inseridas na APA Caverna do Maroaga. A porção noroeste do município está dentro da Terra Indígena Waimiri-Atroari, enquanto a porção nordeste é coberta pela REBIO de Uatumã, Unidade de Conservação de Proteção Integral. Nessas duas áreas, não foram identificadas pressões antrópicas atuantes.

A área proposta para o Geoparque Cachoeiras do Amazonas, localizada a sul/sudoeste do município, abrange todos os geossítios descritos no município, bem como os focos de atrativos naturais voltados para o turismo. Ainda dentro dessa região, os dados acerca dos processos minerários obtidos na ANM indicam a presença de interesses da exploração principalmente de Bauxita, proveniente das coberturas lateríticas, e de granitos para construção civil.

Na porção mais ao norte do município, em um contexto geológico característico do embasamento cristalino, a distribuição dos elementos da geodiversidade delineou uma região com elevado potencial mineral. Conforme dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), disponíveis na plataforma SIGMINE, os processos minerários nessa área estão predominantemente associados à exploração de cassiterita, wolframita e tantalita. Um dos exemplos mais emblemáticos é a Mina de Pitinga, onde afloram granitos da Suíte Madeira, portadores de mineralizações de Estanho (Sn), Nióbio (Nb) e Tântalo (Ta), onde foram também descobertos novos minerais, denominados Waimirita e Atroarita (MINUZZI *et al.*, 2003), demonstrando o caráter excepcional desses depósitos. Além disso, outros projetos encontram-se em fase de pesquisa mineral, abrangendo desde depósitos lateríticos de bauxita até ocorrências de turmalina.

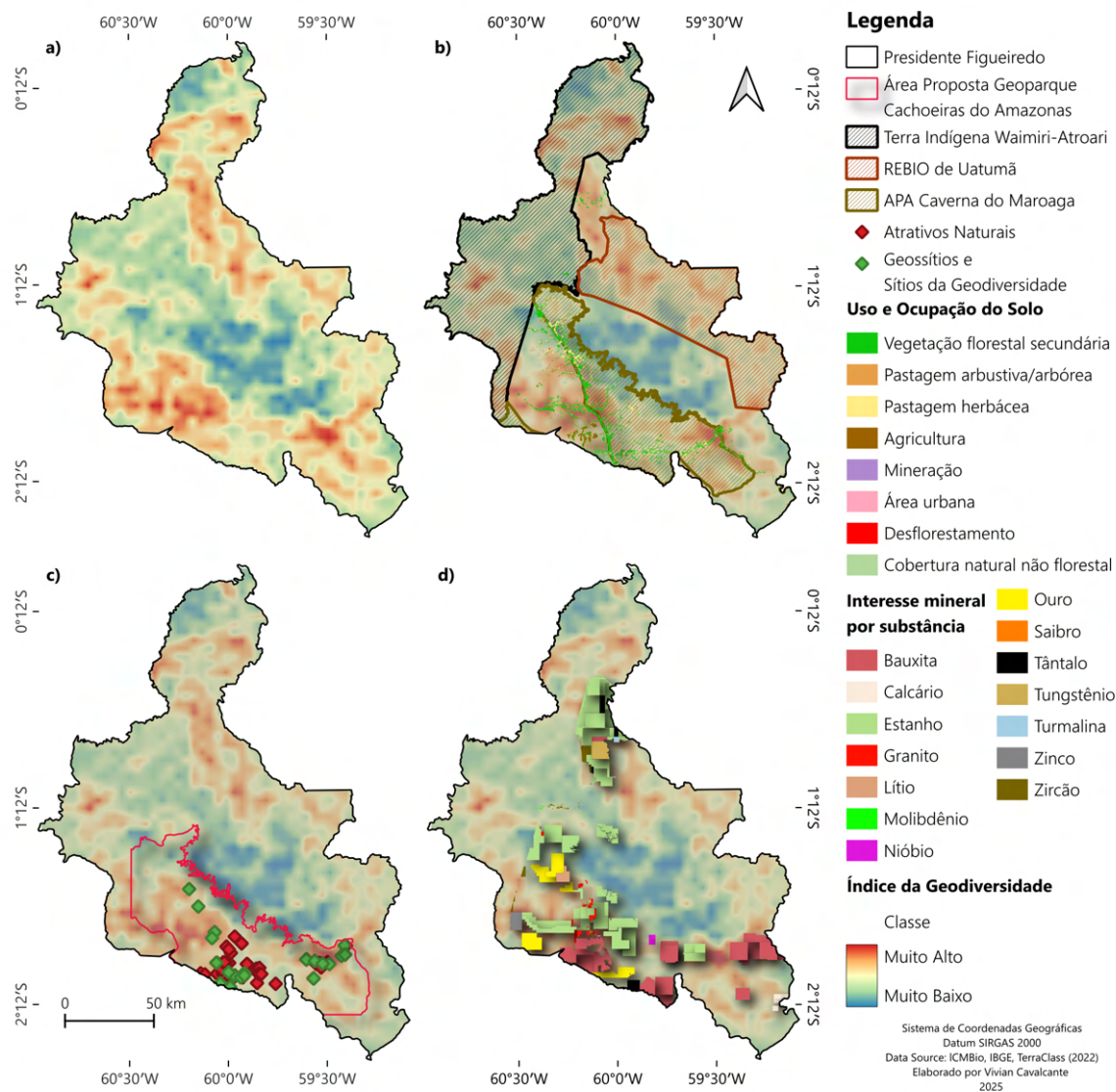


Figura 21 – a) Mapa de Índice da Geodiversidade; b) Unidades de Conservação e Terras Indígenas; c) Geossítios e Atrativos Naturais; d) Uso e ocupação do solo no município de Presidente Figueiredo.

Fonte: A autora (2025)

6

DISCUSSÕES

A análise integrada entre o Mapa de Índice de Geodiversidade e os dados de uso e ocupação do território revelou uma correspondência espacial significativa entre as áreas de maior índice e os focos de atividade antrópica no setor sul do município. Essa região coincide, em grande parte, com a área proposta para o Geoparque Cachoeiras do Amazonas. O Mapa de Uso e Ocupação do Solo demonstra que as pressões antrópicas concentram-se especialmente no núcleo urbano e rural de Presidente Figueiredo, bem como ao longo do eixo da rodovia BR-174 e da AM-240, onde estão localizados os principais geossítios (LUZARDO, 2012; SOUZA; RIBEIRO, 2024) e atrativos naturais (REIS *et al.*, 2020) já inventariados na região (Figura 21). Nessas localidades, não foram observadas medidas vigentes voltadas para a conservação de seus elementos, o que reforça a necessidade de uma atuação conjunta no planejamento territorial da região, que incorpore a geodiversidade como elemento estruturante. Isso reforça a necessidade de novos estudos na região, que viabilizem a realização de diversos passos estratégicos para que essa área proposta possa se tornar de fato um geoparque, como descrito por Brilha (2018b). Além disso, observa-se que a área delimitada no projeto do geoparque contém inconsistências, pois a sul extrapola a área do município de Presidente Figueiredo.

O cenário local reflete a dinâmica histórica de ocupação da Amazônia, tradicionalmente orientada pelos principais cursos d'água e, no caso específico de Presidente Figueiredo, intensificada pela construção da rodovia BR-174 e pela implantação da Usina Hidrelétrica de Balbina. Essa intervenção antrópica na paisagem se reflete nos baixos índices indicados ao longo do reservatório, que agora apresenta uma paisagem homogeneizada. Nesse sentido, a distribuição dos elementos da geodiversidade não apenas estrutura os principais atrativos naturais da região, como também influencia a configuração espacial urbana, desenvolvimento de atividades econômicas e intervenção na cultura local, que se adequam às mudanças impostas na paisagem. Esses

resultados abrem espaço significativo para discussão sobre a influência do ser humano como agente modificador da geodiversidade, como apontado por Prosser (2013). Nesse contexto, um elemento originalmente natural passou a sofrer modificações permanentes em sua configuração devido às alterações humanas na paisagem. Essa transformação implica na necessidade de adaptação das dinâmicas de interação sócioambiental com esse componente da geodiversidade, refletindo o impacto das intervenções humanas sobre os processos naturais e suas consequências para o equilíbrio ecológico local.

Assim, a geodiversidade desempenha papel central no desenvolvimento territorial, atuando como base física para atividades econômicas e influenciando os padrões de uso do solo. Essa relação se expressa de forma clara nas principais atividades econômicas do município — o turismo, ancorado em sua paisagem geonatural, e a mineração, diretamente dependente da disponibilidade de recursos geológicos, evidenciando como os elementos naturais condicionam os processos socioeconômicos locais.

Observa-se ainda que as áreas de alta geodiversidade situadas no interior da Reserva Biológica (REBIO) do Uatumã e da Terra Indígena Waimiri-Atroari permanecem preservadas, sem registros significativos de alteração antrópica, o que atesta a eficácia da delimitação de áreas legalmente protegidas na região. A validação dos recursos naturais que compõem a geodiversidade dentro da REBIO de Uatumã é um desafio, devido ao seu caráter de unidade de proteção integral. Já a Área de Proteção Ambiental (APA) Caverna do Maroaga, que abrange toda a borda oeste do Lago de Balbina e parte do perímetro urbano de Presidente Figueiredo, representa uma unidade de conservação com uso menos restritivo, o que permite diferentes formas de ocupação e manejo, onde são promovidas principalmente atividades turísticas. Essa é uma região com potencial para incorporação dos conceitos de geoconservação associados ao turismo, o que estaria alinhado às diretrizes da APA Caverna do Maroaga como uma unidade de conservação que visa conservar seus elementos bióticos e abióticos. Essa unidade se torna ainda mais importante ao considerar que é dentro dos seus limites que ocorre a maior ocupação antrópica dentro de Presidente Figueiredo.

A análise dos registros de processos minerários no município evidencia outro aspecto relevante sobre a distribuição dos elementos da geodiversidade. Observa-se uma maior concentração de processos relacionados à extração de materiais voltados à construção civil, como granito e saibro, na porção centro-sul do território municipal. Por outro lado, a porção norte apresenta predominância de processos direcionados à exploração de minérios metálicos, com destaque para o Estanho. Esse padrão reflete não apenas a diversidade litológica do município, mas também a

influência da geodiversidade sobre os usos econômicos do solo.

No que se refere aos avanços em geoconservação, o município de Presidente Figueiredo ainda se encontra em uma fase inicial, concentrada majoritariamente na etapa de diagnóstico da geodiversidade. Entretanto, o inventário de Souza e Ribeiro (2024) apresenta limitações importantes, especialmente no que se refere à representatividade geológica. Há uma concentração significativa de geossítios associados à Formação Nhamundá, com destaque para os interesses sedimentológicos, paleontológicos e geomorfológicos. Em contrapartida, outras unidades geológicas relevantes, como os afloramentos do embasamento cristalino, permanecem subrepresentadas, apesar da existência de boas exposições dessas litologias na área proposta para o geoparque.

Além disso, o inventário atual não contempla adequadamente alguns ambientes de interesse pedológico, como as campinaranas e os solos típicos de regiões de várzea, que podem representar importantes interfaces entre geodiversidade e biodiversidade, desempenhando um papel essencial na diferenciação de ecossistemas e, potencialmente, no desenvolvimento de regiões com elevado endemismo.

7

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou o primeiro Mapa de Índice de Geodiversidade aplicado ao município de Presidente Figueiredo e também ao estado do Amazonas. Foram realizadas adaptações metodológicas específicas para a realidade regional e para a escala adotada. O mapa resultante demonstrou-se uma ferramenta eficaz na análise dos padrões de distribuição dos elementos da geodiversidade, revelando áreas de destaque e pontos críticos relevantes para a gestão territorial e ambiental.

O Mapa de Índice de Geodiversidade identificou duas regiões principais com os maiores valores. A primeira corresponde a uma faixa que delimita a zona de transição entre a Bacia do Amazonas e o Cráton Amazônico, caracterizada pela interação entre diferentes tipos de solos e rochas, além de mudanças nos padrões de relevo. A segunda área está situada ao norte do município, inserida no contexto das rochas cristalinas do cráton, onde se observam influências de corpos intrusivos e estruturas geológicas distintas, a exemplo das rochas vulcânicas do Grupo Iricoumé, as rochas intrusivas da Suíte Mapuera e Suíte Água Branca. As bases de dados não forneceram informações suficientes acerca da Suíte Madeira na escala utilizada, unidade conhecida pelo seu potencial mineral, representado nos corpos intrusivos que afloram na Mina de Pitinga. É necessário, portanto, que ocorram avanços no mapeamento a nível de fácies ígneas de uma maneira mais sistemática por todo o município, para que esses fatores possam ser adicionados ao Mapa de Índice da Geodiversidade.

Por outro lado, os menores índices de geodiversidade foram observados na área correspondente ao reservatório da Usina Hidrelétrica de Balbina. Esse padrão reflete não apenas uma carência de informações geológicas para essa região, mas também sugere a perda de geodiversidade associada à inundação provocada pela formação do reservatório e à perda de biodiversidade já relatada em estudos anteriores.

A sobreposição do Mapa de Índice de Geodiversidade com os dados de uso e ocupação do solo revelou uma correlação entre os padrões espaciais da geodiversidade e as formas de ocupação do território no município. As áreas com maiores índices de geodiversidade, quando não inseridas em Unidades de Conservação de Proteção Integral, como a REBIO de Uatumã, coincidem com regiões intensamente ocupadas. Nesses locais, observa-se a predominância de atividades econômicas relacionadas diretamente aos bens e serviços proporcionados pelos elementos da geodiversidade, especialmente o turismo e a mineração. Os resultados apontam, assim, para o papel do ser humano como agente modificador do meio, afetando tanto os componentes biológicos quanto os da geodiversidade. Essa observação traz à luz discussões acerca do papel do homem na manutenção dos elementos da geodiversidade, que se mostra como um componente fundamental no desenvolvimento social, econômico e cultural local.

A análise dos inventários de geossítios disponíveis para a região demonstrou uma concentração significativa de locais avaliados dentro da Formação Nhamundá, enquanto outras unidades geológicas permanecem subrepresentadas. No perímetro do geoparque proposto, persistem lacunas de investigação em áreas relevantes, como a região dos lagos de águas cristalinas, os afloramentos em pedreiras ativas, as campinaranas e solos de várzea, que podem fornecer as bases necessárias para uma compreensão mais ampla desse contexto, incluindo sua função na interação com a biodiversidade.

Entender essa inter-relação constitui também uma via para a compreensão do desenvolvimento social e ambiental na Amazônia. Nesse contexto, conhecer as formas de ocupação do território e sua relação com a geodiversidade é essencial para a construção de cenários mais realistas e eficazes para a conservação ambiental.

No que se refere à conservação, os Locais de Interesse Geológico (LIGs) em Presidente Figueiredo ainda carecem de medidas específicas de proteção. As ações existentes são pontuais e restritas, como na APA da Caverna do Maroaga. A gestão territorial local segue priorizando somente os aspectos biológicos, enquanto importantes afloramentos, fundamentais para a reconstrução da história geológica regional, permanecem desprotegidos. Nesse sentido, é fundamental que as estratégias de conservação considerem, de maneira integrada, tanto os elementos bióticos quanto os abióticos, o que será essencial para garantir a manutenção dos sistemas naturais tão importantes para essa região.

A metodologia aplicada neste estudo demonstrou-se eficaz para o contexto de Presidente Figueiredo, especialmente frente aos desafios logísticos impostos por sua grande extensão territorial e áreas de difícil acesso. Trata-se de uma abordagem replicável em outras regiões e que

pode servir como ponto de partida para novas iniciativas. Ressalta-se, no entanto, que a aplicação do Mapa de Índice de Geodiversidade é sensível à disponibilidade de dados, o que impõe certas limitações.

Como recomendação para pesquisas futuras, sugere-se a integração do Mapa de Índice de Geodiversidade a bases de dados relacionadas à biodiversidade, de forma a permitir análises mais amplas sobre os sistemas naturais da região. Além disso, é fundamental o avanço na consolidação de um inventário robusto e representativo da geodiversidade local, o que possibilitará a adoção de medidas de proteção legal e a valorização do patrimônio geológico como ferramenta para educação, turismo sustentável e promoção da cultura regional.

REFERÊNCIAS

- ADAMY, A. *Geodiversidade do Estado de Rondônia*. Porto Velho: CPRM, 2010. 337 p.
- ADAMY, A. *Geodiversidade do Estado do Acre*. Porto Velho: CPRM, 2015. 321 p.
- ADENEY, J. M. *et al.* White-sand ecosystems in Amazonia. *Biotropica*, Wiley, v. 48, n. 1, p. 7–23, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/btp.12293>>.
- ALAHUHTA, J. *et al.* The role of geodiversity in providing ecosystem services at broad scales. *Ecological Indicators*, Elsevier BV, v. 91, p. 47–56, 2018.
- ALAHUHTA, J. *et al.* Acknowledging geodiversity in safeguarding biodiversity and human health. *The Lancet Planetary Health*, Elsevier BV, v. 6, n. 12, p. e987–e992, 2022.
- ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Brazilian structural provinces: An introduction. *Earth-Science Reviews*, Elsevier, v. 17, p. 1–29, 1981.
- ALMEIDA, M. E. *Evolução geológica da porção centro-sul do Escudo das Guianas com base no estudo geoquímico, geocronológico (evaporação de Pb e U-PB ID-TIMS em zircão) e isotópico (Nd-Pb) dos granitóides paleoproterozóicos do sudeste de Roraima, Brasil*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Pará, 2006.
- ALSBACH, C. M. E.; SEIJMONSBERGEN, A. C.; HOORN, C. Geodiversity in the Amazon Drainage Basin. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Royal Society Publishing, v. 382, p. 651–661, 2024.
- ARAÚJO, A.; PEREIRA, D. A new methodological contribution for the geodiversity assessment: Applicability to Ceará State (Brazil). *Geoheritage*, Springer Verlag, v. 10, n. 4, p. 591–605, 2018.
- BRILHA, J. Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review. *Geoheritage*, Springer Science and Business Media LLC, v. 8, n. 2, p. 119–134, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12371-014-0139-3>>.
- BRILHA, J. Geoheritage and geoparks. In: _____. *Geoheritage: Assesment, Protection and Management*. [S.l.]: Elsevier, 2018. cap. 18, p. 323–335.
- BRILHA, J. Geoheritage: Inventories and evaluation. In: _____. *Geoheritage: Assesment, Protection and Management*. [S.l.]: Elsevier, 2018. p. 69–85.
- BURNETT, M. R. *et al.* The influence of geomorphological heterogeneity on biodiversity. *Conservation Biology*, v. 12, n. 2, p. 363–370, 1998.

CARRIÓN-MERO, P. *et al.* Geodiversity assessment to regional scale: Ecuador as a case study. *Environmental Science & Policy*, Elsevier, v. 136, p. 167–186, 2022.

Climate-Data.org. *Clima: Presidente Figueiredo*. 2024. Acesso em: 17 abr. 2025. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/amazonas/presidente-figueiredo-43920/>.

CORDANI, U. G. *et al.* The position of the Amazonian Craton in supercontinents. *Gondwana Research*, Elsevier, v. 15, p. 396–407, 2009.

COSTA, B. S. C. *et al.* Neotectônica da região amazônica: Aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. [S.l.], 1996. v. 4, 23-44 p.

COSTA, M. L. Aspectos geológicos dos Lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 21, p. 146–160, 1991.

COSTI, H. T.; DALL'AGNOL, R.; MOURA, C. A. V. Geology and Pb-Pb geochronology of paleoproterozoic volcanic and granitic rocks of Pitinga Province, Amazonian Craton, Northern Brazil. *International Geology Review*, Informa UK Limited, v. 42, n. 9, p. 832–849, 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/00206810009465114>.

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

DIAS, M. *et al.* Geodiversity Index Map of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil: Cartography and quantitative assessment. *Geoheritage*, Springer, v. 13, n. 1, p. 1–15, 2021.

FEARNSIDE, P. M. Amazon forest maintenance as a source of environmental services. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, FapUNIFESP (SciELO), v. 80, n. 1, p. 101–114, 2008.

FEARNSIDE, P. M. O cultivo da soja como ameaça para o meio ambiente na Amazônia brasileira. In: _____. *Destruição e conservação da Floresta Amazônica*. Manaus: Editora do INPA, 2019. v. 1, cap. 4, p. 55–81.

FERRON, J. M. T. M. *et al.* Geologia e geocronologia Pb-Pb de rochas graníticas e vulcânicas ácidas a intermediárias paleoproterozóicas da Província Pitinga, Craton Amazônico. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 36, n. 3, p. 499–512, 2006.

GARCIA, M. G. M.; QUEIROZ, D. S.; MUCIVUNA, V. C. Geological diversity fostering actions in geoconservation: An overview of Brazil. *International Journal of Geoheritage and Parks*, Elsevier, v. 10, p. 507–522, 2022.

GORDON, J. E. Geoheritage, geotourism and the cultural landscape: Enhancing the visitor experience and promoting geoconservation. *Geosciences*, MDPI AG, v. 8, n. 4, p. 136, 2018.

GORDON, J. E.; BARRON, H. F. The role of geodiversity in delivering ecosystem services and benefits in scotland. *Scottish Journal of Geology*, v. 49, n. 1, p. 41–58, 2013.

GRAHN, Y. Silurian and lower devonian chitinozoan taxonomy and biostratigraphy of the trombetas group, amazonas basin, northern brazil. *Bulletin of Geosciences*, Czech Geological Survey, Prague, v. 80, n. 4, p. 245–276, 2005.

GRAY, M. Other nature: geodiversity and geosystem services. *Environmental Conservation*, Cambridge University Press (CUP), v. 38, n. 3, p. 271–274, 2011.

- GRAY, M. Geodiversity: Valuing and conserving abiotic nature. Wiley-Blackwell, p. 512, 2013.
- HENRIQUES, M. H. *et al.* Geoconservation as an emerging geoscience. *Geoheritage*, Springer Science and Business Media LLC, v. 3, n. 2, p. 117–128, 2011.
- HJORT, J. *et al.* Why geodiversity matters in valuing nature's stage. *Conservation Biology*, Wiley, v. 29, n. 3, p. 630–639, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1111/cobi.12510>>.
- HOLANDA, J. L. R.; MARMOS, J. L.; M., M. M. A. *Geodiversidade do Estado de Roraima*. Manaus: CPRM, 2014. 252 p.
- HOORN, C. An environmental reconstruction of the palaeo-Amazon River system (Middle-Late Miocene, NW Amazonia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 112, p. 187–238, 1994.
- HOORN, C. *et al.* Andean tectonics as a cause for changing drainage patterns in Miocene northern South America. *Geology*, v. 23, p. 237–240, 1995.
- HOORN, C. *et al.* *Amazonia through time: Andean uplift, climate change, landscape evolution, and biodiversity*. 2010. 927-931 p.
- HORBE, A. M. C. *et al.* A lateritização na gênese das superfícies de aplanamento da região de Presidente Figueiredo Balbina, Nordeste do Amazonas. In: _____. *Contribuições à Geologia da Amazônia*. [s.n.], 2001. v. 2, p. 145–176. Disponível em: <<https://arquivos.sbg-no.org.br/BASES/CGA%202.pdf>>.
- JOÃO, X. S. J.; TEIXEIRA, S. G. *Geodiversidade do Estado do Amapá*. Belém: CPRM, 2016. 138 p.
- JOÃO, X. S. J.; TEIXEIRA, S. G.; FONSECA, D. D. F. *Geodiversidade do Estado do Pará*. Belém: CPRM, 2013. 256 p.
- KROONENBERG, S. B.; ROEVER, E. W. F. de. Geological evolution of the Amazonian Craton. In: _____. *Amazonia, Landscape and Species Evolution: A Look into the Past*. [S.l.]: Blackwell Publishing, 2010. p. 9–28.
- LOMBELLO, J. C. *Petrogênese do magmatismo Abonari, Escudo das Guianas, município de Presidente Figueiredo*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Amazonas, 2011.
- LUZARDO, R. Geoparque Cachoeiras do Amazonas (AM): proposta. In: _____. [S.l.]: CPRM, 2012. cap. 3.
- MAIA, M. A. M.; MARMOS, J. L. *Geodiversidade do Estado do Amazonas*. Manaus: CPRM, 2010. 275 p.
- MALINIEMI, T. *et al.* Too much diversity—multiple definitions of geodiversity hinder its potential in biodiversity research. *Diversity and Distributions*, v. 30, 2024.
- MINUZZI, O. R. R. *et al.* Primeira notícia da descoberta de Waimirita e Atroarita, dois novos minerais na Mina de Pitinga, AM, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. 30, n. 1, p. 99, 2003.

- NETO, A. C. B. *et al.* U-Pb dating of the Madeira Suite and structural control of the albite-enriched granite at Pitinga (Amazonia, Brazil): Evolution of the A-type magmatism and implications for the genesis of the Madeira Sn-Ta-Nb (REE, cryolite) world-class deposit. *Precambrian Research*, Amsterdã, v. 243, p. 181–196, 2014.
- NOGUEIRA, A. C. R. Depósitos costeiros neoproterozóicos da Formação Prosperança, município de Presidente Figueiredo, Estado do Amazonas. In: *VI Simpósio de Geologia da Amazônia*. Manaus: [s.n.], 1999. p. 412–415.
- NOGUEIRA, A. C. R.; SARGES, R. R. Characterization and genesis of waterfalls of the Presidente Figueiredo region, Northeast State of Amazonas, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, Academia Brasileira de Ciências, v. 73, n. 2, p. 287–301, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0001-37652001000200012>>.
- NOGUEIRA, A. C. R.; TRUCKENBRODT, W.; SOARES, E. A. A. O icnogênero *Arthropycus* de depósitos sublitorâneos da Formação Nhamundá (Siluriano Inferior) da Bacia do Amazonas, região de Presidente Figueiredo. *Brazilian Journal of Geology*, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 29, n. 2, p. 135–140, 1999.
- PEREIRA, D. *et al.* Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): An innovative approach. *Environmental Management*, Springer Science and Business Media LLC, v. 52, n. 3, p. 541–552, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00267-013-0100-2>>.
- PEREIRA, R. G. F. d. A. *Geoconservação e desenvolvimento sustentável na Chapada Diamantina (Bahia - Brasil)*. Tese (Doutorado) — Universidade do Minho, 2010.
- PROSSER, C. D. Our rich and varied geoconservation portfolio: the foundation for the future. *Proceedings of the Geologists' Association*, Elsevier BV, v. 124, n. 4, p. 568–580, 2013.
- PUTZER, H. The geological evolution of the Amazon Basin and its mineral resources. In: _____. *The Amazon. Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin*. [S.l.]: Dr. W. Junk Publishers, 1984.
- REIS, J. R. L.; FARIA, I. F.; FRAXE, T. J. P. Geoconservação e geoturismo na amazônia: contexto e perspectivas no geoparque cachoeiras do amazonas. *Revista Turismo em Análise*, Universidade de Sao Paulo, Agencia USP de Gestao da Informacao Academica (AGUIA), v. 31, p. 50–76, 2020.
- REIS, N. J. *et al.* *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas*. [S.l.]: CPRM, 2006.
- RIKER, S. R. L. *et al.* *Carta Geológica da Folha Rio Uatumã SA-21-Y-A*. Manaus: CPRM, 2014.
- RIKER, S. R. L. *et al.* *Carta Geológica da Folha Rio Uatumã SA-21-Y-A*. Manaus: CPRM, 2014.
- RIKER, S. R. L. *et al.* *Carta Geológica da Folha Rio Curiuaú SA-20-X-D*. Manaus: CPRM, 2016.
- SALAZAR-DEL-POZO, S. S. *et al.* Innovative approaches to geoscientific outreach in the Napo Sumaco aspiring UNESCO Global Geopark, Ecuadorian Amazon Region. *Geosciences*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 15, p. 43, 2025. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3263/15/2/43>>.

- SANCHEZ-CORTEZ, J. L. *et al.* Participatory strategies applied for the geoconservation of speleological heritage at the napo sumaco geopark (ecuador). *Episodes*, International Union of Geological Sciences, v. 45, n. 4, p. 417–429, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18814/epiugs/2022/022001>.
- SANTOS, J. O. S. *et al.* A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: Avanços ocorridos no período 2000-2006. In: *IX Simpósio de Geologia da Amazônia*. Belém: SBG, 2006. p. 150–159.
- SANTOS, J. O. S. *et al.* A new understanding of the provinces of the Amazon Craton based on integration of field mapping and U-Pb and Sm-Nd geochronology. *Gondwana Research*, v. 3, p. 453–488, 2000.
- SANTOS, J. O. S. *et al.* Three distinctive collisional orogenies in the Southwestern Amazon Craton: Constraints from U-Pb geochronology. *Short Papers-IV South American Symposium on Isotope Geology*, p. 282, 2003.
- SCAMMACCA, O. *et al.* Geodiversity assessment of French Guiana: Challenges and implications for sustainable land planning. *Geoheritage*, Springer, v. 14, 2022.
- SCAMMACCA, O. *et al.* From geodiversity to geofunctionality: Quantifying geodiversity-based ecosystem services for landscape planning in French Guiana. *Geoheritage*, Springer, v. 16, 2024.
- SCAMMACCA, O. *et al.* The functional dimension of geodiversity: geo-ecosystem services assessment for sustainable land-planning in french guiana. Copernicus GmbH, 2023.
- SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C. R. Geoparques do brasil: propostas. 2011. Disponível em: http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/bitstream/doc/1209/1/geoparques_brasil_propostas.pdf.
- SILVA, J. *et al.* The geodiversity of brazil: Quantification, distribution, and implications for conservation areas. *Geoheritage*, Springer, v. 13, p. 1–21, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12371-021-00598-0>.
- SILVA, J.; RODRIGUES, C.; PEREIRA, D. Mapping and analysis of geodiversity indices in the xingu river basin, amazonia, brazil. *Geoheritage*, Springer Verlag, v. 7, p. 337–350, 2015.
- SIMBAÑA-TASIGUANO, M. *et al.* Geoeducation strategies in the Amazon, Napo Sumaco Aspiring UNESCO Global Geopark. *International Journal of Geoheritage and Parks*, Elsevier, v. 12, p. 465–484, 2024.
- SIMBAÑA-TASIGUANO, M. *et al.* Geodiversity geoconservation and geotourism in Napo Sumaco Aspiring UNESCO Global Geopark. *Geoheritage*, Springer, v. 16, 2024.
- SIMÕES, M. S. *et al.* Projeto Uatumã Abonari: geologia e recursos minerais das folhas Igarapé Canoa - SA.20-X-D-VI, Santo Antônio do Abonari - SA.20-X-D-III e Vila do Pitanga - SA.20-B-VI, Estado do Amazonas. Manaus: CPRM, 2019. Disponível em: http://rigeo.sgb.gov.br/jspui/bitstream/doc/21321/3/carta_geologica_sto_ant_abonari.pdf.
- SOUZA, A. G. H.; RIBEIRO, L. M. A. *Geoparques do Brasil: geoparque Cachoeiras do Amazonas: Presidente Figueiredo, AM: atualização do inventário do patrimônio geológico e sítios da geodiversidade*. [S.l.]: Serviço Geológico do Brasil, 2024.

TASSINARI, C. C. G.; MACAMBIRA, M. J. B. Geochronological provinces of the amazonian craton. *Episodes*, International Union of Geological Sciences, v. 22, p. 174–182, 1999. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/279539867_Geochronological_provinces_of_the_Amazonian_Craton>.

TEIXEIRA, W. *et al.* A review of the geochronology of the amazonian craton: Tectonic implications. *Precambrian Research*, Elsevier, v. 42, p. 213–227, 1989. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0301926889900120>>.

VALÉRIO, C. S.; SOUZA, V. S.; MACAMBIRA, M. J. B. The 1.90–1.88ga magmatism in the southernmost Guyana Shield, Amazonas, Brazil: Geology, geochemistry, zircon geochronology, and tectonic implications. *Journal of South American Earth Sciences*, Elsevier BV, v. 28, n. 3, p. 304–320, 2009. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2009.04.001>>.

VALÉRIO, C. S. *et al.* Geoquímica e geocronologia Pb-Pb em zircão da Suíte Intrusiva Água Branca, município de Presidente Figueiredo (AM): evidências de colisão no Paleoproterozóico da Amazônia Ocidental. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 36, n. 2, p. 359–370, 2006.

VERA, D. *et al.* Quantitative assessment of geodiversity in Ecuadorian Amazon—case study: Napo Sumaco Aspiring UNESCO Geopark. *Geoheritage*, Springer, v. 15, 2023.

WANDERLEY-FILHO, J. R. *et al.* The paleozoic Solimões and Amazonas Basins and the Acre Foreland Basin of Brazil. In: _____. *Amazonia: Landscape and Species Evolution: A Look into the Past*. [S.l.]: Blackwell Publishing, 2010. p. 447.

ZWOLINSKI, Z.; NAJWER, A.; GIARDINO, M. Methods for assessing geodiversity. In: _____. *Geoheritage: Assessment, Protection, and Management*. Amsterdam: Elsevier, 2018. cap. 2, p. 27–52.