



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Susceptibilidade à erosão, perda de solos e vulnerabilidade natural na bacia do Médio Rio Araguaia - Brasil

Ana Clara Alves de Melo<sup>1</sup>, Giovana Maranhão Bettioli<sup>2</sup>, Lidiamar Barbosa Albuquerque<sup>3</sup>, Ivo Augusto Lopes Magalhães<sup>4</sup>, Edson Eyji Sano<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade de Brasília (UnB), Faculdade UnB de Planaltina (FUP), Planaltina (DF), Brasil, CEP 73345-010, aanaclara\_alves@hotmail.com (autor correspondente). <sup>2</sup> Mestre em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás (UFG), Analista em Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto da Embrapa Cerrados, BR-020 km 18, Planaltina (DF), Brasil, CEP 73310-970, giovanna.bettioli@embrapa.br. <sup>3</sup> Doutora em Ecologia pela Universidade de Campinas (Unicamp), Pesquisadora da Embrapa Cerrados, BR-020, km 18, Planaltina (DF), Brasil, CEP 73301-970, lidiamar.albuquerque@embrapa.br. <sup>4</sup> Doutor em Geografia pela Universidade de Brasília - UnB. ICC Ala norte, Asa norte. Brasília- DF, Brasil, CEP 70910-900. [ivo.magalhaes@unb.br](mailto:ivo.magalhaes@unb.br). <sup>5</sup> Ph.D. em Ciência do Solo pela Universidade do Arizona, EUA, pesquisador da Embrapa Cerrados, BR-020, km 18, Planaltina (DF), Brasil, CEP 73301-970, [edson.sano@embrapa.br](mailto:edson.sano@embrapa.br).

Artigo recebido 13/03/2023 e aceito em 22/05/2023

### RESUMO

As alterações antrópicas no meio ambiente têm promovido a redução dos espaços naturais, agravando os problemas ambientais e comprometendo a sustentabilidade dos ecossistemas. Este trabalho objetivou diagnosticar a bacia do Médio Araguaia em termos de susceptibilidade à erosão, perda de solos e vulnerabilidade natural para subsidiar ações de restauração ecológica. As seguintes variáveis foram consideradas: (i) mapas de uso e ocupação da terra do período de 1985–2020; (ii) mapas de solos, geologia e geomorfologia, na escala de 1:250.000; (iii) modelo digital de elevação; e (iv) dados de precipitação. A susceptibilidade à erosão e à perda de solos, provocadas pelas erosões laminar e em sulcos, foi estimada pela equação universal de perda de solo (USLE), enquanto a vulnerabilidade natural foi analisada por meio da abordagem proposta por Crepani e colaboradores, a qual considera uma escala de vulnerabilidade relativa baseada na relação morfogênese/pedogênese. A susceptibilidade à erosão variou entre média (56,0%) e baixa (41,4%), enquanto a perda de solos variou de 0 a 253,4 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Em termos de vulnerabilidade natural, as duas classes mais expressivas foram a moderadamente vulnerável (43%) e medianamente estável/vulnerável (28%). Os resultados deste estudo mostram a importância do planejamento racional de uso e de ocupação da área, tais como a adoção de boas práticas de manejo, ações de restauração e ações protecionistas e de formulação de políticas públicas para otimizar o bem-estar social e ambiental da região.

Palavras-chave: uso e cobertura da terra, análise da paisagem, mitigação dos impactos ambientais.

## Susceptibility to erosion, soil loss, and environmental vulnerability of the Middle Araguaia River Basin - Brazil

### ABSTRACT

The anthropic alterations in the environment have promoted the reduction of the natural spaces, aggravating the environmental problems and compromising the sustainability of the ecosystems. This work aimed to diagnose the Middle Araguaia river basin in terms of susceptibility to erosion, soil loss, and natural vulnerability to subsidy actions of ecological restoration. The following variables were considered: (i) maps of land use and occupation from the period 1985–2020 (ii) maps of soils, geology, and geomorphology on 1:250,000 scale; (iii) digital elevation model and (iv) precipitation data. The susceptibility to erosion and soil loss, caused by laminar and furrow erosions, were estimated using the universal soil loss equation (USLE), while natural vulnerability was analyzed using the approach proposed by Crepani et al., who considers a relative vulnerability scale based on the morphogenesis/pedogenesis relationship. Susceptibility to erosion ranged from and medium (56.0%) and low (41.4%), while soil loss ranged from 0 to 253,4 ton ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. In terms of natural vulnerability, the two most expressive classes were moderately vulnerable (43%) and moderately stable/vulnerable (28%). The results of this study show the importance of rational planning of the land use and occupation of the area such as the adoption of good management practices, restoration actions, and protectionist actions and the formulation of public policies to optimize the social and environmental well-being of the area.

Keywords: land use and land cover, landscape analysis, mitigation of environmental impacts.

## Introdução

As alterações antrópicas têm reduzido os espaços naturais, agravando os problemas ambientais e comprometendo a sustentabilidade dos ecossistemas. Segundo Ross (2001), os estudos integrados são essenciais para o correto entendimento do funcionamento dos ambientes naturais. Para isso, é de suma importância a criação de base de dados espaciais para subsidiar a formulação de estratégias de planejamento, identificando, no mosaico de paisagens, as suas fragilidades e potencialidades sob a ótica da sustentabilidade (Soares e Martins, 2021).

A bacia hidrográfica representa o recorte mais apropriado para o entendimento da dinâmica ambiental, considerando-se as suas características geológicas, geomorfológicas e físicas e as restrições existentes quanto ao uso da terra (Feitosa et al., 2021). Ela permite conciliar, de forma simultânea, as demandas de desenvolvimento econômico e as necessidades de preservação ambiental. A bacia do rio Araguaia é dividida em três segmentos denominados de Alto, Médio e Baixo Araguaia (Latrubesse e Stevaux, 2002). Aproximadamente 75% dessa bacia são classificadas como Médio Araguaia (~290.000 km<sup>2</sup>). O Médio Araguaia contém a ilha do Bananal que consiste em um sistema complexo que engloba um mosaico de formações fluviais e lacustres do Pleistoceno que são cobertas por diferentes fitofisionomias vegetais (Valente et al., 2011). Um estudo conduzido por Latrubesse et al. (2009) demonstrou que a média anual de descarga de sedimentos predominantemente arenosos no leito do rio Araguaia é em torno de 6.500 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, com aumento significativo nessa velocidade ao longo das últimas décadas por causa do crescimento das atividades agrícolas nas partes mais altas do Alto e Médio Araguaia.

A bacia do rio Araguaia apresenta uma das mais extensas e uma das planícies de inundações mais ricas em biodiversidade do mundo (Pelicice et al., 2021). Essa bacia também é uma das poucas bacias brasileiras que não apresenta nenhum grande reservatório para geração de energia hidroelétrica, ao contrário das sete usinas hidrelétricas em cascata que são encontradas no rio Tocantins (Lininger e Latrubesse, 2016; Valadão et al., 2023). Os rios Araguaia e Tocantins formam a extensa bacia do rio Araguaia-Tocantins (~767.000 km<sup>2</sup>) que cobre as regiões Centro-Oeste e Norte do Brasil. Além dessa expansão de usinas hidrelétricas, o aumento das atividades agrícolas na bacia do Araguaia-Tocantins tem comprometido a biodiversidade, os ecossistemas e os serviços

ambientais associados de maneira significativa (Coe et al., 2011; Latrubesse et al. 2019; Luiz et al., 2019).

Por conseguinte, devem-se priorizar ações para o reestabelecimento da qualidade ambiental. Entre elas, cita-se a necessidade de estudos sobre a compreensão e o entendimento da dinâmica de uso da terra, susceptibilidade à erosão e vulnerabilidade ambiental. Por exemplo, a caracterização da susceptibilidade à erosão permite identificar as áreas mais frágeis e sujeitas à degradação ambiental, podendo auxiliar no planejamento do uso e ocupação da terra, bem como para subsidiar as ações de restauração ecológica. A equação universal de perda de solo (USLE) tem sido utilizada na análise da vulnerabilidade ambiental, subsidiando a adoção de práticas de controle, seleção de áreas prioritárias ao planejamento de serviços ambientais e definição de ações conservacionistas (Souza et al., 2019). A fragilidade ambiental compreende a predisposição de um determinado ambiente em sofrer alterações que podem desequilibrá-lo, quando exposto a ações humanas (Santos e Almeida, 2019). Em vista disso, o diagnóstico ambiental permite compreender os padrões de organização espacial, possibilitando diagnosticar e prognosticar as mudanças na paisagem.

Com o advento de diferentes técnicas de análise de dados geoespaciais e da disponibilização de diferentes dados georreferenciados como os modelos digitais de elevação (MDE) e os dados de precipitação derivados de sensores orbitais, é possível gerar diferentes modelos espaciais de susceptibilidade à erosão, estimativas de perdas de solos e vulnerabilidade ambiental, dentre outros. Nesse sentido, pode-se citar, por exemplo, o estudo de Santos e Nascimento (2021) que delimitaram as áreas susceptíveis e vulneráveis aos processos erosivos da bacia hidrográfica do rio São Francisco no estado de Sergipe com base no processo analítico hierárquico envolvendo dados de erodibilidade, erosividade, hipsometria, declividade e cobertura de solos. Guedes et al. (2022) identificaram áreas de maior erodibilidade de solos na bacia hidrográfica urbana do córrego Carneirinhos, na cidade de João Monlevade, Minas Gerais, baseados na análise de atributos que compõem a USLE.

Estudos mais recentes envolvendo caracterização geoambiental do Médio Araguaia foram conduzidos por Suizu et al. (2022) que, com base no processamento de imagens multitemporais dos satélites da série Landsat, analisaram

parâmetros morfométricos de ilhas e barras arenosas e estimaram as áreas que têm sofrido influência dos processos erosivos e deposicionais no sistema fluvial atual. No período 1965–1998, esses autores demonstraram que houve uma tendência de ampliação do padrão de entrelaçamento dos rios que compõem essa bacia. Suizu et al. (2023) desenvolveram uma metodologia baseada na tecnologia de sistema de informações geográficas (SIG) para classificar o Médio Araguaia em cinco grandes grupos de segmentos morfológicos. Oliveira e Castro (2005) elaboraram mapas de susceptibilidade e risco à erosão laminar relacionados com a ocupação de terras baseados nos atributos considerados na USLE, no entanto, esse estudo envolveu apenas a parte do Alto Araguaia. Dentro deste contexto, este trabalho objetivou diagnosticar a bacia do Médio Araguaia em termos de susceptibilidade à erosão, perda de solos e vulnerabilidade ambiental para subsidiar ações de restauração ecológica. A hipótese testada neste artigo é de que, diante da disponibilização de dados biofísicos, ambientais e de sensoriamento remoto cada vez mais detalhados do território brasileiro, é factível de se produzir mapas de susceptibilidade à erosão, perda de solos e vulnerabilidade ambiental em nível de bacia hidrográfica.

## Material e métodos

### Área de Estudo

O rio Araguaia é dividido em três segmentos (Latrubesse e Stevaux, 2002): Alto, Médio e Baixo Araguaia. Este trabalho foi desenvolvido no trecho denominado Médio Araguaia, conforme delimitado por Aquino et al. (2009) e que se estende desde a cidade de Registro do Araguaia, Goiás, até Conceição do Araguaia, Pará, ocupando uma área de 290.936 km<sup>2</sup> (Figura 1). O Médio Araguaia, com uma extensão aproximada de 1.100 km, engloba 139 municípios localizados nos estados do Pará, Tocantins, Goiás e Mato Grosso e nos biomas Amazônia e Cerrado.

Os principais afluentes da bacia do Araguaia são encontrados nesse trecho do Médio Araguaia, constituídos, na margem direita, pelos rios Caiapó, Claro, Vermelho, Tesouras, do Peixe, Crixás-Açu, Formoso, Côco, Caiapó II e Piranhas. Na margem esquerda, têm-se os rios Cristalino, Tapirapê e das Mortes (Aquino et al., 2009). O rio das Mortes nasce na Serra do Roncador, Mato Grosso, e é considerado o mais importante tributário do canal principal, estando localizado na

margem esquerda do rio Araguaia. Esse rio apresenta padrão sinuoso e transcorre ao longo da planície do Bananal, paralelamente ao rio Araguaia.

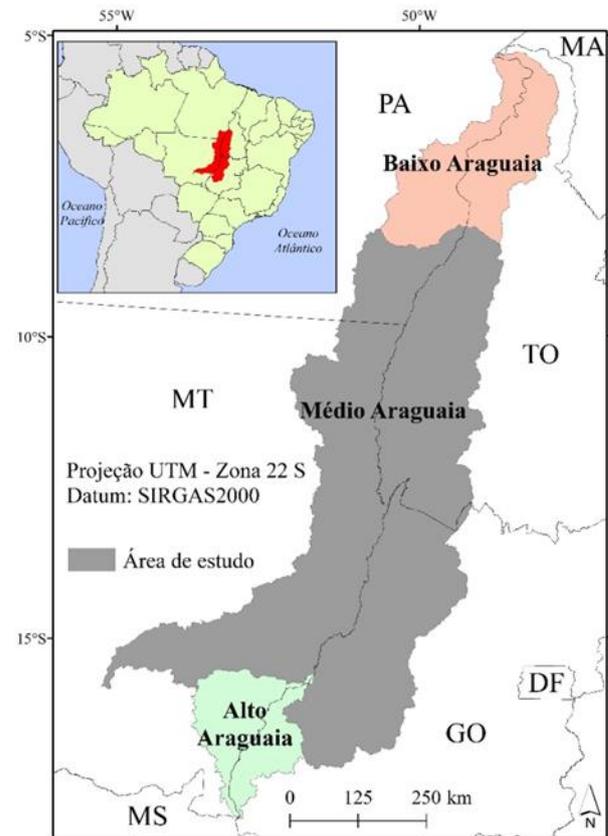


Figura 1. Localização da área de estudo (Bacia do Médio Araguaia) nos estados de Goiás, Tocantins, Mato Grosso e Pará e no Brasil.

### Procedimentos Metodológicos

Os procedimentos metodológicos basearam-se nos estudos conduzidos por Magalhães et al. (2012), Pinese Júnior e Rodrigues (2012), Souza et al. (2015) e Silva et al. (2016), os quais propuseram a integração de variáveis ambientais para analisar processos erosivos. O presente estudo foi desenvolvido com dados multi-escalares produzidos pelo projeto MapBiomias, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) e Agência Nacional de Águas (ANA). As seguintes variáveis ambientais foram consideradas: uso e cobertura da terra, solos, geologia, geomorfologia, declividade e precipitação. A partir dessas variáveis, foram gerados os dados de susceptibilidade à erosão, perda de solos e vulnerabilidade ambiental (Figura 2).

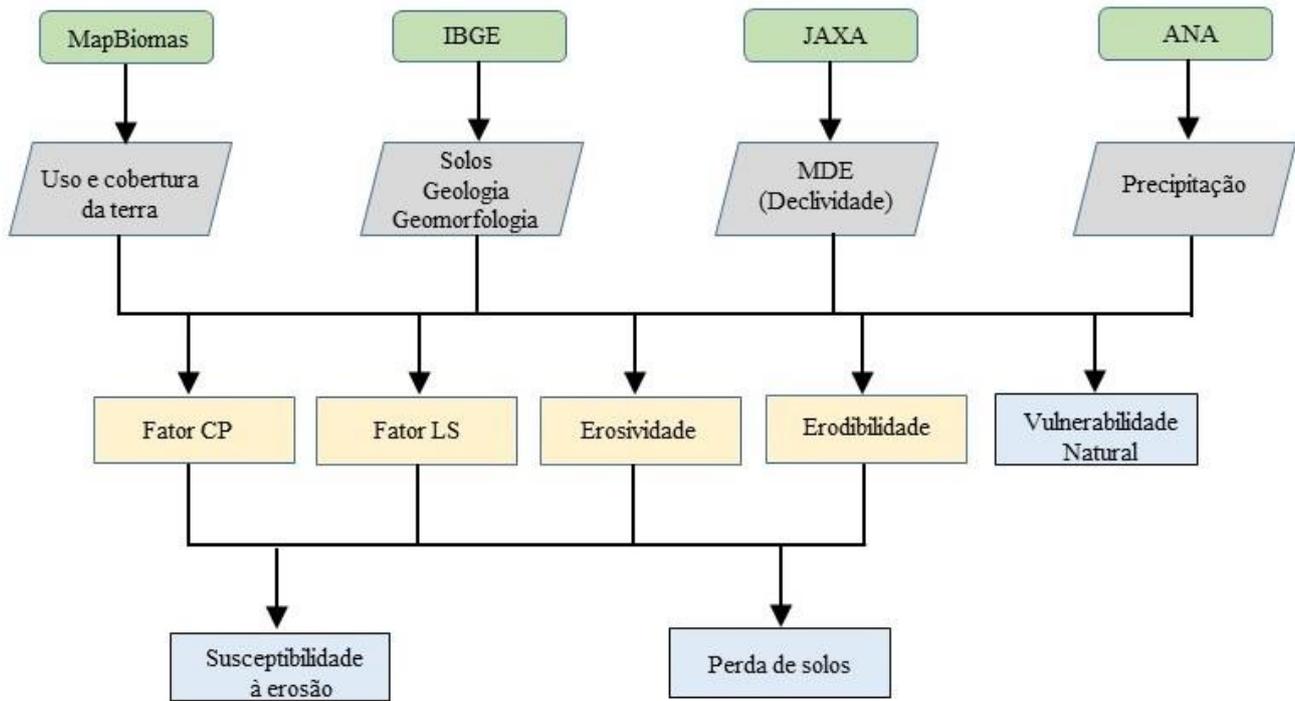


Figura 2. Fluxograma das principais etapas de trabalho envolvidas na elaboração dos mapas de susceptibilidade à erosão, perda de solos e vulnerabilidade ambiental. IBGE = Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; JAXA = Agência de Exploração Aeroespacial do Japão; ANA = Agência Nacional de Águas; MDE = modelo digital de elevação; Fator CP = Fator relacionado com cobertura vegetal e práticas conservacionistas; Fator LS = fator topográfico relacionado com comprimento de rampa e declividade.

### Uso e Cobertura da Terra

Para o mapeamento do uso e da cobertura da terra, foram utilizados os dados da base digital do Projeto MapBiomas para o período 1985–2020 (MapBiomas, 2022). As diversas classes temáticas desse projeto foram agrupadas em: Formação florestal; Formação savânica; Formação campestre; Silvicultura; Campo alagado e área pantanosa; Pastagem cultivada; Cultura agrícola; Área urbanizada; outras áreas não-vegetadas; Mineração; e Afloramento Rochoso.

### Caracterização Física do Médio Araguaia

As bases de dados pedológicos, geológica e geomorfológica foram obtidas dos mapeamentos realizados pelo IBGE na escala de 1:250.000 e disponibilizadas gratuitamente no *site* dessa instituição (IBGE, 2018). A declividade da área de estudo foi obtida a partir de MDE disponível na base de dados do Japão denominada de ALOS *Global Digital Surface Model (AW3D30)*, versão 3.1, com resolução espacial de aproximadamente 30 m (JAXA, 2023). Foram discriminadas seis

**Tabela 1.** Classes de declividade do Médio Araguaia consideradas neste estudo. classes de declividade, conforme proposto pela Embrapa (1979) (Tabela 1).

Declividade (%)	Descrição
0 – 3	Plano
3 – 8	Suave-ondulado
8 – 20	Ondulado
20 – 45	Forte-ondulado
45 – 75	Montanhoso
> 75	Forte-montanhoso

A erosividade (R) (Eq. 1) foi calculada a partir da Eq. 2, desenvolvida por magalhães e Moldenhauer (1992):

$$EI_{30} = 67,355 \times \left( \frac{r^2}{P} \right)^{0,85} \quad (1)$$

Onde:

$EI_{30}$  = média mensal do índice de erosividade (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);

r = precipitação média mensal (mm); e

P = precipitação média anual (mm).

$$R = \sum_{i=1}^{12} EI_{30} \quad (2)$$

Onde:

R = somatório dos 12 meses calculados do EI<sub>30</sub>, isto é, média anual do índice de erosividade (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>).

Para o cálculo dos valores de R, foram utilizados dados de 117 estações pluviométricas disponibilizadas pela ANA, as quais se encontram inseridas em um *buffer* de 100 km no entorno do limite da área de estudo. A inclusão das estações inseridas nessa zona de 100 km foi necessária para garantir a existência de dados interpolados de precipitação em toda a bacia. Posteriormente, a erosividade foi espacializada por meio do método de interpolação baseado no Inverso do Quadrado da Distância (IQD).

**Susceptibilidade à Erosão**

A determinação das áreas com maiores susceptibilidades ao risco de erosão laminar foi feita a partir do método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), proposto por Saaty (1977) e implementada no *software* ArcGIS por meio da extensão *extAhp20 - Analytic Hierarchy Process for ArcGIS*. As variáveis determinantes para essa análise multicritério foram: declividade, erosividade, geomorfologia, tipo de solo e uso e cobertura da terra. Essas variáveis foram subdivididas em classes e notas variando de 0 a 10 que foram atribuídas de acordo com o grau de susceptibilidade à erosão, do menos ao mais susceptível. Como essa é uma etapa importante do trabalho, a qual influencia diretamente nos resultados, a definição dessas notas foi realizada com base em literatura e consulta à equipe multidisciplinar (Tabela 2).

**Tabela 2.** Notas atribuídas às classes de declividade, erosividade, geomorfologia, tipo de solo e uso e cobertura da terra para determinação de susceptibilidade à erosão da bacia do Médio Araguaia. Para massas d'água, foi atribuído peso igual a 1.

Classe	Nota
<b>Declividade (%)</b>	
0 – 3	1
3 – 8	3
8 – 20	4
20 – 45	5
45 – 75	7
> 75	9

<b>Erosividade (R) (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>)</b>	
4905 < R < 7357	6
7357 < R < 9810	8
R > 9810	10
<b>Solos</b>	
Gleissolo	1
Organossolo	1
Latossolo	2
Nitossolo	4
Argissolo	5
Plintossolo	6
Cambissolo	7
Neossolo	8
<b>Geomorfologia</b>	
Planícies	2
Chapadas	3
Patamares	4
Planaltos	5
Depressões	7
Serras	9
<b>Uso e cobertura de terras</b>	
Afloramento rochoso	1
Área urbanizada	1
Campo alagado e área pantanosa	1
Formação florestal	2
Formação savânica	3
Formação campestre	4
Silvicultura	4
Pastagem cultivada	5
Culturas agrícolas	6
Outras áreas não-vegetadas	7
Mineração	9

Cada variável foi correlacionada com a matriz de decisão hierárquica (Tabela 3), atribuindo-se, em função da importância de cada tema, um valor para contribuição da erosão.

**Tabela 3.** Escala de valores dos comparadores relativa à matriz de decisão hierárquica AHP.

Valor	Importância mútua
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Moderadamente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Moderadamente menos importante que
5	Fortemente mais importante que

7	Muito fortemente mais importante que
9	Extremamente mais importante que

Fonte: Saaty (1997).

A matriz de comparação pareada das variáveis empregadas nesse estudo é demonstrada na Tabela 4.

**Tabela 4.** Matriz de comparação das variáveis. Uso = uso e cobertura da terra.

Fatores	Uso	Solo	Geomorfologia	Erosividade	Declividade	Peso
Uso	1	0,3333	0,2	0,1429	0,1111	0,0333
Solo	3	1	0,3333	0,2000	0,1429	0,0634
Geomorfologia	5	3	1	0,3333	0,2000	0,1290
Erosividade	7	5	3	1	0,3333	0,2615
Declividade	9	7	5	3	1	0,5128

A declividade foi definida como a variável de maior peso, seguida de erosividade, geomorfologia, tipo de solos e uso e cobertura da terra. Após a obtenção dos pesos de cada fator, foi elaborado o mapa de susceptibilidade à erosão (SUE) por meio da Eq. 3:

$$SUE = 0,5128 \times Dec + 0,2615 \times R + 0,129 \times Geom + 0,0634 \times Solo + 0,0333 \times Uso \quad (3)$$

Onde: Dec = declividade; R = erosividade; Geom = geomorfologia; e Uso = uso da terra.

As classes de susceptibilidade à erosão consideradas neste estudo foram as mesmas propostas por Silva et al. (2016): muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

#### Perda de Solos

Para estimar a perda de solos, foi utilizada a USLE, proposta por Wischmeier e Smith (1978) e adaptada para o Brasil por Bertoni e Lombardi Neto (1999), expressa conforme a Eq. 4:

$$PS = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (4)$$

Onde:

PS = perda anual de solo por unidade de área (ton ha<sup>-1</sup>);

R = erosividade anual da chuva (MJ mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>);

K = erodibilidade do solo (ton ha<sup>-1</sup> MJ<sup>-1</sup> mm<sup>-1</sup>);

L = comprimento de rampa (m);

S = declividade (%);

C = uso e manejo (adimensional); e

P = práticas conservacionistas (adimensional).

Para gerar a erosividade, foram utilizados os dados de precipitação de 117 estações disponibilizadas na plataforma Hidroweb da ANA (ANA, 2021) (Eqs. 1 e 2). Os valores de

erodibilidade (K) foram atribuídos para cada classe de solo (Tabela 5), conforme os valores propostos por Silva e Alvares (2007), Chaves et al. (2010) e Barbosa et al. (2015).

**Tabela 5.** Valores de erodibilidade do solo (K) discriminados por classes de solos.

Ordem	Erodibilidade (K)	Citação
Argissolo	0,0425	Silva e Alvares (2007)
Cambissolo	0,0508	Silva e Alvares (2007)
Latossolo	0,0162	Silva e Alvares (2007)
Neossolo	0,0351	Silva e Alvares (2007)
Nitossolo	0,0237	Silva e Alvares (2007)
Organossolo	0,0610	Silva e Alvares (2007)
Plintossolo	0,00579	Chaves et al. (2010)
Gleissolo	0,0361	Silva e Alvares (2007)
Rio e Lago	0,001	Barbosa et al. (2015)

Para a geração do fator topográfico LS, que representa o potencial topográfico de erosão hídrica laminar (Paranhos Filho, 2000), foram utilizados dados altimétricos produzidos pelo modelo ALOS Global Digital Surface Model (AW3D30), com resolução espacial de aproximadamente 30 metros, versão 3.1. Para a obtenção dos valores do fator LS, utilizou-se a

ferramenta *LS-Factor, Field Based*, disponível no aplicativo SagaGIS, versão 2.3.2. Este fator foi gerado com base nos cálculos de Wischmeier & Smith (1978). Os valores de LS são crescentes, iniciando-se em zero, que representa o menor potencial topográfico para erosão hídrica laminar.

Os fatores de uso e manejo do solo (C) e práticas conservacionistas (P) foram analisadas de

forma integrada com as classes de uso e cobertura da terra disponibilizados pelo projeto MapBiomas do ano de 2020. Os valores de CP para as classes de uso e cobertura da terra foram obtidos a partir da literatura (Tabela 6). Quanto maior o valor de CP, maior será a perda de solo (Souza e Gasparetto, 2012).

**Tabela 6.** Valores do fator CP para diferentes classes de uso e cobertura da terra.

Classe	Fator CP	Citação
Formação florestal	0,0004	Barbosa et al. (2015)
Formação savânica	0,0007	Stein et al. (1987)
Silvicultura	0,0005	Stein et al. (1987)
Campo alagado e área pantanosa	0,0001	Stein et al. (1987)
Formação campestre	0,01	Stein et al. (1987)
Pastagem cultivada	0,1	Barbosa et al. (2015)
Cultura agrícola	0,25	Stein et al. (1987)
Área urbanizada	0,0688	Pasquatto e Tomazoni (2016)
Outras áreas não-vegetadas	1	Barbosa et al. (2015)
Mineração	1	Barbosa et al. (2015)
Afloramento Rochoso	0,01	Costa et al. (2005)
Rio e Lago	0	Stein et al. (1987)

Após o cálculo e espacialização dos fatores R, K, L, S, C e P, efetuou-se uma álgebra de mapas segundo os critérios estabelecidos na USLE utilizando a ferramenta *Raster Calculator* disponível no aplicativo ArcGIS 10.3.

**Vulnerabilidade Natural**

A metodologia utilizada para geração do mapa de vulnerabilidade natural à perda de solo foi a proposta por Crepani et al. (2001), baseado em elementos geológicos, geomorfológicos, pedológicos, uso da terra e climáticos. A ponderação das unidades geológicas foi baseada

nas diferentes províncias estruturais. O menor valor (1) foi atribuído à província com menor susceptibilidade à erosão, enquanto o maior valor (5) foi atribuído à província com a maior susceptibilidade à erosão.

Para a definição da vulnerabilidade geomorfológica, foi gerado o índice de dissecação do relevo, que consiste no grau de dissecação somado à amplitude interfluvial e declividade, conforme proposto por Guimarães et al. (2017). Já os valores de vulnerabilidade dessa variável foram os propostos por Crepani et al. (2001) (Tabela 7).

**Tabela 7.** Valores de vulnerabilidade ambiental para a intensidade da dissecação do relevo.

Ampl. (m)	Vulner/Esta b	Ampl. (m)	Vulner/Estab	Ampl. (m)	Vulner/Estab
> 5.000	1,0	3.250 – 3.500	1,7	1.500 – 1.750	2,4
4.750 – 5.000	1,1	3.000 – 3.250	1,8	1.250 – 1.500	2,5
4.500 – 4.750	1,2	2.750 – 3.000	1,9	1.000 – 1.250	2,6
4.250 – 4.500	1,3	2.500 – 2.750	2,0	750 – 1.000	2,7
4.000 – 4.250	1,4	2.250 – 2.500	2,1	500 – 750	2,8
3.750 – 4.000	1,5	2.000 – 2.250	2,2	250 – 500	2,9
3.500 – 3.750	1,6	1.750 – 2.000	2,3	< 250	3,0

Ampl. = amplitude do interflúvio; Vulner/Estab = relação entre vulnerabilidade e estabilidade.

Fonte: Crepani et al. (2001).

Para a definição da vulnerabilidade pedológica, foram utilizados os dados de pedologia do IBGE, sendo que os valores de vulnerabilidade

dessa variável foram definidos conforme os valores propostos por Crepani et al. (2001) (Tabela 8).

Para a definição da vulnerabilidade vegetal e do uso da terra, utilizou-se a base digital do Projeto MapBiomias referente aos anos de 1985 a 2020.

**Tabela 8.** Valores de vulnerabilidade dos solos considerados neste estudo.

Classe	Vulnerabilidade
Argissolo	2
Cambissolo	2,5
Gleissolo	3
Latossolo	1
Neossolo	3
Nitossolo	2
Organossolo	3
Plintossolo	3
Rio e Lago	1,5

Os valores de vulnerabilidade vegetal e uso da terra também foram os mesmos dos propostos por Crepani et al. (2001) (Tabela 9).

**Tabela 9.** Valores de vulnerabilidade das classes de uso e cobertura da terra considerados neste estudo.

Classe	Vulnerabilidade
Formação Florestal	1,2
Formação Savânica	1,5
Silvicultura	2
Campo Alagado e Área Pantanosa	3
Formação Campestre	2,7
Pastagem	3
Agricultura	3,5
Área Urbanizada	4
Outras Áreas Não- Vegetadas	5
Mineração	5
Afloramento Rochoso	3
Rio, Lago e Oceano	1

Para o cálculo da vulnerabilidade climática, também foram utilizados os dados de precipitação de 117 estações disponibilizadas na plataforma Hidroweb da ANA. A vulnerabilidade climática foi calculada pela divisão entre a precipitação média anual e o número de dias com chuva, dividido pelo número de dias do mês. Posteriormente, esses dados foram espacializados por meio do método de interpolação baseado no IQD.

Para o cálculo da vulnerabilidade da paisagem, efetuou-se uma álgebra de mapas segundo os critérios estabelecidos por Crepani et al. (2001) (Eq. 5), novamente utilizando a ferramenta *Raster Calculator* do aplicativo ArcGIS 10.3.

$$V_A = \frac{V_{GL} + V_{GM} + V_{PE} + V_{UC} + V_{CL}}{5} \quad (5)$$

Onde:

VA = vulnerabilidade da paisagem;  
 V<sub>GL</sub> = vulnerabilidade geológica;  
 V<sub>GM</sub> = vulnerabilidade geomorfológica;  
 V<sub>PE</sub> = vulnerabilidade pedológica;  
 V<sub>UC</sub> = vulnerabilidade de uso e cobertura da terra;  
 e  
 V<sub>CL</sub> = vulnerabilidade climática.

As áreas estáveis são caracterizadas pela presença de cobertura vegetal densa, dissecação do relevo moderada e ausência de atividades vulcânicas (Crepani et al., 2001). Já os meios fortemente instáveis são aqueles marcados por condições bioclimáticas agressivas, tais como a presença de ventos e chuvas com variações fortes e irregulares, relevo intensamente dissecado, ocorrência de solos rasos, falta de cobertura vegetal densa, susceptibilidade de planícies, fundos de vales sujeitos a inundações e intensa geodinâmica interna (Crepani et al., 2001).

## Resultados e discussão

### *Uso e Cobertura da Terra*

Na Figura 3, são mostradas as séries temporais dos mapas de uso e cobertura da terra do Médio Araguaia para o período 1985–2020. Regra geral, as formações florestais ocorrem predominantemente tanto na porção noroeste da bacia, localizada no estado do Pará, como ao longo das margens dos rios, na forma de matas-de-galeria. As formações campestres, os campos alagados e as áreas pantanosas encontram-se predominantemente no centro da bacia, ao longo do leito do rio Araguaia e seus afluentes. No período das chuvas, elas costumam ficar cobertas por uma lâmina de água que varia de 0,1 m a 0,7 m (Marimon et al., 2008).

Percebe-se ainda uma extensa conversão de áreas florestais para pastagens cultivadas na porção noroeste da bacia. Essa constatação corrobora os resultados obtidos por Bayer et al. (2020) que também observaram um rápido

processo de substituição das áreas de floresta pela agropecuária, notadamente pelas monoculturas de soja, milho, sorgo, além de pastagem. As áreas agrícolas ocorrem concentradas na porção sudoeste da bacia, próximos aos municípios mato-grossenses de Primavera do Leste e Barra do

Garças, região de ecótono entre Amazônia e Cerrado e com intensa produção de grãos. As pastagens cultivadas encontram-se distribuídas aleatoriamente em toda a bacia.

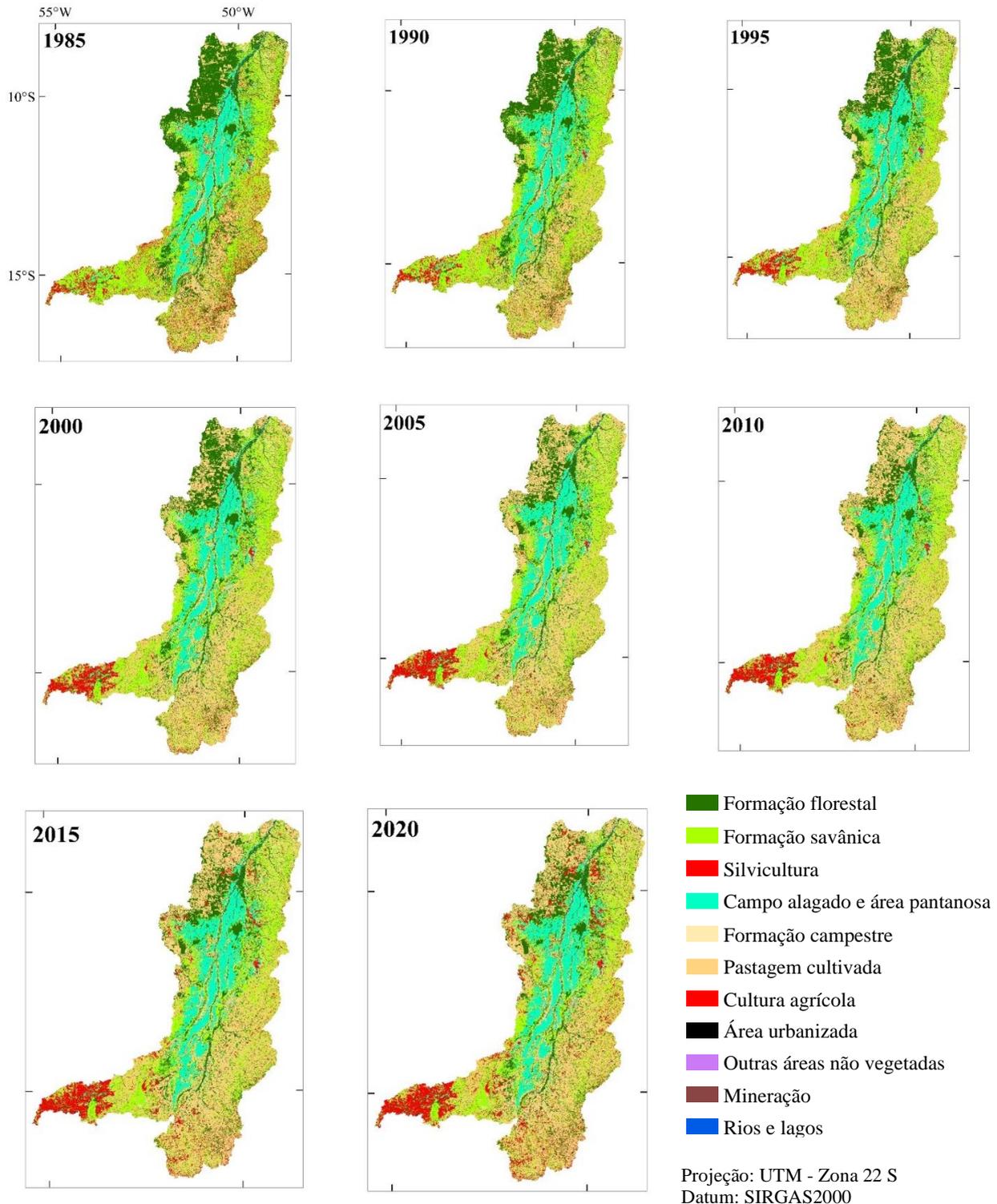


Figura 3. Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia do Médio Araguaia no período 1985–2020. Fonte: MapBiomias (2022).

No período de 1985 a 2020, percebe-se um aumento expressivo de áreas ocupadas com pastagens cultivadas, notadamente nos primeiros 20 anos, isto é, até 2005, passando a se estabilizar logo em seguida (Figura 4). Em 1985, as pastagens cultivadas ocupavam uma área aproximada de 4,8 milhões de ha na bacia do Médio Araguaia, passando a ocupar uma área de 10,3 milhões de há em 2020. O avanço das pastagens cultivadas ocorreu principalmente em áreas de formações florestal e savânica, os quais apresentaram uma redução gradual e constante ao longo de todo o período analisado. Essa conversão de área natural

para área antrópica pode gerar novas áreas suscetíveis à erosão, acelerar os processos erosivos, assoreando o leito do rio e, consequentemente, causar alterações no ciclo hidrológico (Bayer et al., 2020). Destacam-se ainda os campos alagados e as áreas pantanosas que ocupam uma área expressiva de cerca de 3,4 milhões de ha na área de estudo. Segundo Gomes et al. (2021), esses números mostram a dimensão do quanto esse importante sistema fluvial pode ser ameaçado com o avanço das atividades antrópicas.

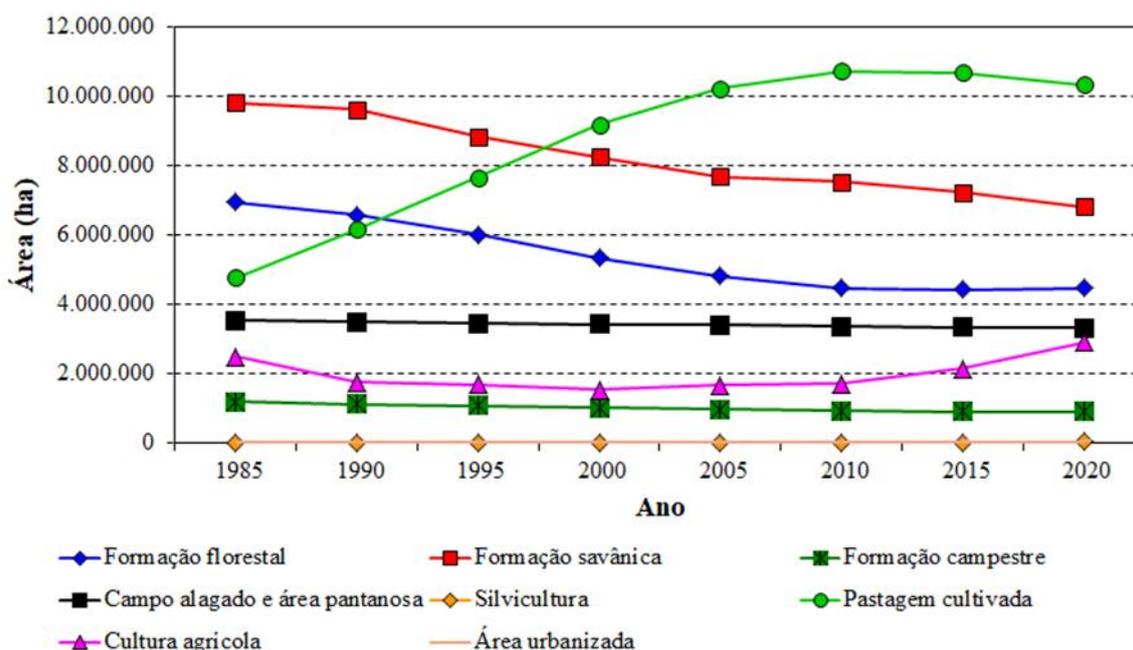


Figura 4. Dinâmica da ocupação das classes de uso e cobertura da terra no Médio Araguaia entre os anos de 1985 a 2020. Fonte: MapBiomias (2022).

Em 2020, 52% do Médio Araguaia estavam cobertas com vegetação nativa, uma porcentagem similar ao encontrado para todo o bioma Cerrado que era de 55% em 2017 (Alencar et al., 2020). De acordo com Klink e Machado (2005), a diminuição das áreas naturais e, consequentemente, o aumento das atividades agropecuárias, ocasiona ainda diversos outros impactos ambientais, tais como a fragmentação da paisagem, perda de biodiversidade, introdução de espécies invasoras e processos erosivos. A conversão da floresta ripária para pastagem reduz ainda a permeabilidade do solo devido à diminuição da capacidade de infiltração e aumento da resistência do solo à penetração, influenciando negativamente uma série de serviços ecossistêmicos (Brito et al., 2019).

A agricultura apresentou uma tendência de redução em área no período de 1985 a 2000, no entanto, essa tendência foi invertida a partir desse último ano. De acordo com Mota Júnior et al. (2020), o uso e ocupação das terras na bacia ainda não está consolidado, o que é característico das áreas de fronteira agrícola. Para Gomes et al. (2021), o avanço do uso e ocupação das terras, principalmente as destinadas ao pastoreio em áreas instáveis como em declividades elevadas e alguns tipos de solos como Cambissolo, Neossolo Quartzarênico e Plintossolo podem agravar os processos erosivos na área de estudo.

Para Assis e Bayer (2020), quanto maiores forem os impactos e degradação ambiental decorrente do uso e cobertura da terra na bacia do rio Araguaia, maiores serão as alterações ambientais e socioeconômicas da região. Esse

cenário pode ser evitado combinando-se políticas públicas para conciliar a expansão agrícola, conservação do Cerrado remanescente e restauração ecológica de habitats críticos (Strassburg et al., 2017).

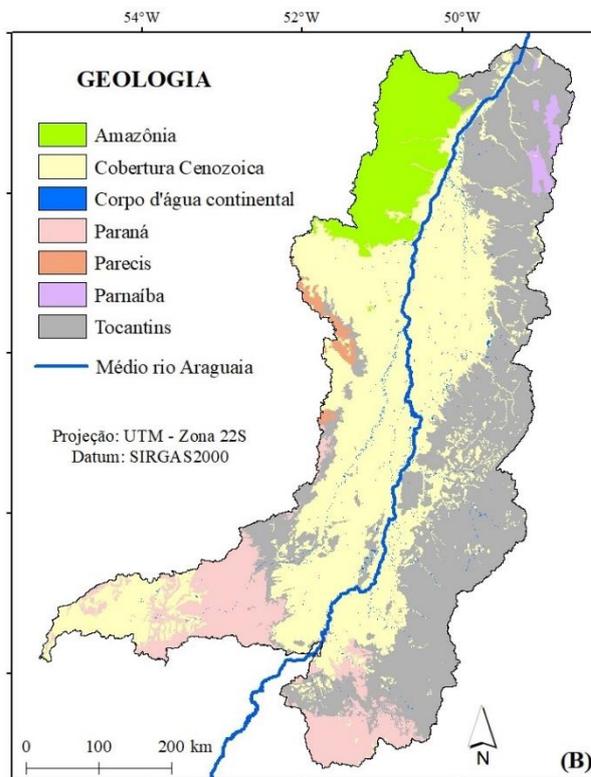
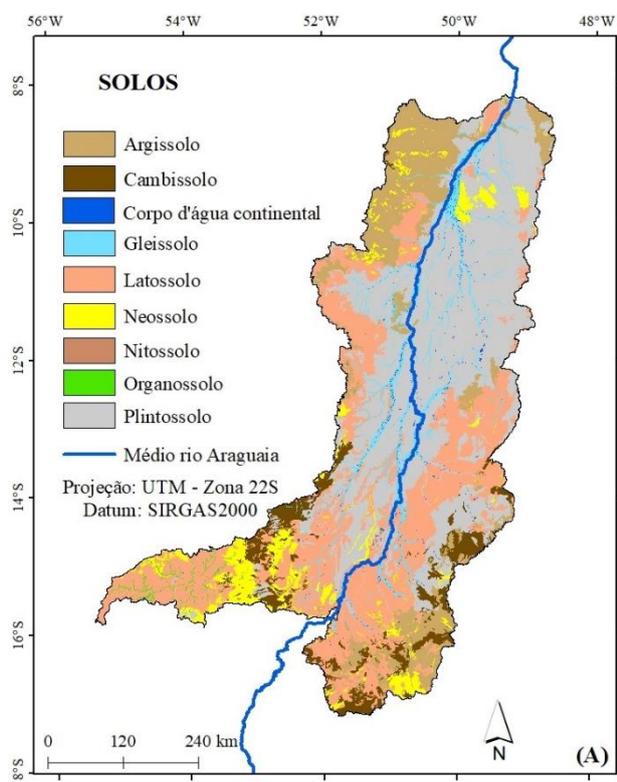
### Caracterização Física do Médio Araguaia

Na Figura 5, são mostrados os mapas de pedologia, geologia, geomorfologia e de declividade do Médio Araguaia. Em termos pedológicos, predominam os Plintossolos (38%), Latossolos (31%) e Argissolos (13%) (Figura 5 – A). Descrição detalhada das características dessas classes de solo pode ser encontrada em Embrapa (2021). Os Plintossolos e os Argissolos ocorrem predominantemente na porção norte do Médio Araguaia, enquanto os Latossolos são encontrados principalmente na porção sul da bacia. Os Plintossolos apresentam sérios problemas de conservação, principalmente devido à presença de cascalhos (França et al., 2019).

A geologia da bacia do Médio Araguaia é formada principalmente pela província estrutural de Tocantins (35%), localizada na porção leste da

bacia e pela Cobertura Cenozoica (43%), situada na porção central da bacia (Figura 5 – B). A Província Estrutural de Tocantins, originalmente definida por Almeida et al. (1977), corresponde a uma compartimentação geotectônica decorrente da formação dos cinturões de dobramentos e cavalgamentos das faixas de dobramentos Brasília, Araguaia e Paraguai.

Embora a geomorfologia da bacia do Médio Araguaia seja relativamente heterogênea e complexa (Martins et al., 2021), há um predomínio de duas compartimentações, as Depressões (55%) e as Planícies (25%) (Figura 5 – C). As planícies fluviais ou flúvio-lacustres são periodicamente inundadas e são encontradas predominantemente na porção central da bacia, ao longo do rio Araguaia, enquanto as depressões ocorrem margeando as planícies, também ao longo do rio Araguaia. As classes mais expressivas de declividade na bacia do Médio Araguaia são a plana (48%), seguida de suave-ondulada (34%), ondulado (14%) e forte-ondulado (3%) (Figura 5 – D).



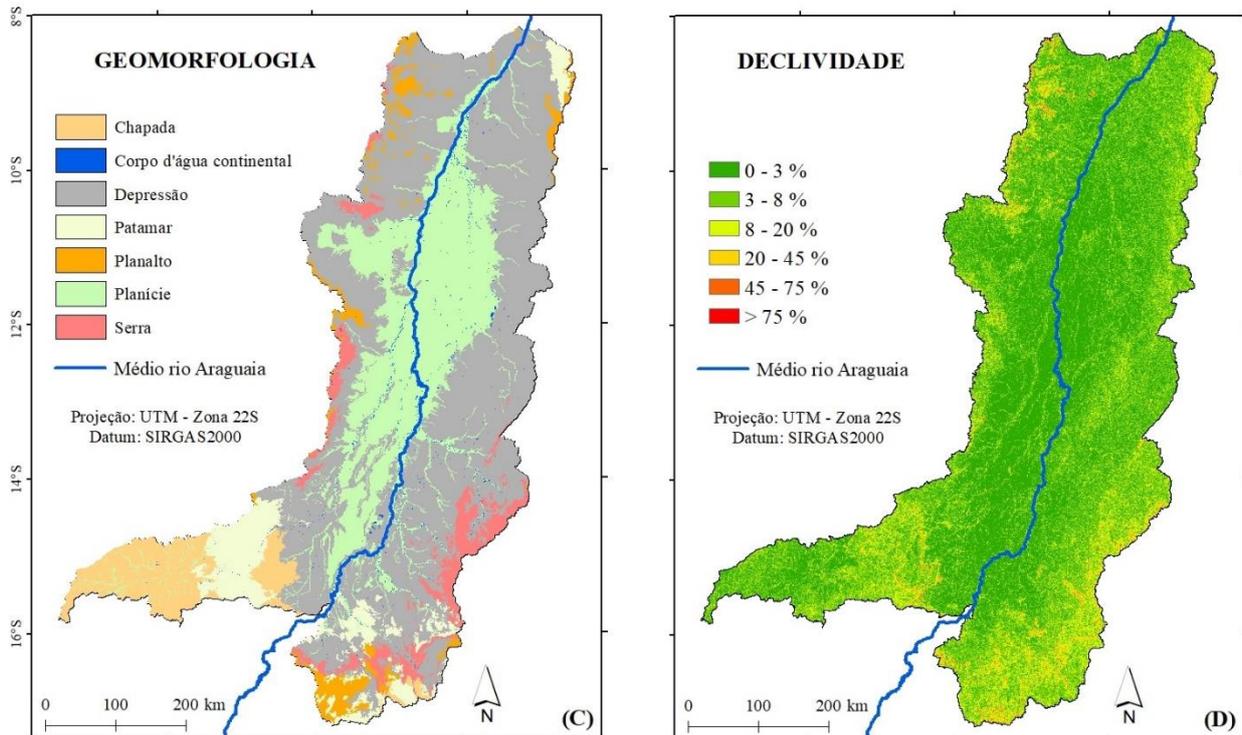


Figura 5. Mapa de solos (A), geologia (B), geomorfologia (C) e de declividade (D) da bacia do Médio Araguaia. Os três primeiros mapas foram adquiridos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala de 1:250.000. O mapa de declividade foi produzido com base no modelo digital de elevação da JAXA (AW3D30).

### Susceptibilidade à Erosão

Na bacia do Médio Araguaia, as áreas com baixa susceptibilidade à erosão correspondem a 41,4% (Figura 6; Tabela 10), já as áreas com alta e muito alta susceptibilidade à erosão representam 2,6% da bacia. As áreas com média susceptibilidade corresponde a 56%, conforme relatado por Silva et al. (2016). Esses resultados vão de encontro com os de Rodrigues Filho (2022) que identificaram uma alta susceptibilidade erosiva em uma microbacia do Mato Grosso.

Considerando que 56% da bacia do Médio Araguaia possui média susceptibilidade a erosão, é importante destacar que os tipos de relevo predominantes nesses ambientes são as depressões, planaltos e planícies. Para Bertoni e Lombardi Neto (1999), a erosão está diretamente ligada à declividade, ou seja, quanto maior a declividade e o comprimento de rampa, maior a velocidade do escoamento superficial e mais intenso o poder de arraste.

Os dois solos com maior expressão na bacia (Plintossolos e Latossolos) favorecem a desagregação das partículas e, em relevos mais acidentados, caracterizam-se por serem áreas instáveis, sujeitas à ruptura de relevo, o que pode

ocasionar casos de erosões e escorregamentos (Melo et al., 2021).

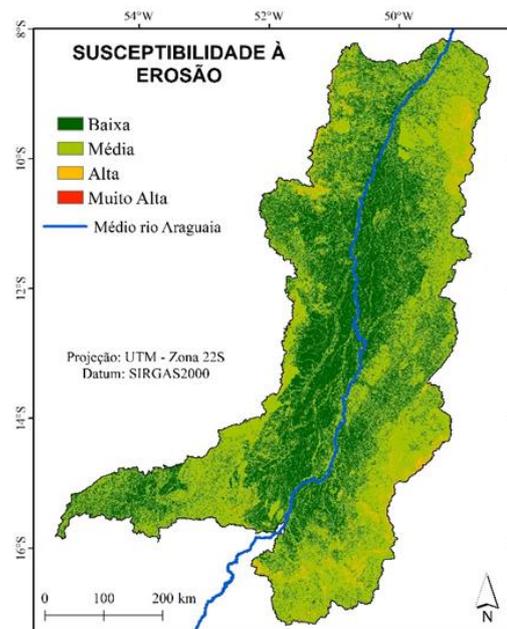


Figura 6. Mapa de susceptibilidade à erosão do Médio Araguaia.

**Tabela 10.** Área (ha) e porcentagem de ocupação das classes de susceptibilidade à erosão da bacia do Médio Araguaia.

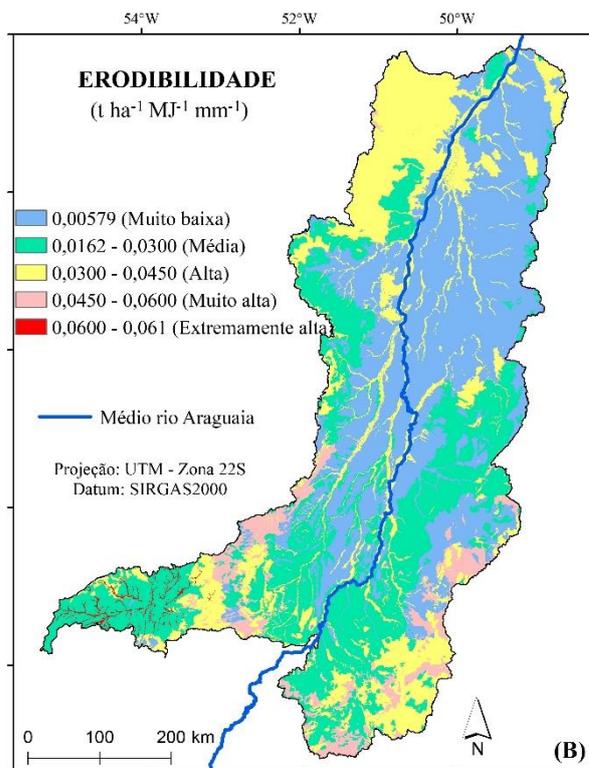
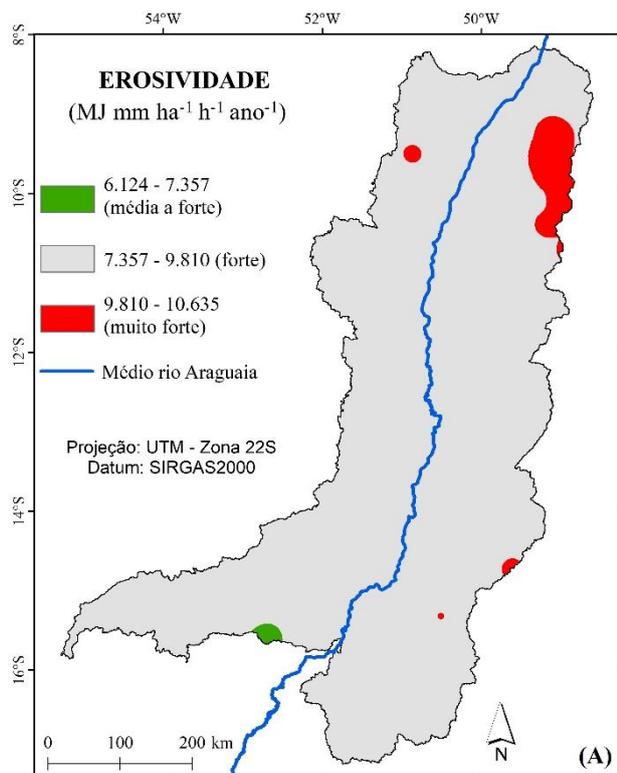
Classe	Área (ha)	Porcentagem (%)
Baixa	12.034.137	41,4
Média	16.320.762	56,0
Alta	722.835	2,5
Muito Alta	15.849	0,1

Além disso, os usos e coberturas da terra mais representativas são os campos alagados, pastagem e agricultura, o que faz com que a

susceptibilidade à erosão seja maior, pois o coeficiente de infiltração é menor do que o escoamento superficial, podendo elevar o potencial de erosão da área. Portanto, nessas áreas, devem ser adotadas boas práticas conservacionistas para que sejam reduzidas a energia e a velocidade da água, evitando processos erosivos, assoreamento dos canais de drenagem, inundação e contaminação das águas superficiais (Failache e Zuquette, 2018).

**Perda de Solos**

Na Figura 7, são mostrados os mapas de erosividade dos solos, erodibilidade dos solos, fator *LS* e fator *CP*.



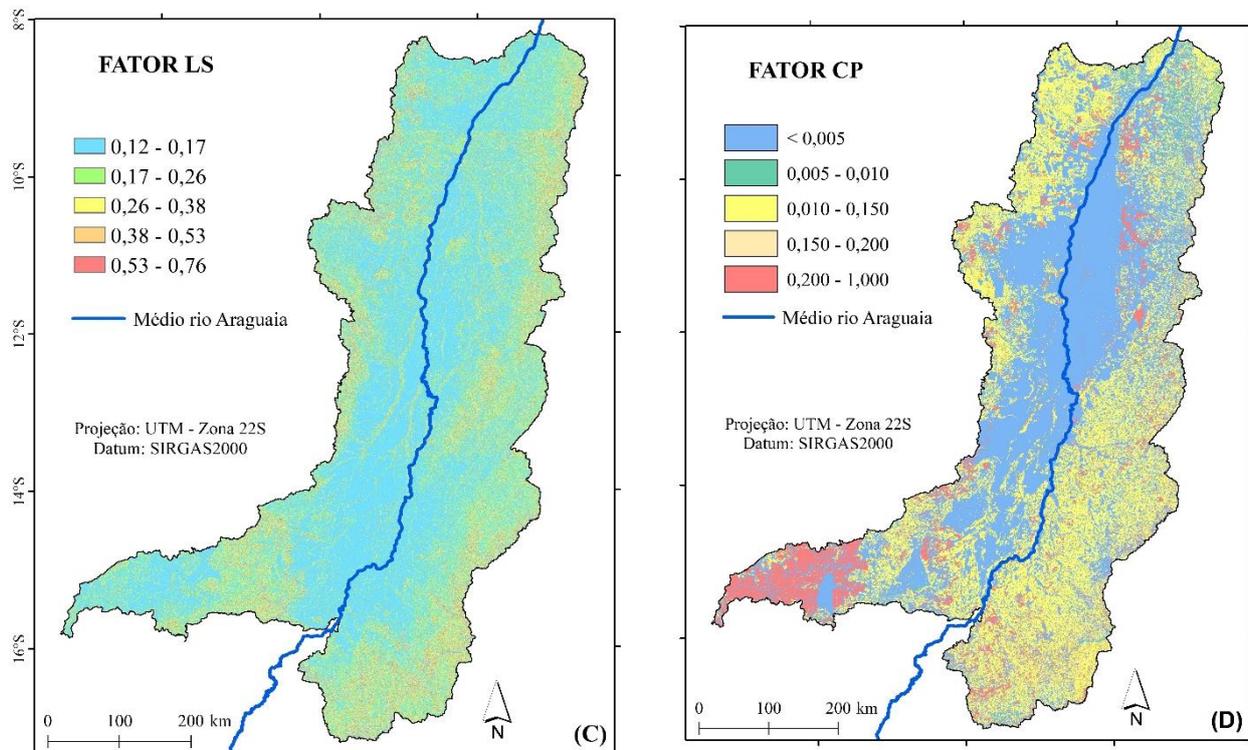


Figura 7. Mapa de erosividade em  $\text{MJ mm}^{-1} \text{ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$  (A), erodibilidade em  $\text{t ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$  (B), fator LS (adimensional) (C) e fator CP (adimensional) (D) da bacia do Médio Araguaia.

A bacia do Médio Araguaia possui erosividade média a muito forte ( $6.124 < R < 10.635 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ), segundo a classificação de Carvalho (2008). Esses dados estão relacionados com a precipitação local, isto é, quanto maior a precipitação, maior é a erosividade da chuva, aumentando a probabilidade de causar erosão no solo (Amaral et al., 2020). Esse resultado corrobora com os encontrados por Lima et al. (2018) que, em análise da região metropolitana de Goiânia, classificaram a erosividade como forte, conforme encontrado neste trabalho.

Os valores de erodibilidade do solo variam de muito baixa a extremamente alta ( $0,00579 < K < 0,061 \text{ t ha}^{-1} \text{MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ ), segundo a classificação de Mannigel (2002), e estão relacionados aos Gleissolos, Organossolos e Argissolos (Silva e Alvares, 2007). Dessa forma, observa-se alta erodibilidade na porção noroeste da bacia do Médio Araguaia. Para Silva et al. (2022), o uso do solo nem sempre é utilizado de forma a conferir resiliência aos sistemas agropecuários, podendo resultar em graves problemas ambientais. Nesse sentido, Maneshy et al. (2022) afirmaram que é necessário readequar os sistemas produtivos, levando em consideração os serviços ecossistêmicos e as vantagens econômicas, sociais e ecológicas.

O fator *LS*, que representa o potencial topográfico de erosão hídrica laminar, possui valores variando de 0,12 a 0,76, indicando que, na região, predominam as menores taxas de escoamento superficial e, conseqüentemente, baixa erosão hídrica laminar (Melo et al., 2021). Beskow et al. (2009) e Gomes et al. (2017) classificaram o fator *LS* em seis classes, sendo que os valores de 0 a 1 representam as áreas mais planas, conforme encontrado neste trabalho. Os maiores valores de *LS* foram encontrados nas bordas, enquanto os menores valores foram encontrados na parte central da bacia. Assim, as áreas de topos de morros e chapadas que possuem as menores declividades apresentaram baixos valores de *LS*, enquanto os maiores valores foram identificados distantes dos divisores topográficos, nas convergências de fluxos e nas declividades acentuadas (Lopes et al., 2011). Esses resultados corroboram com os resultados de Melo e Couto Júnior (2022), onde, em áreas com relevo mais plano e altitudes elevadas, predominam a agricultura e a pastagem, enquanto nos relevos mais íngremes e dissecados, predominam as pastagens e as áreas de cobertura nativa.

O mapa de uso e cobertura da terra de 2020 indicou que a bacia apresenta atualmente mais áreas antrópicas do que cobertura natural (Figura

3), contribuindo para o aumento da estimativa de perda de solo. Nesse sentido, as maiores perdas de solo estão relacionadas à Agricultura e à Pastagem, com os maiores índices dos fatores *C* e *P*, confirmando a maior susceptibilidade do solo, quando expostos a essas classes de uso, uma vez que oferecem pouca proteção ao solo (Ruthes et al., 2016).

Os mapas dos fatores *R* (erosividade), *K* (erodibilidade), *LS* (integração do comprimento de rampa e declividade) e *CP* (integração os fatores de uso e manejo do solo e práticas conservacionistas) foram aplicados na USLE, resultando no mapa de perda de solos, que expressa índices de perda média anual de solo por unidade de área na bacia do Médio Araguaia (Figura 8).

Os valores de perda de solos variaram de 0 a 253,4 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e foram divididos em sete classes (Tabela 11).

Noventa e três por cento (93,57%) da área da bacia do Médio Araguaia apresentaram estimativas de perdas anuais de solo entre 0 a 10 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, o que, segundo a classificação da FAO (1967), representa nenhuma ou ligeira perda de solo. Esses valores corroboram com os obtidos por Castro et al. (2022) que, em uma análise de uma bacia em áreas de Cerrado, encontraram valores de

perda de solo com baixo potencial erosivo, cerca de 73,73%.

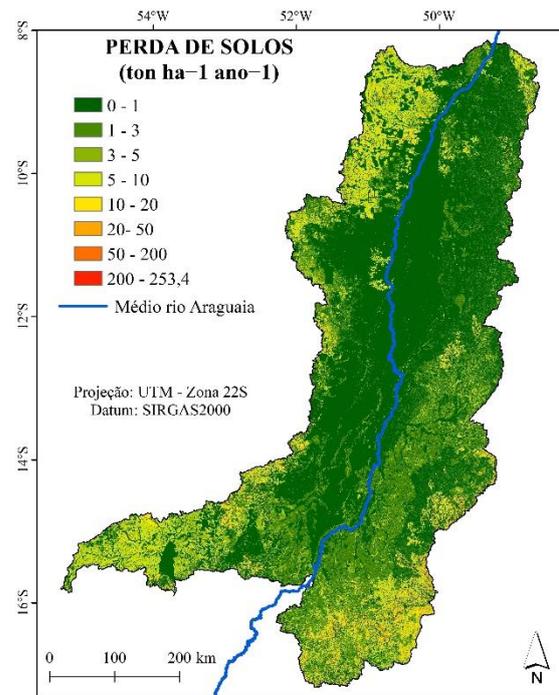


Figura 8. Mapa de perda de solos da bacia do Médio Araguaia.

**Tabela 11.** Classes de intensidade de erosão (de acordo com a perda de solos) e percentual de área ocupada na bacia do Médio Araguaia.

Perdas de solo (ton ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Área (ha)	Porcentagem (%)	Classe
0 - 1	17.188.261	59,079	Nenhuma ou ligeira
1 - 3	4.629.938	15,914	Nenhuma ou ligeira
3 - 5	3.502.993	12,040	Nenhuma ou ligeira
5 - 10	1.902.303	6,539	Nenhuma ou ligeira
10 - 20	1.326.672	4,560	Moderada
20 - 50	473.591	1,628	Moderada
50 - 200	69.453,47	0,239	Alta
200 - 253,4	371,10	0,001	Muito Alta

Analisando o mapa de estimativa de perda de solos e a espacialização dos fatores erosividade da chuva (*R*), erodibilidade do solo (*K*), declividade e comprimento de rampa (*LS*) e do uso, manejo e práticas conservacionistas (*CP*), observou-se que as estimativas de perdas de solo da bacia está associada, sobretudo, aos fatores *CP* e *K*. O fator *LS* não apresentou variação acentuada na área.

Os locais com perda de solo forte e muito forte estão mais relacionadas ao fator *LS*, nas áreas mais declivosas e com rupturas do relevo. Por outro lado, as demais áreas estão relacionadas principalmente com os mosaicos de agricultura e

pastagem. São áreas que, devido à sazonalidade agrícola, encontram-se desprovidas de cobertura vegetal em certos períodos, ficando expostas à erosividade da chuva (Melo et al., 2021). No fator *LS*, o que predominou foram os valores iguais a 0, com baixa declividade e comprimento de rampa. O *CP* foi influenciado pelos mosaicos de agricultura e pastagem, conforme ressaltado pelo estudo conduzido por Galdino et al. (2015). Já o fator *K* foi influenciado pelo Argissolo, Organossolo e Gleissolos, enquanto o fator *R* foi o parâmetro que menos influenciou no processo. Esses resultados corroboram com os encontrados por Rosa et al. (2023) que, em estudos para o estado de Goiás,

mostraram uma perda média histórica de 18 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> no recorte temporal entre 1985 a 2017.

O mapa de perdas de solo permite ainda a identificação de pontos críticos e o direcionamento de esforços para adoção de boas práticas agrícolas em locais mais susceptíveis ou afetados pela erosão do solo, facilitando o planejamento ambiental e a tomada de decisão para adequação das atividades na referida bacia (Xavier et al., 2019; Amaral et al., 2020).

**Vulnerabilidade Natural**

Após a determinação da vulnerabilidade de cada elemento da paisagem, foi realizado o cruzamento dos dados. Conforme apresentado na Figura 9, foram identificadas quatro unidades predominantes de vulnerabilidade da paisagem: Medianamente Estável/Vulnerável, Moderadamente Estável, Moderadamente Vulnerável e Vulnerável. As áreas ocupadas por cada uma dessas unidades estão mostradas na Tabela 12.

A partir do mapeamento da vulnerabilidade da paisagem, verificou-se que a classe predominante é a Moderadamente Vulnerável, ocupando 43% da área total, seguida pela classe Medianamente Estável/Vulnerável, responsável por 28% da área total. Esse resultado vai de encontro com o obtido por Faria et al.

(2021), onde foi possível notar a presença majoritária de áreas com índices médios de vulnerabilidade em uma área de Cerrado.

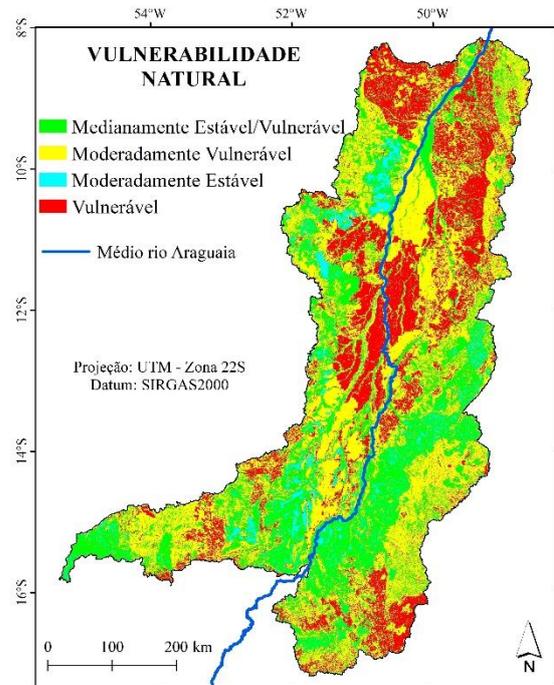


Figura 9. Mapa de vulnerabilidade natural da bacia do Médio Araguaia.

**Tabela 12.** Classes de vulnerabilidade natural (ha) e percentual de área ocupada na bacia do Médio Araguaia.

Classe	Área (ha)	Porcentagem (%)
Moderadamente Estável	1.664.791	6
Medianamente Estável/Vulnerável	8.175.328	28
Moderadamente Vulnerável	12.574.155	43
Vulnerável	6.679.309	23

Os valores de vulnerabilidade atribuídos para cada elemento da paisagem possuem as seguintes definições: valores próximos a 1,0 caracterizam as paisagens estáveis; próximos a 2,0 são caracterizadas como paisagens intermediárias; e os mais próximos do 3,0 como paisagens vulneráveis. A vulnerabilidade é média/baixa onde não há ocupação antrópica, como as áreas de matas e lagoas, ou seja, está associada a elevados níveis de proteção (Herculano e Souza, 2022). Já os locais onde a vulnerabilidade é alta são ocupados principalmente por pastagem e agricultura (Klais et al., 2012).

Em relação à vulnerabilidade geológica do Médio Araguaia, observa-se, na maior parte da bacia, a classe Moderadamente Vulnerável. Já a vulnerabilidade geomorfológica varia de

Medianamente Estável/Vulnerável a Vulnerável. Para identificação da vulnerabilidade pedológica, considerou-se a susceptibilidade dos solos a serem erodidos por meio dos processos naturais do ambiente. A maioria dos solos são vulneráveis à erosão, com exceção dos Latossolos que se apresentam estáveis. Os valores atribuídos para a vulnerabilidade dos solos variaram de Estável a Vulnerável.

A cobertura do solo é um fator importante para a classificação da vulnerabilidade da paisagem ao processo de perda de solos. Quanto maior a densidade de cobertura vegetal, menor será o processo de erosão do solo. Foi possível identificar 11 classes de uso e cobertura da terra na bacia do Médio Araguaia. Dessa forma, evidencia-se que a pastagem, com alto grau de vulnerabilidade, ocupa

a maior área de uso e cobertura da terra. Os valores obtidos passaram a indicar a real exposição das unidades em relação aos processos erosivos, o que permite concluir que a cobertura vegetal é um fator relevante para o equilíbrio da paisagem e sua ausência pode vir a comprometer não só os solos, mas também a qualidade da água pelo uso indiscriminado de agrotóxicos e adubos químicos nas áreas agrícolas (Mesquita et al., 2010).

A variável climática para a vulnerabilidade da paisagem à perda de solos é representada pela precipitação, importante elemento nessa análise, pois exerce influência direta sobre perda de solos. Dessa forma, a depender do estado de cobertura da terra, tal contexto pode causar grandes perdas (Nicolau, 2018). De acordo com Crepani et al. (2001), o cálculo da intensidade pluviométrica é realizado por meio da expressão que divide o valor médio anual de precipitação pelo número de meses de sua maior ocorrência.

A unidade Moderadamente Estável cobre 6% da bacia. A maior parte dessa unidade está localizada na Cobertura Cenozoica. Geomorfologicamente, está associada às áreas de depressões, além da sua litologia estar associada aos Latossolos. Como cobertura vegetal, tem-se as áreas de Pastagens.

A Unidade Medianamente Estável/Vulnerável ocupa 28% do território. A maior parte dessa unidade está localizada na Cobertura Cenozoica. Geomorfologicamente, está associada às áreas de depressões, além da sua litologia estar associada aos Latossolos. Como cobertura vegetal, tem-se predominantemente as áreas de Pastagens. Portanto, todos esses fatores contribuem para que essa unidade se configure como Medianamente Estável/Vulnerável.

A unidade Moderadamente Vulnerável representa 43% da área em estudo. Essa unidade está presente principalmente na Cobertura Cenozoica. Assim como na Unidade Medianamente Estável e Moderadamente Estável, predominam, nessa unidade, as depressões. Os solos predominantes são os Plintossolos, sendo essa unidade recoberta por pastagem, tornando-a uma área de estabilidade moderada para a perda de solo.

A Unidade Vulnerável representa 23% de toda a área de estudo. A geologia das áreas de ocorrência é a Província Estrutural do Tocantins, em áreas de depressões. Os solos predominantes são os Plintossolos. Em relação ao uso e cobertura da terra, o predomínio é de pastagem. Todos esses fatores permitem considerar essa unidade como uma área Vulnerável. Nesse caso específico, o fator

de maior atenção é o uso e cobertura da terra que é estável, uma vez que, se for perdida, pode torná-la mais vulnerável à perda de solos, em virtude da tipologia pedológica predominante.

Em todas as unidades, observou-se áreas recobertas por pastagens e ocorrência de solos expostos, o que as torna mais vulneráveis, ou seja, a partir do processo acelerado de denudação do solo, essa unidade tende a se tornar vulnerável à perda de solo. A qualidade da paisagem é diretamente afetada pelas mudanças no uso e cobertura da terra, através da construção de estradas, urbanização e diminuição da cobertura vegetal. Quanto maior o número de alterações nas características naturais do ambiente, mais susceptível será o ambiente (Nandy et al., 2015). Além disso, as áreas vulneráveis presentes na bacia apresentam, de uma maneira geral, danos ambientais relevantes tais como o assoreamento dos cursos d'água, a mudança e interdição das drenagens dos rios, a retirada da vegetação para uso antrópico (plantio e moradia) e a extração mineral, intervenções essas que são praticamente irreversíveis (Costa et al., 2021). Assim, são necessárias ações de preservação e conservação para manter a dinâmica do meio ambiente (Mira et al., 2022).

Os resultados desse estudo podem ser altamente relevantes para o planejamento de uso e ocupação da área de estudo, adoção de boas práticas de manejo e de ações protecionistas e formulação de políticas públicas ambientalmente sustentáveis para a bacia em questão.

## Conclusões

Quase a totalidade da bacia do Médio Araguaia (97,5%) apresenta susceptibilidade à erosão entre média a baixa, com perda de solos variando de 0 a 253,4 ton ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>. Em termos de vulnerabilidade natural, as duas classes mais expressivas são a moderadamente vulnerável e a medianamente estável/vulnerável. A baixa declividade da área de estudo e a baixa pressão antrópica, principalmente em termos de avanço da produção de grãos com elevado nível de tecnificação, favorecem essa condição de vulnerabilidade ambiental, embora aproximadamente 30% da bacia estejam em situação ambientalmente vulnerável, principalmente na porção mais à jusante do Médio Araguaia.

Recomenda-se a expansão deste estudo para as outras partes das partes da bacia do

Araguaia (alto e baixo Araguaia) e também para a bacia do rio Tocantins, a qual compõe a extensa e complexa bacia do Tocantins-Araguaia na porção central do país.

### Agradecimentos

À Tropical Water Research Alliance (TWRA), Ministério do Desenvolvimento Rural (MDR) e Banco Itaú, pelo suporte financeiro que permitiram a condução deste estudo. Aos revisores anônimos que dedicaram precioso tempo na revisão do manuscrito, trazendo contribuições bastante relevantes para a melhoria deste estudo.

### Referências

- Agência Nacional de Águas (Brasil). HidroWeb: Sistemas de informações hidrológicas. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>. Acesso em: jul. 2021.
- Alencar, A., Shimbo, J.Z., Lenti, F., Marques, C.B., Zimbres, B., et al., 2020. Mapping three decades of changes in the Brazilian savanna native vegetation using Landsat data processed in the Google Earth Engine platform. *Remote Sensing* 12, 924. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Neves, B.B.B.; Fuck, R.A., 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., Campina Grande, PB. Anais... Recife: SBG/Núcleo Nordeste, p. 363-391.
- Amaral, L.K., Cadorin, S.B., Voltar, A.J., Szymanski, F.D., Corseuil, C.W., 2020. Estimation of soil loss by the USLE model in a mountain basin in the south of Santa Catarina State, Brazil. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia* 24, e20. <https://doi.org/10.5902/2236117062695>.
- Aquino, S., Latrubesse, E.M., Souza Filho, E.E., 2009. Caracterização hidrológica e geomorfológica dos afluentes da bacia do rio Araguaia. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 10, 43-54. <https://doi.org/10.20502/rbg.v10i1.116>.
- Assis, P.C., Bayer, M., 2020. Análise multitemporal do sistema fluvial do rio Araguaia, Aruanã, Goiás, Brasil. *Élisée* 9, e9222003.
- Barbosa, A.F., Oliveira, E.F., Miotto, C.L., Paranhos Filho, A.C., 2015. Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (USLE) em *softwares* livres e gratuitos. *Anuário do Instituto de Geociências* 38, 170-179. [http://dx.doi.org/10.11137/2015\\_1\\_170\\_179](http://dx.doi.org/10.11137/2015_1_170_179).
- Bayer, M., Assis, P.C., Suizu, T.M., Gomes, M.C., 2020. Mudança no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Araguaia e seus reflexos nos recursos hídricos, o trecho médio do rio Araguaia em Goiás. *Confins* 48. <https://doi.org/10.4000/confins.33972>.
- Bertoni, J., Lombardi Neto, F., 1999. *Conservação do Solo*. 4ª ed., Ícone, São Paulo, SP.
- Beskow, S., Mello, C.R., Norton, L.D., Curi, N., Viola, M.R., Avanzi, J.C., 2009. Soil erosion prediction in the Grande River basin, Brazil using distributed modelling. *Catena* 79, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.05.010>.
- Brito, G.Q., Sampaio, J.A.G., Luiz, G.P., Melo, A.C.A., Simões, V.P. et al., 2019. Efeitos da conversão de floresta ripária em pastagem sobre as propriedades físico-hídricas do solo. *Espaço e Geografia* 22, 73-89.
- Carvalho, N.O., 2008. *Hidrossedimentologia Prática*. 2ª ed., Interciência, Rio de Janeiro, RJ.
- Castro, R.M., Santos, W.A., Marcionilio, S.M.L.O., Moura, D.M.B., Oliveira, D.M.S., 2022. Soil losses related to rainfall seasonality in a watershed in the Brazilian Cerrado. *Journal of South American Earth Sciences* 119, 104020. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104020>.
- Chaves, T.A., Gomes, R.A.T., Martins, E.S., Carvalho Júnior, O.A., Braga, A.R.S., Guimarães, R.F., 2010. Mapa de erodibilidade dos solos da bacia do Rio Jardim-DF. *Espaço e Geografia* 13, 253-276.
- Coe, M.T., Latrubesse, E.M., Ferreira, M.E., Amsler, M.L., 2011. The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry* 105, 119-131. <https://www.jstor.org/stable/41490493>.
- Costa, T.C.C., Lumbreras, J.F., Zaroni, M.J., Naime, U.J., Guimarães, S.P., Uzeda, M.C., 2005. Estimativas de perdas de solo para microbacias hidrográficas do estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 42 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 78).
- Costa, F.R., Souza, R.F., Silva, S.M.P., 2021. Análise das vulnerabilidades natural e ambiental da bacia hidrográfica do Rio Doce (RN). *Geociências* 40, 459-475. <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i02.15438>.
- Crepani, E., Medeiros, J.S., Hernandez Filho, P., Florenzano, T.G., Duarte, V., Barbosa,

- C.C.F., 2001. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico econômico e ao ordenamento territorial. INPE, São José dos Campos, SP.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1979. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, RJ.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2021. Solos. Disponível: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-cerrado/solo>. Acesso: 18 jan. 2023.
- Failache, M.F., Zuquette, L.V., 2018. Geological and geotechnical land zoning for potential Hortonian overland flow in a basin in southern Brazil. *Engineering Geology* 246, 107-122. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.032>
- FAO. Food and Agriculture Organization, 1967. La erosión del suelo por el agua. Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. FAO, Roma (Cuadernos de fomento agropecuario da Organización de Las Naciones Unidas, 81).
- Faria, K.M.S., Sousa, A.C.R.C., Batista, J.G., 2021. Análise da vulnerabilidade à perda de solos da reserva da biosfera do Cerrado em Goiás e Distrito Federal. Rede – Revista Eletrônica do PRODEMA 1, 7-20.
- Feitosa, T.B., Araújo Filho, R.N., Lost, C., 2021. Diagnóstico geoambiental como ferramenta no planejamento e gestão dos recursos hídricos da sub-bacia do rio Lontra-TO. *Revista Geonorte* 12, 185-201. <http://dx.doi.org/10.21170/geonorte.2021.V.12.N.39.185.201>.
- França, B.B., Lima, J.J.M., Sousa, K.A., Lima, L.F.A., Santos, M.A., Carmo, S.S., Ramos, M.R., 2019. Capacidade de uso e aptidão agrícola de uma fazenda em São Domingos do Araguaia (PA). *Revista Geonorte* 10, 134-153. <https://doi.org/10.21170/geonorte.2019.V.10.N.36.A134.153>.
- Galdino, S., Sano, E.E., Andrade, R.G., Grego, C.R., Nogueira, S.F., Bragantini, C., Flosi, A.H.G., 2015. Large-scale modeling of soil erosion with RUSLE for conservationist planning of degraded cultivated Brazilian pastures. *Land Degradation & Development* 26, 41-54.
- Gomes, L., Simões, S.J.C., Forti, M.C., Ometto, J.P.H.B., Nora, E.L.D., 2017. Using geotechnology to estimate annual soil loss rate in the Brazilian Cerrado. *Journal of Geographic Information System* 9, 420-439. <https://doi.org/10.4236/jgis.2017.94026>.
- Gomes, D.J.C., Sousa, E.V.S., Ferreira, N.S., Lobato, R.R.C., Ribeiro, B.F., Dias, G.F.M., 2021. Vulnerabilidade à erosão hídrica do solo, bacia hidrográfica do rio Araguaia. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 816-833.
- Guedes, F.C., Viegas, J.A., Aguiar, M.C.P., 2022. Application of the Universal Soil Loss Equation (USLE) in the Córrego Carneirinhos Urban Basin, in the city of João Monlevade - MG. *Research, Society and Development* 11, n. 7, e40411730094, 2022. 10.33448/rsd-v11i7.30094.
- Guimarães, F.S., Cordeiro, C.M., Bueno, G.T., Carvalho, V.L.M., Nero, M.A., 2017. Uma proposta para automatização do índice de dissecação do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 18, 155-167. <https://doi.org/10.20502/rbg.v18i1.1163>.
- Herculano, R.M.C.S., Souza, J.C., 2022. Fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Uru (Goiás): Comparação entre modelos. *Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia* 20, 305-323.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. Mapeamento de Recursos Naturais do Brasil. Escala 1:250.000. Rio de Janeiro.
- JAXA. 2023. ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D-30 m (AW3D30). Disponível: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>. Acesso: 05 jan. 2023.
- Klais, T.B.A., Dalmas, F.B., Morais, R.P., Atique, G., Lastoria, G., Paranhos Filho, A.C., 2012. Vulnerabilidade natural e ambiental do município de Ponta Porã, Mato Grosso do Sul, Brasil. *Revista Ambiente & Água* 7, 277-290. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.786>.
- Klink, C.A., Machado, R.B., 2005. A conservação do Cerrado Brasileiro. *Megadiversidade* 1, 147-155.
- Latrubesse, E.M., Stevaux, J.C., 2002. Geomorphology and environmental aspects of the Araguaia fluvial basin, Brazil. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 129, 109-127.
- Latrubesse, E.M., Amsler, M.L., Morais, R.P., Aquino, S., 2009. The geomorphologic response of a large pristine aluvial river to tremendous deforestation in the South American tropics: The case of the Araguaia River. *Geomorphology* 113, 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.03.014>.

- Latrubesse, E.M., Arima, E., Ferreira, M.E., Nogueira, S.H., Wittmann, F., Dias, M.S., Dagosta, F.C.P., Bayer, M., 2019. Fostering water resource governance and conservation in the Brazilian Cerrado biome. *Conservation Science and Practice* 1, e77. <https://doi.org/10.1111/csp2.77>.
- Lima, G.S.A., Ferreira, N.C., Ferreira, M.E., 2018. Modeling of surface soil loss for agriculture and pasture scenarios for the metropolitan region of Goiânia, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia* 70, 1510-1536. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n4-46513>.
- Lininger, K.B., Latrubesse, E.M., 2016. Flooding hydrology and peak discharge attenuation along the middle Araguaia River in central Brazil. *Catena* 143, 90-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.043>.
- Lombardi Neto, F., Moldenhauer, W.C., 1992. Erosividade da chuva: Sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia* 51, 189-196.
- Lopes, F.B., Andrade, E.M., Teixeira, A.S., Caitano, R.F., Chaves, L.C.G., 2011. Uso de geoprocessamento na estimativa da perda de solo em microbacia hidrográfica do semiárido brasileiro. *Revista Agro@mbiente* 5, 88-96. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v5i2.503>.
- Luiz, G.P., Martins, P.R., Gomes, L.F., Couto Júnior, A.F., 2019. Variação intra-anual da cobertura da terra de uma ottobacia no médio curso do rio Araguaia. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, p. 1563-1582.
- Magalhães, I.A.L., Nery, C.V.M., Zanetti, S.S., Pena, F.E.R., Cecílio, R.A., Santos, A.R., 2012. Uso de geotecnologias para estimativa de perda solo e identificação das áreas susceptíveis a erosão laminar na bacia hidrográfica do rio Vieira, município de Montes Claros, MG. *Cadernos de Geociências* 9, 74-84.
- Maneschy, R.Q., Fernandes, I.L.C., Sombra, D.A., Lopes, C.H.S., 2022. Priority areas for inclusion of arboreal component in livestock systems in the Belo Horizonte II settlement, São Domingos do Araguaia, Pará, Brazil. *Research, Society and Development* 11, e30411326367. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i3.26367>.
- Mannigel, A.R., Carvalho, M.P., Moreti, D., Medeiros, L.R., 2002. Erodibility factor and soil loss tolerance in the State of São Paulo. *Acta Scientiarum* 24, 1335-1340. <https://doi.org/10.4025/actasciagr.v24i0.2374>.
- MapBiomas, 2022. MapBiomas v. 7.0. Disponível: <https://mapbiomas.org/>. Acesso: 25 jul. 2022.
- Marimon, B.S., Marimon-Júnior, B.H., Lima, H.S., Jancoski, H.S., Franczak, D.D., Mews, H.A., Moresco, M.C., 2008. Pantanal do Araguaia: Ambiente e Povo. UNEMAT, Cáceres.
- Martins, P.R., Sano, E.E., Martins, E.S., Vieira, L.C.G., Salemi, L.F., Vasconcelos, V., Couto Júnior, A.F., 2021. Terrain units, land use and land cover, and gross primary productivity of the largest fluvial basin in the Brazilian Amazonia/Cerrado ecotone: The Araguaia River basin. *Applied Geography* 127, 102379. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102379>.
- Melo, A.C.A., Couto Júnior, A.F., 2022. O relevo como elemento organizador da ocupação antrópica na ecorregião do Planalto Central. *Espaço & Geografia* 24, 154-177.
- Melo, A.C.A., Albuquerque, L.B., Vilela, M.F., 2021. Relação do uso e da ocupação do município de Águas Lindas e seus impactos ambientais. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14, 634-649.
- Mesquita, C., Assis, A.Q.S., Souza, R.M., 2010. Vulnerabilidade natural à perda de solos da bacia hidrográfica do rio Sagrado – Morretes/PR. *Revista de Geografia* 27, 249-264.
- Mira, I.R.C., Carvalho, D.S., Souza, D.S.L., Silva, M.L., 2022. Vulnerabilidade ambiental da sub-bacia do Alto-Médio Rios Mogi Guaçu e Pardo – MG. *Revista Brasileira de Geografia Física* 15, 1352-1370.
- Mota Júnior, E.R., Trentin, C.B., Silva, I.S., Queiroz, I.L.C., Trentin, A.B., 2020. Monitoramento da degradação da pastagem e a incorporação de atividades agrícolas na microrregião do Médio Araguaia/MT. *Revista Georaguaia* 10, 160-174. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/10895>.
- Nandy, S., Singh, C., Das, K.K., Ningma, N.C., Kushwaha, S.P.S., 2015. Environmental vulnerability assessment of eco-development zone of Great Himalayan National Park, Himachal Pradesh, India. *Ecological Indicators* 57, 182-195. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.04.024>.
- Nicolau, R.F., 2018. Vulnerabilidade da paisagem à perda de solos da bacia hidrográfica do rio do Peixe - Goiás. *Caminhos de Geografia* 19,

- 285-296. <http://orcid.org/0000-0002-9701-2029>.
- Oliveira, V.C.V., Castro, S.S., 2005. Susceptibility and risks to water erosion in the upper of Araguaia River Basin (GO/MT), Brazil. *Sociedade & Natureza* 1, 697-708.
- Paranhos Filho, A.C., 2000. Análise geo-ambiental multitemporal: O estudo de caso da região de Coxim e da bacia do Taquarizinho (MS-Brasil). Tese (Doutorado). Curitiba, UFPR.
- Pasquatto, M.C., Tomazoni, J.C., 2016. Estudo do processo erosivo laminar na bacia de captação do rio Barro Preto, em Coronel Vivida – PR. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 555-570. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.2.p555-570>.
- Pelicice, F.M., Agostinho, A.A., Akama, A., Andrade Filho, J.D., Azevedo-Santos, V.M., Barbosa, M.V.M. et al. 2021. *Environmental Management* 68, 445-452. <https://doi.org/10.1007/s00267-021-01513-7>.
- Pinese Júnior, J., Rodrigues, S.C., 2012. O método de análise hierárquica - AHP - como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG). *Revista do Departamento de Geografia* 23, 4-26. <https://doi.org/10.7154/RDG.2012.0023.0001>.
- Rodrigues Filho, H., 2022. Protocolo para identificação de áreas suscetíveis à erosão aplicado na microbacia do córrego Fortaleza, Cuiabá/MT. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* 13, 154-165. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.006.0013>.
- Rosa, L.E., Cherem, L.F.S., Siame, L., 2023. O papel de fatores naturais e antrópicos na variabilidade da perda de solos no estado de Goiás entre 1985 e 2018. *Sociedade & Natureza* 35, e66034. <https://doi.org/10.14393/SN-v35-2023-66034>.
- Ross, J.L.S., 2001. *Geomorfologia: Ambiente e Planejamento*. 2ª ed., Contexto, São Paulo.
- Ruthes, J.M., Tomazoni, J.C., Gomes, T.C., 2016. Sistematização da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) em sistema de informação geográfica (SIG) na estimativa da erosão no município de Francisco Beltrão–Paraná. *Enciclopédia Biosfera* 13, 1225-1238. <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/1286>.
- Saaty, T.H., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15, 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5).
- Santos, M.T.P., Almeida, M.I.S., 2019. Vulnerabilidade da paisagem à perda de solos do município de Francisco Sá-MG. *Revista Cerrados* 17, 290-311. <https://doi.org/10.22238/rc2448269220191702290311>.
- Santos, M.S., Nascimento, P.S. R., 2021. Análise da suscetibilidade e vulnerabilidade à erosão hídrica pelo processo analítico hierárquico (AHP). *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais* 9, 1–19. <https://doi.org/10.9771/gesta.v9i1.37588>.
- Silva, A.M., Alvares, C.A., 2007. Levantamento de informações e estruturação de um banco dados sobre a erodibilidade de classes de solos no estado de São Paulo. *Geociências* 24, 33-41.
- Silva, W.G., Machado, V.M., Chagas, M.V.S., Flores, W.M.F., 2016. Susceptibilidade à erosão utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica. *Revista Cerrado Agrociências* 7, 66-78.
- Silva, I.C.S., Maneschy, R.Q., Soares, D.A.S., Oliveira, M.C.C., 2022. Mudanças de uso do solo no município de São Domingos do Araguaia – PA e perspectivas agroflorestais. *REUMAM* 7, 52-65. <http://dx.doi.org/10.18542/reumam.v7i1.13898>.
- Soares, C.B.R., Martins, A.P., 2021. Análise empírica da fragilidade ambiental na microrregião rio Vermelho (GO). *Geosul* 36, 68-94. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e74266>.
- Souza, V., Gasparetto, N.V.L., 2012. Aplicação da equação universal de perdas de solo (EUPS) na bacia do córrego Pinhalzinho Segundo, noroeste do Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 13, 267-278. <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i3.191>.
- Souza, J.L.L., Borges, I.G.M., Santos, R.L., 2015. Avaliação da eficiência do modelo AHP na análise de vulnerabilidade a erosão do município de Morro do Chapéu, BA. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, João Pessoa, PB. *Anais... São José dos Campos: INPE*, p. 5042-5049.
- Souza, A.R., Dupas, F.A., Drummond, I.N., Costa, C.W., 2019. Zoneamentos da vulnerabilidade ambiental e expectativa de perda de solo: É possível usar a USLE na determinação de

- vulnerabilidade ambiental? *Geociências* 38, 1105-1119.
- Stein, D.P., Donzelli, P.L., Gimenez, A.F., Ponçano, W.L., Lombardi Neto, F., 1987. Potencial de erosão laminar, natural e antrópica na bacia do Peixe-Parapanema. In: IV Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Marília, SP, Anais... São Paulo: ABGE, p. 105-135.
- Strassburg, B.B.N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R., Iribarrem, A., Crouzeilles, R., Loyola, R., Latawiec, A.E., Oliveira Filho, F.J.B., Scaramuzza, C.A.M., Scarano, F.R., Soares-Filho, B., Balmford, A., 2017. Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology & Evolution* 1, 0099. <https://www.nature.com/articles/s41559-017-0099>.
- Suizu, T.M., Latrubesse, E.M., Stevaux, J.C., Bayer, M., 2022. Resposta da morfologia do médio-curso superior do Rio Araguaia às mudanças no regime hidrossedimentar no período 2001-2018. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 23, 1420-1434. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i2.2088>.
- Suizu, T.M., Latrubesse, E.M., Bayer, M., 2023. Geomorphic diversity of the middle Araguaia River, Brazil: A segment-scale classification to support river management. *Journal of South American Earth Sciences* 121, 104166. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104166>.
- Valadão, L.V., Fonseca, I.R., Cicerelli, R.E., Almeida, T., Garnier, J., Sano, E.E., 2023. Temporal dynamics of the hydropower water reservoirs of the Tocantins-Araguaia Basin, Brazil, based on remote sensing and hydrometeorological station datasets. *Water* 15, 1684. <https://doi.org/10.3390/w15091684>.
- Valente, C.R., Latrubesse, E.M., Ferreira, L.G., 2013. Relationships among vegetation, geomorphology and hydrology in the Bananal Island tropical wetlands, Araguaia River basin, Central Brazil. *Journal of South American Earth Sciences* 36, 150-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2012.12.003>.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide planning. USDA, Washington, DC, Agricultural Handbook n. 537.
- Xavier, J.P.S., Barros, A.H.C., Webber, D.C., Accioly, L.J.O., Marques, F.A., Araújo Filho, J.C., Silva, A.B., 2019. Estimativa da erosividade da chuva por diferentes métodos e seu impacto na equação universal de perdas de solo, no semiárido pernambucano. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 859-875. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p859-875>.