

TENDÊNCIA ESPAÇO-TEMPO DA PERDA DE SOLO NO PARQUE ESTADUAL FORNO GRANDE

Fernanda Lyra, Elaine Cordeiro dos Santos, Iulo Pessotti Moro, Gabrielli Machado Bindeli, Roberto Avelino Cecílio.

Universidade Federal do Espírito Santo/Centro de ciências agrárias e engenharias, Av. Governador Lindemberg, 316, Centro - 29550-000- Jerônimo Monteiro - ES, Brasil, lyraafer@gmail.com, elainecordeiro1220@gmail.com, iulo.floresta@gmail.com, gabriellimbndeli@gmail.com, racecilio@gmail.com.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar a dinâmica da perda de solo no Parque Estadual de Forno Grande (PEFG), no período de 1985 a 2023. A pesquisa utiliza a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) como base metodológica, considerando fatores naturais e antrópicos. Os dados foram processados em ambiente de SIG e linguagem Python, com resolução espacial de 2 metros. Para identificar tendências temporais, foi aplicado o teste estatístico de Mann-Kendall, discretizado em nível de pixel a pixel. Os resultados revelaram uma predominância de tendência significativa de redução da perda de solo unidade de conservação (UC) e na sua Zona de Amortecimento (ZA), indicando a efetividade das ações de manejo adotadas. Em contrapartida, algumas áreas apresentaram tendência significativa de aumento. A análise espaço-temporal possibilitou identificar padrões locais de degradação e estabilidade, oferecendo subsídios para o planejamento ambiental e estratégias de mitigação. Assim, conclui-se que as medidas adotadas nessas áreas desempenham papel relevante na contenção dos processos erosivos.

Palavras-chave: Erosão hídrica, Unidade de Conservação, Zona de Amortecimento, USLE, Geoprocessamento.

Área do Conhecimento: Engenharia Ambiental e Sanitária.

Introdução

O solo exerce funções essenciais nos ecossistemas terrestres, regulando a infiltração e a redistribuição da água, armazenando nutrientes e sustentando a produtividade vegetal (Confessor *et al.*, 2014; Pavan, 2019). Entretanto, o uso intensivo e, muitas vezes, inadequado do solo, associado à expansão agrícola e urbana, tem intensificado a degradação de áreas sensíveis, especialmente em regiões de relevo acidentado. A remoção da cobertura vegetal favorece o escoamento superficial e desencadeia processos erosivos, que comprometem a fertilidade, reduzem a disponibilidade hídrica e afetam diretamente comunidades que dependem do uso sustentável da terra (Medeiros *et al.*, 2011; Firmino e Bulhões, 2021; Arrington, 2022; Sudarta, 2022).

Nesse contexto, as Unidades de Conservação (UCs) e suas respectivas Zonas de Amortecimento (ZAs), ambas previstas pela Lei nº 9.985/2000, que institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (Brasil, 2000), assumem papel estratégico ao proteger remanescentes de ecossistemas naturais e contribuir para a mitigação de impactos ambientais (Pontes e Mello, 2013; Thomas, Thomas e Foletto, 2014). O Parque Estadual de Forno Grande (PEFG), localizado no município de Castelo, Espírito Santo, representa um exemplo relevante no bioma Mata Atlântica, onde a cobertura florestal exerce função crucial na contenção da erosão, na estabilização de encostas e na manutenção dos serviços ecossistêmicos (Li *et al.*, 2022). Apesar de sua importância ecológica, o PEFG e seu entorno permanecem sujeitos a pressões antrópicas e a lacunas de estudos que avaliem a eficácia da proteção legal sobre os processos erosivos ao longo do tempo (Ameca *et al.*, 2024; Muniz *et al.*, 2016).

Entre os métodos disponíveis para estimar a perda de solo, a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) destaca-se pela ampla utilização e capacidade de integrar variáveis como erosividade da chuva, erodibilidade do solo, declividade, uso da terra e práticas conservacionistas (Songara *et al.*,

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

2024; Wischmeier, Walter H; Smith, 1978). A aplicação da USLE em áreas protegidas permite identificar padrões espaciais e temporais de degradação, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento e gestão ambiental (Adesina *et al.*, 2024).

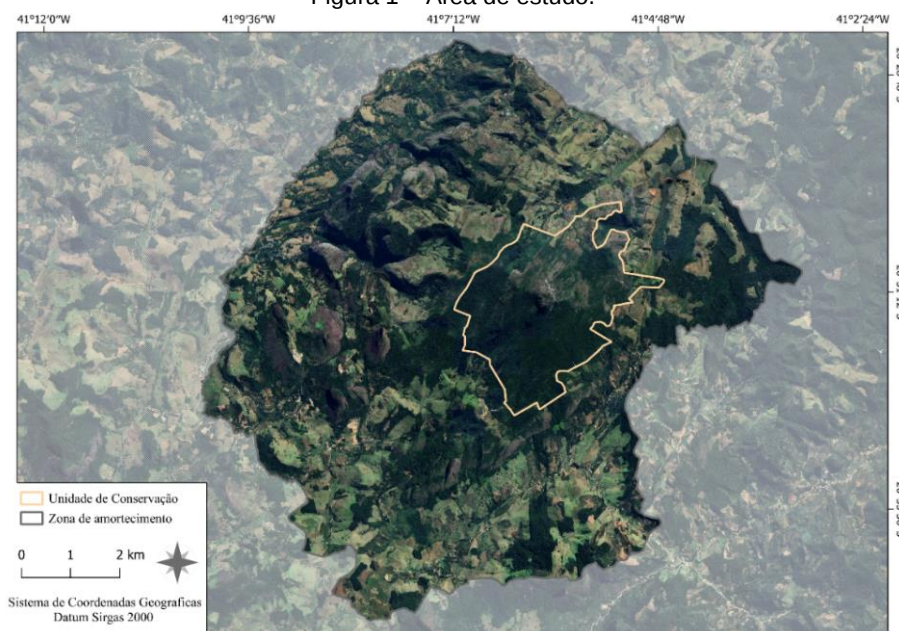
Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar a variabilidade espaço-temporal da erosão hídrica no Parque Estadual de Forno Grande (PEFG), no período de 1985 a 2023, por meio da aplicação da USLE. Busca-se compreender os efeitos da proteção legal sobre os padrões de perda de solo, contribuindo para a avaliação da efetividade do PEFG na conservação dos recursos naturais e no controle da erosão hídrica.

Metodologia

O Parque Estadual Forno Grande (PEFG), localizado no município de Castelo, entre as coordenadas 20°33'57.28" S; 41°4'48.45" O, 20°30'1.02" S; 41°9'28.06" O, 20°29'12.14" S; 41°4'43.09" O e 20°34'28.37" S; 41°9'4.21" O (Figura 1), foi instituído em 1960 como Reserva Florestal e reclassificado como Parque Estadual pela Lei Estadual nº 7.528/1998. Com área de 913,15 hectares, preserva ecossistemas representativos do Domínio Atlântico, destacando-se pela Floresta Ombrófila Densa Montana e Alto-Montana em transição para Floresta Estacional (IEMA, 2023).

De acordo Pirovani (2023), a zona de amortecimento (ZA) do parque é composta majoritariamente por áreas rurais voltadas à agropecuária, embora o ecoturismo, impulsionado pelas paisagens do Pico do Forno Grande e pelas trilhas de acesso, represente alternativa econômica crescente.

Figura 1 – Área de estudo.



Fonte: Os Autores (2025).

A perda de solo foi estimada pela Equação Universal de Perda de Solo – USLE (Wischmeier, Walter H; Smith, 1978), apresentada na Equação 1:

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (\text{Eq. 01})$$

Em que: A corresponde à perda anual de solo ($\text{ton ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); R ao fator de erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$); K à erodibilidade do solo ($\text{ton ha h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); LS ao fator topográfico (adimensional); C ao uso e manejo do solo (adimensional) e P às práticas conservacionistas (adimensional). O cálculo de cada fator foi realizado isoladamente e posteriormente integrado via Python, utilizando dados processados no QGIS (3.34) e Spyder (Python 3.12).

O fator R foi obtido pela equação proposta por Teixeira *et al.* (2023) a partir da precipitação mensal (Pi) fornecida por Xavier *et al.* (2022) para o período de 1985 a 2023. O fator K foi extraído do raster

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

disponibilizado por Godoi *et al.* (2021), com estimativas para todo o Brasil. O fator LS foi calculado pela ferramenta *r.watershed* (GRASS GIS), baseada na equação de Wischmeier, Walter H; Smith, (1978), aprimorada por Moore e Burch (1986).

Os fatores C e P foram estimados a partir dos dados de uso e cobertura da terra do MapBiomass (2024) Coleção 9. Para o fator C, cada classe foi associada a valores da literatura e das diretrizes da ANA (2012). O fator P foi definido como 0,5 para cultivos perenes (presumindo uso de práticas conservacionistas) e 1,0 para os demais usos; áreas urbanas e corpos d'água foram excluídos. Essa sistematização possibilitou o cálculo do fator combinado CP de forma consistente em toda a série temporal.

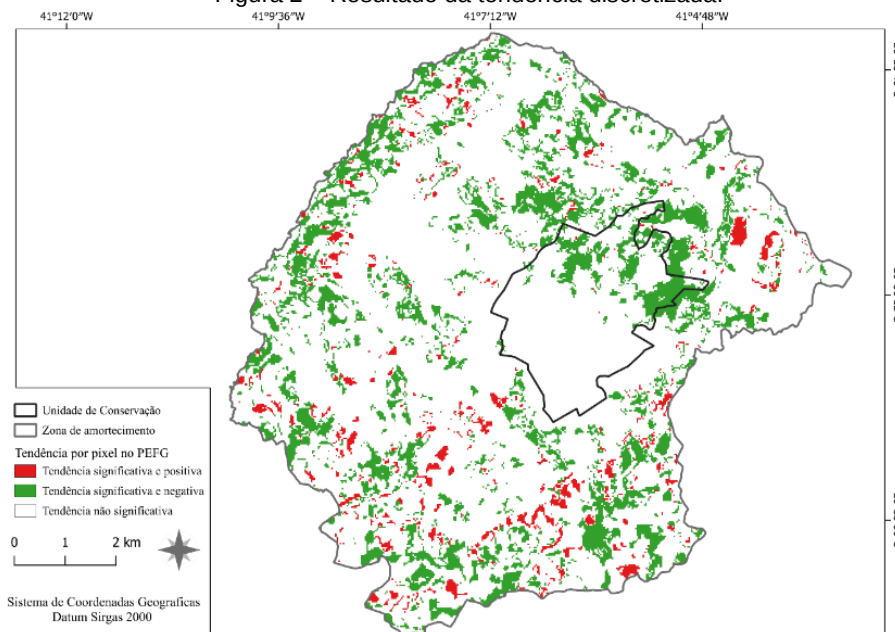
Todos os dados foram reprojatados para SIRGAS 2000 / UTM 24S (EPSG:31984) e reamostrados para resolução espacial de 2 m pelo método bilinear, assegurando compatibilidade entre camadas. Em seguida, os rasters foram recortados conforme os limites das UCs e ZAs.

O resultado final correspondeu a 39 rasters anuais (1985–2023), expressos em $\text{ton ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$. Sobre esses produtos, aplicou-se o teste de Mann-Kendall para detecção de tendências monotônicas, em nível de pixel (2m), resultando em mapas que identificam áreas de tendência positiva ou negativa de perda de solo ao longo da série temporal.

Resultados

A análise pixel a pixel revelou padrões distintos de tendência na dinâmica da perda de solo no PEFG e em sua ZA (Tabela 1; Figura 2). Aproximadamente 18% da área ($15,31 \text{ km}^2$) apresentou tendência significativa de redução, indicando processos de recuperação ambiental. Em contrapartida, cerca de 4% da área ($3,08 \text{ km}^2$) mostrou tendência significativa de aumento, configurando pontos críticos de intensificação da perda de solo. A maior parcela, correspondente a 72% ($64,09 \text{ km}^2$), não apresentou tendência estatisticamente significativa, sugerindo relativa estabilidade ao longo da série temporal.

Figura 2 – Resultado da tendência discretizada.



Fonte: Os Autores (2025).

A análise espacial (Figura 2) demonstra que as áreas de tendência decrescente não se concentram em um único ponto, mas incluem setores relevantes no interior da UC, reforçando a efetividade da proteção legal na mitigação de processos erosivos. Esses resultados sugerem avanços na regeneração da vegetação nativa e maior estabilidade do solo dentro do parque. Em contraste, os focos de tendência crescente concentram-se principalmente na ZA, em áreas de maior declividade e uso antrópico intensivo, caracterizando zonas de maior vulnerabilidade.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Tabela 1 – Classes de tendência.

Classe de tendência	Área (km ²)	Área (%)
Decrescente significativa ($\tau < 0$, $p < 0,05$)	15,314	18
Crescente significativa ($\tau > 0$, $p < 0,05$)	3,079	4
Não significativa	64,085	72

Fonte: Elaborada pelos autores (2024).

De forma geral, o padrão identificado evidencia dois aspectos complementares: a UC apresenta sinais consistentes de melhoria nas condições do solo, reflexo da proteção ambiental, enquanto a ZA, apesar de predominantemente estável, concentra áreas críticas que podem comprometer a integridade do entorno, exigindo monitoramento contínuo e estratégias de manejo específicas.

Discussão

A Figura 2 e a Tabela 1, evidenciam tendência estatisticamente significativa de redução da perda de solo em todas as UC e ZA ao longo da série histórica, indicando que a função de mitigação da erosão vem sendo cumprida nessas áreas. Esse padrão está em consonância com estudos de Soares *et al.* (2024), em Minas Gerais, e Guerra *et al.* (2020), que demonstram a eficácia de técnicas de conservação do solo e da preservação de matas ciliares na redução de perdas. Tais trabalhos também reforçam a importância da integração entre biodiversidade, produção agrícola e ações conservacionistas, além do papel das políticas públicas na regulação do uso do solo e na regeneração natural da vegetação.

A análise espacial pixel a pixel, metodologia mais conservadora e sensível a flutuações sutis (Awasthi *et al.*, 2023; Awty-Carroll *et al.*, 2019), revelou ampla redução significativa na área de estudo. Entretanto, também permitiu identificar focos isolados de tendência crescente, sobretudo nas ZAs (Figura 2). Esses pontos críticos concentram-se em áreas de maior declividade e uso antrópico intensivo, coincidindo com fatores descritos por Fidan *et al.* (2024). Ainda que restritos, tais focos indicam a necessidade de monitoramento específico, de modo a conter processos erosivos incipientes e assegurar a eficácia das medidas conservacionistas a longo prazo (Adams *et al.*, 2015).

Do ponto de vista quantitativo, a maior parte da área apresentou estabilidade ao longo da série temporal, e essa condição está associada ao tempo de existência da UC e ao fortalecimento de práticas de proteção ambiental. Criada em 1960 como Reserva Florestal e reclassificada em 1998 como Parque Estadual (IEMA, 2023), a unidade já contava com 25 anos de proteção quando se iniciou a série histórica analisada (1985). Esse histórico coloca o PEFG em posição diferenciada, uma vez que seus efeitos conservacionistas antecedem o período avaliado.

A literatura reforça a relevância do tempo de conservação das UCs para a consolidação de seus benefícios ambientais. Nolte *et al.* (2013) destacam que áreas protegidas mais antigas apresentam maior efetividade na contenção do desmatamento, refletindo diretamente na mitigação da erosão. De forma semelhante, Adams *et al.* (2015) e Veríssimo *et al.* (2011) argumentam que tanto o amadurecimento institucional quanto o ecológico são determinantes para a detecção de benefícios em séries temporais. Esse mesmo padrão foi observado por Binley *et al.* (2025) em outras áreas protegidas.

Em síntese, os resultados deste estudo reforçam a efetividade das UCs na redução da perda de solo, mas também evidenciam a vulnerabilidade das ZAs frente a pressões antrópicas e características naturais da paisagem. Esses contrastes ressaltam a importância de políticas públicas voltadas ao manejo territorial e ao monitoramento contínuo. A consolidação da conservação a longo prazo depende, portanto, não apenas da proteção formal, mas da integração entre conservação, produção e uso sustentável do entorno.

Conclusão

Os resultados obtidos evidenciam que o PEFG tem cumprido papel relevante na redução da perda de solo ao longo das últimas décadas, refletindo a efetividade das medidas de proteção legal e da cobertura florestal remanescente. A análise espaço-temporal demonstrou predominância de

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

estabilidade e redução dos processos erosivos no interior da UC, enquanto a ZA revelou pontos críticos de intensificação associados a declividade acentuada e usos antrópicos localizados. Tais achados reforçam a importância do tempo de existência das unidades de conservação para a consolidação de benefícios ambientais, além de evidenciar a necessidade de estratégias de monitoramento contínuo e de gestão integrada entre conservação, produção e uso sustentável do solo em áreas de entorno. Assim, este estudo contribui com subsídios técnicos e científicos que podem apoiar políticas públicas e práticas conservacionistas voltadas à mitigação da erosão hídrica na Mata Atlântica.

Referências

- ADAMS, V. M.; SETTERFIELD, S. A.; DOUGLAS, M. M.; KENNARD, M. J.; FERDINANDS, K. Measuring benefits of protected area management: trends across realms and research gaps for freshwater systems. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 370, n. 1681, p. 20140274, 5 nov. 2015.
- ADESINA, E. A.; AJAYI, O. G.; ODUMOSU, J. O.; KOLADE, T. S. Assessment of soil erosion susceptibility using multi-criteria analysis. **Environmental Technology and Science Journal**, v. 15, n. 1, p. 35–45, 24 jun. 2024.
- AMECA, E. I.; NIE, Y.; WU, R.; MITTERMEIER, R. A.; FODEN, W.; WEI, F. Identifying protected areas in biodiversity hotspots at risk from climate and human-induced compound events for conserving threatened species. **Science of The Total Environment**, v. 938, p. 173192, ago. 2024.
- ANA. MANUAL OPERATIVO. **Agência Nacional de Águas**, p. 74, 2012.
- AWASTHI, C.; ARCHFIELD, S. A.; REICH, B. J.; SANKARASUBRAMANIAN, A. Beyond Simple Trend Tests: Detecting Significant Changes in Design-Flood Quantiles. **Geophysical Research Letters**, v. 50, n. 13, 16 jul. 2023.
- AWTY-CARROLL, K.; BUNTING, P.; HARDY, A.; BELL, G. An Evaluation and Comparison of Four Dense Time Series Change Detection Methods Using Simulated Data. **Remote Sensing**, v. 11, n. 23, p. 2779, 25 nov. 2019.
- BINLEY, A. D.; HADDAWAY, L.; BUXTON, R.; LALLA, K. M.; LESBARRERES, D.; SMITH, P. A.; BENNETT, J. R. Endangered species lack research on the outcomes of conservation action. **Conservation Science and Practice**, v. 7, n. 2, 13 fev. 2025.
- BRASIL. **Lei n. 9.985, 18 de julho de 2000** Brasília, DFD.O.U de 19/07/2000, pág. nº 1, , 2000. Disponível em: <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=9985&ano=2000&ato=77ck3aq1kMNPWtfc9>>
- FIDAN, S.; TANYAŞ, H.; AKBAŞ, A.; LOMBARDO, L.; PETLEY, D. N.; GÖRÜM, T. Understanding fatal landslides at global scales: a summary of topographic, climatic, and anthropogenic perspectives. **Natural Hazards**, v. 120, n. 7, p. 6437–6455, 27 maio 2024.
- GODOI, R. DE F.; RODRIGUES, D. B. B.; BORRELLI, P.; OLIVEIRA, P. T. S. High-resolution soil erodibility map of Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 781, p. 146673, ago. 2021.
- GUERRA, A.; OLIVEIRA, P. T. S. DE; ROQUE, F. DE O.; ROSA, I. M. D.; OCHOA-QUINTERO, J. M.; GUARIENTO, R. D.; COLMAN, C. B.; DIB, V.; MAIOLI, V.; STRASSBURG, B.; GARCIA, L. C. The importance of Legal Reserves for protecting the Pantanal biome and preventing agricultural losses. **Journal of Environmental Management**, v. 260, p. 110128, abr. 2020.
- IEMA. **Parque Estadual Forno Grande**. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/PEFG>>.

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

LI, X.; ZHANG, Y.; JI, X.; STRAUSS, P.; ZHANG, Z. Effects of shrub-grass cover on the hillslope overland flow and soil erosion under simulated rainfall. **Environmental Research**, v. 214, p. 113774, nov. 2022.

MAPBIOMAS. **Coleção 9 de Cobertura e Uso da Terra do Brasil**. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/codigos-e-ferramentas/>>.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Physical Basis of the Length-slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 5, p. 1294–1298, set. 1986.

MUNIZ, A. R.; RANGEL, L. DE A.; PEREIRA, L. DOS S.; JORGE, M. DO C. O.; GUERRA, A. J. T. **Degradação Dos Solos Em Diferentes Usos (Trilha E Taludes De Corte) Em Unidades De Conservação** XI Sinageo. **Anais...** 2016 Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Aline_Rodrigues8/publication/308713219_DEGRADACAO_DO_S_SOLOS_EM_DIFERENTES_USOS_TRILHA_E_TALUDES_DE_CORTE_EM_UNIDADES_DE_CONSERVACAO/links/57ec53c408ae93b7fa958e4c.pdf>

NOLTE, C.; AGRAWAL, A.; SILVIUS, K. M.; SOARES-FILHO, B. S. Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 13, p. 4956–4961, 26 mar. 2013.

PONTES, J. A. L.; MELLO, F. A. P. USO PÚBLICO EM UNIDADES DE CONSERVAÇÃO DE PROTEÇÃO INTEGRAL: CONSIDERAÇÕES SOBRE IMPACTOS NA BIODIVERSIDADE. **Anais do Uso Público em Unidades de Conservação**, v. 1, n. 3, p. 30–41, 31 dez. 2013.

SOARES, A. K. M.; CRESTANA, S.; FERREIRA, R. R. M.; RODRIGUES, V. G. S. Assessment of the impact of conservation measures by modeling soil loss in Minas Gerais, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 196, n. 4, p. 358, 12 abr. 2024.

SONGARA, J. C.; GANDHI, F. R.; PATEL, J. N.; PRAKASH, I. Integrated Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geospatial Approach to Assess Soil Erosion in Machhu Sub-watershed, Morbi, India. **Journal of the Geological Society of India**, v. 100, n. 3, p. 391–398, 1 mar. 2024.

TEIXEIRA, D. B. DE S.; CECÍLIO, R. A.; MOREIRA, M. C.; PIRES, G. F.; FERNANDES FILHO, E. I. Assessment, regionalization, and modeling rainfall erosivity over Brazil: Findings from a large national database. **Science of The Total Environment**, v. 891, p. 164557, set. 2023.

THOMAS, B. L.; THOMAS, P. A.; FOLETO, E. M. A RELEVÂNCIA DA CRIAÇÃO DE UMA UNIDADE DE CONSERVAÇÃO NO MORRO GAÚCHO, MUNICÍPIOS DE ARROIO DO MEIO E CAPITÃO/RS. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 27, p. 112, 10 jul. 2014.

VERÍSSIMO, A.; ROLLA, A.; MAIOR, A. P.; MONTEIROS, A.; BRITO, B.; SOUJA JR, C.; AUGUSTO, C. Áreas Protegidas na Amazônia Brasileira: avanços e desafios. **Imazon/ISA**, p. 1–72, 2011.

WISCHMEIER, WALTER H; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. [s.l.: s.n.].

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390–8404, 30 dez. 2022.

Agradecimentos

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