



### ANÁLISE ESPACIAL DAS PISTAS DE POUSO CLANDESTINAS E A MINERAÇÃO ILEGAL NOS MUNICÍPIOS DO BIOMA AMAZÔNIA

Tatiano Diego Armando da Silva <sup>1</sup>, Viviane Adriano Falcão <sup>1</sup>, Alex Mota dos Santos<sup>2</sup>, Carlos Fabricio Assunção da Silva <sup>1</sup>

1. Universidade Federal de Pernambuco
2. Universidade Federal do Sul da Bahia

\* Corresponding author e-mail address: [tatiano.silva@ufpe.br](mailto:tatiano.silva@ufpe.br)

#### ID DO PAPEL: SIT1231084

#### RESUMO

A expansão da mineração ilegal na Amazônia tem sido viabilizada por uma rede de infraestrutura clandestina, incluindo pistas de pouso utilizadas para acesso, suprimento e transporte de recursos em áreas remotas. Este estudo tem como objetivo realizar uma análise espacial entre pistas de pouso clandestinas e áreas de mineração ilegal nos municípios do Bioma Amazônia. Para isso, foram aplicadas técnicas de Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE), utilizando o Índice Global de Moran e o Índice Local de Moran. Os resultados revelaram autocorrelação espacial positiva entre as variáveis, destacando um cluster Alto-Alto com 23 municípios no sul do Pará, onde há concentração elevada de áreas de mineração ilegal e pistas de pouso. Esse padrão indica uma forte associação espacial e sugere a existência de zonas críticas de conectividade logística clandestina. Tais evidências podem auxiliar na formulação de estratégias territoriais externas para monitoramento, ordenamento e planejamento de transporte na região.

**Palavras-chave:** Floresta Amazônica, Logística Clandestina, Índice de Moran, Indicadores Locais de Associação Espacial, Análise Exploratória de Dados Espaciais.

#### ABSTRACT

The expansion of illegal mining in the Amazon has been made possible by a network of clandestine infrastructure that includes airstrips used for access, supply, and transportation of resources in remote areas. This study aims to perform a spatial analysis between clandestine airstrips and illegal mining areas in municipalities in the Amazon Biome. To this end, Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA) techniques were applied, using the Global Moran Index and the Local Moran Index. The results revealed positive spatial autocorrelation between the variables, highlighting a High-High cluster with 23 municipalities in southern Pará, where a high number of illegal mining areas and airstrips are concentrated. This pattern indicates a strong spatial association and suggests the existence of critical zones of clandestine logistics connectivity. Such evidence can assist in external territorial strategies for monitoring, ordering, and planning transportation in the region.

**Keywords:** Amazon Rainforest, Clandestine logistics, Moran Index, Local Indicators of Spatial Association, Exploratory Spatial Data Analysis.

#### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

#### DECLARAÇÃO DE USO DE IA GENERATIVA

Esta pesquisa não utilizou IA generativa

**ID DO PAPEL: SIT1231084**

## **ANÁLISE ESPACIAL DAS PISTAS DE POUSO CLANDESTINAS E A MINERAÇÃO ILEGAL NOS MUNICÍPIOS DO BIOMA AMAZÔNIA**

### **1 INTRODUÇÃO**

A floresta Amazônica é reconhecida como a maior floresta tropical do mundo (Bowman et al., 2022), com uma extensão aproximada de 6.500.000 km<sup>2</sup> (Yahn Filho, 2005). Abrangendo nove países da América do Sul, é considerada um dos ecossistemas mais biodiversos do planeta, exercendo papel fundamental na regulação do clima global (Albert et al., 2023).

A importância da Amazônia em termos climatológicos está ligada à sua capacidade de estocar carbono (Marengo et al., 2018) e influenciar padrões de precipitação em escala regional e global (Sapucci et al., 2022). A degradação do bioma Amazônia tem comprometido o equilíbrio climático, intensificando fenômenos extremos, como secas e enchentes, e agravando os efeitos das mudanças climáticas (Bowman et al., 2022).

Nas últimas décadas, a floresta tem sido degradada por diversas atividades ilegais, tais como a mineração (Silva et al., 2023a), desmatamento (Silva et al., 2023b; Santos et al., 2021), incêndios florestais (Silva et al., 2022), poluição dos recursos hídricos (Ferreira et al., 2021), dentre outros. Essas atividades têm impactado áreas protegidas por lei como Unidades de conservação e Terras Indígenas (Silva et al., 2023b). Esses impactos são viabilizados por uma logística clandestina estruturada para sustentar atividades extrativistas ilegais (Silva et al., 2023b).

As pistas de pouso clandestinas (MapBiomias, 2023), associadas a estradas clandestinas (ANTT, 2024), funcionam como vetores logísticos estratégicos para a mineração ilegal. Essas infraestruturas possibilitam o acesso, transporte e escoamento dos recursos extraídos, favorecendo a expansão dessas atividades em regiões remotas e de difícil fiscalização.

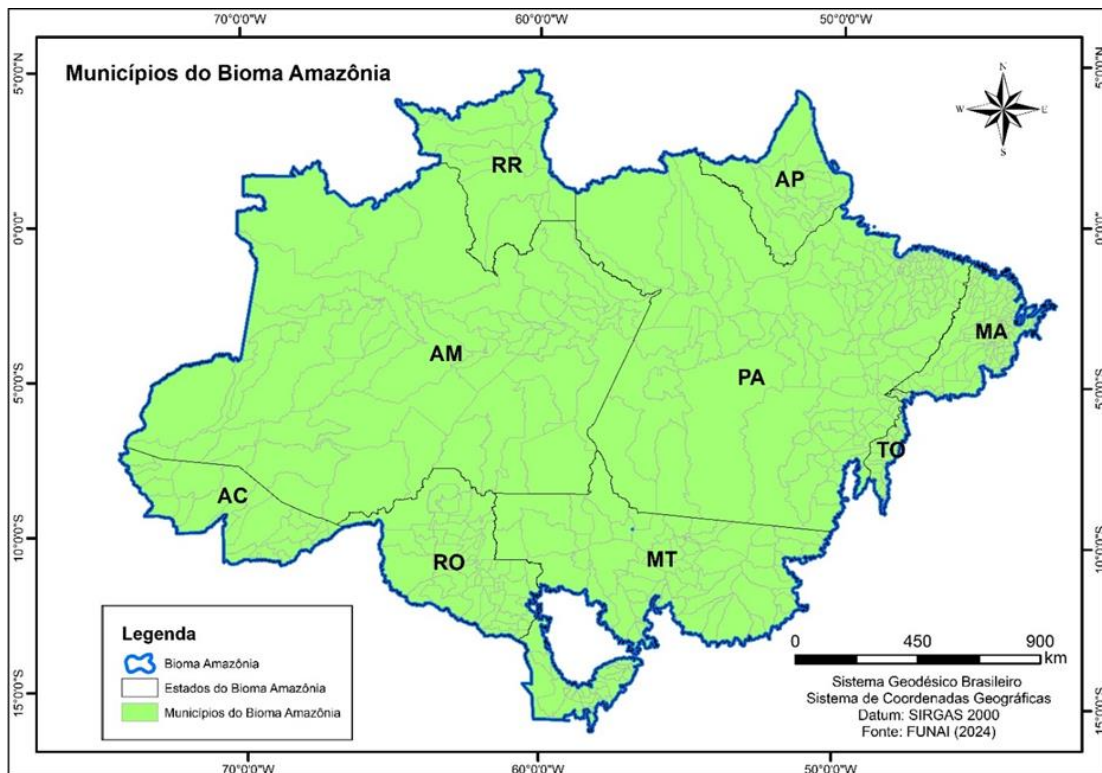
Nesse cenário, o planejamento dos transportes assume um papel estratégico no enfrentamento das dinâmicas ilegais que afetam o território do Bioma Amazônia ou de qualquer outro bioma no Brasil. A análise espacial da malha clandestina de infraestrutura, como pistas de pouso e estradas clandestinas, permite identificar padrões de ocupação e logística que favorecem a mineração ilegal.

A integração de critérios territoriais e ambientais ao planejamento dos transportes no Bioma Amazônia pode potencializar políticas públicas mais eficazes de monitoramento e fiscalização (Oliveira Neto e Nogueira, 2023). De acordo com Oliveira Neto e Nogueira (2023), o sistema de transportes na Amazônia não pode ser entendido apenas como um meio de circulação, mas como elemento estruturante da ocupação e uso do solo, sendo essencial para compreender as transformações em curso e propor soluções sustentáveis para a região.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo realizar uma análise espacial entre pistas de pouso clandestinas e áreas de mineração ilegal nos municípios pertencentes ao Bioma Amazônia, no ano de 2023. A análise busca identificar padrões geográficos que subsidiem a gestão territorial e o enfrentamento das atividades ilegais por meio de ferramentas de planejamento e fiscalização.

### **2 ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo abrange 559 municípios localizados integralmente no Bioma Amazônia (Figura 1), que possui cerca de 4.196.943 km<sup>2</sup> no território brasileiro. O Bioma Amazônia é caracterizado por clima equatorial úmido do tipo Af, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias superiores a 25 °C e índices pluviométricos que frequentemente ultrapassam 2.000 mm ao ano.



**Figura 1:** Localização dos municípios do Bioma Amazônia. Fonte: Os autores (2025).

A vegetação predominante é a floresta ombrófila densa, com grande diversidade florística e estratificação vertical. O relevo, em geral, é composto por planaltos e planícies fluviais de baixa altitude, o que favorece a construção de pistas de pouso clandestinas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Dados

Este estudo utilizou dados e informações de diferentes fontes de dados secundários. Os dados sobre mineração ilegal no ano de 2023 foram obtidas por meio da RAISG – Rede Amazônica de Informação Socioambiental Georreferenciada. Os dados referentes às pistas de pouso clandestinas foram obtidos pelo MapBiomas (2023). As estradas clandestinas utilizadas na análise foram obtidas junto ao Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON, 2020). Já os limites dos municípios do Bioma Amazônia foram obtidos pelo portal TerrasBrasilis (2024). Por fim, a delimitação do Bioma Amazônia foi obtida a partir do portal TerrasBrasilis, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2024). Todos os dados utilizados foram obtidos em formato vetorial.

#### 3.2 Métodos

Esta pesquisa utilizou técnicas de Análise Exploratória de Dados Espaciais (AEDE) para investigar padrões de autocorrelação espacial entre a presença de pistas de pouso clandestinas e as áreas de mineração ilegal nos municípios do Bioma Amazônia no ano de 2023.

##### 3.2.1. Índice de Moran Global

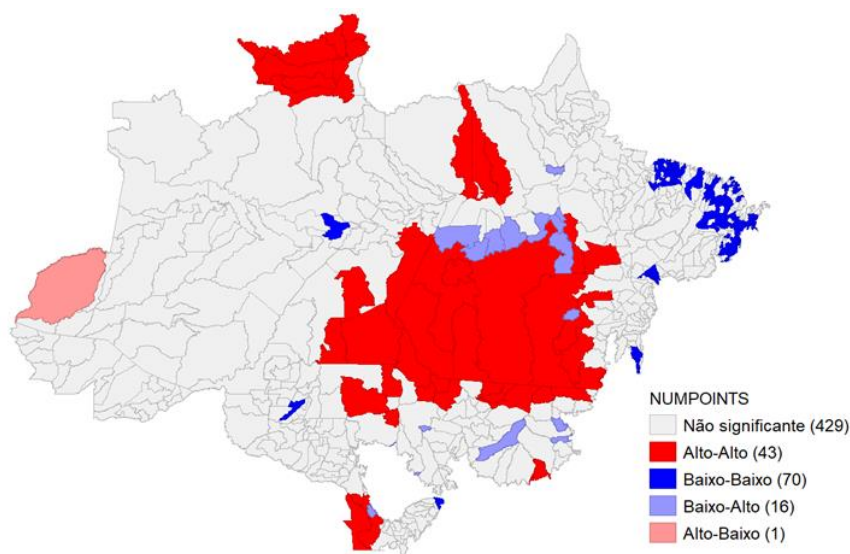
O Índice de Moran Global foi aplicado como medida de autocorrelação espacial geral. Segundo Meng et al. (2005), este índice varia de -1 a +1, sendo que valores próximos de +1 indicam forte autocorrelação espacial positiva (isto é, similaridade entre unidades espaciais vizinhas), valores próximos de -1 indicam autocorrelação negativa, e valores próximos de zero sugerem ausência de dependência espacial significativa.

### 3.2.2. Índice de Moran Local (LISA)

Para a identificação de padrões locais de associação espacial, utilizou-se o Índice de Moran Local, também conhecido como LISA (Local Indicators of Spatial Association). Conforme Anselin (1995), esse método calcula uma estatística individual para cada unidade espacial, permitindo detectar agrupamentos significativos, outliers e variações locais de autocorrelação. O LISA é uma decomposição do índice global e atende a dois critérios fundamentais: (i) identificar padrões significativos de associação espacial; e (ii) ser estatisticamente coerente com o Moran Global. A aplicação do LISA possibilita categorizar os municípios em quatro tipos de relações espaciais: Alto-Alto, Baixo-Baixo, Alto-Baixo e Baixo-Alto. Os resultados foram representados visualmente por meio do LISA Map, facilitando a interpretação dos agrupamentos espaciais.

## 4 RESULTADOS

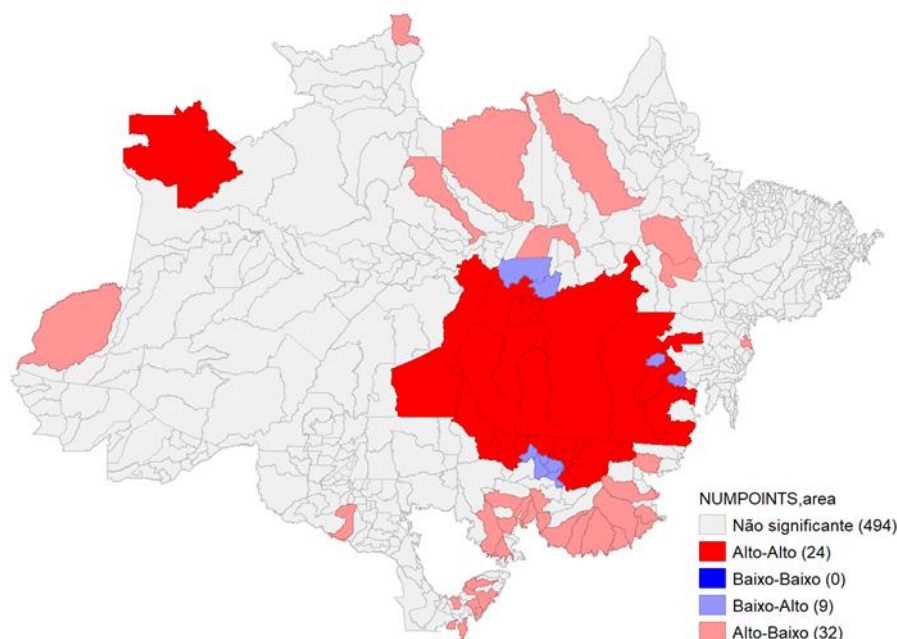
Os resultados do Índice de Moran Univariado para a variável pistas de pouso clandestinas revelaram presença de autocorrelação espacial positiva entre os municípios do Bioma Amazônia, com valor de 0,218 e p-valor de 0,001 (999 permutações). A Figura 2, que apresenta os resultados do LISA Map (Índice de Moran Local Univariado), evidencia quatro agrupamentos do tipo Alto-Alto (AA), representando agrupamentos de municípios com elevado número de pistas clandestinas, cercados por outros municípios com características semelhantes. O maior desses agrupamentos concentra-se na porção sul do Pará (PA), sul do Amazonas (AM), nordeste de Rondônia (RO) e norte do Mato Grosso (MT), regiões historicamente associadas à presença do arco do desmatamento (Santos et al., 2021). Nessa área concentra-se atividades extrativistas ilegais diversas que, devido as dificuldades da fiscalização pelo Estado Nacional, favorece a consolidação de redes logísticas ilícitas (clandestinas). Os demais agrupamentos estão localizados no estado de Roraima (RR), no norte do estado do Pará e no oeste do estado de Mato Grosso. Além disso, foram identificados dois agrupamentos do tipo Baixo-Baixo (BB ou LL) na porção nordeste do estado do Pará, possivelmente associados a áreas menos suscetíveis a atividades ilegais ou caracterizadas por maior efetividade de ações de controle e monitoramento. No estado do Tocantins, observam-se ainda dois agrupamentos adicionais, localizados na porção oeste e na porção norte do estado. Adicionalmente, identificou-se um agrupamento do tipo Baixo-Alto (BA) na porção central do estado do Pará, representando um município com baixo número de pistas clandestinas em meio a municípios vizinhos com valores elevados, o que pode indicar uma situação de pressão territorial ou de resistência pontual frente à dinâmica regional da atividade ilegal.



**Figura 2:** LISAmap do número de pistas de pouso clandestinas nos municípios do Bioma Amazônia. Fonte: Os autores (2025).

Esses padrões espaciais sugerem a existência de zonas críticas de conectividade logística clandestina, que não apenas viabilizam o avanço da mineração ilegal, como também desafiam as políticas públicas de ordenamento territorial. A análise desse cenário exige abordagens que combinem inteligência geoespacial, presença institucional e ações integradas de combate às ilegalidades.

Já com relação aos resultados do Índice de Moran Global Bivariado, entre as pistas de pouso clandestinas e mineração ilegal, observa-se a presença de autocorrelação espacial positiva entre os municípios do Bioma Amazônia, com valor de 0,147 e p-valor de 0,001 (999 permutações). A análise do Moran Local Bivariado revelou a presença de um agrupamento do tipo Alto-Alto (AA), composto por 23 municípios localizados no sul do estado do Pará. Esse agrupamento indica que esses municípios concentram um alto número de pistas de pouso clandestinas e estão próximos de municípios vizinhos com grandes áreas de mineração ilegal, sugerindo uma associação espacial positiva entre as variáveis. Vale destacar que não foram identificados agrupamentos do tipo Baixo-Baixo. Foram ainda identificados quatro agrupamentos do tipo Alto-Baixo (AB), sendo dois no sul do Bioma Amazônia, na porção norte do estado do Mato Grosso e no oeste do Amazonas e dois no norte do Bioma, localizados na porção norte do Pará e em uma área que abrange o oeste do Pará e o leste do Amazonas, representando municípios com elevado número de pistas clandestinas cercados por vizinhos com baixos valores de mineração ilegal. Adicionalmente, identificaram-se dois agrupamentos do tipo Baixo-Alto (BA), localizados na porção norte do Mato Grosso e na porção central do Pará, correspondendo a municípios com baixo número de pistas clandestinas em meio a vizinhos com altos valores de mineração ilegal.



**Figura 3:** LISAm do número de pistas de pouso clandestinas x mineração ilegal nos municípios do Bioma Amazônia. Fonte: Os autores (2025).

Esse padrão reflete uma dinâmica territorial onde a infraestrutura logística clandestina parece sustentar a expansão da mineração ilegal, reforçando o papel das pistas como facilitadoras de atividades clandestinas. A localização desse agrupamento coincide com uma região já marcada por intensos conflitos socioambientais, fraca presença do Estado e proximidade com o Arco do Desmatamento (Santos et al., 2021), o que pode explicar a consolidação dessas práticas ilegais.

Esse resultado contribui para pensar no planejamento dos transportes, bem como seus impactos ambientais. Sobre o planejamento dos transportes no Bioma Amazônia, o resultado permite pensar a organização, a análise e a proposição de soluções para o deslocamento seguro na área em estudo.

A análise espacial permite inferir como determinadas pistas de pouso, localizadas em áreas de difícil acesso, têm sido utilizadas predominantemente como infraestrutura de apoio ao escoamento da produção oriunda da mineração ilegal. Isso evidencia a fragilidade e descontinuidade da infraestrutura de transporte formal no Bioma Amazônia, cenário frequentemente associado à ausência de alternativas logísticas planejadas para atender às necessidades locais (Chiavari et al., 2025). Assim, o mapeamento e a análise dessas pistas clandestinas devem ser integrados ao processo de formulação de políticas públicas de transportes, com foco na expansão de rotas seguras, sustentáveis e monitoradas (Chiavari et al., 2025).

Na perspectiva ambiental, essa análise permite identificar a organização espacial e as transformações recentes no âmbito dos transportes (Oliveira Neto e Nogueira, 2023). A presença de pistas clandestinas, além de evidenciar pressões ambientais relacionadas ao desmatamento e à degradação de ecossistemas, afeta diretamente territórios indígenas, ampliando vulnerabilidades sociais e culturais (Silva et al., 2023). Esses achados reforçam a necessidade de integrar o planejamento de transportes a estratégias de conservação, proteção social e fortalecimento da governança na Amazônia.

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados desta pesquisa revelaram a existência de uma associação espacial positiva entre a presença de pistas de pouso clandestinas e a ocorrência de mineração ilegal nos municípios do Bioma Amazônia, no ano de 2023. A análise identificou padrões espaciais significativos, especialmente a formação de agrupamentos do tipo Alto-Alto, indicando áreas onde essas duas variáveis se sobrepõem de forma sistemática.

Esses achados evidenciam que as infraestruturas clandestinas funcionam como elementos logísticos centrais para a atividade minerária ilegal, contribuindo para a consolidação de redes de transporte ilícitas em regiões com baixa presença do Estado. A identificação desses padrões espaciais fornece informações importantes para o planejamento de transportes na região, ao permitir o mapeamento de áreas que são utilizadas por atividades ilegais, colaborando para o redesenho de estratégias de controle, vigilância territorial e ordenamento dos municípios do Bioma Amazônia.

## 6 REFERENCES

- Araújo, E., Barreto, P., Baima, S., & Gomes, M. (2017). Unidades de conservação mais desmatadas da Amazônia Legal (2012-2015). Belém: Imazon, 92.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical analysis*, 27(2), 93-115.
- Albert, J. S., Carnaval, A. C., Flantua, S. G., Lohmann, L. G., Ribas, C. C., Riff, D., ... & Nobre, C. A. (2023). Human impacts outpace natural processes in the Amazon. *Science*, 379(6630), eabo5003.
- ANTT. (2024). Ação conjunta interdita garimpo ilegal em estradas próximas à Terra Yanomami. Disponível em: <https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202409/acao-integrada-bloqueia-garimpo-ilegal-em-estradas-proximas-a-terra-yanomami>. Acessado em: 10 de junho de 2025.
- Bowman, K. W., Dale, S. A., Dhanani, S., Nehru, J., & Rabishaw, B. T. (2022). The degradation of the Amazon rainforest: Regional and global climate implications. In *Climate impacts on extreme weather* (pp. 217-234). Elsevier.
- Chiavari, J., Cozendey, G., & Antonaccio, L. (2023). Amazônia no Novo PAC: Recomendações para impulsionar a infraestrutura sustentável. <https://www.climatepolicyinitiative.org/pt-br/publication/a-amazonia-no-novo-pac-desafios-para-o-desenvolvimento-regional-atraves-da-infraestrutura/>.

- Ferreira, S. J. F., Pinel, S., Ríos-Villamizar, E. A., Miranda, S. Á. F., Pascoaloto, D., Vital, A. R. T., ... & da Cunha, H. B. (2021). Impact of rapid urbanization on stream water quality in the Brazilian Amazon. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-16.
- MAPBIOMAS (2023). Cerca de um terço das pistas de pouso na Amazônia está dentro de alguma área protegida. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2023/02/06/cerca-de-um-terco-das-pistas-de-pouso-na-amazonia-esta-dentro-de-alguma-area-protegida/>. Acessado em: 10 de junho de 2025.
- Marengo, J. A., Souza Jr, C. M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R. A., ... & Soares, W. R. (2018). Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. *Frontiers in Earth Science*, 6, 228.
- Meng, B., Wang, J., & Zhang, W. (2005). Evaluation of regional disparity in China based on spatial analysis. *Scientia Geographica Sinica*, 25(4), 393.
- Oliveira Neto, T., & Nogueira, R. J. B. (2023). Infraestruturas, transportes e rede urbana na Amazônia: análises e perspectivas. *Cadernos do Desenvolvimento*, 18(36), 79-113. DOI: 10.29327/2148384.18.36-4
- Rorato, A. C., Picoli, M. C., Verstegen, J. A., Camara, G., Silva Bezerra, F. G., & Escada, M. I. S. (2021). Environmental threats over Amazonian indigenous lands. *Land*, 10(3), 267.
- Rorato, A. C., Escada, M. I. S., Camara, G., Picoli, M. C., & Verstegen, J. A. (2022). Environmental vulnerability assessment of Brazilian Amazon indigenous lands. *Environmental Science & Policy*, 129, 19-36.
- Sapucci, C. R., Mayta, V. C., & da Silva Dias, P. L. (2022). Evaluation of diverse-based precipitation data over the Amazon Region. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3), 1167-1193.
- Santos, A. M., Silva, C. F. A., de Almeida Junior, P. M., Rudke, A. P., & de Melo, S. N. (2021). Deforestation drivers in the Brazilian Amazon: assessing new spatial predictors. *Journal of Environmental Management*, 294, 113020.
- Silva, C. F. A., de Andrade, M. O., dos Santos, A. M., Falcão, V. A., & Martins, S. F. S. (2023a). The drivers of illegal mining on Indigenous Lands in the Brazilian Amazon. *The Extractive Industries and Society*, 16, 101354.
- Silva, C. F. A., de Andrade, M. O., dos Santos, A. M., & de Melo, S. N. (2023b). Road network and deforestation of indigenous lands in the Brazilian Amazon. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119, 103735.
- Silva, C. F., Alvarado, S. T., Santos, A. M., Andrade, M. O., & Melo, S. N. (2022). Highway network and fire occurrence in Amazonian indigenous lands. *Sustainability*, 14(15), 9167.
- Yahn Filho, A. G. (2005). O conceito de bacia de drenagem internacional no contexto do Tratado de Cooperação Amazônica e a questão hídrica na região. *Ambiente & Sociedade*, 8, 87-100.