



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE GEOGRAFIA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO



JOSÉ AUGUSTO OLIVEIRA GUIMARÃES

**EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PERDA DE SOLOS POR EROSÃO HÍDRICA NO  
ARRAIAL DE SÃO JOÃO BATISTA DA CANASTRA, SÃO ROQUE DE MINAS -  
MG E ADJACÊNCIAS ATRAVÉS DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE  
SOLOS REVISADA (EUPS-R)**

Uberlândia (MG)

2024

JOSÉ AUGUSTO OLIVEIRA GUIMARÃES

EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PERDA DE SOLOS POR EROSÃO HÍDRICA NO  
ARRAIAL DE SÃO JOÃO BATISTA DA CANASTRA, SÃO ROQUE DE MINAS - MG E  
ADJACÊNCIAS ATRAVÉS DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLOS  
REVISADA (EUPS-R)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Geografia da Universidade  
Federal de Uberlândia como requisito parcial  
para obtenção do título de bacharel em  
Geografia.

Orientador: Silvio Carlos Rodrigues

Uberlândia (MG)

2024

## Resumo

A Equação Universal de Perda de Solos – EUPS é uma formulação baseada em observações práticas e em dados empíricos coletados em campo desenvolvida por Wischmeier e Smith (1965 e 1978) e que permite estimar a quantidade de sedimentos que são erodidos do solo em regiões afetadas pela erosão hídrica laminar. Essa pode ser uma importante ferramenta para uma compreensão espacial e quantitativa da influência da interferência humana na ocorrência dessa forma desse processo erosivo. Em vista disso, o objetivo deste trabalho foi estimar, em ambiente SIG, o potencial de perda média anual do solo no Arraial de São João Batista da Canastra e áreas rurais adjacentes, localizados no município de São Roque de Minas, Minas Gerais, para os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023, pelo uso de versão revisada da EUPS. Essa localidade permitiu uma comparação do potencial de erosão temporal devido ao crescimento da área urbana ao longo desse período. Para tal fim, foram obtidos todos os fatores que contemplam essa equação, em que o fator erosividade da chuva (R) foi obtido através dos dados de Latitude, Longitude e Altitude aplicados na metodologia desenvolvida por Mello *et al.* (2013); a erodibilidade do solo (K) foi determinada por meio da amostragem de solos na área de trabalho, trabalho laboratorial para obtenção da textura e aplicação na equação adaptada por de Lima *et. al* (2007); o fator topográfico (LS) foi conseguido através do Modelo Digital de Elevação da área; o fator uso, manejo e práticas conservacionistas (CP) foi elaborado manualmente através de dados de satélites para cada um dos anos estudados. Como resultado, os valores potenciais da perda média anual do solo na área de estudo apresentaram uma variabilidade considerável ao longo do período analisado, variando entre 0 e 40,95 (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>1</sup>) para o ano de 2000; 0 e 38,64 (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>1</sup>) para o ano de 2008; 0 e 39,18 (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>1</sup>) para o ano de 2016; e 0 e 41,78 (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>1</sup>) para o ano de 2023. Essa erosão foi classificada, levando em consideração a classificação elaborada por Lanza (2011), como "nula a pequena", "moderada" e "média" para todos os anos, com gradual diminuição da classe "nula a pequena" concomitantemente ao aumento das classes "moderada" e "média". E isso se deve ao aumento da urbanização, sobretudo com o aumento e complexificação das estradas de chão, que contribuíram para o aumento da compactação do solo, a interrupção da cobertura vegetal e a modificação do escoamento superficial da água, resultando em um incremento no potencial de erosão do solo.

Palavras-chaves: Equação Universal da Perda de Solo Revisada. Erosão laminar. Serra da Canastra.

## Abstract

The Universal Soil Loss Equation is a formulation based on practical observations and empirical data collected in the field, developed by Wischmeier and Smith (1965 and 1978), which allows estimating the amount of sediment eroded from the soil in regions affected by sheet erosion. This can be an important tool for a spatial and quantitative understanding of the influence of human interference on the occurrence of this form of erosive process. Therefore, the aim of this study was to estimate, in a GIS environment, the potential average annual soil loss in the Arraial de São João Batista da Canastra and adjacent rural areas, located in the municipality of São Roque de Minas, Minas Gerais, for the years 2000, 2008, 2016, and 2023, through the use of the revised version of the USLE. This location allowed for a comparison of temporal erosion potential due to the growth of the urban area over this period. For this purpose, all factors encompassed by this equation were obtained: the rainfall erosivity factor (R) was obtained through Latitude, Longitude, and Altitude data applied in the methodology developed by Mello *et al.* (2013); soil erodibility (K) was determined through soil sampling in the study area, laboratory work to obtain soil texture, and application in the equation adapted by de Lima *et al.* (2007); the topographic factor (LS) was obtained through the Digital Elevation Model of the area; and the factor of land use, management, and conservation practices (CP) was manually elaborated using satellite data for each of the years studied. As a result, the potential values of annual soil loss in the study area showed considerable variability over the analyzed period, ranging between 0 and 40,95 ( $t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ ) for the year 2000; 0 and 38,64 ( $t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ ) for the year 2008; 0 and 39,18 ( $t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ ) for the year 2016; and 0 and 41,78 ( $t \cdot ha^{-1} \cdot year^{-1}$ ) for the year 2023. This erosion was classified, according to the classification developed by Lanza (2011), as "negligible to slight," "moderate," and "medium" for all years, with a gradual decrease in the "negligible to slight" class concurrently with an increase in the "moderate" and "medium" classes. This occurred due to the increase in urbanization, particularly with the increase and complexification of dirt roads, which contributed to the increase in soil compaction, interruption of vegetative cover, and modification of surface water runoff, resulting in an increment in soil erosion potential.

Keywords: Revised Universal Soil Loss Equation. Laminar erosion. Serra da Canastra.

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Mapa de Localização da Área de Estudo. ....	15
<b>Figura 2</b> - Mapa das Bacias Hidrográficas da Área de Estudo .....	16
<b>Figura 3</b> - Cachoeira Lava-pés.....	17
<b>Figura 4</b> - Cachoeira do Jota .....	18
<b>Figura 5</b> - Mapa Hipsométrico da Área de Estudo .....	19
<b>Figura 6</b> - Relevo dissecado associado a colinas suaves no interior nas proximidades da área de estudo .....	20
<b>Figura 7</b> - Mapa Litológico da Área de Estudo .....	21
<b>Figura 8</b> - Paisagem com as fitofisionomias encontradas na Parte Alta da Serra da Canastra .....	23
<b>Figura 9</b> - Fluxograma da Equação Universal de Perda de Solos.....	38
<b>Figura 10</b> - Mapa dos Pontos Amostrais e Identificação Pedológica .....	41
<b>Figura 11</b> - Amostras de solos retiradas da área de estudo. ....	42
<b>Figura 12</b> - Processo de sedimentação para determinar proporção de silte e argila .....	43
<b>Figura 13</b> - Mapa de Erosividade Anual da Chuva (R) na Área de Estudo.....	48
<b>Figura 14</b> - Mapa Pedológico da Área de Estudo .....	49
<b>Figura 15</b> - Mapa de Erodibilidade do Solo (K) na Área de Estudo.....	50
<b>Figura 16</b> - Mapa do Fator Topográfico (LS) da Área de Estudo.....	51
<b>Figura 17</b> - Esquema teórico de construção de uma nomenclatura da cobertura terrestre .....	52
<b>Figura 18</b> - Tabela de Cores RGB para atribuição em Classes de Uso e Ocupação do Solo .53	
<b>Figura 19</b> - Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Área de Estudo referente aos anos de 2000, 2008, 2016 e 2023.....	57
<b>Figura 20</b> - Mapa do fator uso, manejo e práticas conservacionistas do solo (CP) da Área de Estudo referente aos anos de 2000, 2008, 2016 e 2023 .....	59
<b>Figura 21</b> - Mapa de Perda Média Anual do Solo (A) na Área de Estudo para os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023 .....	63
<b>Figura 22</b> - Ravina na lateral de uma estrada rural do Arraial de São João Batista da Canastra, São Roque de Minas - MG.....	68

<b>Figura 23</b> - Erosão hídrica na proximidade de uma estrada rural do Arraial de São João Batista da Canastra, São Roque de Minas - MG.....	69
<b>Figura 24</b> - Ocorrência de escoamento hídrico influenciado por solos expostos de caminhos rurais na vertente direita do Rio Araguari, São Roque de Minas - MG.....	72
<b>Figura 25</b> - Linha d'água efêmera resultante de evento chuvoso .....	73
<b>Figura 26</b> - Acúmulo de sedimentos decorrentes de evento chuvoso .....	74

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> - Classificação da Perda de Solo quanto à sua Intensidade.....	25
<b>Tabela 2</b> - Modelos ajustados para as regiões Sudeste, Norte-Centro-Oeste, Sul e Nordeste do Brasil, com coeficientes estimados por regressão e significância estatística dos coeficientes estimados .....	28
<b>Tabela 3</b> - Classes de interpretação de erosividade da chuva .....	29
<b>Tabela 4</b> - Classes de interpretação para o fator K .....	32
<b>Tabela 5</b> - Valores dos fatores C e P em função das classes de uso e ocupação do solo.....	37
<b>Tabela 6</b> - Proporção de Argila, Areia e Silte das amostras de solos .....	43
<b>Tabela 7</b> - Teor de Argila, Areia e Silte das amostras de solos .....	44
<b>Tabela 8</b> - Valores de K em Função dos Tipos de Solos Encontrados na Área de Estudo.....	45
<b>Tabela 9</b> - Área em km <sup>2</sup> dos diferentes valores de CP da Área de Estudo para os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023.....	60
<b>Tabela 10</b> - Mudança percentual de cada valor de CP da Área de Estudo ao longo do período de 2000 até 2023 .....	60
<b>Tabela 11</b> - Distribuição das classes de potencial à erosão da Área de Estudo referente ao ano de 2000.....	64
<b>Tabela 12</b> - Distribuição das classes de potencial à erosão da Área de Estudo referente ao ano de 2008.....	64
<b>Tabela 13</b> - Distribuição das classes de potencial à erosão da Área de Estudo referente ao ano de 2016.....	64
<b>Tabela 14</b> - Distribuição das classes de potencial à erosão da Área de Estudo referente ao ano de 2023.....	65

## Lista de Siglas

A - Perda Média Anual de Solo  
ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer  
CP – Fator Uso e Manejo e Práticas Conservacionistas  
Ec – Energia Cinética da Chuva  
EI - Índice de Erosão da Chuva  
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EUPS – Equação Universal de Perda de Solos  
EUPS-R – Equação Universal de Perda de Solos Revisada  
GIS - Geographic Information System  
h - Hora  
ha - Hectare  
I<sub>30</sub> – Intensidade Máxima de Chuva em 30 minutos  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
K- Fator Erodibilidade do Solo  
Km<sup>2</sup> – Quilômetro Quadrado  
L – Fator Comprimento de Rampa  
LS – Fator Topográfico  
MDE - Modelo Digital de Elevação  
MG – Minas Gerais  
MJ - Megajoule  
mm - Milímetros  
p – Precipitação Média Mensal  
P – Precipitação Média Anual  
PNSC - Parque Nacional da Serra da Canastra  
R – Fator de Erosividade  
S – Fator de Declividade  
SIG - Sistema de Informação Geográfica  
SNUC - Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza  
Ton - Toneladas  
UC - Unidade de Conservação  
UFU - Universidade Federal de Uberlândia  
USLE - Universal Soil Loss Equation  
ZA - Zona de Amortecimento

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>13</b>
<b>3 OBJETIVOS.....</b>	<b>14</b>
3.1 Objetivo Geral.....	14
3.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>15</b>
4.1 Localização Geográfica .....	15
4.2 Hidrografia.....	16
4.3 Hipsometria.....	18
4.4 Contexto Geológico .....	20
4.5 Clima.....	22
<b>5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>24</b>
5.1 Erosão .....	24
5.2 Perda Média Anual de Solo - A .....	24
5.3 Fator Erosividade da Chuva - R.....	26
5.4 Fator Erodibilidade do Solo - K.....	30
5.5 Fator Topográfico - LS .....	32
5.6 Fator uso, manejo e práticas conservacionistas do solo – CP.....	35
<b>6 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>38</b>
6.1 Fator Erosividade da Chuva - R.....	39
6.2 Fator Erodibilidade do Solo - K.....	40
6.3 Fator Topográfico - LS .....	45
6.4 Classes de Cobertura Vegetal e Fator de Práticas de Conservação .....	47
6.5 Perda Média Anual de Solo - A .....	47
<b>7 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
7.1 Fator Erosividade da Chuva - R.....	48
7.2 Fator Erodibilidade dos Solos - K.....	49
7.3 Fator Topográfico (LS) .....	50
7.4 Uso e Ocupação do Solo e Fator uso, manejo e práticas conservacionistas do solo – CP.....	52
7.4.1 Área Urbana.....	54
7.4.2 Áreas Verdes Urbanas.....	54
7.4.3. Estradas de Chão.....	54
7.4.4 Estradas de Bloquetes .....	55
7.4.5 Pastagem/gramados.....	55
7.4.6 Áreas Agrícolas.....	55
7.4.7 Matas de Galeria .....	55
7.4.8 Vegetação Campestre.....	55
7.4.9 Solo exposto.....	56

7.4.10 Atribuição do Fator CP .....	58
7.5 Perda média anual do solo – A .....	62
<b>8 CONCLUSÃO .....</b>	<b>76</b>
<b>9 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A palavra erosão tem seu significado etimológico oriundo do termo em latim “*Erodere*”, que significa corroer, desgastar. Na área acadêmica, atualmente, esse termo remonta, de acordo com Bastos (1999), a um conjunto de fenômenos e ações naturais que resultam na desintegração, dissolução ou desgaste dos materiais terrosos ou rochosos da crosta terrestre, seguido pelo transporte desses materiais de um local para outro. Isso ocorre principalmente devido à ação de agentes naturais, como rios, oceanos, vento e chuva.

A erosão que resulta do impacto e escoamento das águas da chuva, que dão início ao ciclo de desagregação e produção de sedimentos é denominada erosão hídrica (Lima, 2010). Esse tipo de erosão é destacado no Brasil devido a fatores relacionados ao clima e a geografia do país. Bertoni e Lombardi Neto (1999) caracterizam a chuva como um dos fatores climáticos de maior importância na erosão dos solos, em que o processo acontece com a participação da energia cinética oriunda das gotas d’água desse fenômeno meteorológico.

A erosão dos solos é um processo natural no desenvolvimento da paisagem, ocorrendo ao longo do tempo geológico e modelando a superfície da Terra. Entretanto, a atividade humana tem acelerado significativamente esse processo devido a várias ações, como o desmatamento, a urbanização desordenada, a agricultura intensiva e práticas de manejo inadequadas, que acabam ocasionando uma maior exposição do solo aos fatores intempéricos (Nunes *et al.*, 2011).

O desencadeamento dos processos erosivos depende da interação das variáveis influentes no processo. Dentre essas, como elucida Pereira (2014), destacam-se a erosividade da chuva, que é o potencial das chuvas em causar desgaste, as propriedades do solo, que se referem às suas características morfológicas, a cobertura vegetal, que implica na proteção ao impacto da chuva, na capacidade de infiltração de água no solo e o aspecto do escoamento superficial, as características da encosta, sobretudo sua inclinação, e o manejo do solo.

O aumento e a intensificação dos processos erosivos, frequentemente atribuídos a atividades humanas, têm um impacto significativo no equilíbrio natural. Isso resulta em várias consequências, como aborda Montgomery (2007), incluindo deslizamentos de terra, assoreamento de corpos d’água, agravamento de enchentes, infertilidade do solo, perda de biodiversidade e a introdução de poluentes químicos na água. Essas implicações refletem a importância da conservação do solo e da gestão sustentável para mitigar os danos causados pela erosão.

Os órgãos ambientais brasileiros têm utilizado a criação de unidades de conservação (UCs) como uma estratégia fundamental para proteger e conservar os recursos naturais ainda existentes. O Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), regulamentado pela Lei nº 9.985 em 2000, fornece a denominação para áreas que, devido às suas características únicas, merecem proteção, além de regular a criação, implementação e gestão dessas no Brasil.

Dentre as séries de UCs presentes no país, tem-se o Parque Nacional da Serra da Canastra (PNSC), criado pelo Decreto nº 70.355, de 3 de abril de 1972. Este, de acordo com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, situa-se entre as regiões Oeste e Sul de Minas Gerais, abrangendo as bacias hidrográficas do rio São Francisco, rio Grande e rio Paranaíba e parte do território dos municípios de São Roque de Minas, Capitólio, Vargem Bonita, São João Batista do Glória, Delfinópolis e Sacramento.

O parque contempla, de acordo com o ICMBio (2023), uma área de aproximadamente 197.971,96 hectares, com uma Zona de Amortecimento (ZA) que ocupa cerca de 270.000 ha, conforme Santos (2014). As áreas que serão avaliadas no estudo encontram-se dentro desses limites, sendo elas o interflúvio e as vertentes onde se encontra o Arraial de São João Batista da Canastra, e outra localidade, de caráter rural, de dimensão próxima, localizada estritamente ao lado. Ambas estão localizadas no município de São Roque de Minas.

A erosão do solo em uma área localizada na Serra da Canastra, com foco na influência da urbanização e da localização em relação à zona de amortecimento da unidade de conservação. A quantificação da perda de solo se dará através da utilização da Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), ou, em português, Equação Universal de Perda de Solo Revisada (EUPS-R) aliada ao software de processamento de dados geoespaciais QGIS, importantes ferramentas para auxiliar na quantificação e qualificação da perda de solo por erosão hídrica.

A EUPS é um modelo amplamente utilizado para estimar a erosão de solos desenvolvido por Wischmeier e Smith (1965 e 1978). Essa equação prevê a taxa média anual de erosão de longo prazo em uma encosta de campo com base no padrão de chuva, tipo de solo, topografia, sistema de cultivo e práticas de manejo. Criada, inicialmente, para uso em sistemas de cultivo e manejo selecionados, posteriormente teve seus parâmetros adaptados para outras condições.

De acordo com Djoukbala et al. (2019), na década de 1990, órgãos governamentais estadunidenses, juntamente com a Universidade do Tennessee, elaboraram, a partir do aprimoramento da USLE, a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (EUPS-R). Essa

segue a mesma formulação da EUPS corrigindo algumas imprecisões e fornecendo algumas melhorias na determinação de fatores

Dentre as melhorias incorporadas à EUPS-R, tem-se o melhor reconhecimento da importância dos resíduos vegetais na proteção do solo, a consideração de que parte do escoamento é canalizado em sulcos e ravinas, capturando melhor os processos de erosão em áreas com essas características topográficas e a identificação dos efeitos das chuvas longas na saturação do solo e no aumento do escoamento erosivo, proporcionando uma representação mais precisa dos eventos climáticos extremos. Ainda, é capaz de lidar com terrenos convergentes e divergentes, o que amplia sua aplicabilidade em diferentes tipos de paisagens.

Outra mudança importante incorporada na EUPS-R, conforme elucidado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (2024) é a consideração dos fragmentos de rocha no solo. Enquanto na EUPS esses fragmentos não eram explicitamente tratados, na RUSLE eles são considerados nos cálculos dos fatores C e K, levando em conta seus efeitos na permeabilidade do solo e, conseqüentemente, no escoamento superficial.

Essas melhorias e considerações adicionais tornam a RUSLE uma ferramenta mais robusta e precisa para estimar a erosão do solo em uma variedade de ambientes e condições de uso da terra, contribuindo significativamente para a gestão sustentável dos recursos naturais.

Essa configura uma formulação empírica, baseada em observações práticas e em dados coletados em campo, amplamente considerada no Brasil, sendo ainda, de acordo com Silva *et al.* (2010) a maior referência no país para estimativa de perda de solo. Sua aplicação bem-sucedida se deve a estudos locais que adaptaram seus parâmetros às condições específicas do país. Isso a torna uma ferramenta valiosa para avaliar a erosão do solo no contexto brasileiro e contribuir para a gestão sustentável dos recursos naturais.

A modelagem da erosão tem se destacado como uma ferramenta eficaz na estimativa das perdas de solo. Esses modelos são projetados para fornecer uma representação aproximada da realidade, considerando as complexas interações entre os fatores que afetam a erosão. Além disso, a metodologia para determinação das variáveis é relativamente padronizada, permitindo comparações entre resultados. Isso torna a modelagem preditiva uma abordagem valiosa para avaliar e entender o processo de erosão e suas implicações.

## 2 JUSTIFICATIVA

Na atualidade, devido ao reconhecimento da finitude dos recursos naturais e a crescente compreensão de que saúde do planeta está intrinsecamente ligada à qualidade de vida das pessoas, a questão ambiental tem sido um dos principais temas em discussão no mundo. E compreender os impactos diretos e indiretos no meio ambiente requer o reconhecimento do meio físico natural e suas dinâmicas.

O solo, sendo a camada superficial da crosta e componente crucial do sistema terrestre, representa a superfície sobre a qual os seres humanos desempenham todas as suas atividades, sendo também uma das principais fontes de energia para animais, plantas e seres humanos (Confessor, 2023). Alterações antrópicas no solo podem resultar em impactos significativos, como erosão e assoreamento, gerando danos ambientais de difícil reparação.

A intensificação dos processos de erosão, influenciada pela interferência humana, motiva a necessidade de pesquisa quantitativa e comparação direta entre o aumento desse fenômeno e o tipo de uso do solo. Essa abordagem é crucial para uma compreensão mais completa a respeito de como a ação antrópica atua em seus padrões, além de corroborar com um planejamento eficaz, visando evitar perdas de solo em níveis local e regional.

O emprego de modelos, como a EUPS-R, aliado ao geoprocessamento, facilita a coleta e análise de dados sobre ocupação antrópica, proporcionando informações essenciais para entender e mitigar a erosão do solo, como é elucidado por Frascareli *et al.* (2024). Este trabalho, portanto, contribui ao conhecimento científico, como também como suporte para o planejamento e uso adequado da área, preenchendo uma lacuna na aplicação dessa metodologia para área específica.

Considerando a problemática apresentada pela intensificação dos processos de erosão ocasionadas pela interferência humana, é interessante o desenvolvimento de uma pesquisa que quantifique e faça uma comparação direta entre o aumento desse fenômeno e o tipo de utilização do solo. Portanto, o referido trabalho desempenha um papel na avaliação do impacto da urbanização na erosão do solo em uma área ecologicamente sensível, que é a da Serra da Canastra.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Analisar a erosão do solo na parte alta da Serra da Canastra por meio da quantificação da perda de solo por erosão hídrica por intermédio da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (EUPS-R), para os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Obter pontos amostrais através de reconhecimento em campo para elaborar a cartografia pedológica;
- Cartografar os tipos de uso e ocupação do solo através de sensoriamento remoto por imagens de satélites;
- Aplicar a Equação Universal de Perda de Solos Revisada para a área do Arraial de São João Batista da Canastra e áreas adjacentes, inseridos nas bacias do Rio Araguari, Córrego Lava-pés e Rio Santo Antônio;
- Realizar comparações entre as taxas de erosão dessas áreas para cada ano como também entre as mesmas áreas para diferentes períodos temporais, contribuindo para uma melhor compreensão dos impactos da atividade humana na conservação do solo da região.

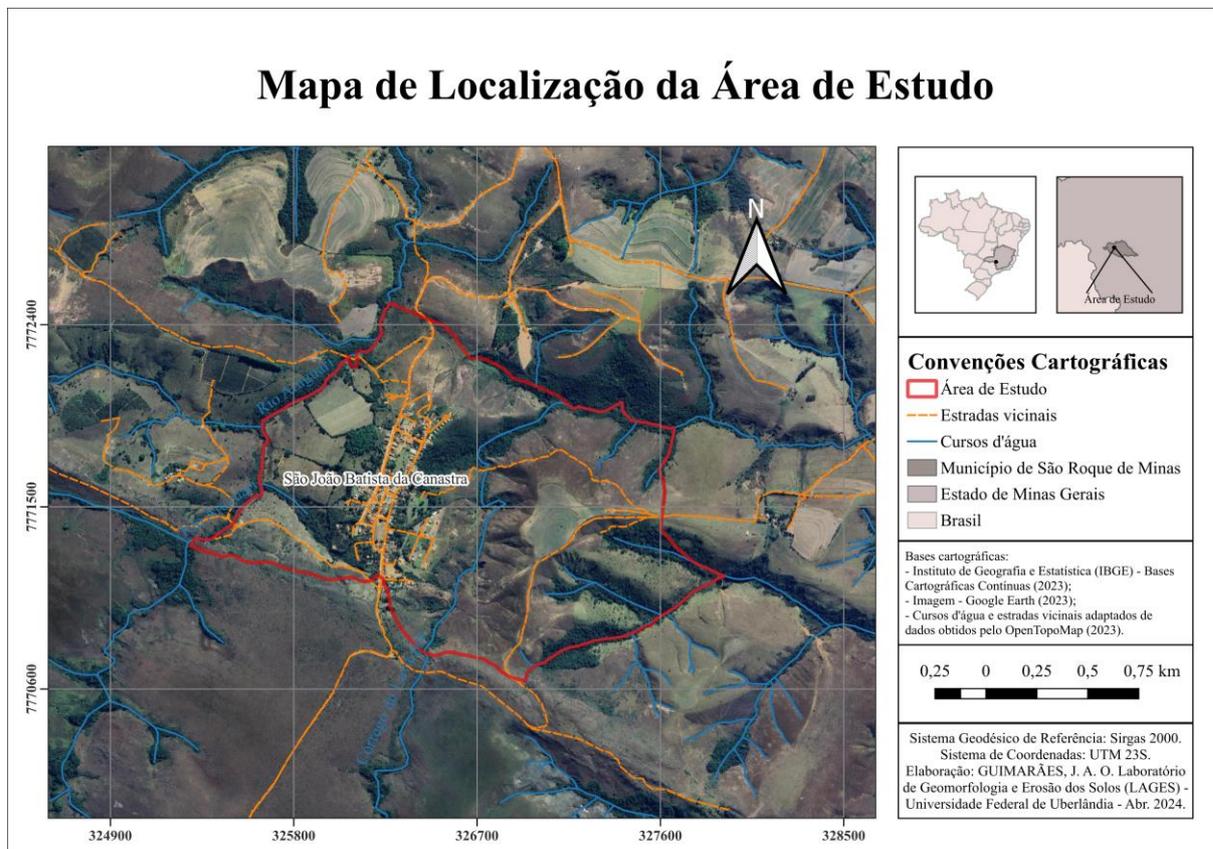
## 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 Localização Geográfica

A área de estudo é caracterizada por um polígono de aproximadamente 2,54 km<sup>2</sup> (254,5 ha), localizado na Zona de Amortecimento do Parque Nacional da Serra da Canastra - PNSC, contemplando as imediações da portaria 2 de entrada para essa Unidade de Conservação. Essa pode ser observada na figura 1.

A sua delimitação se deu através de fatores hídricos e topográficos. Suas arestas respeitam o curso do rio Araguari e dos afluentes do rio Santo Antônio na maior parte do seu perímetro. Em extensões minoritárias, conforma os divisores topográficos entre esses rios e também, na porção sul, curvas de linhas mestras de valor de 1200 metros. O córrego do Lava-pés recorta sua superfície na centralidade.

**Figura 1** - Mapa de Localização da Área de Estudo.



Elaboração: autor (2024).

A área de estudo está localizada no município de São Roque de Minas, no Estado de Minas Gerais, mais especificamente na região noroeste dessa divisão administrativa. De acordo

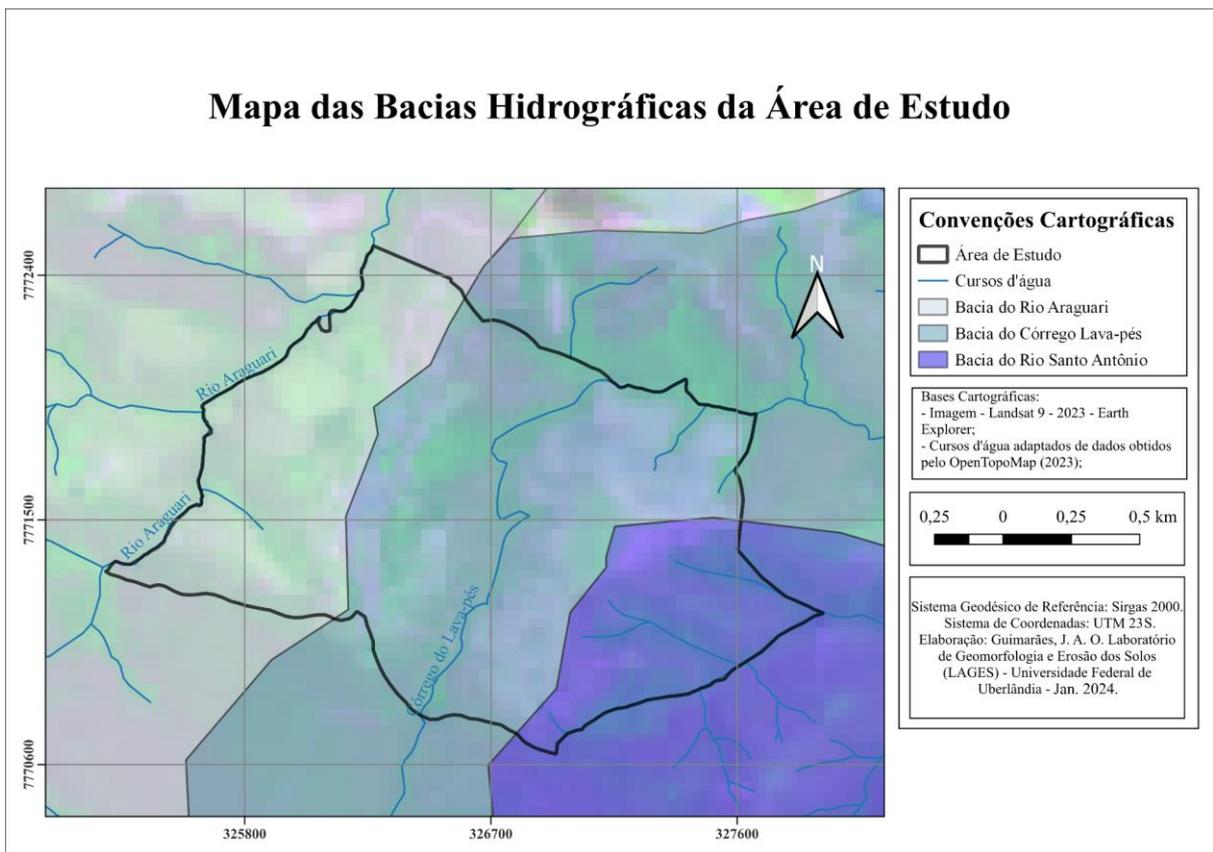
com medições feitas através do Google Earth (2023), se encontra a 296 km de Uberlândia, principal cidade da mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba e a 366 km de Belo Horizonte, capital do estado mineiro.

Essencialmente composta por estradas vicinais, sua extensão é principalmente acessada pela rodovia MG-341, que atravessa o PNSC e está localizada a 25 km da área de estudo. Além disso, é possível alcançar o local pela BR-146, situada a 54,2 km, e pela LMG-827, a 83,7 km de distância, conforme observado no Google Earth (2023).

## 4.2 Hidrografia

A área de estudo tem seu espaço delimitado no interior de três bacias hidrográficas, sendo elas a bacia do Rio Araguari, a bacia do Córrego Lava-pés e a bacia do Rio Santo Antônio, como é visualizado na figura 2. A bacia do rio Araguari, num contexto espacial mais amplo, faz parte da bacia do rio Paraná, enquanto as bacias do Lava-pés e Santo Antônio configuram sub-bacias da bacia do Rio São Francisco.

**Figura 2** - Mapa das Bacias Hidrográficas da Área de Estudo



Elaboração: autor (2024)

A área de estudo apresenta uma proximidade com as nascentes dos rios abrangidos, situando-se a uma média de 4,3 km de distância desses. Essas nascentes têm origem em altitudes mais elevadas, especialmente dentro do PNSC. Conforme abordado por Nazar e Rodrigues (2018), essa região configura-se como uma importante área nacional de recarga e cabeceira de drenagens.

A topografia acidentada, marcada por altitudes elevadas, desempenha um papel crucial na formação de nascentes e na configuração de cabeceiras de rios. A região funciona como uma área de recarga hídrica, onde as precipitações e outras fontes de água são absorvidas pelo solo, contribuindo para o recarregamento da água subterrânea.

Ainda, seus aspectos litológicos se refletem nos padrões de relevo, resultando em diferenças altimétricas pronunciadas e também exercem influência sobre a drenagem, afetando a quantidade e o fluxo de água na paisagem, assim como levando a formação de cachoeiras, como pode ser visto nas figuras 3 e 4.

**Figura 3** - Cachoeira Lava-pés



Fonte: autor (2024).

**Figura 4 - Cachoeira do Jota**

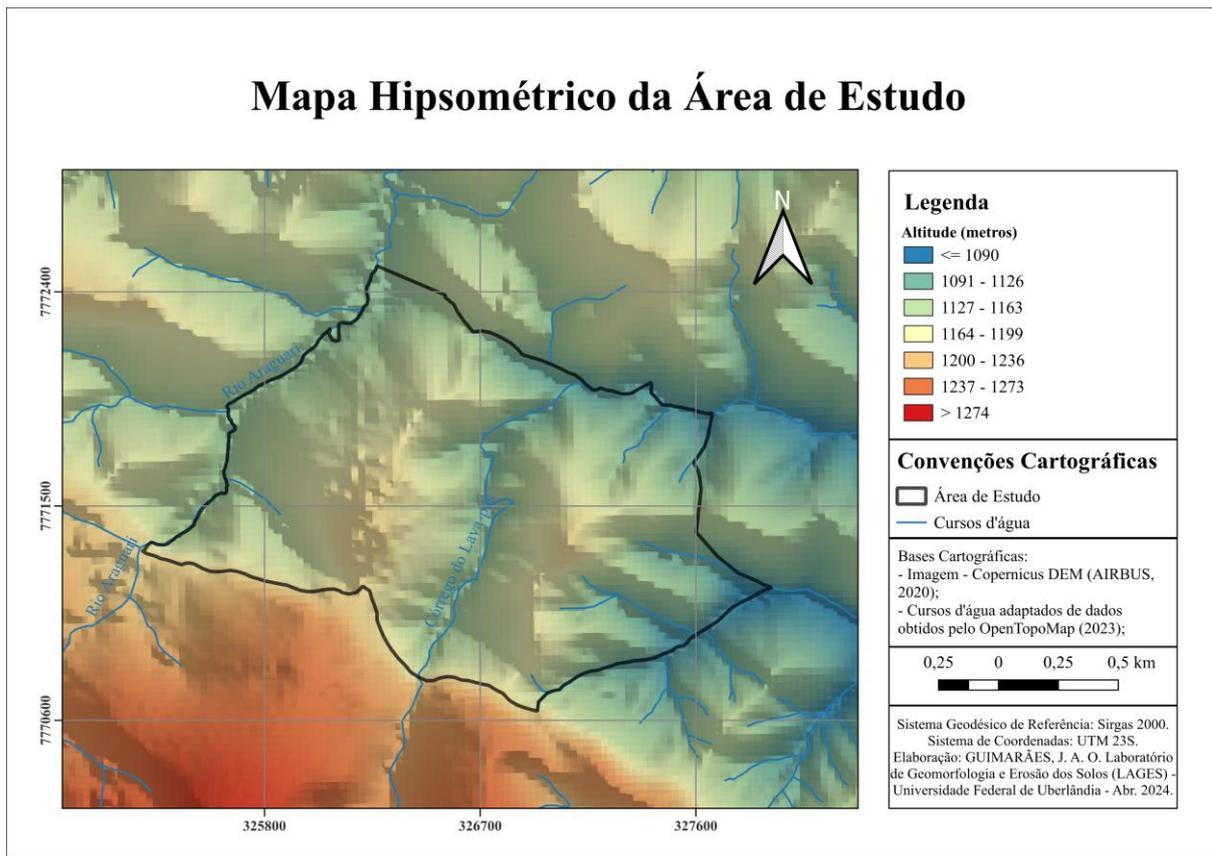


Fonte: autor (2024).

### **4.3 Hipsometria**

Com base nos dados obtidos por meio do Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado pelo satélite TanDEM-X e disponibilizado como Copernicus DEM pelo Programa Copernicus da União Europeia, a área de estudo na Serra da Canastra apresenta uma variação altimétrica considerável. As altitudes registradas oscilam entre 1200 e 1081 metros, marcando uma variação que, ao longo de sua extensão, é de 119 metros, como pode ser visualizado na figura 5.

Figura 5 - Mapa Hipsométrico da Área de Estudo



Elaboração: autor (2024)

Com base na localização na borda superior do PNSC, as características altimétricas e topográficas fornecidas e o trabalho de Nazar (2018), o relevo da área de estudo pode ser classificado como “relevo dissecado associado a colinas suaves”. Essa classificação indicativa de um relevo ondulado e transicional entre áreas mais planas e as elevações características do planalto.

O relevo suavemente dissecado associado a colinas suaves, de acordo com Nazar e Rodrigues (2019), caracteriza áreas de extensas colinas suaves encontradas principalmente nas áreas ao redor, principalmente, da região central e noroeste do Chapadão que conforma a Serra da Canastra. Essas formas geomorfológicas representam uma mudança gradual do terreno suave para os vales mais profundos, em que predominam vertentes convexo-retilíneas a retilíneas.

Essas características geomorfológicas são relevantes para entender os processos de erosão, a dinâmica hídrica e a configuração do uso do solo na região e podem ser mais bem visualizadas na figura 6.

**Figura 6** - Relevo dissecado associado a colinas suaves no interior nas proximidades da área de estudo



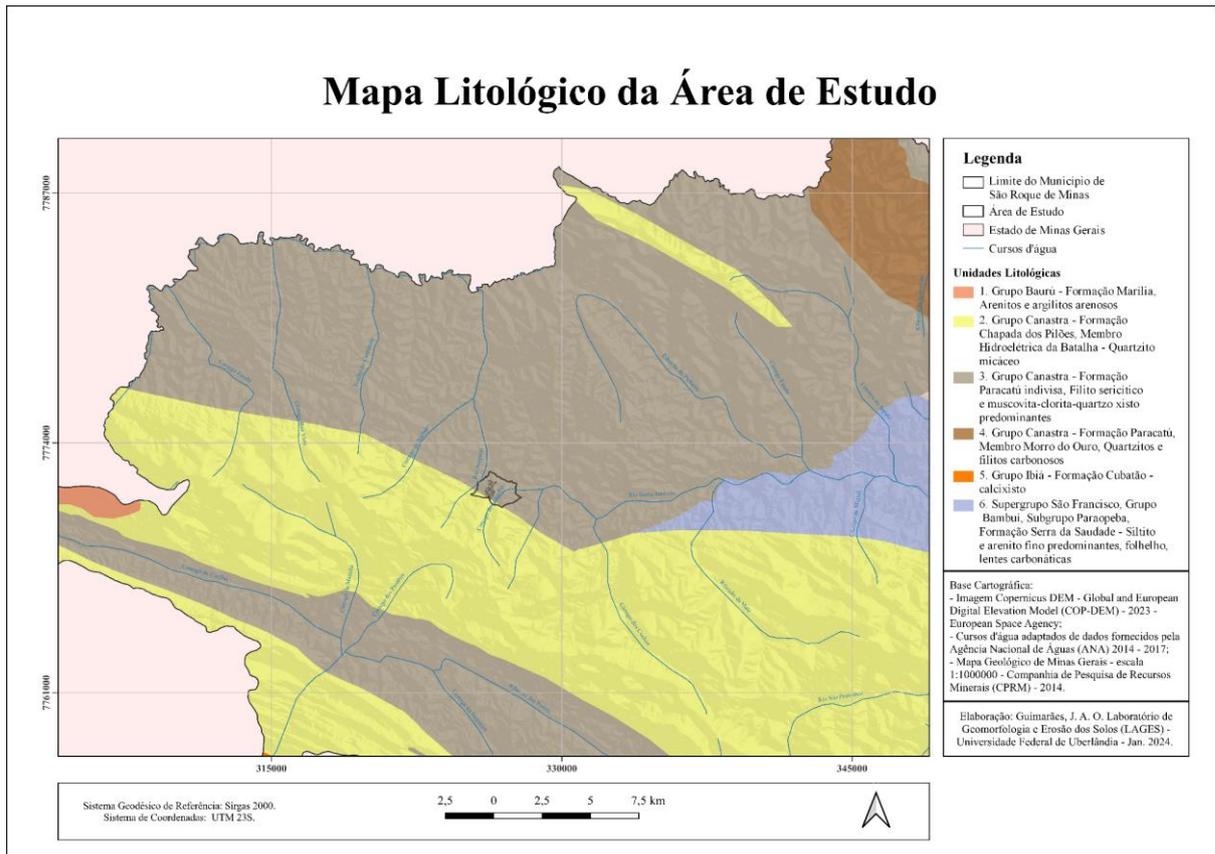
Fonte: autor (2024).

#### **4.4 Contexto Geológico**

Segundo Nazar e Rodrigues (2018), é possível constatar que a área de estudo apresenta uma complexidade geológica representada pelo Grupo Canastra, composto por duas formações principais: a Formação Paracatu Indivisa e a Formação Chapada dos Pilões, especificamente o Membro Hidroelétrica da Batalha. Essas litologias, ou seja, as características das rochas presentes, desempenham um papel fundamental na compreensão da evolução geológica e nas condições ambientais da região.

A distribuição espacial das unidades litológicas que são encontradas na área de estudo e região adjacente pode ser mais bem visualizada na Figura 7.

Figura 7 - Mapa Litológico da Área de Estudo



Elaboração: autor (2024)

Conforme abordado por Silva *et al.* (2012), a predominância de filito sericítico e muscovita-clorita-quartzito xisto caracteriza a Formação Paracatu Indivisa. O filito sericítico, uma rocha metamórfica, revela-se pela presença de sericita. Por outro lado, o muscovita-clorita-quartzito xisto indica uma composição diversificada, sugerindo a presença de minerais como muscovita, clorita e quartzo. Essa variedade de minerais sugere uma história metamórfica complexa na região.

A Formação Chapada dos Pilões, especificamente o Membro Hidroelétrica da Batalha, é predominantemente composta por quartzito micáceo, como coloca Silva *et al.* (2012). Essa rocha sedimentar metamorfizada é caracterizada pela presença de grãos de quartzo e mica. A presença de quartzito micáceo aponta para condições sedimentares e metamórficas particulares na história geológica local.

Nas proximidades da área de estudo também há a identificação do Grupo Bauru, especificamente a Formação Marília. Essa é caracterizada por depósitos sedimentares predominantemente constituídos por arenitos e argilitos arenosos.

## 4.5 Clima

Conforme descrito por Nazar e Rodrigues (2019), a área em questão está localizada em uma região de clima Tropical típico, caracterizado por duas estações climáticas distintas. A estação úmida é marcada por um excedente hídrico significativo, concentrado no trimestre de dezembro a fevereiro. Em contrapartida, a estação seca é mais pronunciada entre os meses de junho a agosto, os quais também são os meses mais frios.

Segundo informações de Novais (2011, *apud* Nazar e Rodrigues, 2019), a pluviosidade na região varia entre 1000 e 1500 mm, indicando uma quantidade considerável de precipitação ao longo do ano. A temperatura média, por sua vez, apresenta uma variação sazonal, com valores em torno de 18°C no mês mais frio e 22°C no mês mais quente. Essa amplitude térmica contribui para a distinção marcante entre as estações, refletindo a dinâmica climática característica do ambiente tropical.

## 4.6 Características locais e regionais de vegetação e uso da terra.

Conforme Ab'Saber (1977) *apud* Santos (2021), a área de estudo está situada no Domínio Morfoclimático do Cerrado, caracterizado por chapadões cobertos por vegetação de cerrado e intercalados por floresta-galeria ao longo dos cursos d'água. Esse domínio exibe diversas variações fitofisionômicas, abrangendo desde campos limpos, sujos e rupestres até formações de cerrado *strictu sensu*.

Dentro dos limites da área de estudo, as variações fitofisionômicas presentes, conforme observado em trabalhos como o de Coura (2007), que realizou o mapeamento da vegetação do estado de Minas Gerais utilizando dados Modis, e Couto Junior *et al.* (2010), que mapeou as fitofisionomias da Serra da Canastra, incluem predominantemente campos limpos e sujos, como pode ser visto na figura 8. Essas constatações foram corroboradas por Messias e Ferreira (2019), que elaboraram um mapa de uso do solo para a mesma região.

**Figura 8** – Paisagem com as fitofisionomias encontradas na Parte Alta da Serra da Canastra



Elaboração: autor (2024)

A área de estudo revela uma intrincada interação entre elementos antrópicos e naturais, proporcionando uma paisagem heterogênea que reflete as atividades humanas e a geografia local. No núcleo urbano, encontra-se um pequeno conglomerado de edificações, indicativo de uma concentração populacional mais densa. Esse cenário urbano contrasta com consideráveis extensões de pastagens e gramados destinados ao pastoreio que permeiam as áreas rurais circundantes.

Além das áreas destinadas à criação de gado, é possível observar propriedades, muitas que se ocupam de pequenas plantações, como as de café, como visto em campo e também silvicultura, que complementam a atividade econômica rural da região. Essas plantações, embora limitadas em extensão, desempenham um papel na diversificação dos usos da terra.

As estradas de chão, que formam a principal rede viária na área, são vitais na conectividade entre os diferentes elementos da paisagem. Servindo como as principais artérias de transporte, essas estradas facilitam o acesso às áreas agrícolas, fazendas e o pequeno aglomerado urbano, promovendo a integração espacial da região.

## **5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **5.1 Erosão**

A erosão é um processo natural de degradação do solo ou da rocha exposta na superfície terrestre. Ele envolve o deslocamento de materiais de áreas elevadas para regiões mais baixas, impulsionado pela ação de agentes como água, vento, gelo e gravidade. Configura um fenômeno natural importante, que tem impactos significativos no ambiente, e que vem sendo intensificado pelas atividades humanas na superfície terrestre.

De acordo com Matos (2015), na erosão hídrica, fatores como chuva, tipo de solo, relevo, vegetação e ocupação do terreno desempenham papéis significativos. Ela se divide em duas categorias: erosão laminar, que remove finas camadas de solo de forma uniforme, e erosão linear, resultante da concentração do escoamento, criando sulcos que podem se aprofundar consideravelmente, formando voçorocas.

A erosão hídrica exerce uma influência significativa em uma variedade de atividades humanas, abrangendo desde a agricultura até a geração de energia elétrica. O aumento da taxa de erosão em uma bacia hidrográfica pode ocasionar ou agravar esses problemas, destacando a importância da conservação do solo e da água para a sustentabilidade dessas atividades humanas e do meio ambiente.

Nesse contexto, o emprego de instrumentos analíticos, como modelos matemáticos, desempenha um papel crucial na compreensão e avaliação das ocorrências da erosão hídrica e de suas implicações. Os modelos matemáticos fornecem uma abordagem sistemática e quantitativa para analisar os processos envolvidos na erosão, permitindo a previsão de sua magnitude e distribuição espacial, bem como a avaliação de fatores de influência e de medidas de mitigação.

### **5.2 Potencial de Perda Anual de Solo - A**

Os modelos matemáticos de predição de erosão são ferramentas importantes na pesquisa e gestão ambiental. Eles permitem compreender os fatores que influenciam a erosão do solo e prever seus impactos. Além disso, auxiliam na análise de cenários e configuram instrumentos poderosos que possibilitam a busca por soluções eficazes para a conservação do recurso natural solo.

A partir da necessidade de explicar e quantificar fenômenos naturais de forma rigorosa e sistemática, surgem os Modelos Empíricos. Esses modelos são compostos por equações que

descrevem associações diretas entre resultados observados e variáveis independentes conhecidas e oferecem uma abordagem simplificada e pragmática para compreender e prever o comportamento de sistemas complexos, facilitando a análise e interpretação de dados.

O mais utilizado modelo empírico trata-se da Equação Universal de Perda de Solos (EUPS), desenvolvido por Wischmeier e Smith (1965, 1978). Criada, inicialmente, para uso em sistemas de cultivo e manejo selecionados, essa equação prevê a taxa média anual de erosão de longo prazo em uma encosta de campo com base no padrão de chuva, tipo de solo, topografia, sistema de cultivo e práticas de manejo. É escrita da seguinte forma:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (1)$$

Onde:

A – potencial de perda anual de solo (ton/ha.ano);

R - fator de erosividade da chuva (MJ·mm/ha·h·ano);

K - fator de erodibilidade do solo (ton·h/MJ·mm);

L - fator de comprimento de rampa (adimensional);

S - fator de declividade de rampa (adimensional);

C - fator de uso e manejo do solo (adimensional);

P - fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Lanza (2011) categorizou a perda de solo com base em sua intensidade. Essa classificação ajuda a compreender a gravidade dos processos erosivos, e pode ser conferida na tabela 1.

**Tabela 1** - Classificação da Perda de Solo quanto à sua Intensidade

<b>Valores de perda de solo (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Classes de erosividade</b>
A < 10	Nula a pequena
10 < A < 15	Moderada
15 < A < 50	Média
50 < A < 120	Média a forte
120 < A < 200	Forte
200 < A	Muito forte

Fonte: Lanza (2011).

Os valores de perda de solo, representados pela variável "A" e expressos em toneladas por hectare por ano (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>), são associados por Lanza (2011) a seis diferentes classes de

erosividade que refletem a gravidade dos processos erosivos e seus possíveis impactos ambientais. Essa categorização oferece uma visão abrangente da intensidade dos processos erosivos, auxiliando na identificação do nível de vulnerabilidade de determinadas áreas a esse desgaste.

### 5.3 Fator Erosividade da Chuva - R

Conforme afirmado por Carvalho (1994), o fator erosividade da chuva (R) caracteriza a capacidade intrínseca da precipitação em causar erosão em uma área desprotegida. Esse fator abarca não apenas o impacto direto da chuva sobre o solo, mas também o salpico de gotas, a turbulência gerada e a ação conjunta da enxurrada, responsável pelo transporte dos sedimentos desprendidos.

É importante ressaltar que a intensidade da chuva está diretamente relacionada à magnitude da erosão laminar, sendo que quanto mais intensa for a precipitação, maior será o potencial erosivo e os impactos associados sobre o solo.

A erosividade é frequentemente avaliada por meio do cálculo do índice  $EI_{30}$ , que representa o produto da energia cinética da chuva ( $E_c$ ) pela sua máxima intensidade registrada em um período de 30 minutos ( $I_{30}$ ).

Segundo Foster *et al.* (1981), a energia cinética das gotas de chuva, representada por  $E_c$ , é uma medida derivada do movimento delas, calculada pela seguinte equação:

$$E_c = 0,119 + 0,0873 \log I \quad (2)$$

Onde:

$E_c$  = energia cinética (MJ/ha-mm);

$I$  = intensidade da chuva (mm/h).

O índice de erosão  $EI_{30}$ , por sua vez, é obtido pela multiplicação da energia cinética da chuva ( $E_c$ ) pela intensidade máxima da chuva registrada em 30 minutos ( $I_{30}$ ), sendo expresso, portanto, pela seguinte equação:

$$EI_{30} = E_c \cdot I_{30} \quad (3)$$

Onde:

$EI_{30}$  = índice de erosão (MJ/ha . mm/h);

$E_c$  = energia cinética da chuva;

$I_{30}$  = intensidade máxima da chuva em 30 minutos (mm/h).

A soma de todos os valores de EI, considerando chuvas com intensidade superior a 10 mm/h ou de menor intensidade, porém que causem perdas consideráveis de solo, ao longo de um ano em determinado local, resultará no valor anual de EI, conforme delineado por Bertoni e Lombardi Neto (2012). Dessa forma, o valor de erosividade anual é obtido pelo somatório do índice de erosão de cada chuva no período de um ano, sendo representado pela equação:

$$R = \sum EI_{30} \quad (4)$$

Onde:

R = Fator erosividade das chuvas (MJ.mm/ha.h.ano).

A falta de registros pluviométricos adequados representa um desafio significativo na obtenção dos dados necessários para calcular o índice de erosão. Diante dessa limitação, diversos pesquisadores se empenharam em desenvolver métodos matemáticos adaptados às condições brasileiras, que considerem outros fatores além da precipitação, como aspectos climáticos. Esses métodos visam a estabelecer relações entre variáveis climáticas e o índice de erosão, proporcionando uma abordagem alternativa e complementar para estimar a erosividade da chuva.

Nesse contexto, Mello *et al.* (2013) desenvolveram modelos matemáticos para estimar a erosividade com base em regressão linear múltipla. Essa trata-se de uma técnica estatística utilizada para entender a relação entre uma variável dependente (a que está sendo estudada ou prevista) e várias variáveis independentes (ou preditoras) que podem estar associadas a ela.

A regressão linear múltipla neste caso foi utilizada para desenvolver modelos que relacionam a erosividade média anual da chuva com as variáveis independentes Latitude (LA), Longitude (LO) e Altitude (A). Cada modelo seria ajustado para uma região geográfica específica do Brasil.

Para o desenvolvimento desses modelos, foram coletados dados de estações pluviográficas em todo o Brasil. Equações foram então derivadas desses dados e aplicadas a uma ampla gama de pluviômetros para estimar a erosividade média anual da chuva em várias localidades do país.

O formato do modelo inicialmente testado é representado pela seguinte equação:

$$EI_{30} = b_1 + b_2 \cdot A + b_3 \cdot LA + b_4 \cdot LO + b_5 \cdot A^2 + b_6 \cdot LA^2 + b_7 \cdot LO^2 + b_8 \cdot A^3 + b_9 \cdot LA^3 + b_{10} \cdot LO^3 + b_{11} \cdot LA \cdot A + b_{12} \cdot LO \cdot A + b_{13} \cdot LA \cdot LO + b_{14} \cdot LO^2 \cdot A + b_{15} \cdot LA^2 \cdot A + b_{16} \cdot LO^2 \cdot A^2 + b_{17} \cdot LO^2 \cdot LA^2 + b_{18} \cdot LA^2 \cdot LO^3 \quad (5)$$

Nessa equação, como elucidam Mello *et al.* (2013),  $b_1, b_2, b_3, \dots, b_{18}$  são os coeficientes do modelo estimados pela regressão linear. LA, LO e A são as variáveis geográficas de entrada, e suas respectivas combinações geram outras variáveis, como  $A^2, LA^2, LA+A, LA-LO$  etc.

Essas combinações seguem critérios estabelecidos para modelos multivariados apresentados em Ferreira (2008) e Hair *et al.* (1998) *apud* Mello *et al.* (2013). Essas variáveis adicionais permitem capturar relações mais complexas entre as variáveis de entrada e a erosividade da chuva, melhorando assim a capacidade do modelo de prever a erosão do solo com base nas informações disponíveis.

**Tabela 2** - Modelos ajustados para as regiões Sudeste, Norte-Centro-Oeste, Sul e Nordeste do Brasil, com coeficientes estimados por regressão e significância estatística dos coeficientes estimados.

Coeficientes	Variável	Sudeste	Norte e Centro-Oeste	Sul	Nordeste
$b_1$	Intercepto	-399.443 <sup>a</sup>	69.908 <sup>a</sup>	2.610.770 <sup>a</sup>	-9264,11 <sup>b</sup>
$b_2$	A	420,49 <sup>a</sup>	-	-60,44 <sup>c</sup>	-599,05 <sup>c</sup>
$b_3$	LA	-78.296 <sup>a</sup>	2713,076 <sup>a</sup>	-	-
$b_4$	LO	-	1940,569 <sup>a</sup>	98.839 <sup>a</sup>	-383,48 <sup>c</sup>
$b_5$	$A^2$	-0,01784 <sup>a</sup>	0,0008671 <sup>ns</sup>	-	0,00955 <sup>a</sup>
$b_6$	$LA^2$	-1594,04 <sup>c</sup>	-141,233 <sup>a</sup>	-1114,68 <sup>c</sup>	-559,01 <sup>c</sup>
$b_7$	$LO^2$	195,84 <sup>a</sup>	16.5387 <sup>a</sup>	938,47 <sup>b</sup>	-
$b_8$	$A^3$	-	-	-	-
$b_9$	$LA^3$	-	-	-	-
$b_{10}$	$LO^3$	-	-	-	-
$b_{11}$	$LA \cdot A$	-	-	-	-
$b_{12}$	$LA^2 \cdot A$	-	-	-	-
$b_{13}$	$LO \cdot A$	17,77 <sup>c</sup>	-	-1185 <sup>a</sup>	30,24 <sup>c</sup>
$b_{14}$	$LA \cdot LO$	-	46,014 <sup>a</sup>	-	-
$b_{15}$	$LO^2 \cdot A$	0,1851 <sup>a</sup>	0,0004417 <sup>b</sup>	-	0,3739 <sup>b</sup>
$b_{16}$	$LO^2 \cdot A^2$	$1002 \cdot 10^{-5c}$	$-3,39 \cdot 10^{-7ns}$	-	-
$b_{17}$	$LO^2 \cdot LA^2$	1389 <sup>a</sup>	0,1905 <sup>a</sup>	1,18857 <sup>a</sup>	1,0903 <sup>b</sup>
$b_{18}$	$LA^2 \cdot LO^3$	0,01364 <sup>c</sup>	0,00262 <sup>a</sup>	0,01494 <sup>c</sup>	0,01834 <sup>b</sup>

Fonte: Mello *et al.* (2013).

É importante considerar as notas atribuídas aos coeficientes na tabela 2. Essas indicam, de acordo com Mello *et al.* (2013), a significância estatística de cada estimativa na regressão. Um coeficiente marcado com <sup>a</sup> é considerado significativo ao nível de 1%, indicando que há uma confiança de 99% de que o resultado não é devido ao acaso. Já os coeficientes marcados com <sup>b</sup> são significativos ao nível de 5%, o que implica uma confiança de 95%. Por sua vez, os coeficientes marcados com <sup>c</sup> são significativos ao nível de 10%, indicando uma confiança de 90%. Se um coeficiente não tiver nenhuma dessas notas, como aqueles marcados com <sup>ns</sup>, isso significa que não é estatisticamente significativo em nenhum dos níveis de confiança especificados, sugerindo que pode não ser relevante para o modelo.

A tabela 2, elaborada por Mello *et al.* (2013), resume os resultados mais importantes dos modelos estatísticos desenvolvidos para prever a erosividade da chuva em diferentes regiões do Brasil. Ela mostra os coeficientes estimados para cada variável nos modelos, juntamente com a significância estatística desses coeficientes. Portanto, destaca quais variáveis têm um impacto significativo na previsão da erosividade da chuva em cada região, fornecendo informações importantes sobre como esses modelos foram construídos e validados.

O índice de erosividade EI<sub>30</sub> pode ser calculado com base nos dados da tabela 2 e na equação fornecida anteriormente. Isso é feito a partir da utilização dos coeficientes estimados ( $b_1, b_2, \dots, b_{18}$ ) fornecidos na tabela e sua posterior inserção na equação, juntamente com os valores das variáveis preditoras (LA, LO e A) para o cálculo.

**Tabela 3** - Classes de interpretação de erosividade da chuva

<b>MJ·mm/ha<sup>1</sup>·h<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup></b>	<b>Classe</b>
R ≤ 2452	Baixa
2452 < R ≤ 4905	Média
4905 < R ≤ 7357	Média – Forte
7357 < R ≤ 9810	Forte
R > 9810	Muito Forte

**Fonte: Carvalho (1994)**

Carvalho (1994), assim como mostra Matos (2015), estabeleceu, em seus trabalhos, uma classificação da erosividade da chuva com base na energia cinética da precipitação. A classificação proposta é dividida em cinco categorias distintas, cada uma associada a um intervalo específico de valores de R, assim como está organizado na tabela 3.

Essa classificação desempenha um papel importante na gestão sustentável dos recursos naturais, especialmente do solo. A partir dela, é possível ter uma noção do quão impactante é o

fator R em uma determinada localidade, e a partir, disso, avaliar o potencial de erosão do solo em diferentes regiões e em diferentes momentos, sendo, portanto, crucial para entender, prever e mitigar os efeitos da erosão do solo.

#### **5.4 Fator Erodibilidade do Solo - K**

O fator K é uma medida que está intrinsecamente ligada às propriedades físicas e químicas do solo, representando sua suscetibilidade à erosão. Diversos métodos foram propostos na literatura para calcular esse fator. Um dos procedimentos mais comuns é o uso do nomograma de erodibilidade do solo desenvolvido por Wischmeier & Smith (1978), que leva em consideração suas propriedades físicas, químicas e biológicas

As propriedades físicas compreendem características como estrutura, textura, taxa de infiltração, permeabilidade, densidade e porosidade do solo. Esses atributos físicos influenciam diretamente na capacidade do solo de resistir à erosão causada pela água ou vento. Por outro lado, as propriedades químicas estão relacionadas à capacidade de infiltração e à estabilidade estrutural do solo, que são determinantes na sua resistência à erosão. Por fim, as propriedades biológicas, como o teor de matéria orgânica presente no solo, desempenham um papel crucial na proteção contra a erosão, uma vez que contribuem para melhorar a estrutura do solo e aumentar sua capacidade de retenção de água.

É importante ressaltar, como destaca Gurgel *et al.* (2011), que os atributos utilizados geralmente se referem ao horizonte superficial do solo, uma vez que a erosão laminar é a principal forma de erosão considerada. No entanto, a aplicação direta desse nomograma em solos tropicais muitas vezes não é apropriada, pois tende a superestimar o fator K.

Conforme explicado por Matos (2015), a determinação da erodibilidade do solo pode ser realizada por meio de três abordagens distintas. A primeira envolve a medição direta do fator K durante chuvas naturais em condições de campo. O segundo método, também direto, consiste na quantificação do fator K em relação às perdas de solo e à erosividade, por meio de chuvas simuladas. Por fim, o terceiro método, conhecido como determinação indireta, emprega regressões múltiplas que utilizam uma variedade de atributos do solo ou relações correlacionadas com o fator K obtido pelos métodos diretos.

A obtenção dos valores de erodibilidade do solo é uma tarefa que demanda não apenas recursos financeiros significativos, mas também longos períodos de estudo, o que torna a sua obtenção uma empreitada desafiadora em todo o território brasileiro. Apesar dessas

dificuldades, alguns pesquisadores têm se empenhado no desenvolvimento de metodologias para determinar o valor de K específico para os solos encontrados no Brasil.

Uma maneira simplificada de calcular a erodibilidade do solo foi proposta por Bouyoucos (1935). Esse método considera apenas as proporções de areia, silte e argila no solo para determinar o fator de erodibilidade, representado por K. Essa abordagem direta e fácil de usar permite estimar a suscetibilidade do solo à erosão com base em sua composição granulométrica. É representada pela equação:

$$K = ((\% \text{ areia} + \% \text{ silte}) / (\% \text{ argila})) / 100 \quad (6)$$

Outro exemplo é o trabalho de Denardin (1990), que desenvolveu um método para o cálculo indireto do fator K, utilizando como parâmetros a textura do solo, a quantidade de matéria orgânica, a permeabilidade e o diâmetro médio ponderado (DMP). A partir desse método, Chaves (2011) elaborou uma adaptação para realizar o cálculo de K exclusivamente a partir do teor de argila, resultando na seguinte equação:

$$K = 0,00000055 \cdot A^3 + 0,00008011 \cdot A^2 - 0,00320292 \cdot A + 0,00623688 \quad (7)$$

Onde:

A = teor de argila no solo (%).

De acordo com Chaves (2011), através da aplicação de um ajuste polinomial para descrever a relação entre o teor de argila do solo e o valor de K, o autor obteve um coeficiente de determinação de 0,8073. O erro absoluto médio foi calculado como 0,0022 ton·ha·h·MJ<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup>·mm<sup>-1</sup>, com um erro absoluto máximo de 0,0059 ton·ha·h·MJ<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup>·mm<sup>-1</sup>. Além disso, o erro relativo médio foi determinado como 12,69%.

O coeficiente de determinação, também conhecido como R<sup>2</sup>, é uma medida estatística que indica o quão bem o modelo de ajuste polinomial se ajusta aos dados. Neste caso, o autor obteve um coeficiente de determinação de 0,8073, o que significa que aproximadamente 80,73% da variabilidade no valor de K pode ser explicada pela relação com o teor de argila do solo. Quanto mais próximo de 1 for o R<sup>2</sup>, melhor o modelo se ajusta aos dados.

O erro absoluto médio de 0,0022 ton·ha·h·MJ<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup>·mm<sup>-1</sup> indica a média das diferenças absolutas entre os valores observados e os valores previstos de K. Já o erro absoluto máximo

de  $0,0059 \text{ ton}\cdot\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{MJ}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$  representa a maior discrepância absoluta entre um valor observado e seu valor previsto.

O erro relativo médio de 12,69% é calculado, conforme Chaves (2011), como a média dos erros relativos, que expressa a diferença entre os valores observados e os valores previstos como uma porcentagem dos valores observados. Esse valor indica a precisão do modelo em relação aos dados reais, sendo que um erro relativo menor indica uma melhor precisão na previsão dos valores de K com base no teor de argila do solo.

Essas métricas são importantes para avaliar a qualidade do ajuste do modelo polinomial e a precisão das previsões do valor de K com base no teor de argila do solo na região estudada.

O valor de erodibilidade calculado pode ser classificado com base em critérios predefinidos. Dessa forma, Carvalho (1994) e Matos (2015) classificaram a erodibilidade dos solos seguindo os valores que são explicitados na tabela 4.

**Tabela 4** - Classes de interpretação para o fator K

<b>Valores de erodibilidade (ton·h/MJ·mm)</b>	<b>Classe de erodibilidade</b>
K < 0,02	Baixa
0,02 < K ≤ 0,038	Média
K > 0,038	Alta

**Fonte: Carvalho (1994), Matos (2015).**

### 5.5 Fator Topográfico - LS

Um dos principais fatores que influenciam a erosão do solo é a topografia do terreno, que é caracterizada pela declividade e comprimento das rampas. Esses fatores desempenham um papel fundamental na determinação da taxa de erosão hídrica.

O comprimento da rampa é a distância ao longo da qual a água escoou até atingir um ponto de deposição ou um canal de drenagem. Embora a perda de água diminua com o aumento do comprimento da rampa devido à maior chance de infiltração, a velocidade do escoamento aumenta devido ao movimento uniformemente acelerado. Isso resulta, como explica Matos (2015), em uma maior capacidade de transporte de sedimentos e, conseqüentemente, em uma maior perda de solo.

A declividade do terreno, por outro lado, influencia a quantidade de perda de solo através de sua influência na velocidade e volume do escoamento superficial. Terrenos mais

inclinados têm uma velocidade de escoamento mais alta, o que reduz a taxa de infiltração e aumenta o escoamento superficial, levando a uma maior erosão do solo.

Os fatores comprimento da rampa e declividade são combinados na Equação Universal da Perda de Solo (EUPS), onde são representados como um único fator topográfico, denotado como LS. Essa equação, desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978), descreve a relação entre a perda de solo em uma determinada área e as perdas que ocorrem em uma área padrão com características específicas de declividade e comprimento de rampa.

Para lidar com a complexidade dos cenários topográficos reais, foi introduzido o conceito de área de contribuição. Isso significa que não apenas o comprimento da rampa é considerado, mas toda a área que contribui para o escoamento em um determinado ponto. Isso permite uma modelagem mais precisa dos processos erosivos, levando em consideração o fluxo acumulado e a convergência/divergência do escoamento.

Algoritmos para calcular automaticamente o fator topográfico foram concebidos com o objetivo de simplificar a obtenção do fator LS, especialmente ao serem aplicados em ambientes de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e fazendo uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

A proposta dessas metodologias é de proporcionar uma abordagem mais eficiente e automatizada na determinação do fator topográfico LS. A utilização de SIG e MDE oferece uma plataforma robusta para análises espaciais, permitindo a integração de dados topográficos de forma precisa e sistemática.

Ao adotar esse enfoque, os pesquisadores visavam simplificar e agilizar o processo de cálculo do fator LS, tornando-o mais acessível e aplicável em diversos contextos de estudo e gestão ambiental. Essa automatização representou um avanço significativo, possibilitando uma análise mais precisa e abrangente dos fatores que influenciam a erosão do solo, contribuindo para uma melhor compreensão e mitigação desse fenômeno.

Esses fatores podem ser obtidos através das seguintes fórmulas:

$$\beta = \frac{(\sin(\text{"Declividade"} \cdot 0,01745) / 0,0896)}{(3 \cdot (\sin(\text{"Declividade"} \cdot 0,01745)^{0,8}) + 0,56)} \quad (8)$$

Onde:

$\beta$  = inclinação do terreno, expressa em radianos;

"Declividade" = é o valor da declividade do terreno;

Sin = função seno;

0,01745 = fator de conversão de graus para radianos.

Essa equação é utilizada para calcular a inclinação do terreno ( $\beta$ ) com base no valor da declividade. O fator de conversão de graus para radianos (-0,01745) é necessário para garantir que a unidade de medida da inclinação esteja correta.

$$m = \frac{\beta}{(1 + \beta)} \quad (9)$$

Onde:

$m$  = o coeficiente em função da inclinação do terreno;

$\beta$  = inclinação do terreno, expressa em radianos.

Essa equação é utilizada para calcular o coeficiente  $m$  com base na inclinação do terreno ( $\beta$ ). O coeficiente  $m$  descreve a relação entre a inclinação do terreno e fenômenos como o escoamento de água e a erosão.

$$L = \frac{(\text{power}((AF + 900), (M + 1)) - \text{power}(AF, (M + 1)))}{(\text{power}(DF, M) \cdot \text{power}(30, (M + 2)) \cdot \text{power}(22, 13, M))} \quad (10)$$

Onde:

$L$  = fator comprimento de rampa;

$AF$  = acumulação de fluxo (medida da quantidade de fluxo que converge em uma célula específica de um Modelo Digital de Terreno (MDT));

$DF$  = direção de fluxo, indicando para onde o fluxo converge a partir de uma célula específica no MDT;

$M$  = fator  $m$ , coeficiente em função da declividade do terreno;

Power = função de potência, que eleva um número à potência especificada.

Essa equação é utilizada para calcular o fator comprimento de rampa ( $L$ ) com base na acumulação de fluxo ( $AF$ ), direção de fluxo ( $DF$ ), e o fator  $m$  ( $M$ ). Ele descreve como o comprimento da vertente influencia o escoamento superficial.

$$\text{ifelse}((\tan(\text{declividade} \cdot 0,01745) < 0,09), 10,8 \cdot \sin(\text{declividade} \cdot 0,01745) + 0,03, 16,8 \cdot \sin(\text{declividade} \cdot 0,01745) - 0,5) \quad (11)$$

Onde:

Declividade = inclinação do terreno, em graus;

Sin = função seno, que retorna o valor do seno de um ângulo em radianos;

Tan = função tangente, que retorna a tangente de um ângulo em radianos.

Essa função condicional é usada para calcular o fator declividade (S) em uma equação relacionada à previsão de erosão do solo, onde diferentes valores são aplicados dependendo da inclinação do terreno.

A multiplicação dos fatores comprimento de rampa (L) e declividade (S) resultam no fator topográfico LS.

## 5.6 Fator uso, manejo e práticas conservacionistas do solo – CP

A cobertura vegetal, conforme Morgan (2007), exerce múltiplas funções na prevenção da erosão, incluindo a proteção direta contra o impacto das gotas de chuva, a dispersão da água, a decomposição das raízes que aumenta a infiltração, e a melhoria da estrutura do solo pela adição de matéria orgânica. A ausência de cobertura vegetal resulta em maior exposição do solo à erosão, o que pode levar a perdas significativas de solo e aumento da velocidade do escoamento superficial.

Os fatores C e P representam a relação entre as perdas de solo em áreas com cobertura vegetal ou práticas conservacionistas e as perdas em áreas descobertas ou com práticas inadequadas de manejo do solo (Silva *et al.*, 2003; Bertoni e Lombardi Neto, 2012). Enquanto o fator C aborda o uso e manejo do solo em relação à cobertura, o fator P refere-se às práticas específicas adotadas para conservar o solo (Silva *et al.*, 2003).

Embora alguns autores defendam a análise separada desses fatores, como Stein *et al.* (1987), Wischmeier e Smith (1978) argumentam que eles estão intrinsecamente relacionados e devem ser considerados em conjunto devido às suas interações significativas. Ainda, é importante considerar que ao longo do tempo, esses fatores podem mudar devido às alterações no uso da terra, resultando em valores que variam de 1 para solo exposto a valores inferiores a 1 à medida que a cobertura do solo aumenta.

A obtenção desses fatores pode ser desafiadora e exigir pesquisas extensivas de campo, como destacado por Stein *et al.* (1987). No entanto, o uso de técnicas como o sensoriamento remoto pode simplificar o processo, fornecendo dados importantes para avaliação e planejamento da conservação do solo (Silva *et al.*, 2003). A classificação dos valores de CP é determinada pelo tipo de cobertura vegetal, porte e densidade, conforme classificado por Stein *et al.* (1987). Isso demonstra a importância de uma abordagem integrada para avaliar e mitigar os impactos da erosão do solo, considerando tanto a cobertura vegetal quanto as práticas de manejo do solo.

A classificação dos valores do fator CP, segundo a definição de Stein *et al.* (1987), está diretamente relacionada ao tipo de ocupação do solo e às características da cobertura vegetal. De acordo com essa classificação, áreas com vegetação de grande a médio porte tendem a apresentar valores mais baixos de CP. Isso indica que a presença de vegetação densa e de porte significativo está associada a uma menor perda de solo, refletindo a capacidade dessa cobertura vegetal em proteger o solo contra a erosão.

Por outro lado, áreas com vegetação de porte menor e menor grau de cobertura tendem a ter valores mais elevados de CP. Isso sugere que, em ambientes onde a cobertura vegetal é menos densa ou está ausente, a perda de solo tende a ser mais acentuada. Essa relação está intrinsecamente ligada à capacidade da vegetação em interceptar a água da chuva, reduzindo o impacto das gotas e aumentando a infiltração no solo.

Além disso, para ocupações antrópicas, como edificações, e corpos d'água, o valor do fator de cobertura do solo (CP) é nulo. Isso significa que, nessas áreas, onde a cobertura do solo é drasticamente alterada ou onde o solo está submerso, a erosão laminar não ocorre. A impermeabilização do solo devido a construções impede a erosão laminar. Em corpos d'água, o solo está submerso, e, portanto, a erosão laminar não se aplica. Nessas condições, o transporte de sedimentos é dominado por outros processos, como a erosão fluvial e a sedimentação.

Essa classificação evidencia a importância da cobertura vegetal na prevenção da erosão do solo, destaca a necessidade de considerar as características da vegetação e toda dinâmica de uso e ocupação ao avaliar os riscos de erosão e planejar medidas de conservação do solo em uma determinada área. Os valores atribuídos a diferentes classes de uso e manejo do solo podem ser visualizados na tabela 5.

**Tabela 5** - Valores dos fatores C e P em função das classes de uso e ocupação do solo

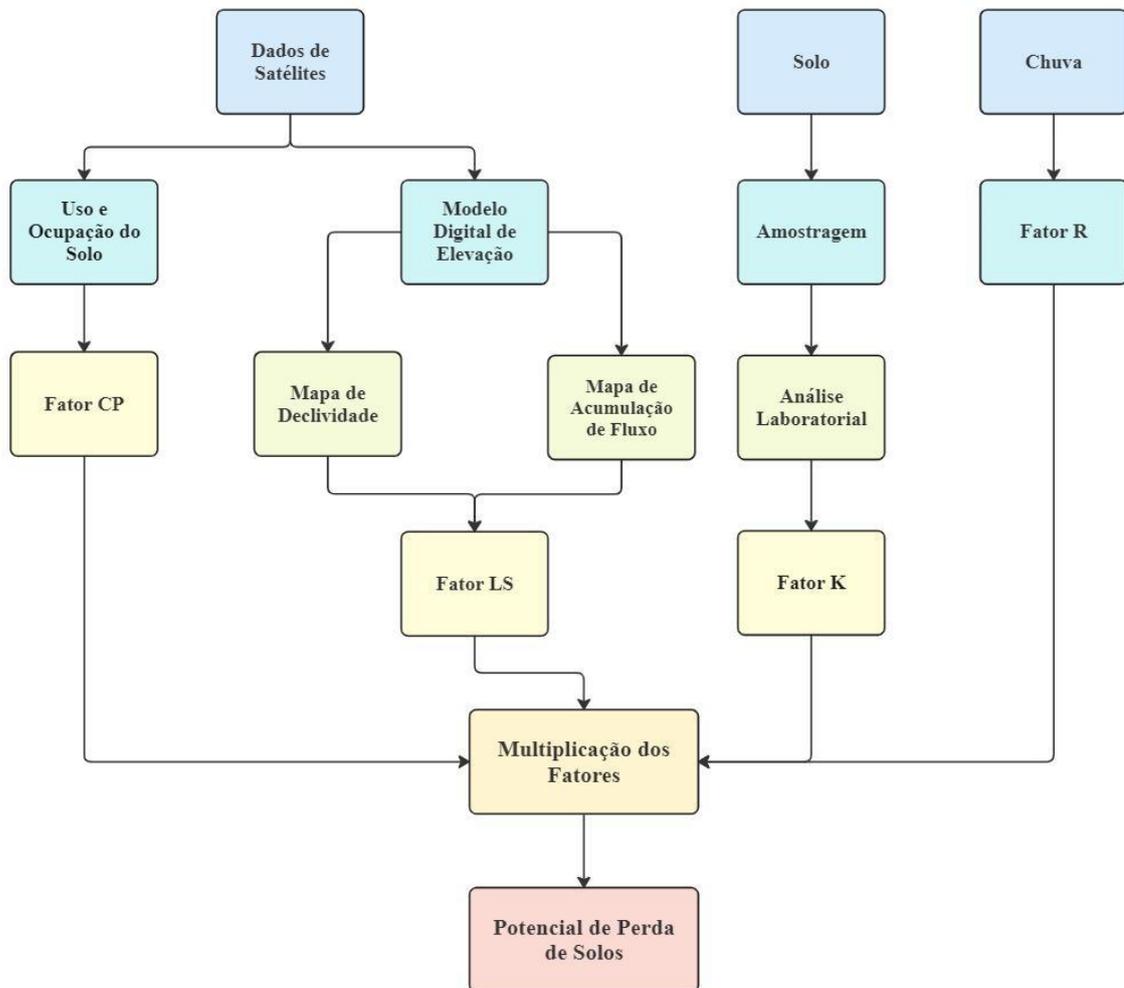
<b>Cobertura do Solo</b>	<b>CP (Adimensional)</b>
Áreas Agrícolas	0,2
Áreas Verdes Urbanas	0
Corpos d'água	0
Edificações	0
Estradas de Chão	0,8
Estradas de Cimento	0
Vegetação Florestal	0,00004
Pastagem/gramado	0,01
Solo Exposto	1
Vegetação Campestre	0,01

**Fonte: STEIN et al., 1987 adaptado. Org. pelo autor (2024).**

## 6 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia empregada neste estudo consistiu na aplicação de cálculos fundamentados nos fatores R (erosividade da chuva), K (erodibilidade do solo), LS (comprimento e inclinação do terreno) e CP (práticas de conservação do solo), utilizando um Software de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Estes fatores foram determinados individualmente e posteriormente combinados para a obtenção da taxa de perda de solo, conforme visualizado na figura 8. Tal abordagem permitiu a estimativa quantitativa dos sedimentos resultantes da erosão para a área de interesse.

**Figura 9** - Fluxograma da Equação Universal de Perda de Solos



Elaborado pelo autor (2024).

As informações usadas na pesquisa para a construção da Equação Universal de Perda de Solo foram: (i) obtenção de uma metodologia que possibilitasse o cálculo da erosividade da chuva sem a dependência direta das informações das estações pluviométricas, encontrada no artigo de Mello *et al.* (2013); (ii) coleta e análise laboratorial de amostras de solo da área de trabalho para elaboração do mapa pedológico e, a partir da equação modificada por Lima *et al.* (2007), o cálculo da erodibilidade de solos; (iii) informações topográficas do Copernicus DEM para obtenção dos fatores L e S; (iv) dados do Google Earth (2023) e (2016), e do Satélite SPOT (2008) e (2000) para elaboração dos mapas de Uso e Ocupação do Solo, e dados de Stein *et al.* (1987) para aplicação dos valores de Cobertura Vegetal e Práticas de Conservação.

Com o propósito de investigar a dinâmica da perda de solo na região e compreender sua evolução ao longo das últimas décadas, este estudo se propôs a aplicar a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (EUPS-R) em diferentes períodos temporais. Para tal desígnio, foram selecionados os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023, estabelecendo-se intervalos temporais aproximados de oito anos entre cada avaliação.

## 6.1 Fator Erosividade da Chuva - R

No presente estudo, a metodologia principal adotada para calcular a erosividade baseou-se principalmente no trabalho de Mello *et al.* (2013). Esta abordagem envolve um modelo matemático desenvolvido pelos autores, que emprega técnicas de regressão linear múltipla para estimar a erosividade considerando as condições específicas do território brasileiro. Diferentemente de métodos tradicionais que se baseiam unicamente na precipitação, o modelo de Mello *et al.* incorpora outros fatores climáticos relevantes, estabelecendo relações entre esses fatores e o índice de erosão.

A escolha por essa abordagem se deu devido à escassez de estações climatológicas próximas à área de estudo. Além disso, a falta de dados climatológicos contínuos abrangendo o período de 2000 a 2023 limitou a utilização do método tradicional baseado no cálculo do índice de erosividade (EI30) e, conseqüentemente, do fator R. Portanto, a abordagem proposta por Mello *et al.* foi adotada como uma alternativa viável para estimar a erosividade de forma adequada, considerando as limitações de dados disponíveis e as características específicas da região de estudo.

No processo de aplicação do método proposto por Mello *et al.* (2013), o Modelo Digital de Elevação do Programa Copernicus (COP-DEM) foi empregado, caracterizado por uma resolução espacial de 30 metros. Por meio das ferramentas disponíveis no software QGIS, o

COP-DEM foi vetorizado e, subsequentemente, foram extraídos os centroides de cada um de seus pixels, os quais detinham valores de Latitude e Longitude (ambos expressos em graus decimais), bem como de Altitude (em metros).

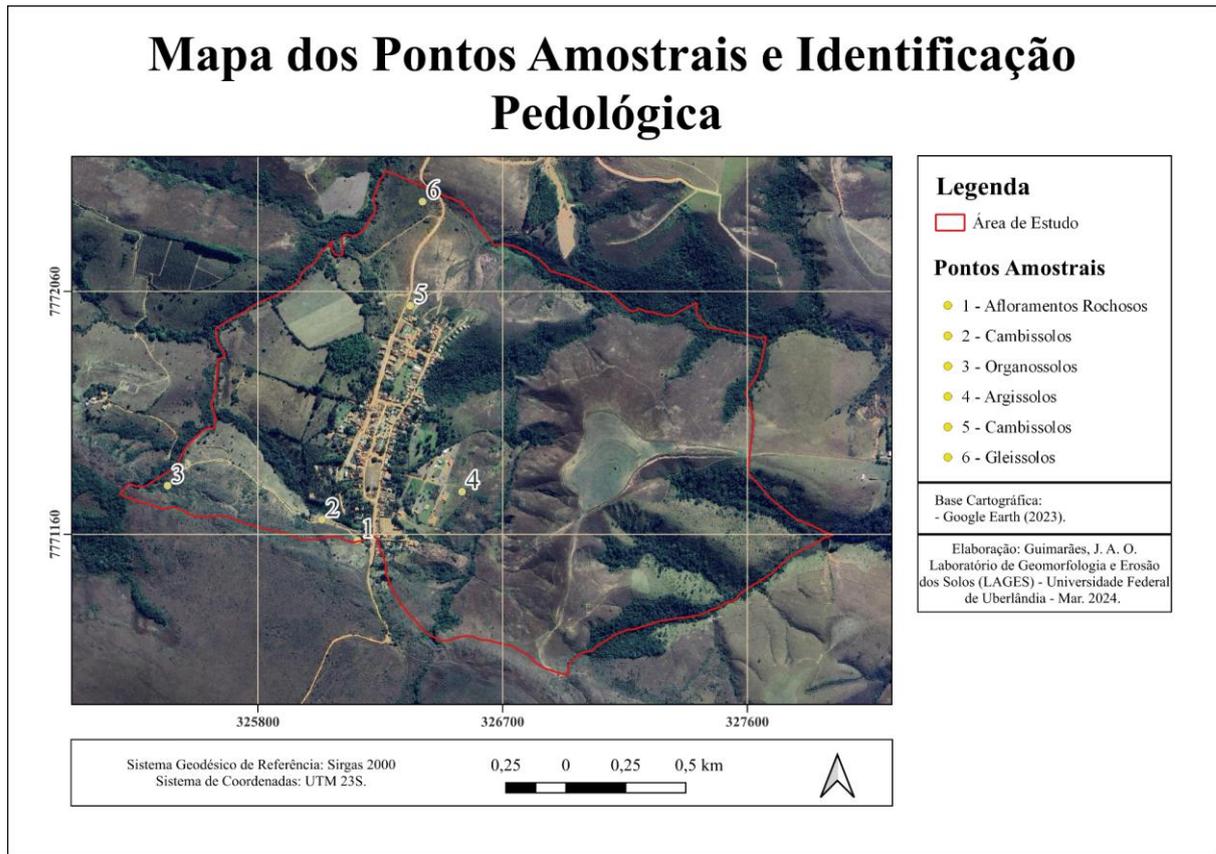
Em seguida, foram realizadas rasterizações distintas para cada um desses atributos, segmentando-os. Utilizando a calculadora raster do QGIS, esses atributos foram multiplicados seguindo a equação 5, resultando na geração de um arquivo raster contendo os respectivos pontos (centróides) e seus valores de R, que representam a erosividade.

Por fim, foi empregada a técnica de interpolação do tipo IDW (Inverse Distance Weighting) para preencher e completar os dados em toda a área de estudo, garantindo uma cobertura espacial homogênea e contínua dos valores de erosividade estimados. Este processo de interpolação permite uma representação mais precisa e detalhada da distribuição espacial dos valores de R em toda a área de interesse.

## **6.2 Fator Erodibilidade do Solo - K**

Para a determinação do fator de erodibilidade do solo, uma série de procedimentos foi conduzida. Inicialmente, no trabalho de campo, foram selecionados seis tipos distintos de solos, dos quais foram coletadas cinco amostras representativas para análise em laboratório.

**Figura 10 - Mapa dos Pontos Amostrais e Identificação Pedológica**



Elaboração: autor (2024).

Como é possível observar na figura 9, que representa os locais exatos dos pontos amostrais, foram retiradas 5 amostras de solo, uma vez que os afloramentos rochosos foram constatados em campo e não passaram por procedimentos laboratoriais.

**Figura 11** - Amostras de solos retiradas da área de estudo



Fonte: autor (2024).

No Laboratório de Geomorfologia e Erosão dos Solos – LAGES da Universidade Federal de Uberlândia, procedimentos específicos foram realizados para identificar a textura do solo, permitindo a quantificação da proporção de argila, silte e areia em sua composição. A figura 10 ilustra as amostras de solos retiradas e identificadas por ponto de amostragem e profundidade.

A textura do solo depende de análise granulométrica, ou seja, da avaliação das proporções entre as partículas de areia, silte e argila. Para isso, foram realizados procedimentos de análise granulométrica por peneiramento e para análise granulométrica por sedimentação, ou método da pipeta, feitos com base no método adotado pelo Laboratório de Geomorfologia e Erosão dos Solos (LAGES-UFU).

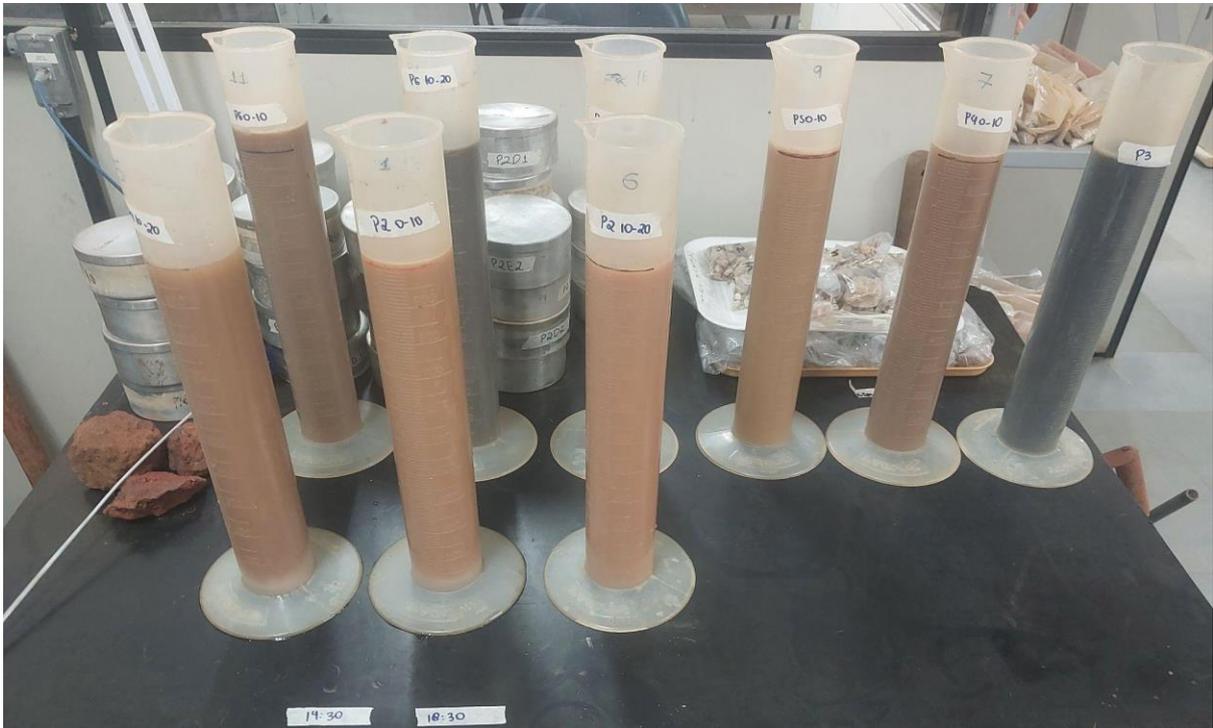
Com método de peneiramento, o solo foi passado por peneiras com malhas de tamanhos progressivamente menores, e as frações retidas em cada peneira foram pesadas. Isso permitiu determinar a distribuição granulométrica do solo em relação ao tamanho das partículas maiores, como areia.

Já com método de sedimentação, o solo foi disperso em água e as partículas se depositam em função de seu tamanho e densidade. Utilizando um tubo de sedimentação, foi possível a determinação da proporção de partículas menores, como silte e argila, como pode ser observado na figura 11.

Como resultado, obteve-se para cada amostra a quantidade em gramas das frações de argila, areia e silte, como pode ser visualizado na tabela 6. Com base nesses dados, foi possível

fazer o cálculo da porcentagem de ocorrência dessas três frações para os diferentes tipos de solos, tendo seu resultado ilustrado na tabela 7.

**Figura 12** - Processo de sedimentação para determinar proporção de silte e argila



Fonte: autor (2024).

**Tabela 6** - Proporção de Argila, Areia e Silte das amostras de solos

Número	Amostras Profundidade (cm)	Quantidades (gramas)		
		Argila	Areia	Silte
P1	0 – 10	-	-	-
	10 – 20	-	-	-
P2	0 – 10	0,1075	10,0505	9,842
	10 – 20	0,1163	8,9828	10,9009
P3	0- 10	0,0767	12,7928	7,1305
	-	-	-	-
P4	0 – 10	0,0703	11,6371	8,2926
	10 – 20	0,0564	10,7943	9,1493
P5	0 – 10	0,1556	6,201	13,6434
	10 – 20	0,0766	10,6217	9,3017
P6	0 – 10	0,0997	3,5443	16,357
	10 – 20	0,1751	3,5531	16,2718

Elaborado pelo autor (2024).

Tabela 7 - Teor de Argila, Areia e Silte das amostras de solos

Número	Amostras		Teor (%)		
	Profundidade (cm)	Argila	Areia	Silte	
P1	0 – 10	-	-	-	
	10 – 20	-	-	-	
P2	0 – 10	0,5375	50,2525	49,21	
	10 – 20	0,5815	44,914	54,5045	
P3	0- 10	0,3835	63,964	35,6525	
	-	-	-	-	
P4	0 – 10	0,3515	58,1855	41,463	
	10 – 20	0,282	53,9715	45,7465	
P5	0 – 10	0,778	31,005	68,217	
	10 – 20	0,383	53,1085	46,5085	
P6	0 – 10	0,4985	17,7215	81,785	
	10 – 20	0,8755	17,7655	81,359	

Elaborado pelo autor.

Posteriormente, os solos foram classificados de acordo com as características observadas, empregando os critérios estabelecidos pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, conforme as diretrizes do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, elaborado por SANTOS, H.G. *et al* (2018).

Na área de estudo foram identificados uma variedade considerável de solos. Entre os tipos de solos catalogados incluem afloramentos rochosos, Argissolos, Cambissolos, Gleissolos e Organossolos. Essa variedade reflete as diferentes condições geológicas, topográficas e pedogenéticas presentes na região em análise.

Além dos solos naturais, foi decidido incorporar ao estudo os Antropossolos, os quais representam uma parte significativa da área que abrange a porção urbanizada. A inclusão desses solos modificados pela atividade humana é crucial para compreender os impactos das intervenções antrópicas no ambiente e na dinâmica do solo, bem como para avaliar potenciais consequências em termos de perda de solo e degradação ambiental.

O cálculo do fator de erodibilidade (K) foi realizado com base na fórmula proposta por Denardin (1990) e adaptada por Lima *et al.* (2007), equação 7, que utiliza a porcentagem de argila como variável principal. Por meio dessa equação foi possível obter os valores de K para cada tipo de solo analisado.

Os valores calculados de K foram então integrados à tabela de atributos do mapa de solos, associando cada polígono de solo com seu respectivo valor de K. Finalmente, o mapa de

solos, agora com os valores de K adicionados à tabela de atributos, foi convertido em um formato raster para posterior multiplicação.

**Tabela 8** - Valores de K em Função dos Tipos de Solos Encontrados na Área de Estudo

<b>Solo</b>	<b>Valor de K (t·ha·h·MJ<sup>-1</sup>·mm<sup>-1</sup>·ha<sup>-1</sup>)</b>
Cambissolos	0,00532
Argissolos	0,00553
Organossolos	0,00515
Antropossolos	0,00250
Gleissolos	0,00524

**Elaborado pelo autor (2024).**

Para a realização desses cálculos, foram utilizados exclusivamente os valores do teor de argila referentes à profundidade de 0 a 10 cm para todos os tipos de solos. Tal abordagem metodológica foi adotada em virtude do reconhecimento de que a erosão laminar afeta predominantemente a camada superficial do solo. Dessa forma, a seleção específica dessa profundidade para a determinação do teor de argila visa melhor representar as condições que influenciam diretamente a suscetibilidade do solo à erosão em sua camada mais superficial.

Para o valor de K atribuído ao antropossolo, em face da ausência de uma literatura que pudesse fornecer um referencial direto, optou-se por estabelecer um valor de 0,0025. Esta determinação foi fundamentada em uma análise abrangente dos valores de K encontrados para os outros tipos de solos na região de estudo. Presumindo que na ausência de intervenção humana a área urbana estaria construída predominantemente sobre argissolos e levando em conta a interação com as áreas urbanizadas, onde o valor de K seria essencialmente zero devido à impermeabilização do solo, chegou-se a esse valor aproximado.

### 6.3 Fator Topográfico - LS

Para determinar o fator topográfico (LS), empregou-se o Copernicus DEM, cuja resolução espacial é de 30 metros, que configura a qualidade disponibilizada de maneira gratuita. Conforme delineado por Matos (2015), um MDE constitui uma representação cartográfica da superfície física terrestre em forma de grade retangular matricial, onde cada pixel corresponde a um valor numérico de elevação.

Antes de iniciar o processo de cálculo do fator topográfico nos MDEs, procedeu-se à correção de falsas depressões ou depressões espúrias, essas que podem acontecer devido à baixa resolução do arquivo ou erros do imageamento. Essa etapa foi executada utilizando a ferramenta

r.fill.dir, integrada ao complemento GRASS do software QGIS, a qual efetuou o preenchimento das lacunas presentes no arquivo raster.

Após a correção do Modelo Digital de Elevação (MDE), um arquivo raster de declividade foi derivado por meio da análise dos rasters dentro do ambiente do software QGIS. A declividade nesse arquivo foi expressa em graus. Em seguida, a inclinação do terreno foi convertida para radianos, visando viabilizar os cálculos subsequentes. Este valor, denotado como  $\beta$ , foi determinado utilizando a equação 8.

Posteriormente, com o raster resultante de  $\beta$ , o fator M foi calculado. Este fator é uma função da inclinação do terreno e foi obtido utilizando a equação 9.

Também se procedeu o cálculo da direção de fluxo, que constitui uma representação raster das trajetórias esperadas do fluido em um sistema determinado com base nos valores altimétricos de cada pixel. Esses algoritmos de determinação da direção do fluxo são essenciais para identificar os pixels mais prováveis de se tornarem destinos durante a simulação da presença de precipitação no sistema hidrográfico. Este processo foi conduzido por meio da aplicação da ferramenta r.fill.dir, disponível no complemento Grass do software QGIS.

Além disso, foi realizado o cálculo da acumulação de fluxo, que consiste na geração de um raster que registra o fluxo acumulado em cada célula, com base em um raster de direção do fluxo. Tal etapa foi executada utilizando a ferramenta r.flow, também integrada ao complemento Grass do QGIS.

Por meio da calculadora raster disponibilizada pelo complemento GDAL, é obtido o fator L utilizando os dados anteriormente obtidos e a equação 10.

Por fim, o fator S foi determinado utilizando a calculadora raster disponível no complemento SAGA do software QGIS. Especificamente, este fator foi derivado por meio de uma função condicional que calcula um valor com base na declividade do terreno, expressa em graus. A função condicional empregada corresponde à equação 11.

Nesta expressão, a declividade é convertida de graus para radianos antes de ser utilizada na função. A função condicional verifica se a tangente da declividade é menor que 0.09. Se esta condição for verdadeira, o valor do fator S é calculado como  $10.8 \cdot \sin(\text{declividade} \cdot 0.01745) + 0.03$ ; caso contrário, o valor é calculado como  $16.8 \cdot \sin(\text{declividade} \cdot 0.01745) - 0.5$ .

#### 6.4 Classes de Cobertura Vegetal e Fator de Práticas de Conservação

Para alcançar os valores de CP para área de estudo, foi desenvolvido o processo de obtenção de dados de satélites referentes aos anos de 2000, 2008, 2016 e 2023. Esses foram disponibilizados pelo Google, que oferece imagens capturadas de satélite Landsat 8 (USGS/NASA) e pela Agência Espacial Francesa (CNES), que concederam imagens dos satélites SPOT 4 e 5. Através das imagens desses dispositivos, foram realizados os mapas de uso e ocupação do solo para todos os respectivos anos mencionados, de forma manual.

Para a definição das classes de Uso e Ocupação, foi empregue o Manual Técnico de Uso da Terra do IBGE (2006), no qual é apresentado um esquema teórico de construção de uma nomenclatura da cobertura terrestre, assim como uma referência de cores em formato RGB para a categorização das classes.

Foram estabelecidas, portanto, 9 classes, sendo elas: Área Urbana (edificações); Áreas verdes urbanas (praça); Estradas de chão; Estradas de bloquetes (concreto); Pastagem/gramados; Áreas Agrícolas; Matas (de galeria); Vegetação campestre (campos limpos e campos sujos); e Solos expostos. A classificação usada para definir os valores de CP foi a definida por Stein *et al.* (1987) e exposta na Tabela 5.

É importante salientar que o valor da classe "estrada de chão", por falta de referências na literatura, foi estabelecido pelo autor. Para definição desse valor, foi levado em conta o fato de que as estradas de chão também configuram solos expostos, mas com maior compactação, devido à constante pressão exercida pela passagem de veículos. Isso fez com que seus valores fossem ligeiramente menores do que 1.

Por fim, os valores de CP foram adicionados à tabela de atributos de cada uma das classes de cada um dos mapas. Em seguida, esses foram transformados em raster através da rasterização, no QGIS.

#### 6.5 Potencial de Perda Média Anual de Solo - A

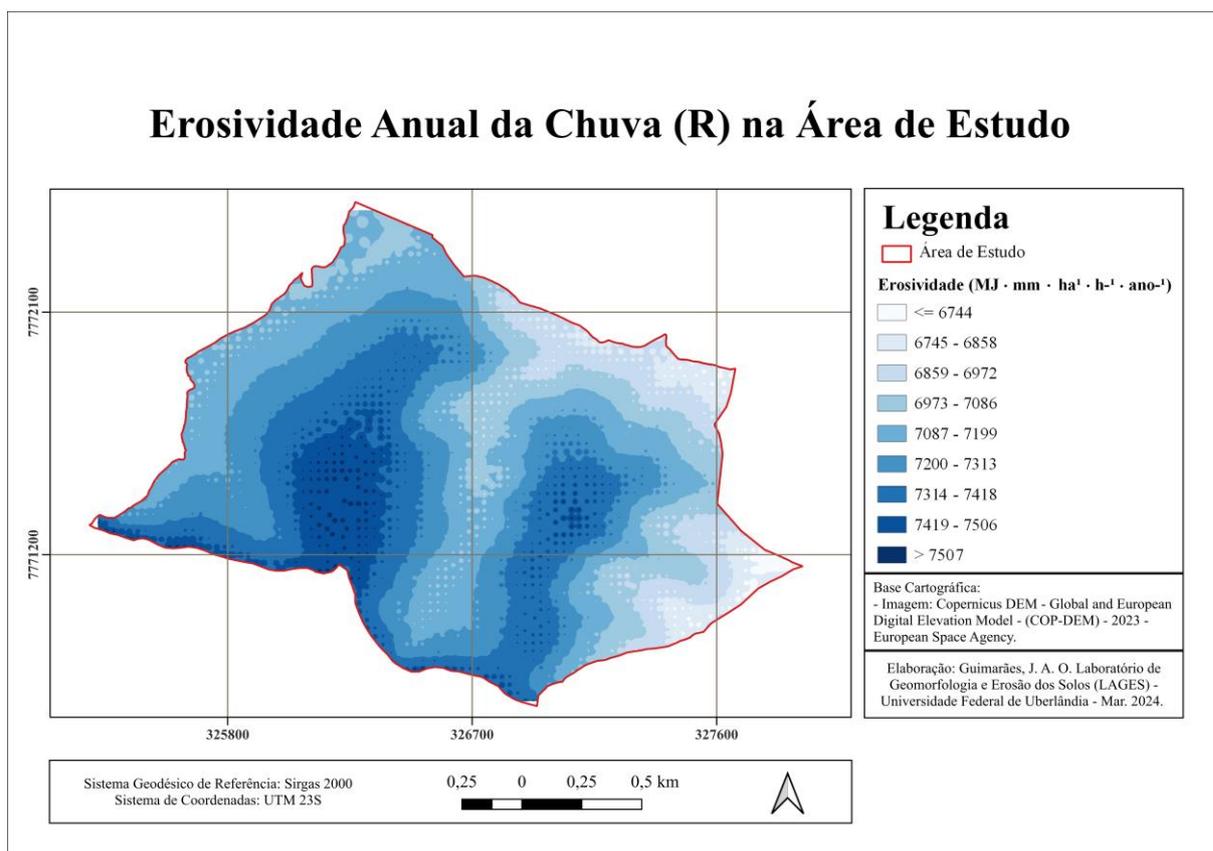
A perda média anual do solo foi calculada por meio da ferramenta “Calculadora Raster” do Software QGIS 3.28, efetuando o produto entre os fatores R, K, LS e CP, como demonstrado anteriormente.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Fator Erosividade da Chuva - R

A figura 12 representa os valores da erosividade anual da chuva (Fator R) distribuído espacialmente para toda extensão da área de estudo. Calculados a partir da metodologia desenvolvida por Mello *et al.* (2013), os valores do fator erosividade da chuva na área variaram entre 6630 e 7615 MJ·mm/ha·h.

**Figura 13** - Mapa de Erosividade Anual da Chuva (R) na Área de Estudo



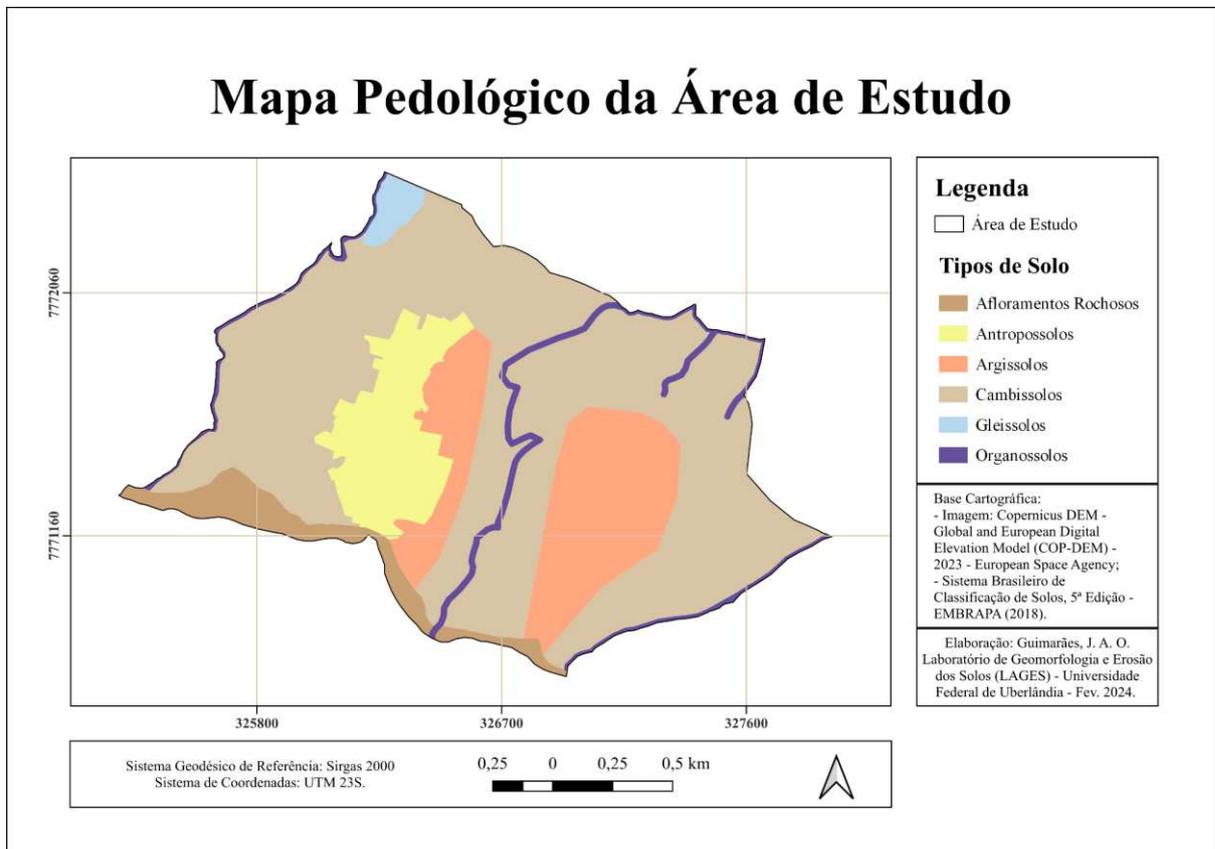
Elaboração: autor (2024).

Os valores encontrados mostram que a erosividade das chuvas na área é classificada como média-forte e forte, conforme interpretado por Carvalho em 1994 (Tabela 3). Essa classificação indica um potencial significativo de erosão do solo na área.

## 7.2 Fator Erodibilidade dos Solos - K

Utilizando o software QGIS, elaborou-se um mapa pedológico da região de estudo, integrando as informações obtidas em campo e a interpretação da paisagem.

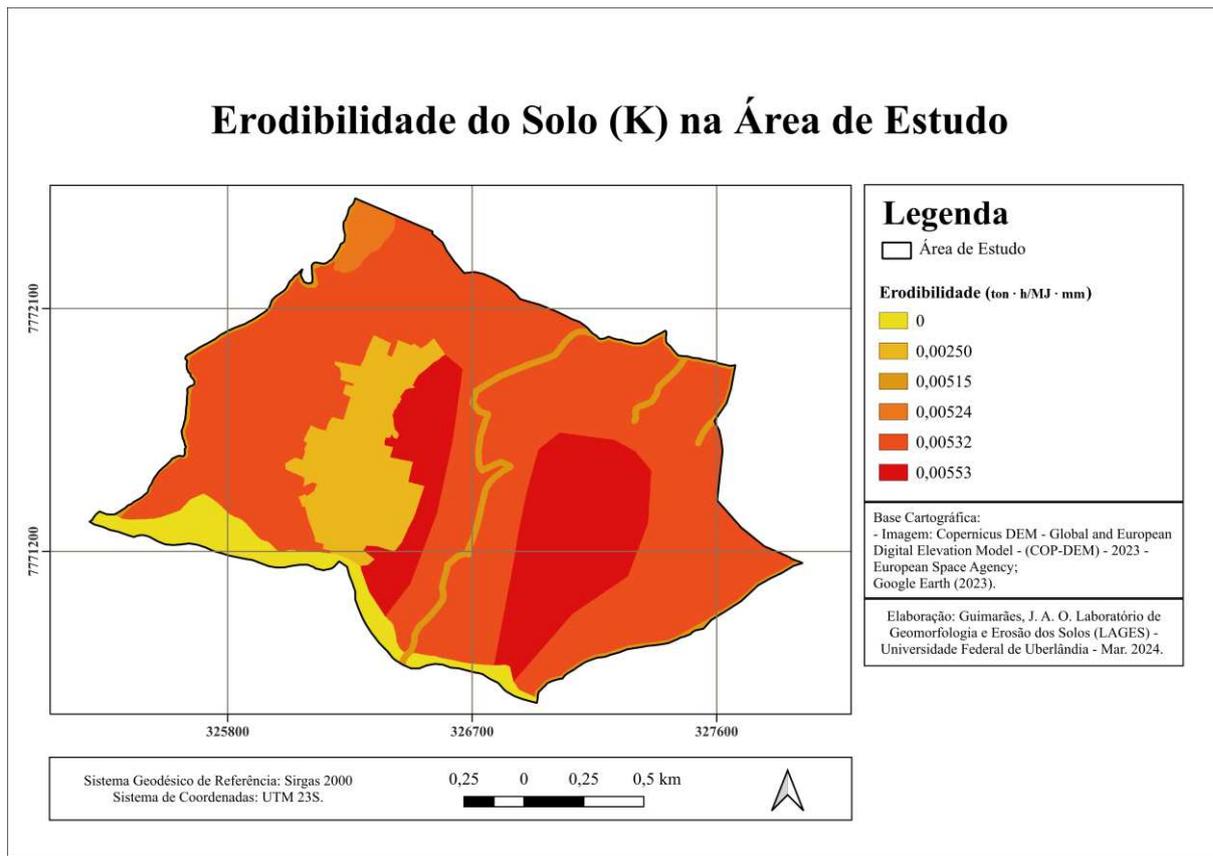
Figura 14 - Mapa Pedológico da Área de Estudo



Elaboração: autor (2024).

Conforme a figura 13, que traz os tipos de solos e sua distribuição dentro da área de estudo, foram identificadas 5 categorias distintas de solos juntamente com afloramentos rochosos. A partir da coleta das amostras, o processo laboratorial de obtenção da textura e a utilização da equação desenvolvida por Denardin (1990) e adaptada por Lima et. al (2007) para obtenção da erodibilidade dos solos (Fator K), foram obtidos 6 valores.

Figura 15 - Mapa de Erodibilidade do Solo (K) na Área de Estudo



Elaboração: autor (2024).

Os valores de erodibilidade desses tipos de solo obtidos variaram de 0,00250 a 0,00553 ton·h/MJ · mm. Com base na classificação estabelecida por Carvalho (1994), tabela 4, pode-se inferir que todos os tipos de solo na área de estudo apresentam uma erodibilidade baixa, indicando uma menor suscetibilidade à erosão hídrica. Isso sugere que esses solos possuem características físicas que os tornam mais resilientes ao escoamento de água.

Os afloramentos rochosos tiveram sua erodibilidade definida como 0, devido ao fato de serem muito resistentes à erosão física causada pela chuva e não contribuem significativamente para a produção de sedimentos. Sua disposição espacial pode ser visualizada na figura 14.

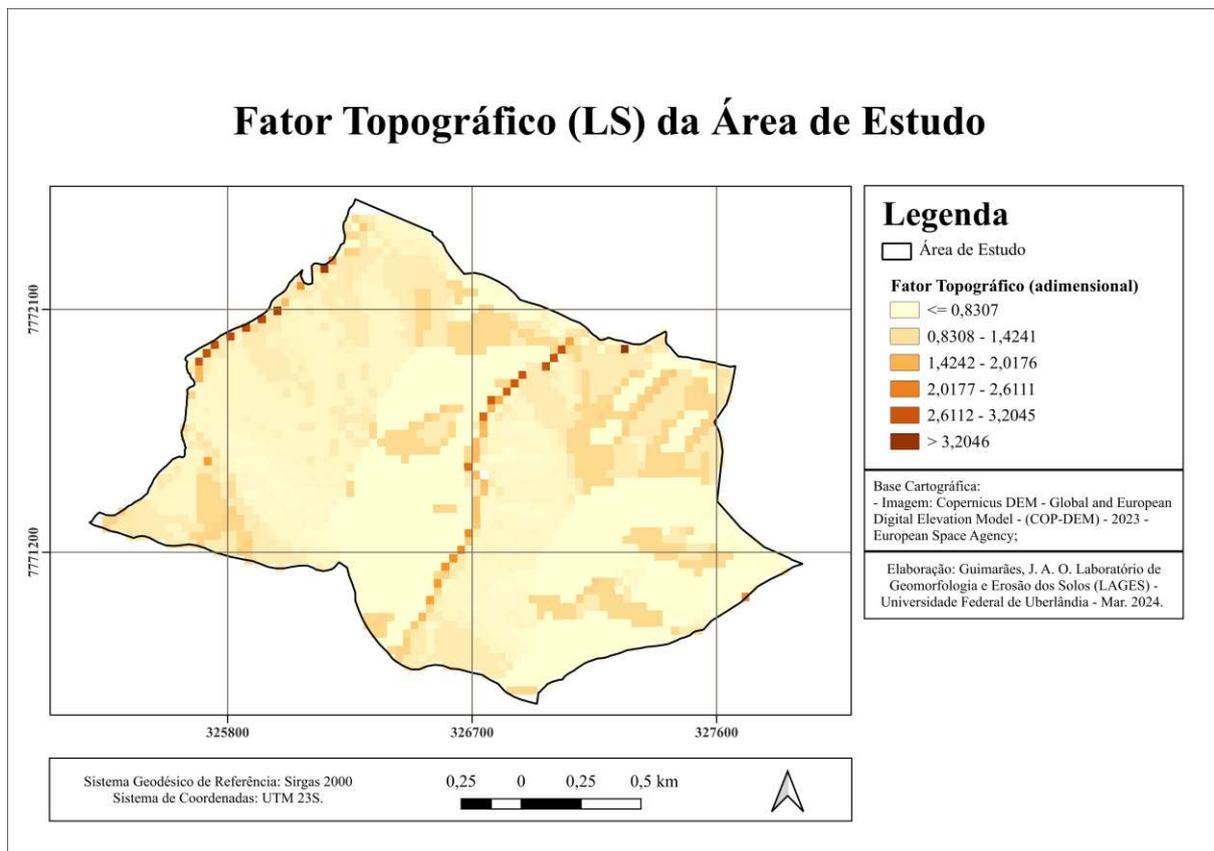
### 7.3 Fator Topográfico (LS)

Os valores de comprimento de rampa (L) foram baixos, apresentando valores entre 0,014 e 0,233, onde os maiores valores foram encontrados próximos aos cursos hídricos. O fato de o comprimento de rampa apresentar valores baixos implica em um menor acúmulo de precipitação e menor velocidade de escoamento.

Quanto aos valores do fator de declividade (S), esses variam muito pouco, estando na faixa de 16,29 a 16,30, o que indica uma pequena variação na inclinação do terreno dentro da área estudada. Isso sugere que a topografia da área apresenta poucas variações significativas, o que influencia diretamente na distribuição da água da chuva, afetando a velocidade e a quantidade de escoamento superficial.

A multiplicação dos fatores comprimento de rampa (L) e declividade (S) resultou no fator topográfico (LS) retratado na figura 15. A variação desse fator foi observada entre 3,79 e 0,23, com a maior parte da extensão da área empregada apresentando valores entre 0,23 e 2.

**Figura 16** - Mapa do Fator Topográfico (LS) da Área de Estudo



Elaboração: autor (2024).

Conforme destacado por Pinheiro *et al.* (2014), todos os valores de LS acima de 1,5 são considerados significativos em termos de potencial de erosão do solo. Isso implica que uma grande parte da bacia em estudo apresenta valores consideráveis de potencial erosivo, o que sugere uma suscetibilidade significativa à erosão.

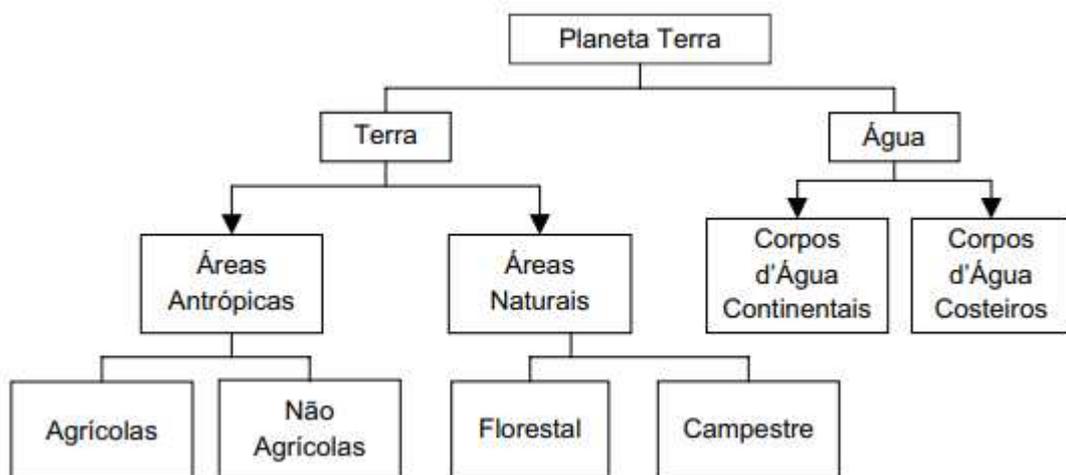
#### 7.4 Uso e Ocupação do Solo e Fator uso, manejo e práticas conservacionistas do solo – CP

A elaboração dos mapas de uso e ocupação do solo para a área de estudo compreende a categorização de nove classes distintas, cada uma representando diferentes características de cobertura. A categorização dessas classes proporciona uma visão abrangente e pormenorizada da diversidade de usos do solo, além de representar visualmente suas mudanças nesse período de 23 anos, como pode ser visto na figura 18.

As diretrizes primordiais para a demarcação dessas categorias, visando concisão e acessibilidade, basearam-se no Manual Técnico de Uso da Terra (2006) do IBGE. Este manual estabelece princípios fundamentais para apresentar informações territoriais de maneira clara e compreensível, atendendo a um amplo espectro de usuários em diversas escalas, desde regional e estadual até local. Isso possibilita comparações significativas entre as regiões ao longo do tempo.

Procurou-se cartografar a diversidade do território em consideração, adotando uma abordagem compatível com a escala, o tamanho da menor área a ser mapeada, a fonte primária de dados e as exigências inerentes ao escopo do trabalho. A terminologia empregada visou a clareza e foi concebida com base no esquema teórico da cobertura terrestre, conforme delineado no Manual Técnico de Uso da Terra (2006) e representado na figura 16.

**Figura 17** - Esquema teórico de construção de uma nomenclatura da cobertura terrestre



Fonte: Manual Técnico de Uso da Terra, IBGE (2006).

A atribuição das paletas de cores a cada classe também foi fundamentada no Manual Técnico de Uso da Terra (2006), o qual apresenta uma referência de cores em formato RGB para a categorização das classes de uso e ocupação do solo. Conforme estabelecido no referido manual, a metodologia segue padrões internacionais de padronização para a representação visual das diferentes classes, que podem ser conferidas na figura 17.

**Figura 18** - Tabela de Cores RGB para atribuição em Classes de Uso e Ocupação do Solo

1  Áreas Antrópicas Não-Agrícolas	Área Urbanizada	Mineração		
	1.1	1.2		
	R = 255 G = 168 B = 192	R = 173 G = 137 B = 205		
2  Áreas Antrópicas Agrícolas	Lav. Temporária	Lav. Permanente	Pastagem	Silvicultura
	2.1	2.2	2.3	2.4
	R = 255 G = 255 B = 0	R = 255 G = 214 B = 0	R = 205 G = 137 B = 0	R = 205 G = 173 B = 0
3  Áreas de Vegetação Natural	Florestal	Campestre		
	3.1	3.2		
	R = 115 G = 168 B = 0	R = 214 G = 255 B = 168		
4  Água	Corpo d'água Continental	Corpo d'água Costeiro		
	4.1	4.2		
	R = 235 G = 255 B = 255	R = 153 G = 194 B = 230		

Fonte: Manual Técnico de Uso da Terra, IBGE (2006).

A partir dessa abstração, as classes e as nomenclaturas para o levantamento do uso e da cobertura da terra foram organizadas. Foram estabelecidas, portanto: Área Urbana (edificações); Áreas verdes urbanas (praça); Estradas de chão; Estradas de bloquetes (concreto); Pastagem/gramados; Áreas Agrícolas; Matas (de galeria); Vegetação campestre (campos limpos e campos sujos); e Solos Expostos.

### **7.4.1 Área Urbana**

Esta classe engloba construções que abrangem uma variedade de edifícios, que na área de estudo variam desde residências até estruturas comerciais. Para referida área, essa categoria reflete o desenvolvimento e uma concentração populacional um pouco mais adensada que conforma principalmente os aspectos do arraial de São João Batista da Canastra.

Apesar da classificação abrangente da área de estudo como zona rural, conforme a definição do IBGE (2023), que delimita zona urbana como englobando exclusivamente sedes de municípios (cidades) e de distritos (vilas), optou-se pela realização dessa distinção urbano/rural com o propósito de destacar de forma mais acentuada as características intrínsecas dos fatores submetidos à análise.

Essa abordagem metodológica visa proporcionar uma compreensão mais refinada e específica dos elementos estudados, considerando as nuances e particularidades presentes na região em questão, mesmo dentro da categoria geralmente classificada como zona rural.

### **7.4.2 Áreas Verdes Urbanas**

Representa espaços públicos intraurbanos que, de acordo com o Art. 8º, § 1º, da Resolução CONAMA Nº 369/2006, são caracterizados por desempenhar funções ecológicas, paisagísticas e recreativas, contribuindo para aprimorar a qualidade estética, funcional e ambiental da cidade.

Na área de estudo em questão, essa categoria é representada principalmente pela categoria praça, que serve como elemento para a interação social e o aprimoramento do ambiente urbano.

### **7.4.3. Estradas de Chão**

Designa vias não pavimentadas, frequentemente compostas essencialmente por terra (solo exposto). Essas desempenham um papel crucial na conectividade e acessibilidade em áreas rurais e agrícolas, compondo a principal forma de estrada encontrada na área de estudo.

#### **7.4.4 Estradas de Bloquetes**

Refere-se a vias pavimentadas utilizando bloquetes de concreto como material de revestimento. Essas estradas fornecem uma infraestrutura mais robusta, sendo encontradas na parte central da área urbanizada, representada pelo Arraial de São João Batista da Canastra.

#### **7.4.5 Pastagem/gramados**

Compreende áreas cobertas por vegetação rasteira destinada ao pastoreio ou espaços gramados em ambientes urbanos. Estas áreas são frequentemente associadas à atividade pecuária, lazer e estética dos espaços urbanos.

#### **7.4.6 Áreas Agrícolas**

Abrange terrenos dedicados à prática agrícola. Em relação à área de estudo, essa categoria é constituída principalmente por pequenas lavouras temporárias, conforme dados disponibilizados pelo site de Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, IDE - Sisema (2020).

#### **7.4.7 Matas de Galeria**

Segundo Ribeiro *et al.* (2001), a Mata de Galeria representa uma formação florestal que acompanha as margens de rios de pequeno porte e córregos nas áreas elevadas do Brasil Central. Essa vegetação cria corredores densos (galerias) ao longo do curso d'água, geralmente situando-se nos vales profundos ou nas nascentes de drenagem, onde os cursos d'água ainda não desenvolveram um canal definitivo. Comumente, essa mata encontra-se cercada por faixas de vegetação não florestal em ambas as margens, e frequentemente ocorre uma transição abrupta para formações savânicas e campestres.

#### **7.4.8 Vegetação Campestre**

Conforme elucidado por Eiten (1994) e Henriques (2005), o campo limpo se caracteriza por uma fisionomia marcada por gramíneas, com uma cobertura reduzida de arbustos e a

ausência de árvores. Em contraste, o campo sujo corresponde a uma fisionomia onde gramíneas e arbustos predominam, havendo uma cobertura de árvores, contudo, em níveis mais baixos.

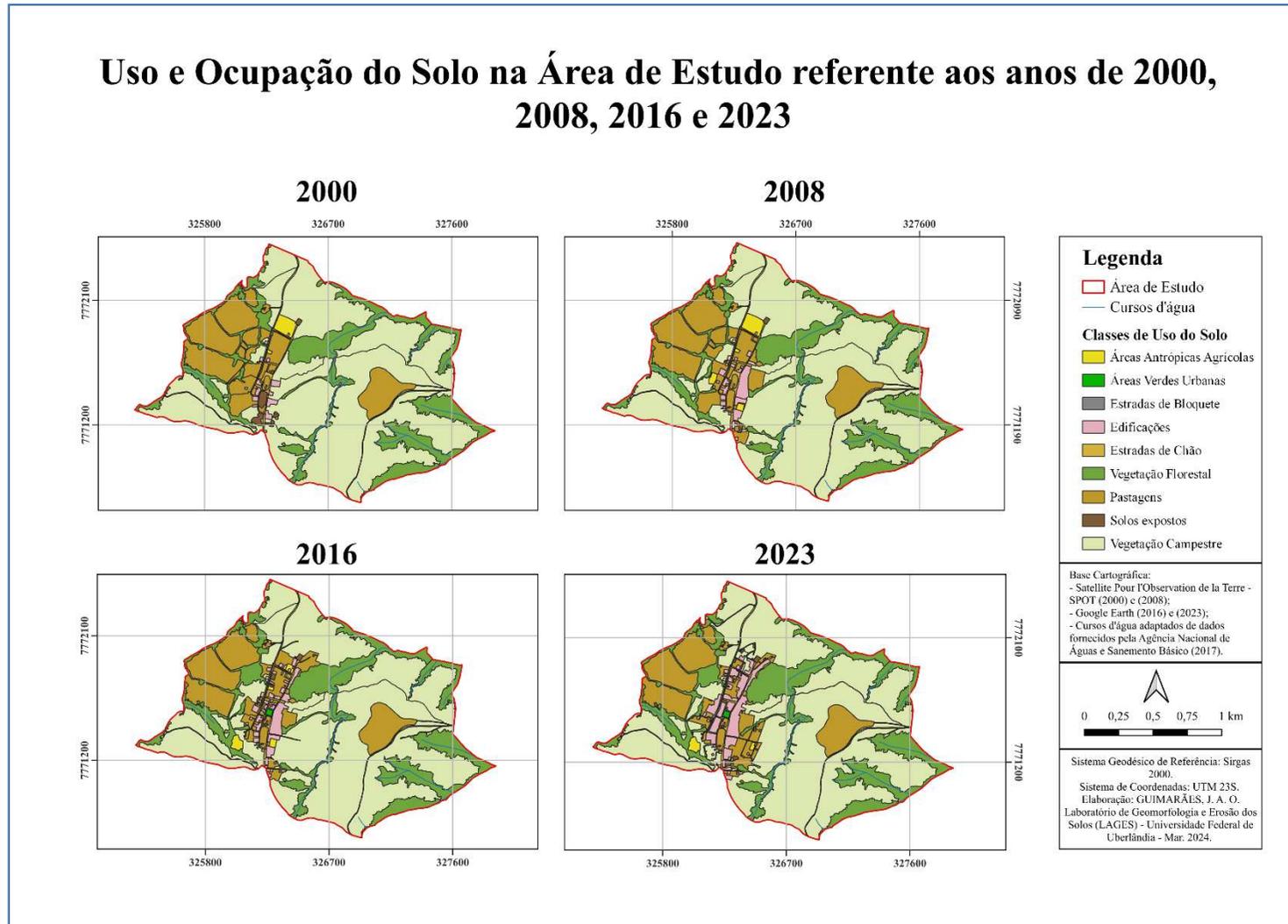
As fitofisionomias de campo limpo e campo sujo foram englobadas em uma única classe para o cálculo da EUPS-R na área de estudo. Essa decisão é fundamentada na similaridade, em que ambas as fitofisionomias apresentam características análogas no que diz respeito ao potencial de erosão do solo, atribuídas à prevalência de gramíneas em ambas as categorias.

Essa abordagem técnica é respaldada pela convergência de características hidrossedimentares entre as fitofisionomias, o que simplifica o processo de modelagem e análise. A homogeneização dessas classes considera a natureza predominante das gramíneas em ambas, contribuindo para uma representação mais eficaz do potencial erosivo na área de estudo, sem a necessidade de distinção pormenorizada entre campo limpo e campo sujo.

#### **7.4.9 Solo exposto**

Dentro das categorias definidas para os mapas de uso e ocupação do solo, foi incluída a categoria "solo exposto". Esta é caracterizada pela ausência de cobertura vegetal, tornando o solo mais vulnerável a processos erosivos. Conforme ressaltado por Marinheski (2016), quando exposto, o solo recebe o impacto direto das gotas de chuva, resultando na desagregação de suas partículas e aumentando sua suscetibilidade ao arraste causado pelo escoamento superficial da água.

**Figura 19** - Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Área de Estudo referente aos anos de 2000, 2008, 2016 e 2023



Elaboração: autor (2024).

#### 7.4.10 Atribuição do Fator CP

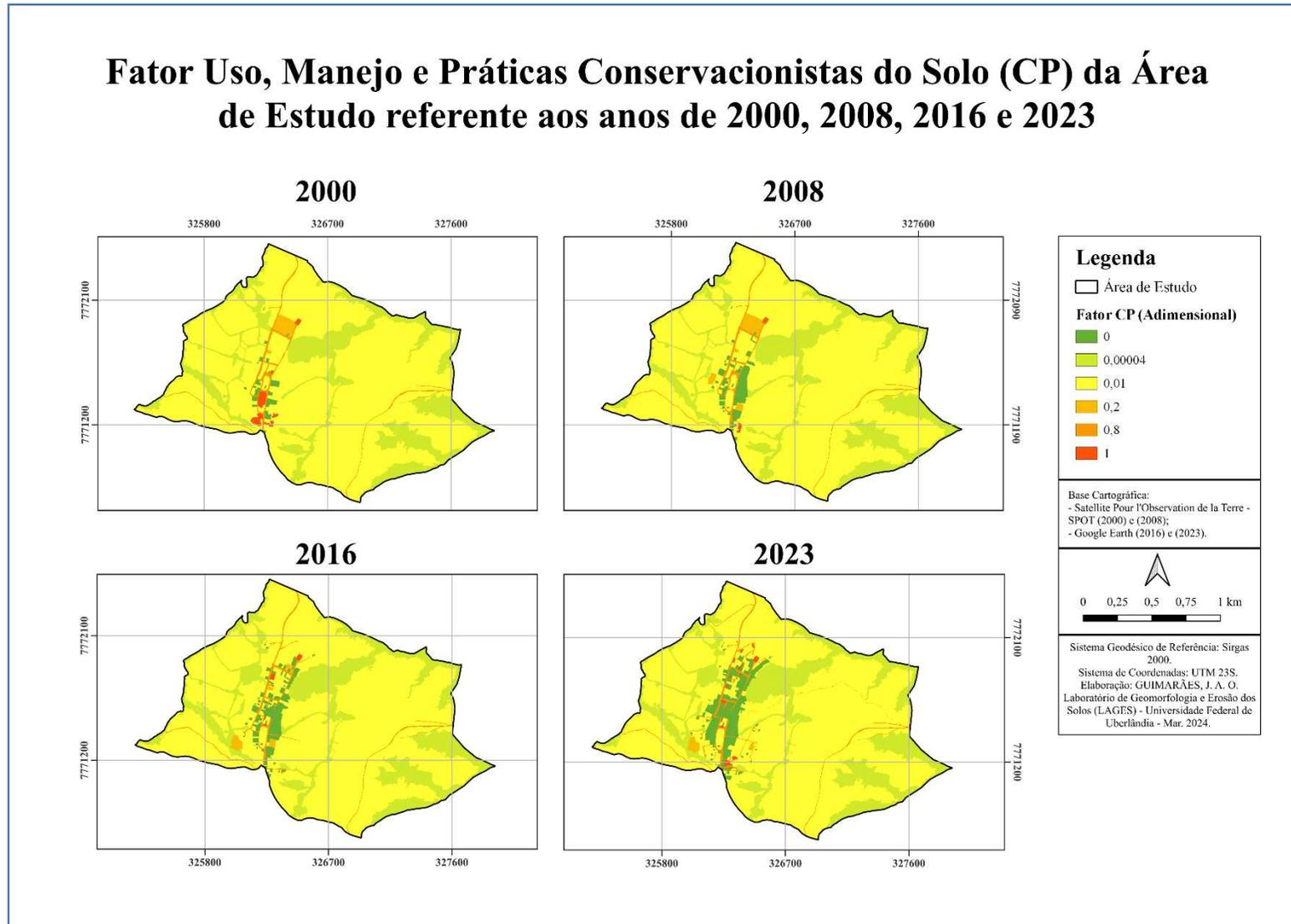
Dentro da área de estudo, a classificação das diferentes classes de uso e cobertura do solo em termos do fator CP foi realizada com base na estrutura proposta por Stein *et al.* (1987), com adaptações específicas para contemplar características locais, como estradas de chão, estradas de cimento e a área verde urbana (extremamente impermeabilizada). Como resultado, foram estabelecidas seis classes distintas para o fator CP.

Os valores mais elevados de CP estão associados às classes que apresentam pouca ou nenhuma cobertura de solo, indicando uma maior suscetibilidade a processos erosivos. Essas áreas, caracterizadas por uma exposição direta do solo, são mais propensas à erosão devido à ausência de proteção oferecida pela vegetação, como é o caso dos solos expostos e das estradas de chão.

Por outro lado, os valores mais baixos de CP são observados em áreas onde os processos erosivos são menos intensos. Isso inclui áreas cobertas por vegetação arbórea, que oferece proteção ao solo por meio de sua cobertura vegetal, e áreas urbanas edificadas e cimentadas, onde a presença de superfícies impermeabilizadas impede a erosão do solo causada por processos naturais.

A distribuição espacial dos valores de CP dentro da área de estudo para cada um dos anos analisados pode ser conferida na figura 19.

**Figura 20** - Mapa do fator uso, manejo e práticas conservacionistas do solo (CP) da Área de Estudo referente aos anos de 2000, 2008, 2016 e 2023



Elaboração: autor (2024).

**Tabela 9** - Área em km<sup>2</sup> dos diferentes valores de CP da Área de Estudo para os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023

Valor CP	Área (km <sup>2</sup> )			
	2000	2008	2016	2023
0	0,017784	0,044048	0,065388	0,105683
0,00004	0,517227	0,51993	0,548545	0,551538
0,01	1,938011	1,914278	1,872918	1,820524
0,2	0,017505	0,023604	0,013125	0,008554
0,8	0,039635	0,040249	0,041628	0,050285
1	0,015243	0,003297	0,003748	0,008777

Elaborado pelo autor (2024).

**Tabela 10** - Mudança percentual de cada valor de CP da Área de Estudo ao longo do período de 2000 até 2023

Valor de CP	Mudança (%)
0	493,65
0,00004	6,62
0,01	-6,05
0,2	-51,23
0,8	26,92
1	-42,58

Elaborado pelo autor (2024).

Quatro categorias de cobertura do solo - Áreas Verdes Urbanas, Corpos d'água, Edificações e Estradas de Cimento - foram atribuídos de valor de CP equivalente a zero. Inicialmente, apresentavam, na área de estudo, uma área de 0,017784 km<sup>2</sup>, e, ao longo do período analisado, passaram por aumento percentual de 493,65% nesse valor, indicando uma rápida expansão das áreas urbanizadas.

Este aumento na cobertura do solo urbano tem implicações importantes para a erosão do solo e a qualidade da água. A expansão das edificações e das estradas de cimento leva a uma maior impermeabilização do solo, resultando em um aumento na escorrência superficial e na erosão do solo. Além disso, a redução das áreas verdes limita a capacidade de infiltração do solo e a regulação do fluxo de água, aumentando a ocorrência de erosão laminar nas imediações.

Para a categoria de Áreas Agrícolas, foi atribuído um valor de CP de 0,2, representando a extensão das culturas temporárias. Ao analisar a mudança percentual no valor de CP ao longo

do período, observou-se uma redução significativa de -51,23%, o que indica uma diminuição na extensão das áreas agrícolas durante o período de estudo.

Os dados fornecidos mostram que as áreas agrícolas, diminuíram de 0,017505 km<sup>2</sup> para 0,008554 km<sup>2</sup> durante o período analisado. Essa diminuição na extensão das áreas agrícolas pode ser atribuída a fatores como urbanização e mudanças no uso da terra.

Houve também mudança na cobertura do solo relacionada às estradas de chão, representadas pela categoria de valor de CP igual a 0,8, durante o período de análise. Os dados fornecidos revelam um aumento na extensão das estradas de chão, passando de 0,039635 km<sup>2</sup> para 0,050285 km<sup>2</sup> ao longo do período estudado. Esse aumento na área coberta por estradas de chão tem implicações significativas para o ambiente.

O aumento das estradas de chão pode intensificar a erosão laminar de várias maneiras. Primeiramente, a construção das estradas muitas vezes envolve a remoção da cobertura vegetal nativa, deixando o solo exposto à ação direta da chuva. Sem a proteção oferecida pela vegetação, o solo se torna mais suscetível à erosão, especialmente durante eventos de precipitação intensa.

Além disso, as estradas de chão podem alterar o padrão natural de escoamento da água da chuva, concentrando o fluxo de água em determinadas áreas e aumentando assim a pressão erosiva sobre o solo. As erosões resultantes podem criar ravinas e sulcos, agravando ainda mais o problema.

A área da vegetação florestal, representada por CP igual à 0,0004 aumentou de 0,517227 km<sup>2</sup> para 0,551538 km<sup>2</sup> durante o período estudado, representando uma mudança percentual positiva de 6,62%. Esse aumento na extensão da vegetação florestal é um indicador positivo de conservação ambiental e pode ser atribuído a fatores como iniciativas de reflorestamento, conservação de áreas naturais e silvicultura.

A vegetação florestal desempenha um papel fundamental na proteção do solo contra a erosão laminar devido a uma série de características e mecanismos específicos. Em primeiro lugar, a cobertura fornecida pela vegetação, incluindo folhas, galhos e copas das árvores, cria uma barreira física que diminui o impacto das gotas de chuva na superfície do solo. Isso reduz a energia cinética da água da chuva e minimiza o transporte de sedimentos pela superfície do solo.

Ainda, as raízes das árvores desempenham um papel crucial na estabilização do solo. Essas penetram profundamente nesse corpo natural, criando uma rede tridimensional que ajuda a prender as partículas do solo e aumentar sua coesão, o que torna o solo menos suscetível ao deslocamento pela água da chuva, reduzindo assim o risco de erosão laminar.

A variação na cobertura do solo representada pelo valor de CP de 0,01, que se refere à área de pastagem/gramado e vegetação campestre, apresentou uma diminuição de 1,938011 km<sup>2</sup> para 1,820524 km<sup>2</sup> ao longo do período de análise, representando uma mudança percentual negativa de -6,05%. Esta redução na extensão das áreas de pastagem/gramado pode ser influenciada por mudanças nas práticas agrícolas e urbanização.

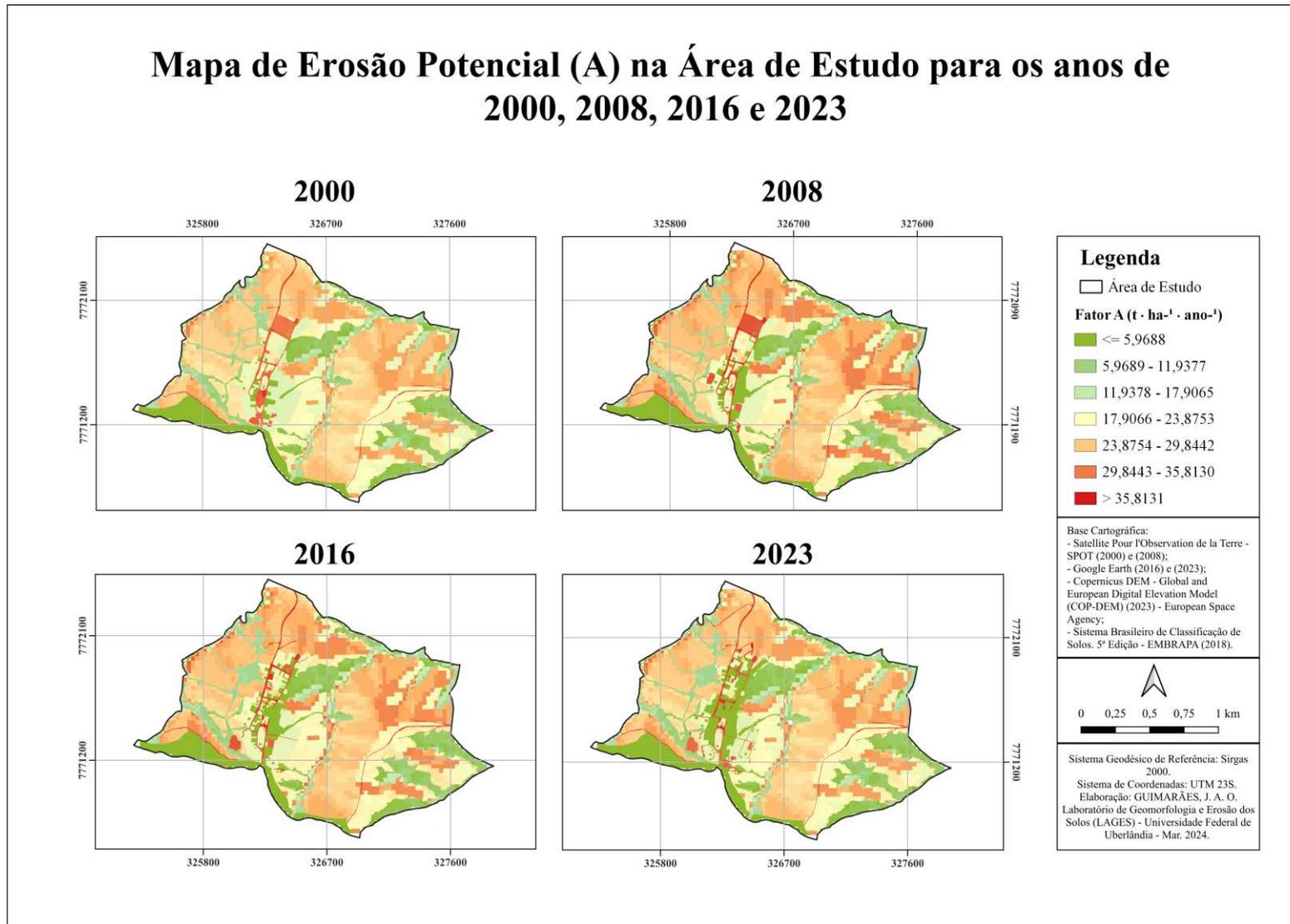
A variação na cobertura do solo representada pelo valor de CP de 1, que se refere à área de solo exposto, durante o período de 2000 a 2023, mostrou uma diminuição de 0,015243 km<sup>2</sup> para 0,008777 km<sup>2</sup>, representando uma mudança percentual negativa de -42,58%. Esta redução na extensão das áreas de solo exposto pode ser influenciada por, especificamente, mudanças no uso e manejo dos solos, como construção de casas, um campo de futebol e reflorestamento.

A diminuição na área de solo exposto tem implicações consideráveis em termos de conservação do solo, qualidade ambiental e sustentabilidade dos ecossistemas. O solo exposto é altamente suscetível à erosão, pois está desprovido de cobertura vegetal e é diretamente exposto à ação da água da chuva, o que pode resultar em perda significativa de solo e degradação de sua qualidade.

### **7.5 Perda média anual do solo – A**

Os valores da perda média anual do solo na Área de Estudo apresentaram uma variabilidade considerável ao longo do período analisado. O valor de A variou entre 0 e 40,95 (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>1</sup>) para o ano de 2000; 0 e 38,64 (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>1</sup>) para o ano de 2008; 0 e 39,18 (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>1</sup>) para o ano de 2016; e 0 e 41,78 (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>1</sup>) para o ano de 2023. A distribuição espacial dessas perdas de solo pode ser visualizada no mapa correspondente (Figura 20).

Figura 21 - Mapa de Erosão Potencial (A) na área de estudo para os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023



Elaboração: autor (2024).

Ao longo dos anos analisados, os valores do potencial de erosão para a Área de Estudo se situaram predominantemente nas classes de erosividade "nula e pequena", "moderada" e "média", conforme classificação proposta por Lanza (2011), encontrada na tabela 1. Essas classes abarcam uma ampla gama de valores de perda de solo e se encontram distribuídas ao longo da extensão da área em estudo. Isso sugere que, embora haja variações na intensidade da erosão ao longo do tempo, a maior parte da área apresenta níveis relativamente baixos a moderados de perda de solo, indicando uma vulnerabilidade controlada à erosão.

Considerando a classificação da perda do solo proposta por Lanza (2011), retratada na Tabela 1, foi possível obter a distribuição das classes de potencial à erosão da área de estudo para os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023.

**Tabela 11** - Distribuição das classes de potencial à erosão da Área de Estudo referente ao ano de 2000

<b>Valores de perda de solo (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Classes de erosividade (Lanza, 2011)</b>	<b>Área km<sup>2</sup></b>	<b>Área (%)</b>
A < 10	Nula a pequena	2,49363	99,46
10 < A < 15	Moderada	0,00399	0,16
15 < A < 50	Média	0,00962	0,38

Elaborado pelo autor (2024).

**Tabela 12** - Distribuição das classes de potencial à erosão da Área de Estudo referente ao ano de 2008

<b>Valores de perda de solo (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Classes de erosividade (Lanza, 2011)</b>	<b>Área km<sup>2</sup></b>	<b>Área (%)</b>
A < 10	Nula a pequena	2,49490	99,51
10 < A < 15	Moderada	0,00329	0,13
15 < A < 50	Média	0,00911	0,36

Elaborado pelo autor (2024).

**Tabela 13** - Distribuição das classes de potencial à erosão da Área de Estudo referente ao ano de 2016

<b>Valores de perda de solo (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Classes de erosividade (Lanza, 2011)</b>	<b>Área km<sup>2</sup></b>	<b>Área (%)</b>
A < 10	Nula a pequena	2,49346	99,45
10 < A < 15	Moderada	0,00359	0,14
15 < A < 50	Média	0,01021	0,41

Elaborado pelo autor (2024).

**Tabela 14** - Distribuição das classes de potencial à erosão da Área de Estudo referente ao ano de 2023

<b>Valores de perda de solo (t·ha<sup>-1</sup>·ano<sup>-1</sup>)</b>	<b>Classes de erosividade (Lanza, 2011)</b>	<b>Área km<sup>2</sup></b>	<b>Área (%)</b>
A < 10	Nula a pequena	2,48640	99,21
10 < A < 15	Moderada	0,00541	0,21
15 < A < 50	Média	0,01525	0,60

Elaborado pelo autor (2024).

Considerando que os fatores de erosividade da chuva (R), erodibilidade dos solos (K) e topográfico (LS) permaneceram constantes ao longo dos anos de 2000, 2008, 2016 e 2023, destaca-se que a variação na Perda Média Anual do Solo foi especialmente influenciada pelo fator Uso, Manejo e Práticas Conservacionistas do Solo (CP).

Conforme evidenciado na Figura 20, a qual apresenta a Perda Média Anual do Solo (A) na Área de Estudo durante os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023, evidencia-se que áreas caracterizadas por afloramentos rochosos, vegetação florestal e edificações exibiram as menores taxas de erosão. Este padrão revela a influência desses elementos contra a degradação do solo ocasionada pela erosão hídrica.

Os afloramentos rochosos oferecem uma superfície resistente à erosão, reduzem a suscetibilidade do solo adjacente à remoção por processos erosivos. Similarmente, a presença de cobertura vegetal, especialmente em forma de vegetação florestal, desempenha um papel crucial na mitigação da erosão, através da estabilização do solo, absorção de água da chuva e redução da velocidade do escoamento superficial. Por fim, as edificações, ao alterarem a dinâmica do terreno e proporcionarem proteção física às áreas circundantes, contribuem para a diminuição da erosão do solo.

As áreas caracterizadas por pastagens/gramados e vegetação campestre exibiram uma susceptibilidade que variou de pequena a moderada em relação aos valores de perda de solo, conforme definido pelas classes de erosividade estabelecidas por Lanza (2011). Nestas regiões, o fator topográfico emergiu como determinante na variação entre as referidas classes.

A observação de uma susceptibilidade relativamente baixa a moderada nessas áreas sugere uma influência mitigadora exercida pela cobertura vegetal predominante. A presença de pastagens/gramados e vegetação campestre pode reduzir o impacto direto das gotas de chuva no solo, promover a infiltração da água e estabilizar a superfície do solo, diminuindo assim o potencial de erosão.

Entretanto, a variação nas classes de susceptibilidade observada dentro dessas áreas sugere que outros fatores, como a topografia, desempenham um papel significativo na determinação dos níveis de perda de solo. Em terrenos mais inclinados ou com maior propensão ao escoamento superficial, a capacidade de retenção de solo pela vegetação pode ser comprometida, aumentando assim a vulnerabilidade à erosão.

Foi constatado que as regiões identificadas por solos expostos e estradas de chão apresentaram os mais elevados índices de potencial de perda de solo devido à erosão laminar, com essa vulnerabilidade sendo exacerbada em áreas caracterizadas por uma declividade acentuada. Na classificação proposta por Lanza (2011), essas foram caracterizadas como médias em todos os anos de estudo.

A exposição direta do solo, sem a devida proteção vegetal ou medidas de conservação, aumenta sua susceptibilidade à erosão laminar. Além disso, a ausência de um revestimento adequado e de práticas de drenagem adequadas em estradas de chão pode acelerar o escoamento superficial da água, contribuindo para a erosão dos solos circundantes. E a influência da declividade acentuada é crucial, visto que ela intensifica o processo de erosão laminar, facilitando o rápido escoamento da água sobre a superfície do solo, o que aumenta a sua capacidade erosiva.

Ao longo do período de análise do potencial erosivo na área de estudo, conforme registrado nas tabelas 11, 12, 13 e 14, observou-se uma tendência geral de redução gradual das áreas onde a erosividade era classificada como nula a pequena. Em contrapartida, houve um aumento progressivo das áreas classificadas como moderadas e médias.

Essa tendência foi verificada através da diminuição gradual das áreas com valores de perda de solo correspondentes à erosividade nula a pequena, ao passo que se constatou um aumento nas áreas com valores de perda de solo associados à erosividade moderada e média, conforme evidenciado nos registros das tabelas.

A exceção a esse padrão foi observada especificamente na transição do ano de 2000 para o ano de 2008. Nesse intervalo, foi registrada uma diminuição significativa das áreas com o fator de uso, manejo e práticas conservacionistas do solo (CP) igual a 1, indicativo de áreas de solos expostos, conforme documentado na Tabela 9. Essa diminuição expressiva das áreas de solos expostos pode ser atribuída à implementação e edificações durante esse período.

Com o avanço da urbanização na região do Arraial de São João Batista da Canastra, houve um aumento significativo na extensão das estradas de chão, tanto dentro da vila quanto em suas adjacências. Este fenômeno emergiu como um fator determinante no aumento do potencial de perda de solos dentro da área de estudo. Conforme documentado na Tabela 10, o

fator de uso, manejo e práticas conservacionistas do solo (CP) correspondente a essas áreas experimentou um incremento de 26%.

Essa expansão das estradas de chão é um reflexo direto da intensificação das atividades antrópicas. A presença de estradas de chão contribui para o aumento da compactação do solo, a interrupção da cobertura vegetal e a modificação do escoamento superficial da água, resultando em um incremento no potencial de erosão do solo na área de estudo.

**Figura 22** - Ravina na lateral de uma estrada rural do Arraial de São João Batista da Canastra, São Roque de Minas - MG



Fonte: autor (2024).

**Figura 23** - Erosão hídrica na proximidade de uma estrada rural do Arraial de São João Batista da Canastra, São Roque de Minas - MG



Fonte: autor (2024).

As figuras 21 e 22 ilustram bem os resultados da erosão hídrica influenciados pela presença de estradas rurais (de chão), sem um devido manejo. Ambas mostram diferentes estados de erosão nas laterais desse tipo de via, em que na primeira já há o aparecimento de uma ravina, que são sulcos que são provocados por escavamentos produzidos pelo escoamento superficial.

A evolução de ravinas, conforme descrito por Horton (1945 *apud* GUERRA, 1997), está fundamentada no fenômeno em que a quantidade de precipitação supera a capacidade de infiltração do solo. Quando isso ocorre, a água se acumula nas depressões ou micro topografias presentes na superfície do solo. À medida que essa água se acumula, forma-se um fluxo contínuo conhecido como sheetflow, que se desloca pela encosta do terreno. Com o tempo, esse sheetflow pode se concentrar em determinadas áreas, aumentando sua velocidade e erosão, o que pode eventualmente levar à formação de ravinas.

Em resumo, o processo começa com a acumulação de água nas depressões do solo devido à incapacidade de infiltração, seguida pelo escoamento laminar (sheetflow) que percorre a encosta. Com o tempo, esse sheetflow concentrado pode erodir o solo e formar ravinas, que são sulcos mais profundos e definidos na paisagem. Esse processo é uma ilustração da erosão hídrica laminar, em que a água desempenha um papel significativo na formação e evolução das feições do terreno.

. Após períodos de chuva, as estradas rurais tendem a se transformar em canais temporários para o escoamento da água da chuva. Isso ocorre porque as estradas apresentam uma superfície impermeável, ou apenas parcialmente permeável, que direciona a água da chuva ao longo de seu leito em direção às áreas mais baixas.

À medida que a água da chuva se acumula e se desloca ao longo das estradas, ela tende a se concentrar em determinados pontos, formando fluxos de água que podem se tornar bastante significativos, especialmente em terrenos com declives acentuados. Esses fluxos de água carregam consigo sedimentos de materiais presentes nas estradas e também dos barrancos.

A ausência de planejamento e a falta de manutenção adequada das estradas rurais no Brasil são questões críticas que contribuem significativamente para a elevada incidência de erosão nessas áreas. Muitas estradas rurais são construídas sem considerar as características naturais do relevo e a vulnerabilidade à erosão, o que resulta em infraestruturas mal projetadas e suscetíveis a danos causados pela água da chuva. Para efeito de comparação, conforme indicado por Anjos Filho (1998), cerca de metade das perdas de solo no estado de São Paulo são atribuídas ao desprendimento e ao arraste das partículas do solo provenientes das estradas.

Segundo Marinheski (2017), um dos principais desafios enfrentados pelos processos erosivos em estradas rurais reside nos sistemas de drenagem. O acúmulo excessivo de fluxos de água na pista da estrada, combinado com declives pronunciados, amplia o potencial de remoção e transporte de materiais. Além disso, a concentração de umidade reduz a capacidade de resistência do solo, tornando-o mais suscetível aos processos erosivos.

**Figura 24** - Ocorrência de escoamento hídrico influenciado por solos expostos de caminhos rurais na vertente direita do Rio Araguari, São Roque de Minas - MG



Fonte: autor (2024).

**Figura 25** - Linha d'água efêmera resultante de evento chuvoso



Fonte: autor (2024).

**Figura 26** - Acúmulo de sedimentos decorrentes de evento chuvoso



Fonte: autor (2024).

As figuras 23, 24 e 25 destacam a influência das estradas e caminhos de terra no direcionamento do fluxo de água superficial e na mobilização de sedimentos. Na Figura 25, é

observado o escoamento de água influenciado pela exposição do solo. A Figura 26 ilustra uma linha d'água temporária, onde grande parte do fluxo de água é originado pelo escoamento superficial de uma via próxima. Por fim, a Figura 27 mostra o acúmulo de sedimentos após um evento de chuva, provavelmente provenientes principalmente das estradas rurais adjacentes.

As figuras fornecem uma representação visual da influência significativa das estradas de terra no fluxo de água e transporte de sedimentos em ambientes naturais. A exposição do solo nas estradas rurais cria superfícies suscetíveis à erosão, especialmente durante eventos de precipitação intensa. O escoamento superficial resultante desses eventos é visível nas imagens, onde a água flui ao longo das vias, arrastando consigo sedimentos.

É ilustrado, portanto, a dinâmica da erosão laminar. À medida que a água se move pela superfície do solo exposto, ela carrega consigo partículas de solo, contribuindo para a erosão gradual da camada superficial. Além disso, a formação de linhas d'água temporárias, como mostrado na Figura 26, destaca como o escoamento superficial influenciado pelas estradas pode aumentar o volume de água que flui para os corpos d'água próximos.

O acúmulo de sedimentos após eventos de chuva, conforme ilustrado na Figura 27, demonstra a capacidade das estradas de terra em mobilizar material do solo e depositá-lo em áreas adjacentes, incluindo cursos d'água. Esse transporte de sedimentos pode, a depender das condições, resultar em assoreamento, afetando negativamente a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos.

Portanto, as imagens fornecem informações importantes sobre como as atividades humanas, como a construção e manutenção de estradas de terra, podem influenciar significativamente os processos erosivos e a dinâmica hidrossedimentar de um sistema, destacando a importância de práticas de manejo do solo e conservação ambiental para mitigar esses impactos.

## 8 CONCLUSÃO

O emprego da EUPS-R em conjunto com tecnologias de Sistemas de Informações Geográficas (GIS) oferece uma boa abordagem para a representação espacial e temporal do potencial de erosão do solo. Este enfoque permite a integração de dados quantitativos com informações geoespaciais, resultando em uma visualização detalhada e dinâmica do comportamento da erosão ao longo do tempo e do espaço e facilita a tomada de decisões em relação ao manejo da terra e à implementação de práticas de conservação.

Nesse contexto, o presente estudo se dedicou à análise da erosão do solo na região da parte alta da Serra da Canastra, abrangendo tanto áreas urbanizadas, representadas pelo Arraial de São João Batista da Canastra, quanto áreas rurais adjacentes. O principal objetivo deste trabalho foi quantificar a perda de solo devido à erosão hídrica ao longo do tempo, utilizando a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), em conjunto com o software QGIS, para os anos de 2000, 2008, 2016 e 2023.

Como resultado para o período de análise, os valores erosão potencial do solo na área de estudo apresentaram uma variabilidade considerável. Seu valor variou entre 0 e 40,95 ( $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ) para o ano de 2000; 0 e 38,64 ( $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ) para o ano de 2008; 0 e 39,18 ( $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ) para o ano de 2016; e 0 e 41,78 ( $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ) para o ano de 2023.

Foi observado que as áreas identificadas por solos expostos e estradas de terra apresentaram os maiores potenciais de perda de solo devido à erosão laminar, especialmente em regiões com declividades acentuadas. A exposição direta do solo, desprovido de cobertura vegetal ou medidas de conservação, aumenta sua suscetibilidade à erosão laminar. Além disso, a falta de revestimento adequado e práticas de drenagem acelera o escoamento superficial da água, contribuindo para a erosão dos solos ao redor.

Ao longo do período, foi observada uma tendência geral de redução gradual das áreas classificadas com erosividade nula a pequena. Em contrapartida, houve um aumento progressivo nas áreas com erosividade moderada e média. Essa tendência foi decorrente principalmente por variações no uso e cobertura da terra, influenciando diretamente nos valores de uso e manejo do solo e práticas conservacionistas (CP).

O processo de urbanização na região do Arraial de São João Batista da Canastra trouxe consigo um aumento expressivo na extensão das estradas de terra, tanto dentro da vila quanto em suas proximidades. Esse fenômeno emergiu como um fator determinante no aumento do potencial de perda de solos dentro da área de estudo, experimentando um crescimento de 26% em sua área.

A expansão das estradas de terra reflete diretamente a intensificação das atividades antrópicas. Essas estradas contribuem para a compactação do solo, a supressão da cobertura vegetal e a alteração do padrão de escoamento superficial da água, o que resultou em um aumento do potencial de erosão do solo na região analisada.

Ainda, levando em conta o contexto brasileiro, a falta de planejamento e a inadequada manutenção das estradas rurais são questões que contribuem significativamente para a alta incidência de erosão nessas áreas. Muitas vezes, essas estradas são construídas sem levar em conta as características naturais do terreno e a vulnerabilidade à erosão, o que resulta em infraestruturas mal projetadas e suscetíveis a danos causados pela água da chuva.

Uma forma eficaz de minimizar o processo de erosão hídrica em estradas de terra é a adoção de estruturas mitigadoras específicas. Um exemplo seria a implementação de sistemas que interceptem as águas provenientes do escoamento da própria estrada, bem como as águas pluviais oriundas de áreas adjacentes, que são então coletadas e direcionadas para estruturas projetadas para conter a erosão.

Essas medidas podem incluir a instalação de terraços embutidos e bacias de captação ao longo das estradas. Os terraços embutidos consistem em sulcos rasos construídos ao longo do leito da estrada, projetados para interceptar e desacelerar o escoamento da água, permitindo que ela seja infiltrada no solo e reduzindo a velocidade do fluxo superficial. Isso ajuda a prevenir a erosão do solo ao longo da estrada.

Além disso, as bacias de captação são estruturas projetadas para coletar e armazenar a água da chuva que se acumula ao longo da estrada e em áreas adjacentes. Essas são construídas com o objetivo de reduzir a velocidade do escoamento superficial e permitir a sedimentação de partículas de solo transportadas pela água., o que ajuda a evitar a erosão do solo e a reduzir o transporte de sedimentos para cursos d'água próximos.

Ao adotar essas medidas mitigadoras de erosão hídrica em estradas de terra, é possível reduzir significativamente os problemas de erosão e melhorar a sustentabilidade ambiental dessas áreas. Essas práticas não apenas protegem o solo e os recursos hídricos, mas também contribuem para a segurança das estradas e a preservação dos ecossistemas adjacentes.

Para o desenvolvimento do trabalho, a ciência geográfica desempenhou um papel fundamental, pois forneceu a estrutura e os métodos necessários para compreender a dinâmica espacial da erosão hídrica. A Geografia permitiu uma abordagem integrada e multidisciplinar, considerando não apenas os aspectos físicos do ambiente, como clima, solo e relevo, mas também os fatores humanos, como o uso da terra e as práticas agrícolas.

Ainda, forneceu as ferramentas para analisar e interpretar os diferentes fatores que influenciam a erosão do solo, incluindo aspectos climáticos, topográficos, pedológicos, e de uso da terra. A obtenção e análise de dados geográficos, como a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, o relevo e as práticas de manejo da terra, foram essenciais para calcular os valores potenciais de perda de solo ao longo do tempo.

Portanto, a capacidade de fornecer uma abordagem holística e integrada para o estudo da erosão hídrica, considerando tanto os aspectos naturais quanto os humanos do ambiente permitiu uma análise abrangente dos processos erosivos nesta região e forneceu informações valiosas para a gestão ambiental e agrícola. Isso destaca a relevância contínua da Geografia na compreensão e enfrentamento dos desafios ambientais contemporâneos.

## 9 REFERÊNCIAS

ANJOS FILHO, O. Estradas de terra. **Jornal o Estado de São Paulo**, São Paulo, Suplemento Agrícola, 29 abr. 1998.

BACK, A. J. Estimativas de perdas de solo por erosão hídrica por meio da Equação Universal de Perdas de Solo. **Boletim Técnico**, [S. l.], n. 210, 2023. Disponível em: <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/BT/article/view/1714>. Acesso em: 7 de mar. de 2024.

BASTOS, Cezar Augusto Burkert. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 303 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2978/000242000.pdf?sequence=1>. Acesso em: 04 de abr. de 2024.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 8ª ed. São Paulo: Icone, 2012, 355p.

BOUYOUCOS, G. J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 27, p. 738-741, 1935. Disponível em: <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj1935.00021962002700090007x>. Acesso em: 07 de abr. de 2024.

BRASIL. **Lei Federal N° 9.985, de 18 de julho de 2000**. Regulamenta o art. 225, § 1o, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19985.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm). Acesso em: 05 de abr. de 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 70355, de 3 de abril de 1972**. Diário Oficial da União.

Brasil. **Resolução CONAMA N° 369 de 28 de março de 2006**. Dispõe sobre os casos excepcionais, de utilidade pública, interesse social ou baixo impacto ambiental, que possibilitam a intervenção ou supressão de vegetação em Área de Preservação Permanente - APP. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2006\\_Res\\_CONAMA\\_369.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2006_Res_CONAMA_369.pdf). Acesso em: 08 de abr. de 2024.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.

CHAVES, Thiago Avelar. **Análise do Custo Econômico da Erosão em uma Bacia Hidrográfica Ocupada por Agricultura - Um Estudo de Caso da Bacia Bom Jardim - DF**. Orientador: Prof. Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes. 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia da Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2011. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/8813>. Acesso em: 11 de mar. de 2024.

CHAVES, Thiago Avelar *et al.* Mapa de Erodibilidade dos Solos da Bacia do Rio Jardim - DF. **Espaço & Geografia**, Brasília - DF, v. 13, ed. 2, p. 253 - 276, 2010. Disponível em:

<https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegeografia/article/view/39887/30994>. Acesso em: 16 de fev. de 2024.

CONFESSOR, Jefferson Gomes. **Dinâmica hidrogeomorfológica de vertentes do Chapadão do Diamante - Serra da Canastra – MG**. 2023. 231 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.70>. Acesso em: 8 de abr. de 2024.

DJOUKBALA, O., HASBAIA, M., BENSELAMA, O. *et al.* Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). **Model. Earth Syst. Environ.** 5, 725–743 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0562-6>. Acesso em: 20 de nov. de 2023.

EARTH DATA SEARCH. Disponível em: <https://search.earthdata.nasa.gov/>. Acesso em: 2 de abr. de 2024.

EITEN, G. Vegetação do Cerrado In: PINTO, M. N. (Ed.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas**. 2. ed. Brasília: UnB: SEMATEC, 1994b. p. 17-73

FAO. **Wischmeier and Smith Empirical Soil Loss Model (USLE)**, 1962. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/t1765e/t1765e0e.htm> Acesso: 10 de dez. de 2023.

FRASCARELI, Daniele *et al.* Utilização das geotecnologias para avaliação do potencial de erosão do solo na bacia hidrográfica do Rio Pirajibu-mirim, São Paulo, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, [s. l.], v. 50, n. 1, p. 1 - 14, 2023. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/PesquisasemGeociencias/article/view/129338>. Acesso em: 5 abr. 2024.

GOOGLE. Google Earth website. Disponível em: <http://earth.google.com/>. Acesso em: 05 de abr. de 2024.

GUEDES, F. C.; VIEGAS, J. A.; AGUIAR, M. C. P.. 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**, [S. l.], v. 11, n. 7, p. e40411730094, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i7.30094. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/30094>. Acesso em: 8 de fev. de 2024.

GUERRA, Antônio José Teixeira. Ravinas: processo de formação e desenvolvimento. **Anuário do Instituto de Geociências**, Rio de Janeiro - RJ, v. 20, p. 9-26, 4 abr. 2024. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/aigeo/article/view/6180/4777>. Acesso em: 4 de abr. de 2024.

HENRIQUES, R.P.B. 2005. Influência da história, solo e fogo na distribuição e dinâmica das fitofisionomias no bioma do Cerrado. In **Cerrado: Ecologia, Biodiversidade e Conservação** (J.C. Souza Silva & J.M. Felfili, eds.). Ministério do Meio Ambiente, Brasília, p.73-92.

IDE - SISEMA. Cobertura e uso da terra de Minas Gerais (IBGE, 2000 a 2020). IDE - SISEMA. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/api/records/5269f5df-a55f-4472-9ea8-7a85f6c19580>. Acesso em: 08 de abr. de 2024.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. ICMBio. Parque Nacional da Serra da Canastra. Disponível em: <https://sisva.sisicmbio.icmbio.gov.br/publico/unidade/3388/4/atrativos>. Acesso em: 05 de abr. de 2024.

LANZA, Daniel Santana. **Diagnóstico da erosão laminar na alta e média bacia do rio Paraopeba**. Orientador: Philippe Maillard. 2011. 151 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Departamento de Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-8MAPD4>. Acesso em: 7 de abr. de 2024.

LIMA, Herlander Mata. **Introdução à Modelação Ambiental: Erosão Hídrica**. Funchal (Portugal), 2010.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. **Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP)**. *Bragantia*, Campinas, v. 51, n. 2, 1992, p.189-196.

MACEDO, Fabrício Lopes de *et al.* **MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DO RIACHO JACARÉ - SE. RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise**, [S.l.], v. 24, mar. 2012. ISSN 2177-2738. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/26263>>. Acesso em: 16 de mar. de 2024. doi:<https://dx.doi.org/10.5380/raega.v24i0.26263>.

MACHADO, Marley Lamounier *et al.* Levantamento sistemático dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solos (USLE) para o delineamento de áreas com potencial erosivo da bacia PN1 – IGAM, Minas Gerais (resultados parciais). **XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal - RN, p. 7733-7739, 2009. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.18.00.04/doc/7733-7739.pdf>. Acesso em: 8 de fev. de 2024.

MANNIGEL, A. R.; E CARVALHO, M. DE P.; MORETI, D.; MEDEIROS, L. DA R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 24, p. 1335-1340, 30 abr. 2008. Acesso em: 05 de mar. de 2024.

MANUAL TÉCNICO DE USO DA TERRA. 3. ed. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2013. 171 p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>. Acesso em: 28 jan. 2024.

MARINHESKI, V. A EROSÃO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS NA BACIA DO RIO DO ATALHO EM CRUZ MACHADO – PR. **Boletim de Geografia**, v. 35, n. 2, p. 117-127, 1 dez. 2017. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/28802/pdf>. Acesso em: 31 de mar. de 2024.

MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S; NORTON, L. D. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. **Geoderma**, [s. l.], v. 202-203, p. 88 - 102, 2013.

MESSIAS, C. G.; FERREIRA, M. C. PARQUE NACIONAL DA SERRA DA CANASTRA: ASPECTOS FÍSICOS E SOCIOECONÔMICOS. *Revista da ANPEGE*, [S. l.], v. 15, n. 27, p. 71–112, 2020. DOI: 10.5418/RA2019.1527.003. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/8922>. Acesso em: 17 mar. 2024.

MATOS, Thiago Vieira da Silva. **Determinação de Áreas de Vulnerabilidade à Erosão Hídrica com Base na Equação Universal De Perda De Solo (USLE)**. Orientador: Prof. Dr. Jorge Luis Zegarra Tarqui. 2015. 116 p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.) - Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte - MG, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-A3FETB>. Acesso em: 2 dez. 2023.

MONTGOMERY, David R. Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Washington, D.C, v. 104, n. 33, p. 13268–13272, 5 abr. 2024. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.0611508104>. Acesso em: 5 de abr. de 2024.

MORGAN, R. P. C. **Vegetative-based technologies for erosion control**. In A. Stokes, I. Spanos, J. E. Norris, E. Cammeraat (Eds.), *Eco and ground bio-engineering: The use of vegetation to improve slope stability*. Dordrecht: Springer, p. 265–271, 2007.

NAZAR, Thallita Isabela Silva Martins. **O Chapadão do Diamante na Serra da Canastra/MG, Brasil: caracterização geomorfológica e análise integrada do meio físico a partir de dados multifontes**. Orientador: Silvio Carlos Rodrigues. 2018. 271 p. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/21251/3/ChapadaoDiamanteSerra.pdf>. Acesso em: 6 de abr. de 2024.

NAZAR, T. I. S. M.; RODRIGUES, S. C. RELEVO DO CHAPADÃO DO DIAMANTE, SERRA DA CANASTRA/MG, BRASIL: COMPARTIMENTAÇÃO E ANÁLISE A PARTIR DOS ASPECTOS GEOMORFOMÉTRICOS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. l.], v. 20, n. 1, 2019. DOI: 10.20502/rbg.v20i1.1300. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1300>. Acesso em: 6 de abr. de 2024.

NUNES, A. N., et al. (2011). Impactos do uso e tipo de cobertura do solo no escoamento superficial e erosão do solo em uma área marginal de Portugal. *Geografia Aplicada*, 31(2), 687-699. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.12.006>. Acesso em: 04 de abr. de 2024.

OLIVEIRA, Paulo Jerônimo Lucena de; GUEDES, Jânio Carlos Fernandes; SANTOS, José Yuri Gomes dos; COSTA, Diógenes Félix da Silva. Aplicação da USLE nos Serviços Ecosistêmicos de Controle de Erosão em Área Suscetível à Desertificação, NE - Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 1088–1103, 2023. DOI: 10.26848/rbgf.v16.2.p1088-1103. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/254952>. Acesso em: 4 de fev. de 2024.

PEREIRA, Juliana Sousa. **Avaliação das Perdas de Solos por Erosão Laminar na Área de Influência da UHE Amador Aguiar**. Orientador: Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues. 2014.

167 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/16206/1/AvaliacaoPerdasSolos.pdf>. Acesso em: 4 abr. 2024.

PINHEIRO, L. de S. *et al.* Geração do fator topográfico (LS) em bacia hidrográfica: análise da extensão de vertentes. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 8, n. 1, p. 50-60, 2014.

**Proposta metodológica para classificação dos espaços do rural, do urbano e da natureza no Brasil.** Coordenação de Geografia do IBGE, Investigações experimentais / Informações Geocientíficas Experimentais. IBGE, Rio de Janeiro, 2023. ISBN 978-85-240-4575-2.

QGIS Development Team, 2023. **QGIS Geographic Information System.** Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em: 05 de abr. de 2024.

REVISED UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/land-water/land/land-governance/land-resources-planning-toolbox/category/details/en/c/1236444>. Acesso em: 13 de abr. de 2024.

RIBEIRO, Isabela Aparecida Acipreste. **Aplicação da Equação Universal de Perda do Solo (EUPS) por meio de Sistema de Informação Geográfica (SIG) em bacia de contribuição de reservatório para contenção de sedimentos de mineração.** Orientador: Prof. Dr. Guilherme José Cunha Gomes. 2022. 59 p. Dissertação (Bacharel em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Ambiental, Ouro Preto - MG, 2022. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/5033>. Acesso em: 8 de fev. de 2024.

RIBEIRO, J.F.; WALTER, B.M.T. As matas de galeria no contexto do bioma Cerrado In: RIBEIRO, J.F.; FONSECA, C.E.; SOUSA-SILVA, J.C., ed. **Cerrado: caracterização e recuperação de matas de galeria.** Planaltina: EMBRAPA Cerrados, p.29 - 47, 2001.

RODRIGUES, Silvio Carlos; NAZAR, Thallita Isabela Silva Martins. Mapeamento e Análise de Geocoberturas no Chapadão do Diamante - MG - Brasil. **Revista Mercator**, Fortaleza - CE, v. 18, n. 4, p. 1 - 20, 2019. Disponível em: <https://www.redalyc.org/journal/2736/273659202001/html/>. Acesso em: 7 de fev. de 2024.

SALES, José Felipe Silva de. **Estimativa de Perdas de Solo por Erosão em Propriedades Rurais Registradas no Cadastro Ambiental Rural no Município de Alagoa Nova - PB.** Orientador: Prof. Dr. Djail Santos. 2018. 46 p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia Agrônômica) - Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/4551?locale=en>. Acesso em: 16 de fev. de 2024.

SANTOS, Amanda Alves dos. **Paisagem do Parque Nacional da Serra da Canastra e de sua Zona de Amortecimento - MG: Análise de Padrões Espaciais a partir de Árvore de Decisão e Métricas de Paisagem.** Orientador: Profa. Dra. Maria Márcia Magela Machado. 2014. 146 p. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) - Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG,

2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/IGCM-9UXRPK>. Acesso em: 5 abr. 2024.

SANTOS, H.G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 531 p. ISBN 978-85-7035-817-2. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 8 de abr. de 2024.

SILVA, C. H. *et al.* O Grupo Canastra em sua área-tipo, região de Tapira, sudoeste do estado de Minas Gerais. *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, Brasil, v. 12, n. 2, p. 83–98, 2012. DOI: 10.5327/Z1519-874X2012000200006. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspssc/article/view/45416>. Acesso em: 6 abr. 2024.

SILVA, Denise Alves da. **Análise das Classes de Declividade do Chapadão do Diamante (Serra da Canastra) e sua Relação com Padrões de Compartimentação do Relevo e Geocoberturas**. Orientador: Prof. Dr. Silvio Carlos Rodrigues. 2023. 67 p. Dissertação (Bacharelado em Geografia) - Instituto de Geografia da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/38454/1/AnáliseDasClasses.pdf>. Acesso em: 4 de nov. de 2023

SILVA, Valdeir Demetrio da. **Análise de Perda de Solo, Utilizando o Modelo (Rusle) Revised Universal Soil Loss Equation, Aplicado com Auxílio das Técnicas de Geoprocessamento na Bacia Do Ribeirão Reis, Maringá - PR**. Orientador: Prof. Dr. Joel Pellerin. 2008. 109 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91234>. Acesso em: 2 de fev. de 2024.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E. & CAMARGO, P.B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2003.

SOUZA, V.V *et al.* Caracterização de uma topossequência no Parque Nacional da Serra da Canastra, MG - Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/916144/caracterizacao-de-uma-topossequencia-no-parque-nacional-da-serra-da-canastra-mg>. Acesso em: 4 de fev. de 2024.

STEIN, D. P.; DONZELI, A. F.; GIMENEZ, A. F.; PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópica na bacia do Peixe Paranapanema. In: **SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO**, 4., São Paulo, 1987. [Anais] São Paulo: ABGE/DAEE, 1987, p. 105-136.

THOMPSON, Dayse; FIDALGO, Elaine Cristina Cardoso. Estimativa da Perda de Solos Por Meio da Equação Universal de Perdas De Solos (USLE) com uso do Invest para a Bacia Hidrográfica do Rio Guapi - Macacu – RJ. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, ed. XV**, p. 1 - 7, 2013. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3547>. Acesso em: 6 fev. 2024.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. **USDA-ARS Agriculture Handbook**, Washington DC, 1978.