



ANÁLISE ESPACIAL QUANTITATIVA DA GEODIVERSIDADE DE RORAIMA: UMA ABORDAGEM MULTIMETODOLÓGICA COM DENSIDADE KERNEL

Stélio Soares Tavares Júnior¹
Luiza Câmara Beserra Neta²
Antônio Alberto Teixeira Gomes³

RESUMO

A geodiversidade, essencial para a gestão dos recursos naturais, tem sido avaliada de forma predominantemente qualitativa na Amazônia brasileira, incluindo Roraima. A complexa composição abiótica roraimense, contudo, exige métodos quantitativos para uma avaliação precisa. Este estudo objetivou quantificar a geodiversidade de Roraima utilizando um índice abrangente, integrando dados geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos. Para isso, a metodologia empregou uma função de densidade de Kernel, permitindo estimar a densidade de pontos representativos da geodiversidade no território estadual. A partir da elaboração de mapa integrado que representa a sobreposição espacial de diferentes atributos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e da hidrografia. A análise da densidade Kernel revelou um mapa de intensidade de geodiversidade para Roraima, com variações sutis entre os modelos de reclassificação. Observou-se uma vasta distribuição de áreas com alta intensidade de geodiversidade por todo o estado, reflexo da diversidade paisagística e da configuração geotectônica do cráton Amazônico. As regiões setentrionais, influenciadas pelo Cinturão Ígneo Orocaima, e as áreas centrais, marcadas por formas de relevo residuais e pela bacia hidrográfica do rio Cauamé, apresentaram elevados índices. Trechos ao longo do Rio Branco também exibiram alta geodiversidade, atribuída às feições geomorfológicas fluviais. Essas zonas de alta intensidade indicam significativo potencial para a identificação de geossítios, como a Pedra Pintada, já reconhecida pelo GEOSIT, e a região do graben do Tacutu, que se destaca pela sua relevância para o geopatrimônio. O estudo permitiu a distinção de padrões espaciais da geodiversidade em Roraima, com áreas de alta intensidade ligadas à complexa configuração geotectônica do cráton Amazônico, especialmente no cinturão Orocaima, graben do Tacutu e Rio Branco. Os resultados fornecem uma base sólida para a identificação de geossítios e futuras pesquisas em geopatrimônio, destacando o potencial do estado para conservação e planejamento territorial.

INTRODUÇÃO

A geodiversidade, compreendida como a vasta variedade de elementos abióticos da natureza, desde rochas e minerais até formas de relevo e processos geológicos, representa um campo de estudo crucial para a compreensão e gestão dos recursos naturais. No Brasil, e em especial na Amazônia, a análise da geodiversidade tem sido predominantemente qualitativa. Contudo, a rica e complexa composição abiótica do estado de Roraima, com sua notável diversidade de recursos naturais inanimados, exige a aplicação de métodos mais rigorosos para uma avaliação precisa e quantificável.

¹ Prof. do Curso de Geologia da Universidade Federal de Roraima - UFRR, stelio.tavares@ufr.br;

² Profa. do Curso de Geografia da Universidade Federal de Roraima - UFRR, luiza.camara@ufr.br

³ Prof. do Curso de Geografia da Universidade do Porto- Portugal - UP, albgomes@gmail.com;



Neste contexto este estudo explora a lacuna existente em abordagens quantitativas para a geodiversidade, especialmente em regiões de alta complexidade, como Roraima. A predominância de estudos qualitativos tem limitado a capacidade de se estabelecerem parâmetros objetivos para a identificação, classificação e valoração de geossítios. Deste modo a adoção de métodos quantitativos decorre da necessidade de se transcender a descrição para se alcançar uma análise espacial e de intensidade da geodiversidade. Essa abordagem inovadora permitirá não apenas uma caracterização mais robusta dos atributos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos, mas também contribuirá para a consolidação de uma base de dados que subsidiará futuras pesquisas e monitoramentos ambientais.

Para a região de Roraima, a importância deste estudo é múltipla. Sendo o estado mais ao norte do Brasil, Roraima é um testemunho da dinâmica da história geológica da Terra, abrigando um mosaico impressionante de componentes abióticos. A quantificação da geodiversidade permitirá a identificação de geossítios com relevância científica intrínseca, mas também com potencial econômico (associado a recursos minerais e turísticos), educativo (para a formação e conscientização ambiental) e cultural (ligado à identidade e história dos povos locais). O conhecimento aprofundado da geodiversidade de Roraima é, portanto, essencial para o planejamento territorial sustentável, para a criação de políticas de conservação eficazes e para o desenvolvimento de iniciativas de geoturismo, que valorizem o patrimônio natural do estado. Além disso, a delimitação e valoração de geossítios específicos podem impulsionar ações de geoconservação, protegendo áreas de singular interesse geológico e geomorfológico de pressões antrópicas.

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo principal quantificar a geodiversidade do estado de Roraima, por meio da aplicação de um índice abrangente que integra dados geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos. Para alcançar este objetivo, adotou-se uma estrutura metodológica robusta, baseada em trabalhos consolidados na literatura Pereira et al. (2013); Silva et al. (2015); Forte et al. (2018); Betard & Peulvast (2019) e Silva et al. (2021), permitindo o desenvolvimento de um índice de geodiversidade abrangente para todo o território estadual. Neste estudo, reconhecendo as características do estado de Roraima, como sua complexa distribuição espacial de unidades litológicas, feições geomorfológicas, classes de solos e bacias hidrográficas, empregou-se uma metodologia baseada na função de densidade de Kernel para estimar a densidade de pontos representativos da geodiversidade.

A geodiversidade, conforme Brilha (2005), transcende a mera inclusão de rochas, minerais e fósseis. Adotando a definição da *Royal Society for Nature Conservation* do Reino



Unido, ela engloba a variedade de ambientes geológicos, fenômenos e processos ativos que moldam paisagens, rochas, minerais, fósseis, solos e outros depósitos superficiais, servindo como suporte fundamental para a vida. Esta perspectiva abrange exclusivamente os componentes não vivos do planeta, incluindo processos geológicos atuais. Tal definição é particularmente adequada para a aplicação de metodologias de quantificação da intensidade de geodiversidade, pois foca em elementos geológicos mensuráveis, destacando como a geodiversidade condiciona intrinsecamente a biodiversidade ao fornecer as condições abióticas essenciais.

Segundo Brilha (2018), a geodiversidade pode ser caracterizada por abordagens qualitativas e quantitativas. O estudo completo demanda ambas as análises. A caracterização qualitativa descreve os elementos da geodiversidade em uma área, muitas vezes explicando seus valores de forma não numérica, identificando especificidades. Já a análise quantitativa expressa objetivamente a variabilidade espacial dos elementos. É crucial diferenciar a quantificação dos valores de geodiversidade, que atribui um número ao valor intrínseco de um elemento, da quantificação da intensidade dos componentes da geodiversidade (objeto do presente estudo), que mede a abundância ou densidade desses elementos. Essa distinção otimiza a representação cartográfica e a compreensão da distribuição da geodiversidade.

A avaliação da geodiversidade é um campo em evolução. Inicialmente, o foco estava na identificação do patrimônio geológico, mas a tendência atual é a quantificação holística de toda a diversidade geológica natural,

Na metodologia aplicada para quantificação da geodiversidade do Estado do Paraná, Pereira et al. (2013) validam as escolhas metodológicas baseadas em grades, pois proporcionam uma contagem individual da diversidade de cada componente e uma clara distinção entre os valores dos índices. Neste sentido, geologia é um componente fundamental, quantificável por unidades litoestratigráficas. Para a geomorfologia, mapas que representam feições por áreas são mais adequados, com rios avaliados separadamente para realçar o índice geomorfológico. A avaliação do Índice Pedológico foca em ordens de solo para evitar a supervalorização. Por fim, o índice de ocorrências minerais reflete aspectos não expressos pelos demais, como depósitos especiais e fontes de energia, dependendo da disponibilidade de informações. Nesta metodologia a representação cartográfica do índice de geodiversidade emerge como uma ferramenta de gestão eficaz, consolidando informações dispersas e sendo facilmente compreendida por não especialistas. Áreas de alta geodiversidade merecem atenção especial no



planejamento do uso da terra, com potencial para conservação, educação e turismo, e são cruciais na definição de estruturas ecológicas e áreas protegidas.

Conforme Wolniewicz (2023) para superar as limitações das avaliações de geodiversidade baseadas em grades, empregou-se uma metodologia inovadora que combina a análise de centroides com a estimativa de densidade Kernel. A análise de centroides consiste na identificação dos centros geométricos de polígonos que representam elementos da geodiversidade, ou áreas com valores homogêneos de variáveis geodiversitárias. Subsequentemente, a estimativa de densidade Kernel foi utilizada para visualizar a densidade espacial desses centroides, permitindo a criação de mapas que destacam hotspots e coldspots, indicando áreas de maior ou menor concentração de elementos da geodiversidade por unidade de área. Essa abordagem proporciona uma representação mais precisa e contínua da distribuição da geodiversidade no espaço.

A quantificação da geodiversidade tem apresentado uma evolução notável, transitando de uma perspectiva restrita para uma abordagem mais integradora, que busca abarcar a multiplicidade de componentes geológicos. Contudo, apesar dos progressos, as metodologias atuais ainda enfrentam desafios significativos, como a tendência de supervalorização dos aspectos geomorfológicos e a dificuldade de aplicação em distintas escalas espaciais. Isso ressalta a necessidade premente de aprimorar as ferramentas existentes, visando capturar de forma mais eficaz a complexidade inerente à diversidade geológica natural.

A quantificação da intensidade da geodiversidade é, por sua vez, um passo fundamental para a identificação de potenciais geossítios. No entanto, é imperativo que tal quantificação seja precedida por um conhecimento aprofundado da fisiografia da área em estudo. Isso garante que a análise esteja ancorada em uma compreensão sólida do contexto geomorfológico e geológico local, otimizando a precisão na seleção e caracterização dos sítios de interesse geológico.

MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa adotou uma abordagem metodológica pautada em etapas sequenciais e interligadas, visando à elaboração de um mapa de intensidade da geodiversidade do estado de Roraima, o mais setentrional da República Federativa do Brasil (Figura 1). A fase inicial consistiu na revisão bibliográfica aprofundada de referenciais teóricos e metodológicos relacionados à geodiversidade. Este processo abrangeu a análise de conceitos e fundamentos inerentes à temática, com foco na avaliação qualitativa e quantitativa da intensidade da geodiversidade. Essa etapa foi crucial para o embasamento teórico da pesquisa, garantindo a



compreensão das diversas abordagens e indicadores utilizados para caracterizar a geodiversidade.

A quantificação da geodiversidade do estado de Roraima foi realizada por meio de uma metodologia que segue os preceitos de Forte et al. (2018), focando na análise da sobreposição de mapas temáticos e na aplicação da técnica de Densidade Kernel (EDK). Este procedimento permite a criação de um mapa integrado que representa a sobreposição espacial de diferentes atributos geológicos e geomorfológicos, superando a limitação de analisar cada tema isoladamente.

A metodologia empregada consistiu na integração de dados geoespaciais vetoriais referentes à litologia, geomorfologia, pedologia e principais redes de drenagem. A validade dos dados é assegurada, uma vez que todos os mapas temáticos foram obtidos de uma base de dados unificada proveniente do Zoneamento Ecológico e Econômico (ZEE) do estado de Roraima. Esses dados passaram por múltiplas etapas de ajustes e validação, seguindo rigorosamente a metodologia nacional para a elaboração de Zoneamentos Ecológicos nos estados brasileiros. O objetivo principal dessa etapa é a criação de um mapa integrado que represente a sobreposição espacial de diferentes atributos geológicos e geomorfológicos relevantes. Esse processo é crucial para permitir uma análise combinada das características que compõem a geodiversidade, transformando dados individuais em uma representação unificada e mensurável.

Após a sobreposição dos mapas temáticos, as feições geométricas multipartes presentes na camada vetorial resultante foram individualizadas utilizando a ferramenta "Multiparts to Singlepart". Este pré-processamento teve como objetivo otimizar a geração de um mapa de pontos centroides, etapa subsequente da metodologia.

O cálculo do ponto centroide de polígonos na metodologia de EDK é essencial para transformar dados poligonais em dados pontuais, permitindo que a análise de densidade seja aplicada de forma eficaz. O uso dos centroides possibilita a identificação de padrões espaciais na distribuição das feições geológicas, onde agrupamentos indicam áreas de maior riqueza e diversidade geológica, enquanto a dispersão aponta para menor variabilidade.

A partir do mapa de centroides gerado, aplicou-se a função de Densidade Kernel, durante esta etapa, foram explorados diferentes valores de raio de busca e tamanhos de célula raster. O resultado da EDK (baseada nos centroides) é um mapa de densidade, onde áreas com maior concentração de centroides (e, portanto, de polígonos de geodiversidade) indicam maior geodiversidade. Essa abordagem permite:



- Quantificar a geodiversidade: Através dos valores de densidade gerados, é possível atribuir um índice numérico para a geodiversidade em diferentes locais.
- Visualizar espacialmente: O mapa resultante facilita a identificação visual das áreas com maior e menor geodiversidade, auxiliando no planejamento e na tomada de decisões.

Esta etapa culminou na geração do mapa de intensidade de geodiversidade, que representa a complexidade e diversidade dos elementos geológicos, geomorfológicos e pedológicos da área de estudo. A superfície contínua de geodiversidade foi então reclassificada em um número finito de níveis, com o objetivo de destacar características específicas dos dados e facilitar a interpretação dos resultados. Para otimizar a visualização dos níveis de geodiversidade, empregou-se a operação de alongamento, baseada em estatísticas de desvio padrão e mínimo-máximo.

É fundamental ressaltar que o conhecimento do contexto da paisagem é crucial para a correta interpretação dos mapas de geodiversidade. Os parâmetros metodológicos utilizados na análise de EDK, como o tamanho da célula e o raio de busca, influenciam diretamente a distribuição espacial e as dimensões das áreas de alta e baixa intensidade de geodiversidade.

Para auxiliar na compreensão da metodologia empregada, um fluxograma detalhado foi elaborado e apresentado na Figura 2, ilustrando o passo a passo dos procedimentos realizados.

Paralelamente à revisão bibliográfica e após às etapas de processamento para geração do mapa de intensidade de geodiversidade, foram realizadas campanhas de campo em áreas identificadas como de alta intensidade de geodiversidade. Durante essas incursões, procedeu-se à aquisição de imagens aéreas por meio de veículos aéreos não tripulados (drones), descrições detalhadas da paisagem e mensurações estruturais. Os dados coletados em campo foram essenciais para a validação e enriquecimento das informações obtidas por meio do mapeamento e para a caracterização in loco dos elementos da geodiversidade.

Todos os procedimentos para a elaboração do mapa de intensidade da geodiversidade foram executados no Laboratório de Geotecnologias do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Roraima. O processamento e a análise dos dados ocorreram em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software Arcgis Pro. Este trabalho foi viabilizado por meio de uma colaboração técnico-científica estabelecida com o curso de Geografia da Faculdade de Letras da Universidade do Porto.

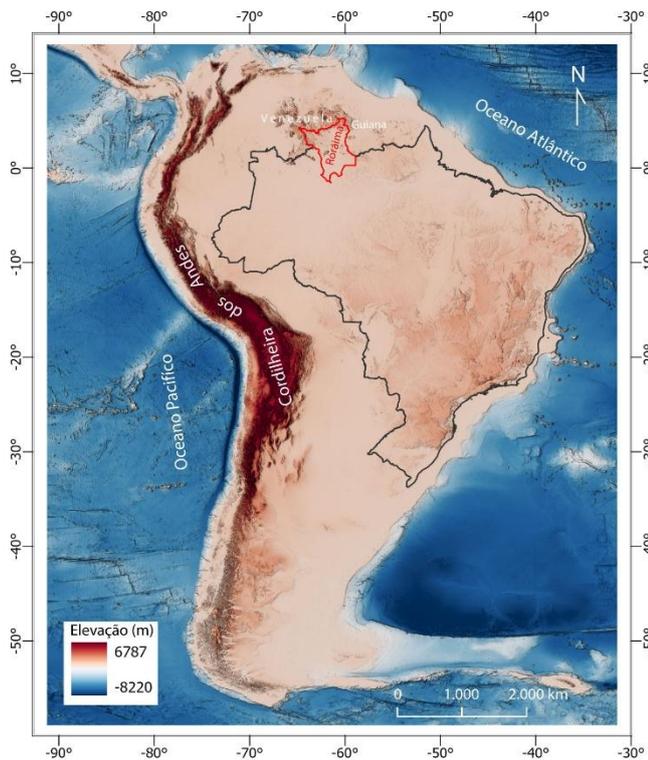


Figura 1: Localização do estado de Roraima e hipsometria da América do Sul

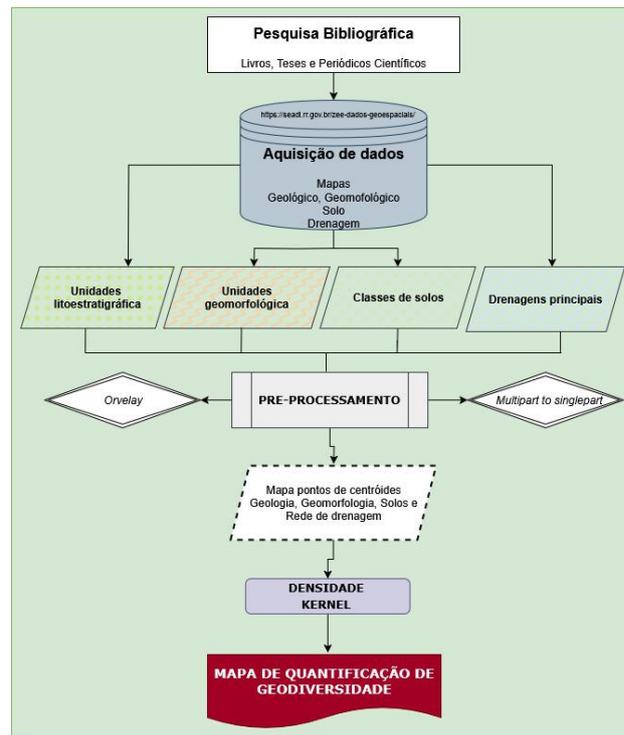


Figura 2: Fluxograma metodológico

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da técnica de estimativa da densidade Kernel revelou um mapa de intensidade de geodiversidade para o estado de Roraima, apresentado em dois modelos de reclassificação: *natural breaks* e desvio padrão (Figura 3). Uma análise preliminar indica uma sutil redução nos intervalos de alta e média intensidade no mapa reclassificado via desvio padrão em comparação com o *natural breaks*. Isso sugere que os valores nesses intervalos estão menos dispersos e, possivelmente, mais consistentes, o que pode refletir uma maior homogeneidade nas áreas de maior geodiversidade.

Observa-se a ocorrência de diversas áreas de alta intensidade de geodiversidade que se estendem de norte a sul e de leste a oeste do estado. Essa distribuição é um reflexo direto da forte diversidade de paisagem de Roraima (Figura 4), evidenciada pela configuração geotectônica desta porção setentrional do cráton Amazônico, conforme demonstrado por Fraga et al. (2024). A complexidade geológica é acompanhada por morfoestruturas de relevo condicionadas por arranjos tectônicos, inúmeras classes de solos derivadas de processos pedogenéticos associados a essas litologias, e diversas bacias de drenagem que compõem a bacia do Rio Branco.

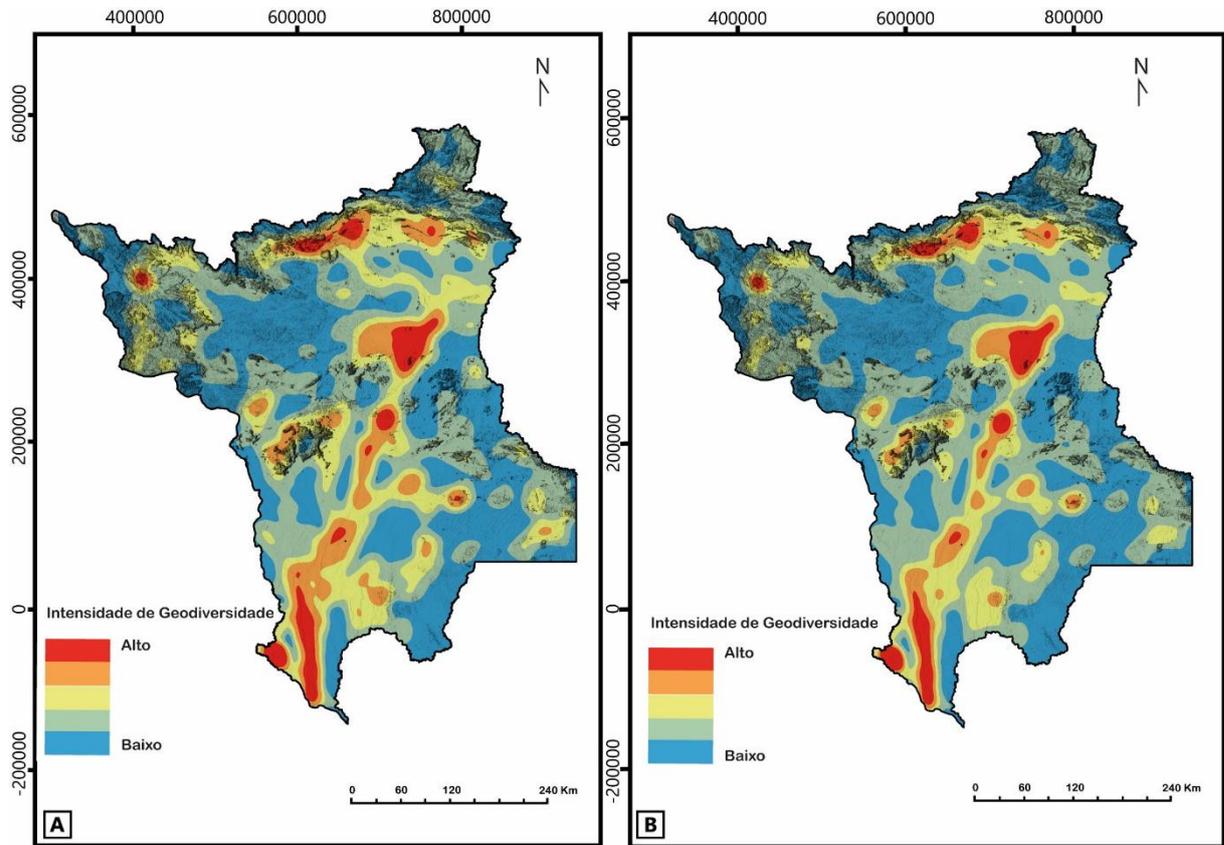


Figura 3: Mapa de intensidade de geodiversidade do estado de Roraima. (A) Classificação *natural breaks* e (B) Classificação desvio padrão.

Os intervalos de alta intensidade de geodiversidade correspondem a áreas de grande diversidade geológica, geomorfológica e pedológica. Na região norte de Roraima, essa alta intensidade está associada à variabilidade litológica do Cinturão Ígneo Orocaima, conforme descrito por Fraga et al. (2024), e às diversas morfoestruturas de relevo a ele conectadas, visualizadas na imagem do relevo sombreado integrada à variabilidade da intensidade de geodiversidade.

Na região central do estado, as altas intensidades de geodiversidade são provavelmente influenciadas, além da variabilidade litológica, pelas formas de relevo residuais que contrastam com a monotonia de extensas áreas de relevo suavemente plano. Soma-se a isso a alta incidência de canais fluviais da bacia hidrográfica do rio Cauamé, afluente importante da margem direita do rio Branco, que possui grande parte de sua extensão na área urbana de Boa Vista. Nesta área central, as regiões de média a alta intensidade se alongam em consonância com a direção principal do graben mesozoico do Tacutu, uma área marcada por uma vasta tipologia litológica, resultado dos estágios evolucionários da bacia sedimentar do Tacutu.



Outros pontos de destaque em termos de alta intensidade de geodiversidade correspondem aos trechos ao longo do rio Branco. A elevada geodiversidade nessas áreas é provavelmente uma função das diversas feições geomorfológicas de natureza fluvial, como bancos de areia, terraços e planícies de inundação, que contribuem para essa complexa geodiversidade.

As áreas de alta geodiversidade delineadas na Figura 3 representam um potencial significativo para a identificação de geossítios, com especial enfoque naqueles intrinsecamente relacionados à evolução da paisagem, à diversidade de rochas, minerais, fósseis e a processos geológicos singulares. Para uma compreensão aprofundada da complexidade da paisagem regional, é imperativo que se realizem inventários detalhados nessas áreas. Tais inventários devem contemplar levantamentos geológicos, geomorfológicos, pedológicos e hidrológicos abrangentes.

As áreas identificadas com alta intensidade de geodiversidade em Roraima oferecem um significativo potencial para o reconhecimento de geossítios. Entre essas áreas, destaca-se a região da Pedra Pintada, já catalogada na plataforma digital de geossítios do Serviço Geológico do Brasil (GEOSSIT) como um geossítio potencial. Este local, de valor científico, educacional e turístico em escala internacional, apresenta um baixo risco de degradação, tornando-o um exemplo para a conservação e valorização do geopatrimônio (CPRM, 2024).

Outra área com potencial para a criação de geossítios é a região central de Roraima, especificamente na região do Graben do Tacutu. Evangelista et al. (2025) conduziram um inventário e avaliação de 12 locais de interesse geológico (11 geossítios e 1 sítio de geodiversidade) na porção brasileira da Bacia do Tacutu. O objetivo desse estudo foi identificar o potencial de uso educacional e turístico desses locais, reforçando a relevância da região para o geopatrimônio estadual.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo desenvolveu uma metodologia rigorosa para mapear a intensidade da geodiversidade em Roraima. Utilizando a abordagem de Forte et al. (2018), que integra Estimativa de Densidade Kernel (EDK) com dados geoespaciais de litologia, geomorfologia, pedologia e redes de drenagem do Zoneamento Ecológico e Econômico (ZEE) de Roraima, foi possível superar a análise individual de cada tema.

A transformação de dados poligonais em pontuais permitiu identificar padrões espaciais, revelando áreas de maior riqueza e diversidade abiótica. O mapa gerado visualiza espacialmente

a geodiversidade, atribuindo índices numéricos essenciais para planejamento e tomada de decisões, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas em geopatrimônio.

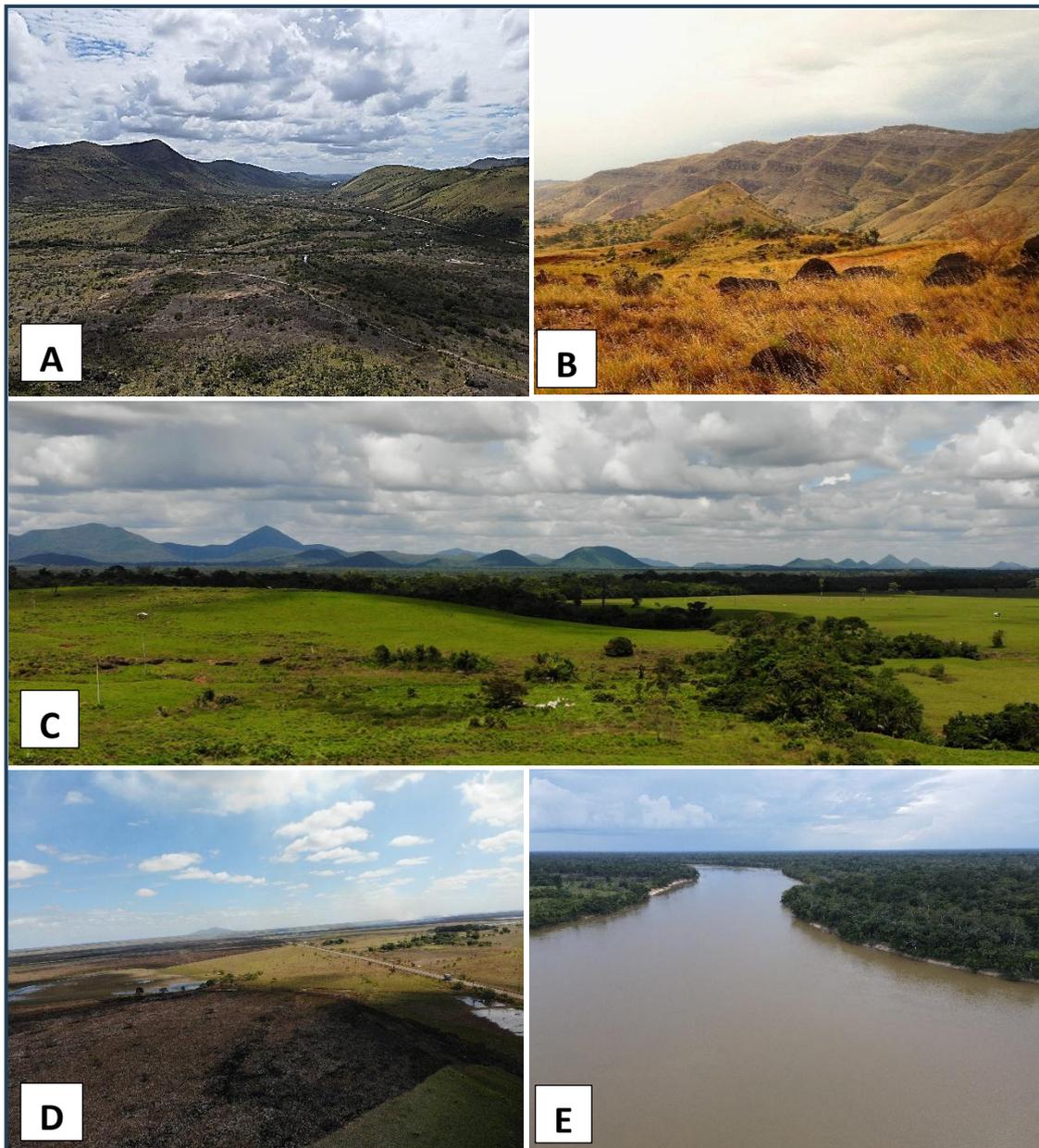


Figura 4 – Exemplos da diversidade de paisagens do estado de Roraima: (A) vale em forma de "U" encaixado entre serras com cristas estruturalmente alinhadas da região norte, esculpido em rochas graníticas e vulcânicas; (B) relevo montanhoso, característico da região norte, moldado em camadas de rochas areníticas basculhadas, que configuram a borda da bacia sedimentar intracratônica Roraima; (C) Alinhamento estrutural de serras esculpidas em rochas graníticas, evidenciando a geomorfologia da região central do estado; (D) região savânica central de Roraima, caracterizada por uma paisagem de campos abertos, pontuada pela presença de lagos dispersos e relevos residuais que emergem suavemente do terreno; (E) sucessão de terraços fluviais que delineiam as margens do rio Branco, evidenciando os múltiplos estágios de incisão e agradação do canal no sul de Roraima.



Palavras-chave: Quantificação da Geodiversidade, Densidade Kernel, Geodiversidade de Roraima

REFERÊNCIAS

- BÉTARD, F., & PEULVAST, J.P. Geodiversity hotspots: Concept, method and cartographic application for geoconservation purposes at a regional scale. *Environmental management*, 63(6), 2019 822-834. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01168-5>
- BRILHA, J. Patrimônio Geológico e Geoconservação: A Conservação da Natureza na sua Vertente Geológica. Lisboa: Palimage Editores, 2005. 183p.
- BRILHA, J., GRAY, M., PEREIRA, D.I., & PEREIRA, P. Geodiversity: An integrative review as a contribution to the sustainable management of the whole of nature. *Environmental Science & Policy*, 86, 19-28, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.001>
- CPRM, Serviço Geológico do Brasil (2024). Geossit: cadastro de sítios geológicos. Disponível em: <https://www.cprm.gov.br/geossit>, Acesso em: 05 julho 2025
- EVANGELISTA, T.A.; GARCIA, M.G.M.; PAMELLA, M.; HOLANDA, E.C. Inventory and Assessment of Geological Sites in the Brazilian Portion of the Takutu Basin, Roraima. *Geoheritage*. Springer, <https://doi.org/10.1007/s12371-025-01135-z>
- FORTE, J. P., BRILHA, J., PEREIRA, D. I., & NOLASCO, M. Kernel Density Applied to the Quantitative Assessment of Geodiversity. *Geoheritage*. Springer Science and Business Media LLC. 2018. <http://doi.org/10.1007/s12371-018-0282-3>
- FRAGA, L.M, CORDANI, U., DREHER, AM, SATO K, REIS,, NJ, NADEAU S, de ROEVER, E, KROONENBERG, S, MAURER, VC. Early Orosirian belts of the central Guiana Shield, northern Amazonian Craton: U-Pb geochronology and tectonic implications. *Precambr Res* 407:107362. 2024, <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2024.107362>
- PEREIRA, D.I., PEREIRA, P., BRILHA, J., & SANTOS, L. Geodiversity assessment of Paraná State (Brazil): an innovative approach. *Environmental management*, 52, 541-552. 2013 <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00267-013-0100-2>
- SILVA, J.P.S., ALVES, G.B., ROSS, J.L.S., OLIVEIRA, F.S., NASCIMENTO, M.A.L. & FELINI, M. G., MANOSSO, F.C. & PEREIRA, D.I. The Geodiversity of Brazil: Quantification, Distribution, and Implications for Conservation Areas. *Geoheritage*, 13 (75), 2021, <https://doi.org/10.1007/s12371-021-00598-0>
- SILVA, J., RODRIGUES, C., & PEREIRA, D. I. Mapping and analysis of geodiversity indices in the Xingu River basin, Amazonia, Brazil. *Geoheritage*, 7, 337-350. 2015 <https://doi.org/10.1007/s12371-014-0134-8>
- WOLNIEWICZ, P. Quantifying geodiversity at the continental scale: limitations and prospects. *Resources*, 12(5), 59. 2023 <https://doi.org/10.3390/resources12050059>