UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de São Carlos

Estimativa de perda de solos por erosão na Bacia do Rio Corumbataí: influência das mudanças climáticas e do uso e ocupação da terra

Maria Julia Degli Esposti Bergamasco

Orientador: Prof. Dr. Silvio Crestana

EESC · USP

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MARIA JULIA DEGLI ESPOSTI BERGAMASCO

Estimativa de perda de solos por erosão na Bacia do Rio Corumbataí: influênciadas mudanças climáticas e do uso e ocupação da terra

SÃO CARLOS,

2023

MARIA JULIA DEGLI ESPOSTI BERGAMASCO

Estimativa de perda de solos por erosão na Bacia do Rio Corumbataí: influênciadas mudanças climáticas e do uso e ocupação da terra

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos paraa obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Silvio Crestana

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2023

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

DB493e

Degli Esposti Bergamasco, Maria Julia
Estimativa de perda de solos por erosão na Bacia do Rio Corumbataí: influência das mudanças climáticas e do uso e ocupação da terra / Maria Julia Degli Esposti Bergamasco; orientador Silvio Crestana. São Carlos, 2023.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2023.

1. Construção de Cenários. 2. Mudanças Climáticas. 3. USLE. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharela **MARIA JULIA DEGLI ESPOSTI BERGAMASCO.**

Título da dissertação: "Estimativa de perda de solos por erosão na Bacia do Rio Corumbataí: influência das mudanças climáticas e do uso e ocupação da terra".

Data da defesa: 24/02/2023.

Comissão Julgadora	Resultado
Dr. **Silvio Crestana (Orientador)** (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)	**APROVADA**
Prof. Dr. **Jamil Alexandre Ayach Anache** (Universidade Federal de Mato Grosso do Sul/UFMS)	**APROVADA**
Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	**APROVADA**

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:
Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu irmão, Heitor Degli Esposti Bergamasco e aos meus pais, Luciana Degli Esposti Bergamasco e Miguel Angelo Bergamasco que sempre me incentivaram e estiveram presentes nos momentos mais importantes

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luciana Degli Esposti Bergamasco e Miguel Angelo Bergamasco por me acompanharem todos os meus sonhos, caminhos e obstáculos, por todo o apoio, incentivo, conselhos, carinho e por sempre acreditarem no meu potencial. Ao meu irmão, Heitor Degli Esposti Bergamasco pelo companheirismo, pelas risadas, por seu meu melhor amigo e tornar os momentos difíceis mais leves. A minha avó, Paschoalina Palmero Degli Esposti por todo carinho, atenção, afeto e pelas histórias compartilhadas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Crestana pela oportunidade de orientação, paciência, compreensão e confiança depositada para a realização desta pesquisa.

À Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP), por meio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Aos professores das disciplinas cursadas na pós-graduação, pelos ensinamentos passados que contribuíram para a minha formação.

Aos meus amigos que me acompanharam nesta etapa tão importante em minha vida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que de alguma maneira colaboraram para realização deste trabalho. Á todos, muito obrigada!

EPÍGRAFE

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis”

(José de Alencar)

RESUMO

BERGAMASCO, M. J. D. E. 2023. **Estimativa de perda de solos por erosão na Bacia do Rio Corumbataí: influência das mudanças climáticas e do uso e ocupação da terra.** Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2023.

Os recursos naturais como, água, solo e vegetação, vêm sofrendo constante pressão. Por isso, o estudo acerca da degradação ambiental é amplamente discutido ao redor do globo. Dentre as mais variadas temáticas do assunto, destaca-se a erosão, sobretudo na condição hídrica, devido a sua relevância nos âmbitos social, econômico e ambiental. Sendo assim, essa dissertação teve como objetivo avaliar os impactos da perda de solos na Bacia do Rio Corumbataí (SP), através do modelo de erosão USLE (Equação Universal de Perda de Solos). Foram coletados dados diários de precipitação de 33 postos pluviométricos para o período de 1970 a 1999, com a finalidade de analisar a variabilidade espacial e temporal da precipitação na área de interesse. Foram utilizados também dados futuros de precipitação, gerados pelo modelo de circulação regional ETA, e de uso e ocupação da terra, criados a partir do *software* LCM. Tais dados foram utilizados na construção de cenários para avaliar a influência das mudanças climáticas e da cobertura vegetal na perda de solos. A aplicação da USLE constatou que a Bacia do Rio Corumbataí apresenta perda de solos média de 7,1 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ é considerada baixa devido, principalmente, a presença predominante das declividades suave ondulado e ondulado. As simulações dos cenários criados para avaliar a influência da precipitação e da cobertura vegetal mostraram o risco à erosão na bacia para o período de 2030 a 2070.

Palavras-Chave: erosão; mudanças climáticas; USLE;

ABSTRACT

BERGAMASCO, M. J. D. E. 2023. **Estimation of soil loss by erosion in the Corumbataí River Basin: influence of climate change and land use and occupation.** Dissertação (Mestrado), São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2023.

Natural resources such as water, soil and vegetation, have been under constant pressure. For that reason, the study of environmental degradation is widely discussed around the world. Among the most varied themes of the subject, erosion stands out, especially in the water condition, due to its relevance in the social, economic and environmental spheres. Thus, this dissertation aimed to evaluate the impacts of soil loss in the Corumbataí River Basin (SP), through the USLE erosion model (Universal Soil Loss Equation). Daily precipitation data were collected from 33 rainfall stations for the period from 1970 to 1999, in order to analyze the spatial and temporal variability of precipitation in the area of interest. Future precipitation data generated by the ETA regional circulation model and land use and occupation, created from the LCM software, were also used. These data were used in the construction of scenarios to evaluate the influence of climate change and vegetation cover on soil loss. The application of the USLE found that the Corumbataí River Basin presents an average soil loss of 7,1 $t.ha^{-1}.year^{-1}$ is considered low due, mainly, to the predominant presence of small slopes. The simulations of the scenarios created to evaluate the influence of precipitation and vegetation cover showed the risk of erosion in the basin for the period 2030 to 2070.

Keywords: erosion; climate change; USLE;

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do PCJ no Estado de São Paulo 44

Figura 2. Divisão de Sub-bacias da BHRC.....45

Figura 3. Classes de declividade das sub-bacias da BHRC 47

Figura 4. Localização dos postos pluviométricos da Bacia do Rio Corumbataí 52

Figura 5. Distribuição espacial dos pontos de grade do modelo ETA.....60

Figura 6. Comparação entre os valores de precipitação observados e os estimados pelo modelo HADGEM2-ES 62

Figura 7. Distribuição mensal da precipitação na BHRC 69

Figura 8. Evolução da precipitação média anual da BHRC para os anos de 1970 a 1999.....70

Figura 9. Desvio normalizado da precipitação na BHRC. (Desvio padrão: 222,07).....71

Figura 10. Tendência de anomalias das precipitações médias anuais da BHRC 71

Figura 11. Evolução da precipitação média anual da BHRC para os anos de 1980 a2018.....73

Figura 12. Distribuição espacial da precipitação total anual.....75

Figura 13. Distribuição espacial do desvio padrão e do coeficiente de variância da precipitação total anual 76

Figura 14. Distribuição espacial da precipitação média mensal para os períodos chuvoso e seco.....77

Figura 15. Evolução anual do Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI).....79

Figura 16. Análise gráfica da evolução do NDVI 79

Figura 17. Evolução anual da distribuição espacial do uso e ocupação da terra 81

Figura 18. Distribuição espacial do fator de erosividade da chuva para BHRC 83

Figura 19. Distribuição espacial do fator de erodibilidade do solo para BHRC 85

Figura 20. Distribuição espacial do fator de comprimento de rampa e declividade para BHRC.....88

Figura 21. Distribuição espacial dos fatores de uso e manejo do solo e de práticas conservacionistas

na BHRC.....90

Figura 22. Distribuição espacial da perda de solos a BHRC 91

Figura 23. Análise da precipitação simulada com e sem correção em relação aos valores observados 94

Figura 24. Distribuição espacial do fator de erosividade da chuva para RCP4.5 e RCP8.5 95

Figura 25. Distribuição espacial da perda de solo (Cenário 01).....96

Figura 26. Distribuição espacial do uso e ocupação da terra para o ano de 2070 98

Figura 27. Distribuição espacial da perda de solo (Cenário 02).....99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Descrição dos postos pluviométricos 53

Tabela 2. Valores do Fator K para cada tipo de solo encontrado na BHRC 55

Tabela 3. Valores do Fator C para cada classe temática 58

Tabela 4. Classificação da perda do solo 59

Tabela 5. Critérios avaliados em cada cenário 67

Tabela 6. Postos Pluviométricos analisados no período de 1980 a 2018.....73

Tabela 7. Distribuição percentual do uso e ocupação da terra na BHRC 82

Tabela 8. Classificação da média anual da erosividade da chuva 84

Tabela 9. Valores do Fator K para cada tipo de solo e suas respectivas áreas.....86

Tabela 10. Classificação da média anual da erodibilidade do solo 87

Tabela 11. Classificação da declividade da BHRC 87

Tabela 12. Classes de uso e ocupação da terra.....89

Tabela 13. Relação entre o Fator A e o Fator CP 92

Tabela 14. Sobreposição do Fator A, CP e K em relação aos limites de tolerância de perda do solo .92

Tabela 15. Índices estatísticos para a precipitação do modelo ETA. 93

Tabela 16. Comparação da precipitação observada e simulada para cada ponto de grade 95

Tabela 17. Classes de usos da terra para os anos de 2020 e 2070 97

Tabela 18. Classes de perda de solo para os Cenários 01 e 02.....100

LISTA DE ABREVIAÇÕES E SIGLAS

SIG – Sistema de Informações Geográficas

BHRC – Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí

EUPS/USLE – Equação Universal de Perda de SolosMO – Matéria Orgânica

A – Perda de solo média

R – Fator de erosividade da chuva

K – Fator de erodibilidade do solo

L – Fator comprimento de rampa

S – Fator de declividade de rampa

C – Fator de uso e manejo da terra

P – Fator de práticas conservacionistasMDE – Modelo Digital de Elevação

IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

PCJ – Bacia Hidrográfica dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí ANA – Agência Nacional de Água e Saneamento Básico

IDW – Ponderação do Inverso das DistânciasUTM – Universal Transversa de Mercator

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

CPTEC – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos RCP - Percurso de Concentração Representativa

GEE – Gases do efeito estufa

JGCRI – *Pacific Northwest National Laboratory's Joint Change Research Institute*

IIASA – *International Institute for Applied Systems Analysis*

EMA – Erro Médio Absoluto

EMR – Erro Médio Relativo

EMQ – Erro Médio Quadrático

RV – Redução da Variância

LCM – *Land Change Modeler*

MLPNN – Rede Neural de Percepção Multicamada

ENOS – *El Niño Oscilação Sul*

NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

DP – Desvio Padrão

CV – Coeficiente de Variância

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 28
2. OBJETIVOS 31
2.1. Objetivo Geral 31
2.2. Objetivos Específicos 31
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 33
3.1. Degradação Ambiental e Erosão Hídrica 33
3.1.1. Fatores associados à Erosão Hídrica 34
3.2. Modelos de Avaliação de Susceptibilidade a Perda de Solos 35
3.3. Equação Universal de Perda do Solo 37
3.3.1. Erosividade da Chuva (Fator R) 38
3.3.2. Erodibilidade do Solo (Fator K) 38
3.3.3. Comprimento de Rampa e Declividade (Fator LS) 38
3.3.4. Uso e Manejo do Solo (Fator C) 39
3.3.5. Práticas Conservacionistas (Fator P) 39
3.4. Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Erosão dos Solos 39
3.5. Mudanças Climáticas e Previsão Climática 41
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 44
5. METODOLOGIA 51
5.1. Equação Universal de Perda do Solo (EUPS/USLE) 51
5.1.1. Erosividade da Chuva (Fator R) 51
5.1.2. Erodibilidade do Solo (Fator K) 54
5.1.3. Comprimento de Rampa e Declividade (Fator LS) 55
5.1.4. Uso e Manejo do Solo (Fator C) e Práticas Conservacionistas (Fator P) 57
5.1.5. Integração e análise dos fatores 58
5.2. Previsão de Mudanças Climáticas 59
5.2.1. Levantamento de dados de precipitação do Modelo ETA 59
5.2.2. Correção dos dados de precipitação do Modelo ETA 61

5.2.3. Aplicação dos dados de precipitação simulados pelo Modelo ETA na USLE 62
5.2.4. Avaliação estatística dos dados de precipitação do Modelo ETA 63
5.3. Previsão das classes de uso e ocupação da terra 64
5.3.1. Pré- processamento das imagens 64
5.3.2. Modelagem do potencial de transição 65
5.3.3. Modelagem das mudanças de uso da terra 66
5.3.4. Aplicação do mapa de simulação futura de uso da terra na USLE 66
5.4. Construção de cenários futuros 66
6. RESULTADOS 69
6.1. Avaliação da variabilidade da precipitação 69
6.1.1. Variabilidade temporal 69
6.1.2. Variabilidade espacial 74
6.2. Alterações na Cobertura Vegetal e no Uso e Ocupação da terra 78
6.2.1. Cobertura Vegetal 78
6.2.2. Uso e Ocupação da terra 81
6.3. Estimativa da perda de solo por erosão hídrica na BHRC através da USLE 82
6.3.1. Erosividade da Chuva (Fator R) 82
6.3.2. Erodibilidade do solo (Fator K) 84
6.3.3. Comprimento de Rampa e Declividade (Fator LS) 87
6.3.4. Uso e Manejo do Solo (Fator C) e Práticas Conservacionistas (Fator P) 88
6.3.5. Perda de solos na Bacia do Rio Corumbataí (Fator A) 91
6.4. Análise estatística da correção dos dados de precipitação 93
6.5. Simulação futura da perda do solo em diferentes cenários 95
7. CONCLUSÃO 102
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 104

_Toc133106916

1. INTRODUÇÃO

A degradação ambiental, por muitos, é considerada como um problema de importante magnitude e que deve ser amplamente discutidos ao redor do globo (SHRESTHA *et al*, 2004). Dentre as mais variadas temáticas estudadas sobre o assunto, a erosão dos solos ganha destaque devido a sua relevância e suas conseqüências. No Brasil, os impactos da erosão são bastante expressivos, chegando a totalizar 600 milhões de toneladas de solo agrícola (BAHIA *et al*, 1992).

De acordo com Quiquerez *et al* (2008), os eventos chuvosos de alta intensidade que desencadeiam no escoamento superficial são os que mais induzem a ocorrência de erosão e da degradação ambiental. Tais eventos podem acarretar no assoreamento de rios, córregos e lagos; na redução de condições favoráveis a fauna, a flora e as atividades humanas; na diminuição da qualidade de água devido a presença de sedimentos; alterações no regime fluvial; dentro outros (GUERRA, 2005).

Do ponto de vista técnico-científico, a erosão é tida como uma temática multidisciplinar que deve ser considerada como um importante indicador de qualidade do ambiente. Isso ocorre em virtude das interações entre o uso e manejo da terra, a temperatura, ao relevo, ao clima e os danos causados para os âmbitos econômico, social e ambiental (SILVA *et al*, 2003).

Esta interatividade com outras áreas pode ser observada através da necessidade de obtenção de dados de séries históricas dos mais diversos fatores para a realização de estudos de modelagem. Este fato expressa um dos principais problemas associados à modelagem, visto que a obtenção dos dados que permitem a caracterização da distribuição espaço-temporal das chuvas sofrem com adversidades de coleta, manutenção e custo (SILVA, 2010).

Dentre deste contexto, interesse-se o acoplamento do Sensoriamento Remoto e dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG) como uma importante alternativa para a realização de estudos acerca da degradação dos solos, das mudanças climáticas e da espacialização da precipitação, por exemplo, (MACHADO, 2002).

Sendo assim, pesquisas sobre previsão dos processos erosivos associada ao ambiente SIG apresentam-se como ferramentas fundamentais para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, principalmente quando analisadas em contexto de construção de cenários futuros. A avaliação da evolução da degradação ambiental de uma bacia, a identificação de áreas suscetíveis à erosão e a previsão de assoreamento de reservatórios são alguns exemplos da aplicabilidade desse acoplamento (LI *et al*, 2009).

A degradação dos solo em bacias hidrográficas, além de ser impactada pelos processos erosivos, também é influenciada pelas mudanças climáticas. Estas atuam na qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Deste modo, geram impactos sociais, econômicos e sociais na áreas de bacia (SILVA, 2010).

Portanto, o presente estudo tem por objetivo avaliar os impactos da perda de solo decorrentes de alterações no uso e ocupação da terra e das mudanças climáticas a partir da utilização de técnicas de Sensoriamento Remoto para a Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí – SP.

2. OBJETIVOS

2.1.Objetivo Geral

Este estudo tem por objetivo estimar a perda de solo associada à variabilidade climática e às mudanças de uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Rio Corumbataí (BHRC) a partir das técnicas de Sensoriamento Remoto.

2.2.Objetivos Específicos

(a) Compreender a variabilidade espaço-temporal da precipitação na bacia do Rio Corumbataí;
(b) Avaliar o processo de modificação do uso e cobertura da terra por meio de dados de Sensoriamento Remoto;
(c) Realizar as previsões climáticas até o ano de 2070, para a bacia do Rio Corumbataí;
(d) Estimar a perda de solos para cenários futuros de previsão climática até o ano de 2070 a partir do uso da Equação Universal de Perda do Solo (EUPS/USLE);

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.Degradação Ambiental e Erosão Hídrica

A degradação ambiental é um dos problemas mais alarmantes relacionados a questões ambientais e vem sendo amplamente discutida a partir das Conferências de Estocolmo e de Nairóbi que ocorreram em 1972 e 1977, respectivamente. Desde então, a temática em suas diferentes particularidades obteve prioridade ao ser denominada como uma questão de primeira magnitude (SILVA, 2010).

De acordo com Souza *et al* (2004), a degradação ambiental está diretamente associada a impactos prejudiciais não somente ao meio ambiente como também ao homem, por meio da perda da produtividade biológica e econômica. Esta, por sua vez, é ocasionada pela deterioração da biodiversidade, dos recursos hídricos e também dos solos.

Como supracitado, o termo envolve a degradação dos recursos naturais solo e água através de diversos impactos como a extinção de espécies animais e vegetais, o assoreamento, bem como, poluição de nascentes, baías, rios e lagos (Guerra e Guerra, 1997). Neste estudo, todavia, o foco será voltado para o fenômeno de erosão visto que, segundo Machado e Vertorazzi (2003), é o principal causador de degradação ambiental.

A erosão provoca impactos de maneira gradativa, o que faz com que muitas vezes não sejam notados. Nesse sentido, o conhecimento do seu processo é de extrema importância para a gestão política, econômica e social de uma bacia hidrográfica, dado que as condições desfavoráveis acarretadas pela degradação do meio ambiente diminuem a capacidade de suporte da população residente em tal bacia (SILVA, 2010).

De forma sucinta, a erosão dos solos é um processo complexo que abrange a desagregação, transporte e a deposição de partículas produzidas pela ação de diversos agentes (STROOSNIJDER, 2005). Em regiões de clima tropical, predominantes no território brasileiro, o tipo de erosão mais comumente encontrado é a erosão hídrica (PIRES e SOUZA, 2013).

A erosão hídrica é caracterizada como um processo de interações complexas que ocorre em duas fases: (a) desprendimento das partículas de solo e; (b) transporte de material por agentes erosivos, destacando-se o impacto da gota da chuva e a consequente formação de fluxos de água. Em casos onde os agentes transportadores não obtiverem de energia suficiente há uma terceira fase: (c) deposição (MORGAN, 2005).

Os fenômenos erosivos apresentam uma forte correlação com as dinâmicas de

uso e ocupação da terra, uma vez que a remoção da cobertura vegetal por atividades antrópicas acelera o desprendimento e arraste das partículas de solo pela água. Sendo assim, destaca-se a importância do conhecimento acerca dos diferentes usos da terra para que medidas que propiciem a correta conservação do solo sejam cada vez mais empregadas (SARAIVA, 2005).

3.1.1. Fatores associados à Erosão Hídrica

O início da erosão é dado pelo salpicamento, no qual o impacto da gota da chuva ocasiona na ruptura do agregado em partículas menores e no seu transporte. Esse processo está relacionado com a energia cinética da gota da chuva e com a resistência que o solo oferece ao seu impacto. Por esse motivo, o salpicamento estabelece a influência da variação espaço-temporal da erosividade (potencial erosivo da chuva) (GUERRA, 2012).

A estabilidade do agregado, quando ocorre o processo de ruptura, é associada a diversos fatores, entretanto, Moraes (2016) aponta o teor de matéria orgânica (MO) como o principal fator de interferência na erodibilidade do solo (potencial do solo em ser erodido). A relação é dada de maneira diretamente proporcional, de modo que quanto menor o teor de MO menor a estabilidade do agregado.

Zejun *et al* (2002) destacam que o impacto da chuva também acarreta no selamento e encrostamento da superfície do solo. Desse modo há uma redução da taxa de infiltração do solo e da condutividade hidráulica, bem como um aumento da resistência e do escoamento superficial direto, que provoca a erosão.

Quando ocorre um evento de chuva, a água pode infiltrar-se, favorecendo a capacidade de armazenamento da mesma no solo. Contudo, a capacidade de infiltração está relacionada com as características da chuva, com a cobertura vegetal, manejo do solo, propriedades do solo, topografia e superfície do terreno. Assim, com o preenchimento dos poros pela água da chuva, há a diminuição da taxa de infiltração (MORAES, 2016).

A partir da ocorrência da saturação, formam-se poças de água sobre a superfície irregular do solo que, com passar do tempo, vão se interligando até a produção da enxurrada. Este fluxo de água no início ocorre de maneira difusa, porém, fluxos concentrados podem ser encontrados. O escoamento superficial difuso origina a erosão laminar, já o escoamento concentrado acarreta na formação de sulcos, ravinas e voçorocas (SANTOS *et al*, 2010).

Outros fatores importantes de serem analisados são a textura e a estrutura dos

solos. Esse fato é válido, pois solos com textura fina e média, baixo teor de MO e ainda com um desenvolvimento da estrutura insuficiente apresentam maior susceptibilidade a erosão. É importante salientar que solos com tais características ainda possuem taxas de infiltração reduzidas fazendo com que o escoamento superficial seja elevado (PIMENTEL, 1995).

O relevo também influencia diretamente no processo erosivo. Segundo Vermang *et al* (2015), esse fator determina a rugosidade da superfície do solo e esta, por sua vez, interfere no tempo de início do escoamento. Desta forma, quanto menor a rugosidade de um terreno, maior a taxa de infiltração e menor o escoamento superficial.

Em relação à topografia, destacam-se dois fatores: o comprimento de rampa e a declividade. O comprimento de rampa está associado ao trajeto em que a enxurra irá seguir. Sendo assim, em terrenos com um comprimento de rampa mais extenso, maior será a velocidade do escoamento superficial na vertente e, portanto, maior a perda do solo. No que se refere à declividade, o processo é semelhante, visto que maiores declividades provocam aumento na velocidade da enxurrada (BETORNI e LOMBARDI NETO, 2010).

Por fim, ressalta-se que as relações entre o uso da terra, a cobertura vegetal e o clima também interferem no processo de erosão. Isso ocorre, pois, os dois primeiros têm a capacidade de alterar os ciclos de infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial, de modo que afete a produção de sedimentos e os fluxos de água. Como exemplo, tem-se o fato de que em regiões com cobertura vegetal escassa há um aumento do escoamento superficial provocado pela diminuição das taxas de infiltração (MOLINA *et al*, 2012).

3.2.Modelos de Avaliação de Susceptibilidade a Perda de Solos

Modelos podem ser caracterizados como uma simplificação da natureza realizada com o objetivo de se obter conhecimento acerca de determinado fenômeno e, por esse fato, apresentam-se como ótimos dispositivos para descrição de um processo ambiental (TIM, 1996).

Sendo assim, modelos hidrológicos devem abranger complexas interações espaço-temporais advindas dos processos dinâmicos da natureza. Devido a sua elevada complexidade, alguns fenômenos tendem a ter comportamentos não-lineares (FELGUEIRAS, 2001). Para tanto, são utilizadas metodologias estatísticas e matemáticas como uma forma de representação artificial de tal bacia (TUCCI, 1998).

Tais modelos matemáticos representam matematicamente, a partir da observação de dados de um sistema real, um fenômeno que ocorre na natureza. Essa modelagem é realizada com diversas finalizadas, como previsibilidade (previsões futuras) ou simulação de cenários para direcionamento de tomadas de decisões (MACHADO, 2002).

Para construção de um modelo matemático, Hassuda (2000) destaca os principais passos. São eles: (a) desenvolver um modelo conceitual através de dados reais; (b) escolher o programa computacional a ser usado; (c) converter o modelo conceitual para a linguagem matemática; (d) calibrar para reduzir incertezas.

Nesse sentido, os modelos matemáticos aplicados ao manejo do ambiente necessitam de uma classificação. Esta ocorre considerando os processos físicos a serem simulados, a dependência de dados e os processos a serem realizados (FELGUEIRAS, 2001). De maneira inicial, Woolhiser e Brakensiek (1972) dividiu os modelos em dois grupos: materiais e conceituais. O primeiro possui propriedades semelhantes ao sistema a ser representado. Já o segundo tem a “propriedade estrutural importante do sistema real” (MACHADO, 2002).

Os modelos conceituais são fundamentados no tratamento empírico ou teórico dos processos que interferem no sistema real. Os modelos empíricos não possuem relação explicita aos processos físicos que ocorrem na realidade. Os modelos teóricos utilizam de leis da Física para que sejam desenvolvidos algoritmos que representem o sistema real (WOOLHISER e BRAKENSIEK, 1972).

Os modelos teóricos são divididos em: não determinístico e determinístico. Os modelos não determinísticos expressam resultados incertos ou aleatórios, pois representam fenômenos estocásticos e representam distribuição de probabilidade. Os modelos determinísticos expressam resultados idênticos para o mesmo conjunto de entradas, assim par cada grupo de entradas há apenas um grupo de saídas (CHOW, 1988).

Chow (1988) ainda afirma que os modelos determinísticos podem ser divididos em distribuídos ou concentrados, de acordo com o tratamento do espaço. Os modelos distribuídos dividem a região de estudo em unidades de áreas regulares ou irregulares com características hidrológicas homogêneas, reconhecendo a distribuição espacial. Já

nos modelos concentrados, a área da região é representada de maneira única e homogênea, de modo que valores medos sejam adotados por toda a sua extensão (ROSA, 2002).

Existem certas divergências em relação aos modelos concentrado e distribuído. Para Tucci (1998), modelos distribuídos não existem na prática, uma vez que pode ser considerado com uma junção de diversos modelos concentrados menores. Já Beven (1985) critica a utilização de modelos concentrados para representação de processos hidrológicos, visto o seu excesso de empirismo. Apesar de tais discordâncias, ressalta-se que cada modelo possui um propósito, sendo assim a sua escolha irá depender da intenção do usuário e das características da bacia de estudo (MERRITT *et al*, 2003).

3.3.Equação Universal de Perda do Solo

A Equação Universal de Perda do Solo (EUPS ou ULSE em inglês) é um modelo matemático proposto por Wischmeier e Smith (1978) originalmente para a escala de parcelas agrícolas nos Estados Unidos. O modelo em questão é do tipo empírico e estima a erosão laminar em função de cinco fatores associados a esse processo: erosividade climática (chuvas); erodibilidade dos solos (características físicas); topografia (comprimento e declividades das vertentes), uso e manejo da terra e práticas conservacionistas (BAGHERZADEH, 2012). Uma vez utilizada em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possibilita a avaliação da perda do solo, o que permite relacionar os resultados obtidos com o uso de ocupação da terra (PAES, 2010).

A estimativa da perda de solos é realizada a partir da multiplicação de seis fatores (Equação 1). A descrição de cada fator é apresentada nos tópicos subsequentes.

$$A = R*K*L*S*C*P \qquad \text{Equação 1}$$

onde:

A: Perda de solo média ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$);

R: Fator de erosividade da chuva ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$);

K: Fator de erodibilidade do solo ($t.h.ha.MJ^{-1}.mm$-1);

L: Fator comprimento de rampa (adimensional, baseado em valores em metros);

S: Fator de declividade de rampa (adimensional, baseado em valores em porcentagem);

C: Fator de uso e manejo da terra (adimensional) e;

P: Fator de práticas conservacionistas (adimensional).

3.3.1. Erosividade da Chuva (Fator R)

A erosividade pode ser caracterizada a força do agente de erosão (chuva) que provoca a desagregação do agregado e seu transporte. O Fator R expresso à capacidade da chuva em provocar essa ruptura e, por sua vez, à erosão, através de um índice numérico (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010).

O fator é determinado através do índice EI_{30} relacionado ao valor médio anual da multiplicação da energia cinética de um evento chuvoso por sua máxima intensidade em 30 minutos (KINNELL, 2019). Sua obtenção pode ser realizada a partir de dados de séries diárias de precipitação para um período mínimo de 20 anos (WALTRICK *et al*, 2015).

3.3.2. Erodibilidade do Solo (Fator K)

A erodibilidade de solo representa a suscetibilidade à erosão, de modo sucinto é dada pela quantidade do agregado que foi removido por unidade de área no momento em que os demais fatores permanecem constantes (FREIRA *et al*, 1992).

A erodibilidade pode ser determinada através de diversas equações associadas às propriedades intrínsecas do solo, como a velocidade de infiltração de água no solo, a permeabilidade e capacidade de armazenamento e, a resistência às forças de dispersão a ao transporte por escoamento superficial, por exemplo, (BENAVIDES *et al*, 2018). Dentre as metodologias mais utilizadas, encontram-se os nomogramas desenvolvidos por Wischmeier e Smith (1978) que associa os percentuais de MO, areia, areia fina e silte.

3.3.3. Comprimento de Rampa e Declividade (Fator LS)

Como já citado, o relevo apresenta influência sobre a erosão do solo e o mesmo, é representado pelo comprimento de rampa e pela declividade. De acordo com Neves (2006), este fator, exceto o fator de manejo do solo, é que detém maior influência na erosão solo.

Embora na equação original os dois fatores sejam calculados separadamente, sua representação prática é realizada por um único fator, o topográfico (LS). O comprimento de rampa (L) é definido como a distância entre o ponto onde o escoamento origina até o ponto em que há uma diminuição na declividade que permita a deposição dos sedimentos. A declividade (S) é representada de variação de declividade em intervalos de vertentes (GANASRI e RAMESH, 2016).

Este fator, no entanto, foi desenvolvido para vertentes regulares e em seguida foi proposta uma metodologia comprimento de rampa é insignificante, pois a concentração de fluxo ao longo das vertentes para vertentes irregulares. Todavia, em contextos de bacia hidrográfica, o termo exerce maior influência nos processos erosivos (SALGADO, 2011).

Por esse motivo uma nova metodologia foi proposta com o intuito de substituir o fator de comprimento de rampa (L) pela área de contribuição de uma bacia. Tal área é dada pela relação entre o fluxo acumulado e a largura do mesmo. Assim, utiliza-se os Modelos Digitais de Elevação (MDE) para o cálculo desse fator em áreas com topografias mais complexas (DESMET e GOOVERS, 1996).

3.3.4. Uso e Manejo do Solo (Fator C)

O fator de uso e manejo do solo se dá pela relação da cobertura e manejos do solo e a perda de solo em um terreno. Este fator geralmente é determinado a partir de tabelas de referência e estudos que foram realizados na mesma região (BENAVIDES *et al*, 2018).

3.3.5. Práticas Conservacionistas (Fator P)

O fator de práticas conservacionistas é dado pela relação entre a perda de solo em uma área com práticas conservacionistas e uma área com agricultura em linha reta ao redor da encosta. Assim como o fator acima, os valores deste podem ser obtidos na literatura. Porém, as práticas conservacionistas são difíceis de serem mapeadas fazendo com que alguns pesquisadores adotem o seu valor igual a um (BENAVIDES *et al*, 2018).

3.4.Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Erosão dos Solos

De acordo com Rodrigues (1990), o conceito de Geoprocessamento é atrelado às tecnologias de desenvolvimento de sistemas e de coleta e tratamento de informações espaciais. Nesse sentido, as técnicas de Geoprocessamento caracterizam-se como uma ferramenta de elevado potencial para estudos de modelagem de processos ambientais voltados para a conservação do solo e da água (MENDES, 1998).

Dentro deste contexto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são incorporados como um instrumento utilizado com o intuito de manipular funções que

retratem de forma simplificada a realidade do ambiente nas mais variadas regiões (MENDES, 1998).

A partir da expansão das pesquisas utilizando as técnicas de SIG aliada ao avanço computacional, diversos modelos de avaliação do comportamento dos processos ambientais vêm sendo adicionados ao ambiente SIG visto que este permite agregar bases de dados de diversas fontes espaciais e não espaciais em diferentes escalas (SILVA, 2010).

Além disso, as manipulações realizadas no ambiente são comumente apresentadas por meio de mapas temáticos, os quais auxiliam as análises espaciais por meio da sobreposição de dados tabulares, imagens de sensoriamento remoto e informações geográficas (NIGEL e RUGHOOPUTH, 2010).

A integração entre o SIG e os modelos ambientais representam um vasto campo de pesquisa das ciências relacionadas ao meio ambiente, ao geoprocessamento e a agricultura. Este acoplamento, apesar de não ser recente – se iniciou em meados da década de 1980 –, vem sendo realizado de maneira expressiva em estudos nos últimos anos (SILVA, 2010).

Alguns destes estudos descrevem a utilização do SIG junto à modelagem hidrológica como uma ferramenta para inovação no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, bem como, para o desenvolvimento de planos integrados de uso e ocupação da terra e da água no meio urbano e rural. O uso do SIG é de grande valia uma vez que permite o estudo de diferentes cenários de maneira rápida e de baixo custo (JAIN e DAS, 2009).

Como exemplo de pesquisas que realizam tal acoplamento, pode-se citar o trabalho de Jürgens e Fander (1993) que analisaram a perda do solo de uma área experimental pequena utilizando-se de dados do Fator LS, obtidos pelo Modelo Digital de Elevação (MDE), e de informações adquiridas por imagem de satélite, sobre o uso e ocupação da terra. Os autores identificam relação entre as classes de uso da terra ao processo de erosão.

Schulz *et al* (2010) avaliaram, através de imagens de satélites no período de 1975 a 2008, as mudanças no uso e ocupação da terra no Chile, constatando a redução de áreas de floresta e transição de áreas de mata para agropecuária. Em relação ao uso dos modelos USLE em ambientes SIG diversos trabalhos foram realizados: Valeriano (1999); Feitosa (2006); Pereira (2011); Côrrea (2011); Moraes (2016) e; Junior (2020);

3.5.Mudanças Climáticas e Previsão Climática

O sistema climático é composto por cinco principais componentes que interagem entre si: litosfera, biosfera, criosfera, hidrosfera e atmosfera. De acordo com Moos *et al* (2010), o mesmo é suscetível a variações modificações temporais e espaciais externas, dadas por fatores naturais ou antropogênicos, ou internas relacionadas a sua própria dinâmica.

As condições climáticas possuem uma variabilidade espacial enquanto que os fenômenos climáticos têm uma variação interanual e sazonal. Estes podem, em distintas escalas espaço-temporais, se apresentar de modo desfavorável ou favorável (SILVA, 2005).

Desse modo, é importante distinguir os conceitos de Modificação Climática e Variabilidade Climática. A Variabilidade Climática é definida como as alterações que ocorrem no clima ocasionadas pelos condicionantes naturais do sistema terrestre e suas interações, tais como: variações das atividades vulcânicas, alteração da temperatura da superfície do mar, alternâncias da órbita terrestre, variações da inclinação do eixo de rotação da Terra, alterações na composição química da atmosfera, dentre outros. Já a Modificação Climática se refere às alterações da variabilidade climática provocadas pela atividade humana, como emissões de gases do efeito estufa, desmatamento e queimadas (TUCCI *et al*, 2002).

O estudo das precipitações devido às mudanças climáticas representa um desafio de grande importância para o cenário atual, descrevendo discussões entre a sociedade científico-acadêmico, a sociedade e as organizações ambientais, visto que possui implicações nos âmbitos social, econômico e ambiental (SILVA, 2010).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês) constitui-se como uma importante ferramenta de divulgação dos estudos mais avançados sobre as mudanças climáticas, principalmente acerca do aquecimento global, indicando seus efeitos, causas e riscos para o meio ambiente (TORIHARA, 2022). Atualmente, o IPCC é composto por três volumes elaborados por diferentes grupos de trabalho, o WGI que avalia as bases da ciência física das mudanças climáticas (IPCC, 2021), o WGII sobre os impactos, adaptação e a vulnerabilidade (IPCC, 2022a) e, o WGIII acerca da mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2022b).

O primeiro relatório de avaliação (AR1) divulgado pelo IPCC, em 1990, expôs a importância global da questão das mudanças climáticas e do comprometimento

internacional diante do tema. Nesse sentido, o AR1 foi fundamental para a criação da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, em inglês) na Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (ECO- 92), que definiu compromissos a serem seguidos para todos os países participantes (partes). Sendo assim, as Conferências das Partes (COP), a partir de 1995, passaram a ser realizadas anualmente pela UNFCCC (IPCC, 2022c).

No ano de 1995, foi publicado o segundo relatório do IPCC (AR2) que serviu como base teórica para a elaboração do Protocolo de Kyoto durante a terceira COP, em 1997. Tal documento estabeleceu políticas e metas de redução da emissão de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera (IPCC, 2022c).

O terceiro relatório do IPCC (AR3), divulgado em 2001, avaliou os impactos das mudanças climáticas e destacou a necessidade de medidas mitigatórias. Alem disso, o relatório exibe a novas evidências da relação entre as mudanças climáticas a as atividades antrópicas. Vale ressaltar também que, nesse mesmo ano, foi criado o Fundo de Adaptação com o objetivo de auxiliar nas adaptações dos países frente às mudanças do clima (IPCC, 2022c; RODRIGUES FILHO *et al*, 2016).

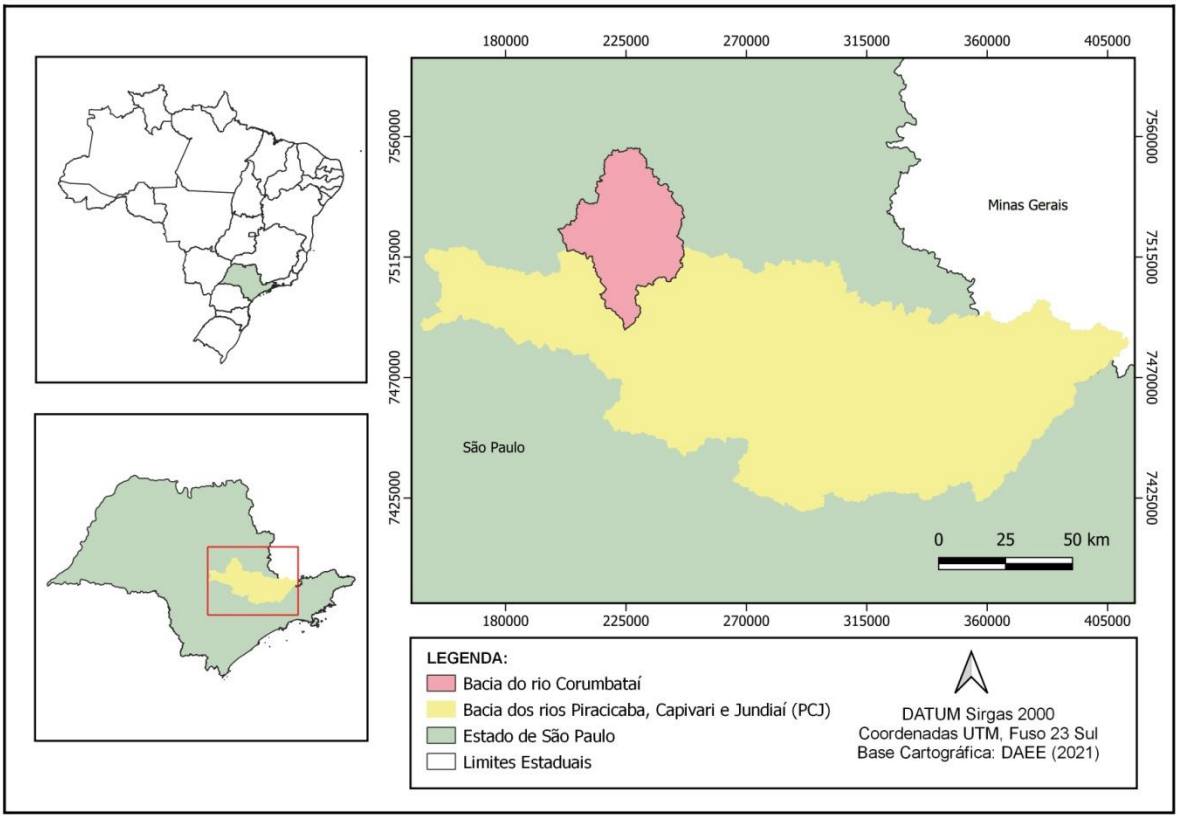
No ano de 2007 o quarto relatório do IPCC (AR4) foi publicado. Este relatório forneceu elementos de base para ação pós ao Protocolo de Kyoto. Em 2014, o IPCC divulgou o AR5. Este concluiu que as atividades humanas possuem influência na ocorrência de mudanças climáticas, essencialmente no que se refere às variações de temperatura dos oceanos (HOEGH-GULDBERG *et al*, 2018).

O sexto, e mais recente, relatório pelo IPCC mostra que as emissões dos GEE continuam a aumentar e que os planos e metas estabelecidos até o momento não serão suficientes para limitar o aumento da temperatura terrestre em 1,5º C em relação ao período pré-industrial. Além disso, o AR6 evidencia que as emissões ocorrem de maneira desigual no globo. Os países mais desenvolvidos são os maiores responsáveis pelas emissões, no entanto, impactos climáticos de maior magnitude ocorrem nos países em desenvolvimento (IPCC, 2022).

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

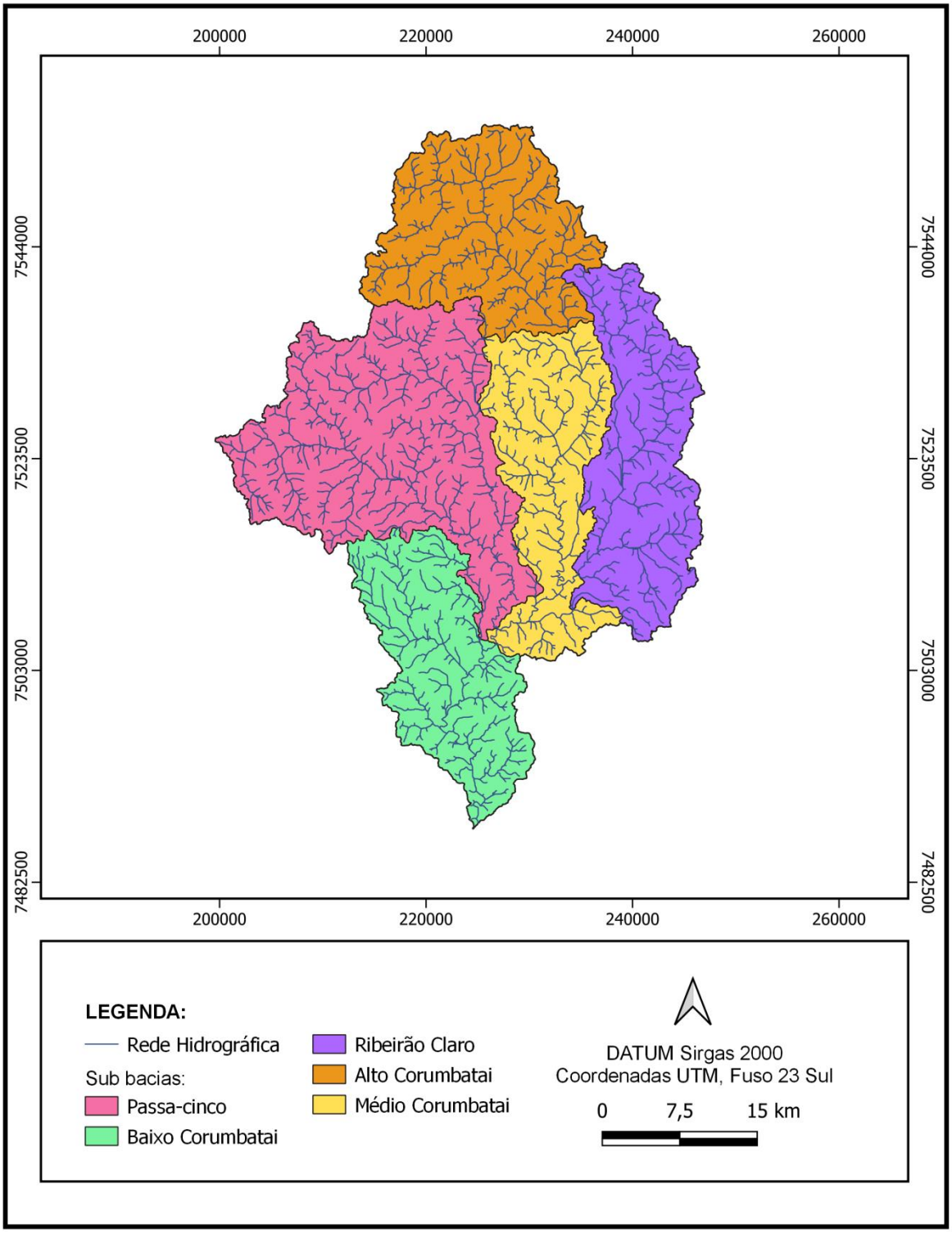
A Bacia do Rio Corumbataí (BHRC) encontra-se na porção centro-oeste do Estado de São Paulo, entre as latitudes 22º 04’ 46” S e 22º 41’ 28” S e longitudes 47º 26’ 23” O e 47º 56’ 15” O. A mesma representa aproximadamente 15% da área da bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ) e localiza-se à margem direita do rio Piracicaba (Figura 1). A bacia possui 1.708 km², de modo que a maior parte de seu território situa-se na Depressão Periférica Paulista. Além disso, os municípios que a compõe total ou parcialmente são: Analândia, Corumbataí, Rio Claro, Santa Gertrudes, Piracicaba, Charqueada, Ipeúna e Itirapina (IPEF, 2002).

Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do PCJ no Estado de São Paulo



A Bacia do Rio Corumbataí é dividida em cinco sub-bacias (Figura 2): Alto Corumbataí (318,02 km²); Médio Corumbataí (293,17 km²); Baixo Corumbataí (287,25 km²); Passa-Cinco (527,58 km²) e Ribeirão Claro (281,79 km²). Sua extensão na direção norte-sul é de 63,72 km e na direção leste-oeste é de 26,80 km (VALENTE, 2001).

Figura 2. Divisão de Sub-bacias da BHRC



O Rio Corumbataí se estende por aproximadamente 110 km, desde a nascente, localizada na Serra do Cuscuzeiro, próxima ao município de Analândia, até a sua foz em Piracicaba. A altimetria varia de 1058 metros a 470 metros. Seus principais afluentes

são os rios Cabeça, Passa-Cinco e Ribeirão Claro que drenam a parcela do território que se encontra entre as chamadas “cuestas arenitobasálticas” do planalto ocidental paulista (VALENTE, 2001).

A declividade da bacia é bastante variada, contendo áreas planas até muito íngremes (Figura 3). No alto curso, as declividades encontradas são acentuadas, com rápido escoamento do Rio Corumbataí entre cachoeiras e corredeiras, o que lhe proporciona fluxo constante e maior velocidade. Esses trechos mais íngremes estão associados a um forte processo erosivo, mesmo com pouco volume de água e com o fundo rochoso. As declividades mais altas encontram-se nas sub-bacias do rio Passa-Cinco e Alto Corumbataí (PALMA-SILVA, 1999).

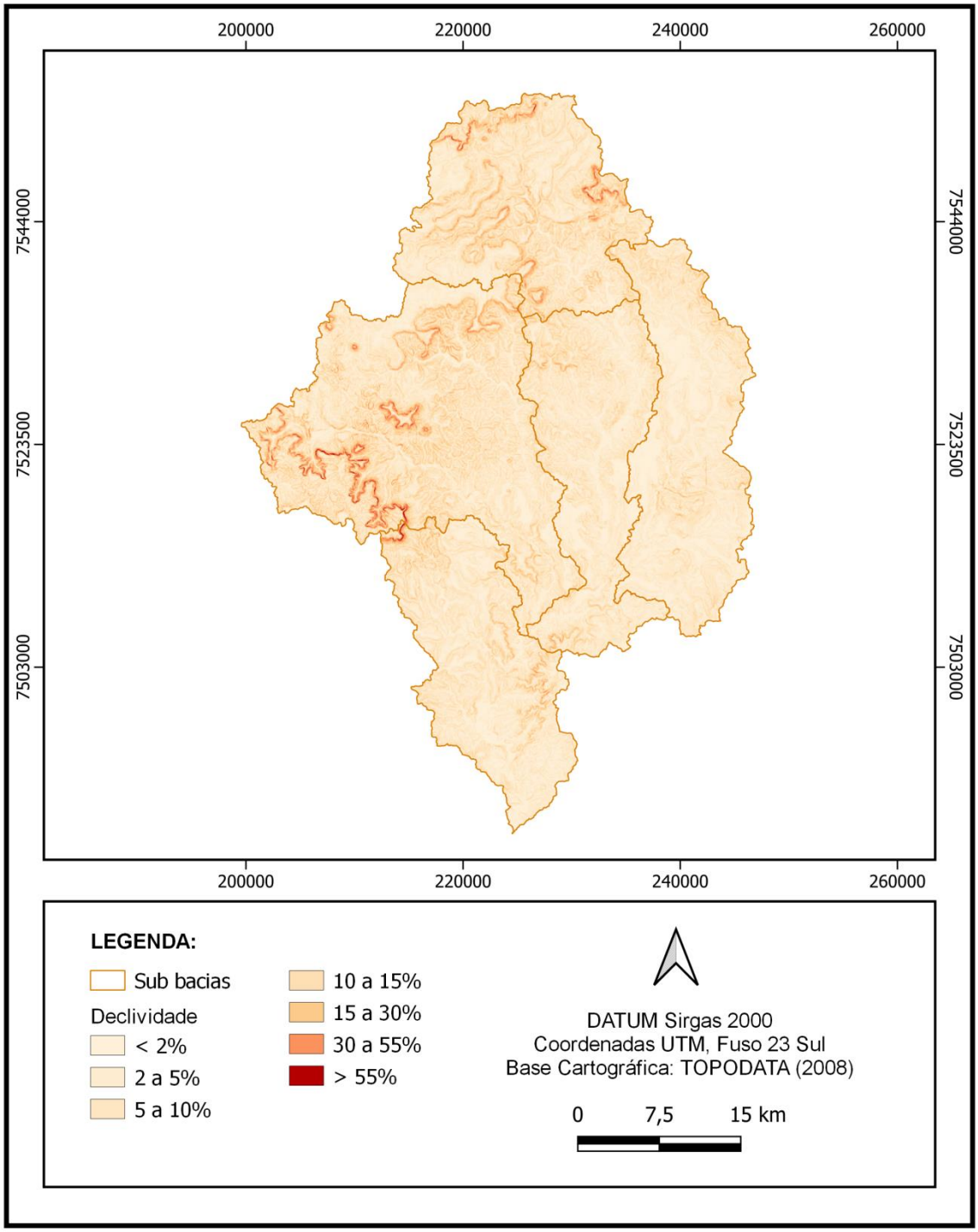
A declividade e consequente velocidade do rio Corumbataí diminuem no médio curso. Com vales mais abertos e características menos sinuosas, o rio tende à deposição de sedimentos oriundos do alto curso. No baixo curso, o declive é ainda menor e o rio torna-se caudaloso – de acordo com os seus padrões – com curvas e meandros sobre um substrato de arenito (PROJETO CORUMBATAÍ, 2001).

A rede hidrográfica da BHRC indica um padrão mais alongado e paralelo ao Rio Corumbataí na margem esquerda em comparação à margem direita. Em contrapartida, a margem direita apresenta maior densidade, o que pode ser associado aos controles tectônicos vinculados às condições litoestruturais e geomorfológicas do território (SILVA, 1999).

Segundo Viadanna (1985) a paisagem da bacia pode ser categorizada como monótona, com extensas áreas suavemente onduladas cortadas pela rede de drenagem de padronagem dendrítica e por escarpas arenítico-basálticas.

O relevo da área de estudo é representado por dois tipos principais, segundo IPT (1981): (a) montes alongados e espigões e (b) colunas médias e amplas. O primeiro é caracterizado pela presença de interflúvios angulosos e achatados sem orientações definidas. Além disso, possui vertentes com perfis retilíneos e drenagem de média e alta densidade. Já o segundo tem interflúvios aplainados e vertentes com perfis convexos a retilíneos e drenagem de baixa e média densidade.

Figura 3. Classes de declividade das sub-bacias da BHRC



De acordo com Koffler (1994), a BHRC é caracterizada pelas formações Pirambóia, Corumbataí, Irati e Rio Claro. Do ponto de vista geológico, a mesma se localiza na Bacia Sedimentar do Paraná, com litologias correspondentes aos períodos Cenozóico, Mesozóico e Paleozóico.

Seguindo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, subtropical com verões chuvosos e invernos secos. O período chuvoso representa mais

de 80% da precipitação anual que é de 1390 mm. As temperaturas mais elevadas são obtidas no período de dezembro a março (com médias mensais superiores a 22ºC) e mais baixas entre junho e julho (com médias mensais de 17ºC) (SALATI, 1996).

O município de Rio Claro apresenta a maior extensão territorial e densidade populacional da BHRC, o que lhe confere grande importância para a região. De acordo com IPEF (2002), o município se destaca tanto em relação às atividades industriais quanto ao comércio e prestação de serviço. As atividade industriais são associadas aos estabelecimentos de pequeno e médio porte de diferentes ramos, como: indústrias químicas, de bebidas, confecções, papel, automobilística, alimentícia, produtos cerâmicos e mineração.

Ainda em relação a Rio Claro, sua área urbana encontra-se totalmente inserida na bacia. Portanto, o município é o maior responsável pelos impactos antrópicos na BHRC. Dentre esses impactos, cita-se: lançamento de óleos e produtos de veículos automotores nos rios, resíduos sólidos e impermeabilização do solo (MORI *et al*, 2016).

Nos municípios restantes, o setor industrial concentra-se na extração de minerais, com foco na produção de cerâmica, sobretudo no município de Santa Gertrudes. As atividades agrícolas da região estão associadas à produção de algodão, milho, arroz e feijão, para atender às necessidades locais. O cultivo de cana-de-açúcar é bastante expressivo na bacia a fim de satisfazer à demanda das usinas açucareiras das regiões próximas. Os municípios de Analândia, Corumbataí, Ipeúna, Itirapina e Santa Gertrudes são seus os principais produtores, com destaque para Rio Claro onde a cana ocupa 25% do total das áreas de lavoura (MORI *et al*, 2016).

Carmona *et al* (2004) aponta que a BHRC representa uma área de amplo interesse ambiental e econômico devido a abundância de minerais não metálicos, argila, areia e calcário para uso agrícola e industriais e, também, de recursos naturais, como a vegetação nativa.

Com exceção de Santa Gertrudes, todos os demais municípios estão localizados sob os domínios do Aquífero Guarani. Este é considerado o maior reservatório subterrâneo transfronteiriço da América do Sul e, portanto, é de grande importância para o pais. De acordo com a Agência das Bacias PCJ (2020), o aquífero pode ser como uma

fonte alternativa de abastecimento para as áreas onde se faz presente, devido a sua ocorrência restrita em algumas áreas.

Ademais, pelo fato do Rio Corumbataí ser o principal afluente do Rio Piracicaba, a bacia se destaca no cenário hídrico estadual, pela sua capacidade de abastecimento de água em quantidade e qualidade para os municípios de Piracicaba, Rio Claro, Corumbataí, Analândia, Itirapina, Ipeúna, Charqueada e Santa Gertrudes. A população atendida é de cerca de 710 mil habitantes, com demanda de 2, 92 m^3/s e disponibilidade hídrica de 4, 97 m^3/s (IBGE, 2020).

5. METODOLOGIA

5.1.Equação Universal de Perda do Solo (EUPS/USLE)

Conforme supracitado, a USLE é dada pela Equação 1. Seus fatores foram calculados separadamente seguindo a metodologia proposta por Williams e Arnold (1997). O resultado final obtido corresponde à erosão bruta. Esta simplificação é aceita visto que a USLE foi criada em escala de parcela onde os processos de deposição não são relevantes (MEDEIROS *el al*, 2009).

$$A = R*K*L*S*C*P \qquad \text{Equação 1}$$

onde:

A: Perda de solo média ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$);

R: Fator de erosividade da chuva ($MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}.ano^{-1}$);

K: Fator de erodibilidade do solo ($t.h.ha.MJ^{-1}.mm$-1);

L: Fator comprimento de rampa (adimensional, baseado em valores em metros);

S: Fator de declividade de rampa (adimensional, baseado em valores em porcentagem);

C: Fator de uso e manejo da terra (adimensional) e;

P: Fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Os procedimentos para determinação individual dos fatores são descritos a seguir.

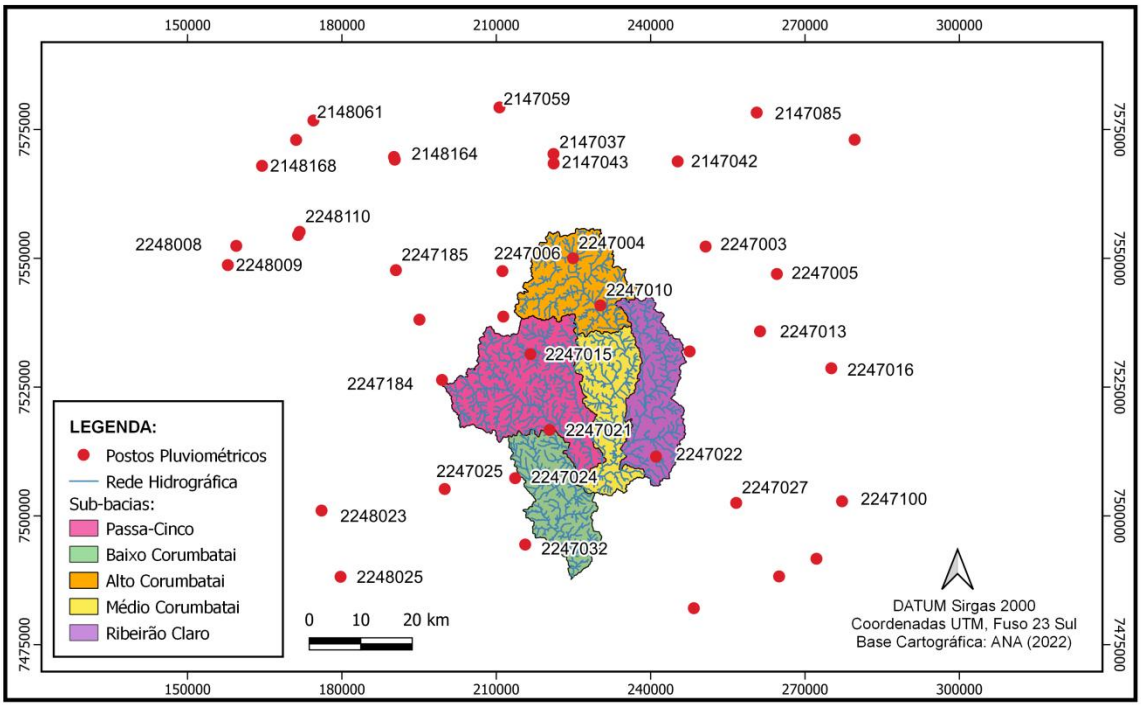
5.1.1. Erosividade da Chuva (Fator R)

A erosividade da chuva é ocasionada tanto pelo impacto de suas gotas no solo quanto pelo escoamento superficial. Estes estão relacionados com as características do solo (declividade da superfície, tipo e cobertura do solo e capacidade de infiltração) e com a intensidade da chuva (BACK e GONÇALVES, 2017).

Nesse sentido, para o cálculo do Fator R é necessário obter e avaliar a distribuição espacial e temporal das chuvas na Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí. Portanto, foi consultado o banco de dados da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA) onde foram levantados os dados diários de precipitação de 33 postos pluviométricos instalados dentro e em regiões próximas à bacia (Figura 4). Com a aquisição dos dados, em uma planilha do *software* Excel, os totais mensais e anuais da precipitação foram calculados para cada posto. O período da série avaliada foi de 1970 a 1999. As informações de cada um dos postos assim como suas localizações geográficas

estão expostas na Tabela 1.

Figura 4. Localização dos postos pluviométricos da Bacia do Rio Corumbataí



Após a obtenção dos totais mensais e anuais, foram observadas inconsistências. Estas foram corrigidas através do método de ponderação regional (Equação 2). Tal método recomendado para a correção de dados de séries mensais e anuais tendo como base ao menos três postos vizinhos em regiões climatológicas semelhantes, com série de dados de no mínimo 10 anos (SILVA, 2010).

$$P_x = \frac{1}{3}\left(\frac{M_x}{M_a}P_a + \frac{M_x}{M_b}P_b + \frac{M_x}{M_c}P_C\right) \qquad \text{Equação 1}$$

onde,

P_x: Variável com os dados corrigidos (mm);

M: Média aritmética da estação com falha (mm);

P_a; P_b; P_c: Dados de precipitação das estações vizinhas ao posto com falhas (mm);

M_a; M_b; M_c: Média aritmética das estações vizinhas ao posto com falhas (mm);

Tabela 1. Descrição dos postos pluviométricos

Código	Estação	Estado	Município	Latitude (S)	Longitude (O)	Altitude (m)
2147037	Fazenda Monte Alegre	SP	Descalvado	21,95	47,7	840
2147042	Governador Fernando Costa	SP	Pirassununga	21,97	47,67	640
2147043	Fazenda Santa Rita	SP	Descalvado	21,97	47,7	780
2147059	Usina Capão Preto	SP	São Carlos	21,87	47,8	610
2147073	Venda Branca	SP	Casa Branca	21,93	47,13	610
2147085	Baguaçu	SP	Pirassununga	21,88	47,32	600
2148048	Usina Tamóio (Bela Vista)	SP	Araraquara	21,92	48,18	560
2148061	Usina Chibarro (CPFL)	SP	Araraquara	21,88	48,15	580
2148086	Ibaté	SP	Ibaté	21,95	48	830
2247003	Sitio São Geraldo	SP	Santa Cruz da Conceição	22,12	47,42	620
2247004	Analândia	SP	Analândia	22,13	47,67	660
2247005	Cresciumal	SP	Leme	22,16	47,28	600
2247006	Visconde de Rio Claro	SP	Itirapina	22,15	47,8	740
2247010	Corumbatai	SP	Corumbatai	22,22	47,62	600
2247012	Itirapina	SP	Itirapina	22,23	47,8	790
2247013	Fazenda Santa Cruz	SP	Araras	22,27	47,32	600
2247015	Graúna	SP	Itirapina	22,3	47,75	610
2247016	Conchal	SP	Conchal	22,33	47,18	580
2247017	Fazenda Belmonte	SP	Araras	22,3	47,45	720
2247022	Santa Gertrudes	SP	Santa Gertrudes	22,48	47,52	620
2247024	Charqueada	SP	Charqueada	22,52	47,78	600
2247025	São Pedro	SP	São Pedro	22,53	47,92	600
2247027	Limeira	SP	Limeira	22,57	47,37	640
2247031	Usina Ester	SP	Cosmópolis	22,67	47,22	560
2247032	Artemis	SP	Piracicaba	22,68	47,77	470
2247039	Fazenda São Pedro	SP	Piracicaba	22,75	47,75	540
2247075	UHE Americana Jusante	SP	Americana	22,69	47,29	521
2247100	Artur Nogueira	SP	Artur Nogueira	22,56	47,16	640
2248005	Ribeirão Bonito	SP	Ribeirão Bonito	22,08	48,18	590
2248008	Fazenda São Pedro	SP	Dourado	22,08	48,18	690
2248009	Dourado	SP	Dourado	22,1	48,3	700
2248023	Santa Maria da Serra	SP	Santa Maria da Serra	22,57	48,15	470
2248025	Fazenda do Barreiro Rico	SP	Anhembi	22,69	48,12	560

Para avaliar a distribuição temporal da ocorrência de anomalias foi calculada a tendência de anomalias (Equação 3) para cada ano do período definido.

$$A_n = (x - x_{ii}) \qquad \text{Equação 3}$$

onde,

A_n: Valor total de precipitação do ano com anomalia (mm);

x: Média climatológica do período estudado (mm);

x_{ii}: Total anual de precipitação calculado (mm);

Além disso, o desvio padrão (Equação 4), o desvio normalizado (Equação 5) e o coeficiente de variância (Equação 6) da precipitação foram determinados.

$$\sigma = \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(P_p - \bar{P}\right)^2} \qquad \text{Equação 2}$$

$$D_n = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{P_p-\bar{P}}{\sigma} \qquad \text{Equação 3}$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{P}} \qquad \text{Equação 4}$$

Após a correção dos dados, o Fator R foi obtido por meio da metodologia desenvolvida por Lombardi e Moldenhauer (1992) para o Estado de São Paulo (Equação 7).

onde,

P_p: Precipitação do mês analisado (mm);

$\bar{P}$: Média mensal da precipitação (mm);

σ: Desvio Padrão (mm);

D_n: Desvio Normalizado (mm);

n: Número de anos;

CV: Coeficiente de variância (mm).

Posteriormente, a metodologia de interpolação de dados denominada de Ponderação do Inverso das Distâncias (IDW) foi utilizada para inserir os valores do Fator R no ambiente SIG (QGIS 3.22.9). Esta interpolação é baseada na dependência espacial, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior o peso atribuído ao ponto amostrado (JIMENEZ e DOMENICQ, 2008). Adotou-se o Datum SIRGAS 2000, com projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) no fuso 23 Sul. Como produto final, gerou-se o mapa da distribuição espacial do Fator R (*raster*).

5.1.2. Erodibilidade do Solo (Fator K)

A erodibilidade do solo está associada à sua suscetibilidade à erosão. Essa vulnerabilidade é decorrente das propriedades do solo que interferem na sua capacidade total de armazenamento, na permeabilidade e na velocidade de infiltração (FARINASSO *el al*, 2006).

Para obter o Fator K o mapa pedológico do Estado de São Paulo foi utilizado como base. O mapa encontrava-se em formato *shapefile* (*shp*) gerado em setembro de 2017 pelo Márcio Rossi e disponibilizado pelo site da Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (ROSSI, 2017).

Os valores de K foram obtidos por meio da literatura cientifica disponível, visto

as diversas limitações encontradas na determinação experimental. No QGIS, o arquivo original foi recortado para a área de interesse e os valores de erodibilidade foram inseridos de acordo com os grupos do solo (Tabela 2). Por fim, converteu-se o mesmo em formato *raster* para sua posterior utilização na USLE.

Tabela 2. Valores do Fator K para cada tipo de solo encontrado na BHRC

Sigla	Tipos de Solo	Fator K (t.h.ha.MJ-1.mm-1)
AU	Área Urbana	0,000
PVAa	Argissolos Vermelho-Amarelos Abrúptico	0,028
PVAd	Argissolos Vermelho-Amarelos Distrófico	0,055
PVa	Argissolos Vermelhos, textura argilosa	0,035
PVm	Argissolos Vermelhos, textura média	0,034
CX	Camissolos Háplicos	0,035
MT	Chernossolos Argilúvicos	0,023
GX	Gleissolos Háplicos	0,014
LVAa	Latossolos Vermelho-Amarelos, textura argilosa	0,011
LVAm	Latossolos Vermelho-Amarelos, textura média	0,014
LVd	Latossolos Vermelhos Distroférrico	0,013
LVe	Latossolos Vermelhos Eutroférrico	0,012
LVa	Latossolos Vermelhos, textura argilosa	0,015
LVm	Latossolos Vermelhos, textura média	0,017
RL	Neossolos Litólicos	0,053
RQ	Neossolos Quartzarênicos	0,049
NVa	Nitossolos Vermelhos latossólico	0,052
NVt	Nitossolos Vermelhos típico	0,019
R	Rios, represas e lagoas	0,000

Fonte: Carvalho (2012).

5.1.3. Comprimento de Rampa e Declividade (Fator LS)

O Fator de Comprimento de Rampa e de Declividade, também conhecido como Fator Topográfico, consiste na relação entre as perdas de solo por unidade de área em um declive qualquer (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2014).

Desenvolvido pela NASA, em parceria com a Agência Espacial Italiana (ASI) e o Centro Aeroespacial Alemão (DLR), o projeto *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) é um importante sistema radar que gera seus produtos a partir de técnicas de interferometria. Concentrando-se na aplicabilidade em solos brasileiros, o projeto TOPODATA do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE) dispõe o *raster* do MDE e suas

derivações a partir dos dados SRTM (RABUS, 2003).

Dentre as diversas metodologias existentes, optou-se por calcular cada fator separadamente. O Fator L foi determinado através da Equação 8, proposta por Desmet e Govers (1996).

$$L_{i,j} = \frac{\left[\left(A_{i,j-in}+D^2\right)-\left(A_{i,j-in}\right)^{m+1}\right]}{\left[D^{m+2}{x_{i,j}}^m(22,13)^m\right]} \qquad \text{Equação 5}$$

onde,

$L_{i,j}$: Fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i, j) (adimensional);

$A_{i,j-in}$: Área de Contribuição de uma célula com coordenadas (i, j) (m²);

D: Tamanho da grade de células (m);

$x_{i,j}$: Valor da direção do fluxo; e

m: Coeficiente dependente da declividade.

Foi utilizado o MDE do projeto TOPODATA com resolução espacial de 30 metros para geração do mapa de declividade e para subsequente determinação da área de contribuição, do acúmulo de fluxo e da direção de fluxo para cada pixel. Na obtenção deste último, encontraram-se depressões que agem como um elemento de interrupção de fluxo. Portanto, necessitou-se corrigi-las (JENSEN e DOMINGUES, 1988).

O cálculo da constante "m" na USLE seguiu a metodologia de Foster *el al*, (1977), expressa na Equação 9.

$$m = \frac{\beta}{(1+\beta)} \qquad \text{Equação 6}$$

onde,

β: Quociente entre a erosão por sulco (ocasionada pelo fluxo) e a erosão entre-sulcos (ocasionada pelo impacto das gotas de chuva).

O valor de "β" foi estimado com base no método de McCool *et al* (1989) (Equação 10). Usualmente, estes valores são calculados para condições de solo moderadamente suscetível a erosão por sulcos e entre-sulcos.

$$\beta = \frac{\left({sen\ \theta}/{0,0896}\right)}{[3*(sen\ \theta)^{0,8}+0,56]} \qquad \text{Equação 7}$$

onde,

θ: Declividade da encosta (em graus);

Para o fator de declividade (S) foi utilizada a metodologia de Wischmeier & Smith (1978) (Equação 11). Por fim, o Fator LS foi calculado através do produto dos fatores envolvidos.

$$S = 0{,}00654\,\theta^2 + 0{,}0456\,\theta + 0{,}065 \qquad \text{Equação 8}$$

5.1.4. Uso e Manejo do Solo (Fator C) e Práticas Conservacionistas (Fator P)

Para fins de simplificação, considerou-se os fatores C e P como um único fator (CP) por meio do produto dos mesmos, de acordo com a metodologia de Farinasso *el al* (2016).

O Fator de Uso e Manejo do Solo (C) influencia diretamente na relação entre as perdas de solo e a cobertura do mesmo. Sendo assim, em casos agrícolas, a redução da erosão pode estar associada ao tipo de cultura e do manejo escolhido além da fase do ciclo vegetativo (SILVA, 2021).

De acordo com Batista *et al* (2017), o fator C varia de 0 a 1, com uma diminuição gradativa da cobertura vegetal conforme o aumento dos valores de C, até alcançar o valor 1 que corresponde às áreas de solo exposto.

Além disso, os valores ainda podem variar ao decorrer dos anos em decorrência das mudanças na intensidade e na forma de cada uso da terra. Assim, torna-se imprescindível a utilização de imagens de épocas próximas àquela que se deseja determinar a perda de solo (BORGES, 2009).

O Fator C foi estimado através do mapa de uso e cobertura da terra disponibilizado, em formato *raster*, pelo projeto MapBiomas, para o ano de 2020. A utilização deste mapa é justificada graças ao seu grande detalhamento de classes de usos, como por exemplo, a cana, que possui forte presença na BHRC. Tal projeto faz parte de uma iniciativa de diversas universidades, empresas de tecnologias e ONGs com o intuito de mapear e monitoras as mudanças da cobertura da terra no decorrer dos anos (MAPBIOMAS, 2021). Os mapas de 2000, 2005 e 2015 também foram utilizados para avaliar a evolução anual destes usos, conforme demonstra o item 4.4.

Assim como no Fator K, para cada uso da terra foi associado a um respectivo valor de C que foi obtido por meio da literatura científica, conforme demonstra a Tabela 3.

Tabela 3. Valores do Fator C para cada classe temática

ID	Classe de uso e ocupação da terra	Fator C	Referências
3	Formação Florestal	0,0004	Barbosa et al, 2015
4	Formação Savânica	0,0007	Carneiro, 2019
9	Silvicultura	0,0001	Martins, 2015
11	Campo Alagado	0,0250	Morgan, 2005
12	Formação Campestre	0,2500	Barbosa et al, 2015
15	Pastagem	0,0100	Barbosa et al, 2015
20	Cana-de-açúcar	0,0500	Martins, 2015
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	0,2500	Carneiro, 2019
24	Área Urbanizada	0,0688	Pasquatto e Tomazoni, 2016
25	Outras áreas não vegetadas (Solo Exposto)	0,0500	Barbosa et al, 2015/ Souza, 2010
30	Mineração	1,0000	Back et al., 2017
33	Rio, Lago, Oceano	0,0000	Pasquatto e Tomazoni, 2016
39	Soja	0,1437	Bertol et al (2002) citado por Cecílio (2008)
41	Lavouras Temporárias	0,1893	Silva, Albuquerque Filho, Sales e Lourenço, 2017
46	Café	0,0201	Bertol et al (2002) citado por Cecílio (2008)
47	Citrus	0,0500	Rocha, 2015
48	Lavouras Perenes	0,4600	Bertoni e Lombardi Neto, 1985 apud Gómez, J. D. P

O Fator de Práticas Conservacionistas (P) tem por finalidade reduzir a erosão ocasionada pelas práticas de manejo agrícola. Em áreas muito grandes, como bacias hidrográficas, a identificação dessas práticas é demasiadamente complexa. Deste modo, a literatura científica recomenda considerar o Fator P como igual a 1 (KARAMAGE *et al*, 2016).

5.1.5. Integração e análise dos fatores

Os *rasters* dos fatores R, K, LS e CP foram multiplicados através da ferramenta intitulada “Calculadora Raster” do QGIS 3.22.9 a fim de se obter o Fator A. Finalmente, os resultados da erosão bruta foram classificados conforme a classificação proposta pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), como demonstra a Tabela 4.

Tabela 4. Classificação da perda do solo

Perda de solo ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$)	**Classe de interpretação**
0 a 1	Nenhuma ou ligeira
1 a 3	Nenhuma ou ligeira
3 a 5	Nenhuma ou ligeira
5 a 10	Nenhuma ou ligeira
10 a 20	Moderada
20 a 50	Moderada
50 a 200	Alta
> 200	Muito Alta

Fonte: FAO (1967)

5.2.Previsão de Mudanças Climáticas

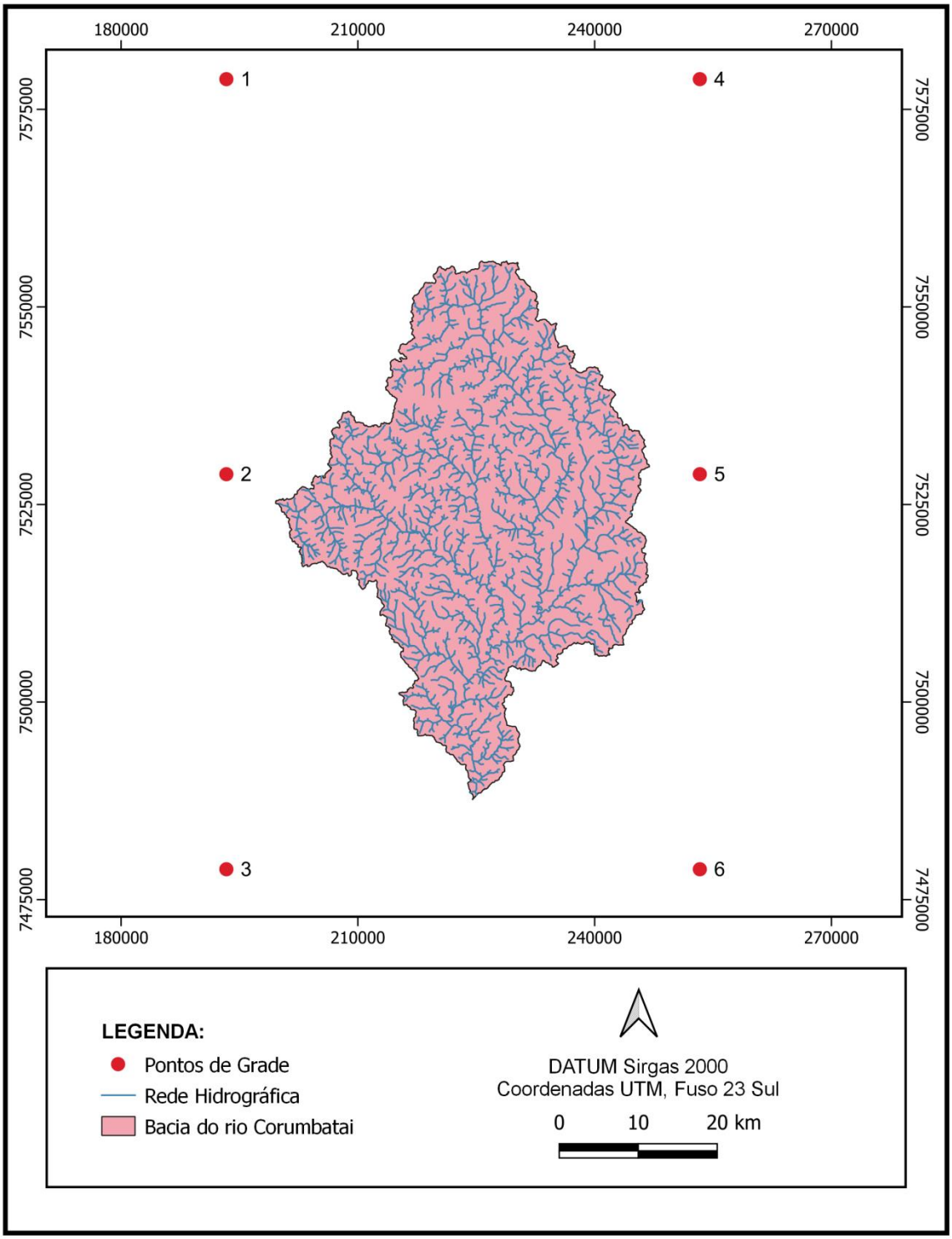
5.2.1. Levantamento de dados de precipitação do Modelo ETA

Os dados de previsão da precipitação para a BHRC foram adquiridos através do modelo de circulação atmosférica regional ETA do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Este é um modelo hidrostático com mesoescala em ponto de grade e que utiliza a coordenada vertical ETA a fim aprimorar o cálculo do gradiente horizontal (MESINGER, 1984).

O conjunto de dados referidos é disponibilizado pela Plataforma PROJETA após passar pelo processo de *downscaling*. Este processo baseia-se na regionalização de dados utilizando-se os modelos climáticos globais acoplados como modelos forçantes para as condições de contorno do modelo regional (MESINGER *et al*, 2012).

Dentre os diversos modelos presentes na plataforma, o HADGEM2-ES é o único que apresenta resolução espacial de 5 km para a região sudeste (domínio sudeste-BR), motivo pelo qual foi escolhido na utilização deste trabalho. Portanto, as simulações regionalizadas foram realizadas com o modelo HADGEM2-ES, no período de 2030 a 2070, na escala diária e com resolução espacial de 5 km em seis pontos de grade distribuídos no entorno da bacia, conforme metodologia proposta por Silva (2010) (Figura 5).

Figura 5. Distribuição espacial dos pontos de grade do modelo ETA



Além disso, é válido ressaltar que tais simulações foram realizadas em três cenários: histórico, RCP4.5 e RCP8.5. O primeiro cenário, o histórico, também conhecido como período de referência, corresponde ao período atual para as oncentrações de gases do efeito estufa (GEEs). Este período é utilizado como base na comparação com os valores encontrados nos postos pluviométricos para detecção de

possíveis erros sistemáticos (CPTEC, 2017). Nesse sentido, utilizou-se o mesmo período do item 4.2.1. que foi de 1970 a 1999.

O segundo cenário, RCP4.5, foi desenvolvido pela equipe de modelagem do *Pacific Northwest National Laboratory's Joint Change Research Institute* (JGCRI) dos EUA. Neste cenário, as forçantes radiativas estabilizam-se em 4,5 W/m² antes do ano de 2100, por meio de estratégias de redução da emissão de GEEs (WISE *et al*, 2009).

Por fim, o terceiro cenário, RCP8.5, foi desenvolvido pelo *International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) da Áustria. Neste cenário a emissão de GEEs não é controlada de modo que as forçantes radiativas alcancem 8,5 W/m² até o ano de 2100. Portanto, pode-se considerar o cenário RCP4.5 como mais otimista em relação ao RCP8.5 (RIAHI *et al*, 2007)

Ressalta-se que os dados das variáveis climáticas disponibilizados pela Plataforma PROJETA não foram submetidos ao processo de correção de viés. Nesse sentido, o tópico a seguir discorre sobre a metodologia utilizada neste processo.

5.2.2. Correção dos dados de precipitação do Modelo ETA

Os modelos de previsão climática, embora muito importantes para estudos acerca da interferência do clima em cenários futuros, apresentam erros sistemáticos. Tais erros estão relacionados principalmente a representação dos processos físicos atuantes, bem como, das condições iniciais e de fronteira aplicadas nesses modelos (MOURA *et al*, 2010).

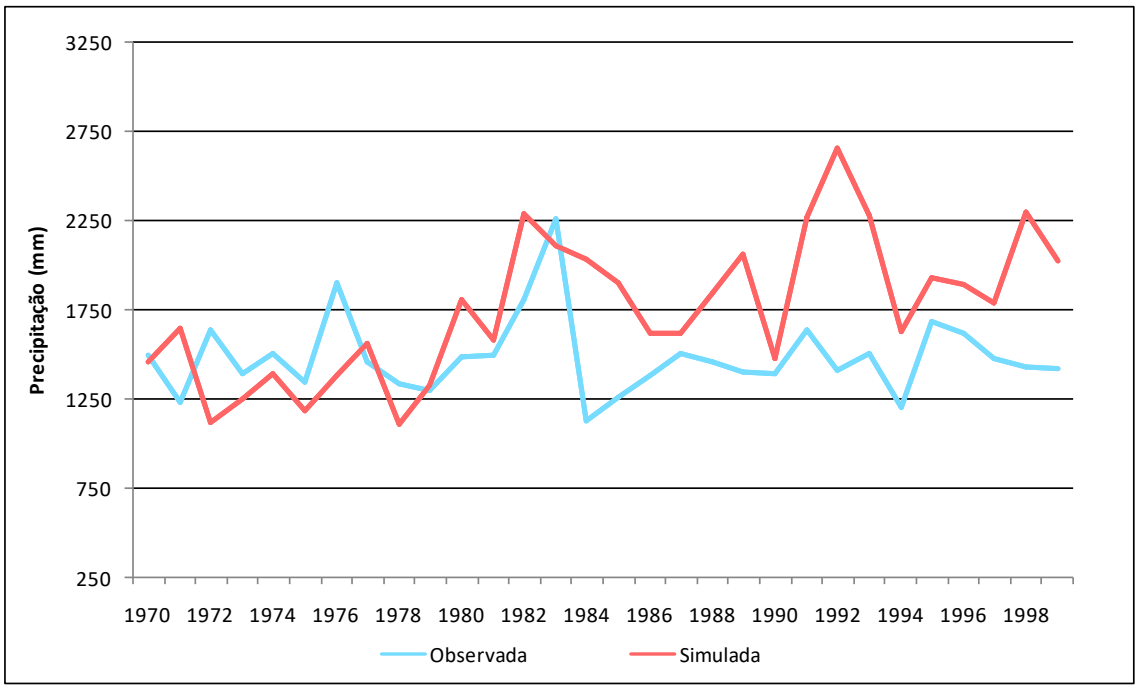
A reprodução de eventos extremos é outra limitação dos modelos atmosféricos. Isso ocorre porque muitas vezes os modelos são incapazes de compreender sistemas intensos, de modo a superestimar ou subestimar a intensidade das variáveis climáticas. Nesse sentido, é fundamental a avaliação do desempenho destes modelos para detectar e reduzir os erros sistemáticos e, assim, obter previsões cada vez mais confiáveis (VIEIRA JUNIOR *et al*, 2009).

De acordo com Wood *et al* (2002), os erros sistemáticos que esboçam a diferença entre o valor estimado e o parâmetro observado são denominados de viés. Quando se verifica a presença de tais erros, modificações são realizadas com o objetivo de reduzir o viés existente. Este procedimento é intitulado de correção de viés.

Como demonstra a Figura 6, o modelo HADGEM2-ES não apresenta uma clara tendência em relação aos dados observados, visto que em determinados anos superestima e em outros subestima os dados de precipitação total anual. Sendo assim, a

utilização de um método de correção de viés se faz necessária. Neste trabalho, aplicou-se a metodologia desenvolvida por Braga *et al* (2009) e adaptada por Fernándes Bou *et al* (2015).

Figura 6. Comparação entre os valores de precipitação observados e os estimados pelo modelo HADGEM2-ES



Inicialmente, os totais mensais foram calculados para os dados de precipitação observada e de precipitação simulada no cenário histórico do modelo atmosférico. Como supracitado, o período de referência foi de 1970 a 1999. Em seguida, os dados foram organizados de maneira crescente sem respeitar a série temporal. Com isso, construíram-se curvas de dispersão em planilhas do *software* Excel, cujo eixo das ordenadas corresponde à precipitação observada e o eixo das abscissas à precipitação simulada. Ressalta-se que essas curvas foram realizadas para cada mês do ano e para cada ponto da grade de previsão. Posteriormente, foram obtidas as linhas de tendência polinomial de ordem 2 que geraram as equações utilizadas como parâmetro para a correção dos dados simulados nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 do período futuro (2030 a 2070).

5.2.3. Aplicação dos dados de precipitação simulados pelo Modelo ETA na USLE

Após a remoção de viés dos dados simulados para o período futuro, o total mensal e anual foi calculados para cada ponto da grade. Posteriormente, determinou-se o Fator R de acordo com a Equação 7.

Assim como demonstra o tópico 4.2.1., a interpolação IDW foi utilizada para converter os dados do Fator R no mapa (*raster*) da distribuição da erosividade na bacia. Os valores inseridos no QGIS 3.22.9 correspondem a cada ponto da grade de cada cenário futuro. Sendo assim, foram obtidos dois mapas, um mapa para o RCP4.5 e outro para o RCP8.5. Estes foram utilizados para posterior avaliação da influência das mudanças climáticas na USLE.

5.2.4. Avaliação estatística dos dados de precipitação do Modelo ETA

Para fins comparativos, se faz necessário averiguar se os quantitativos das precipitações simuladas, com e sem correção de viés, apresentam diferenças estatísticas significativas em relação aos dados de precipitação observada. O teste T-Student foi a ferramenta escolhida para esse propósito uma vez que apresenta resultados importantes para a toma de decisão em estudos hidrológicos e climatológicos (CABRAL JÚNIOR *et al*, 2017; FRAUCHES *et al*, 2020). Destaca-se que as precipitações simuladas neste item correspondem as precipitações médias dos seis pontos de grade obtidas pelo método de Thiessen.

Posteriormente, foi avaliada a qualidade dos dados simulados considerando os seguintes critérios: cálculo do índice de *bias* (Equação 12); cálculo dos erros médios absolutos (EMA) (Equação 13), relativos (EMR) (Equação 14) e quadráticos (EMQ) (Equação 15) e; redução da variância (RV) (Equação 16).

$$bias = \frac{\overline{P_s}}{\overline{P_o}} \qquad \text{Equação 9}$$

$$EMA = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_s - P_o| \qquad \text{Equação 10}$$

$$EMR = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{P_s - P_o}{P_o}\right| \qquad \text{Equação 11}$$

$$EMQ = \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_s - P_o)^2} \qquad \text{Equação 12}$$

$$RV = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_s - P_o/P_{oi})^2}{\sum_{i=1}^{n}(P_{mc} - P_o/P_{oi})^2} \qquad \text{Equação 13}$$

onde,

$\overline{P_s}$: Média da precipitação simulada;

$\overline{P_o}$: Média da precipitação observada;

P_s: Precipitação simulada;

P_o: Precipitação observada;

P_{mc}: Precipitação média simulada;

P_{oi}: Média móvel da precipitação observada para cada mês;

n: Número de anos.

O cálculo da redução da varia seguiu a metodologia descrita por Collischonn *et al* (2005). Esta avalia a capacidade de redução da dispersão dos valores de previsão, com ou sem correção de viés. Sendo assim, valores de RV iguais a 1 indicam que não há diferença entre as precipitações simuladas e as observadas (previsão perfeita) (SILVA, 2010).

5.3.Previsão das classes de uso e ocupação da terra

5.3.1. Pré- processamento das imagens

As simulações futuras acerca dos usos da terra foram realizadas a partir do módulo *Land Change Modeler* (LCM) anexado ao *software TerrSet* 18.0. Sendo assim, todas as imagens utilizadas foram previamente inseridas no *software* QGIS 3.22.9 para que fossem reprojetadas para o sistemas de coordenadas UTM, fuso 23 Sul; recortadas para a área da Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí e; convertidas para o formato *raster*.

O emprego do LCM deve-se a diversos fatores. Dentre eles cita-se: interface simples acoplada ao ambiente SIG; admite imagens de média e alta resolução espacial e; permite adicionar variáveis explanatórias que auxiliam na caracterização da área de estudo (SOUZA, 2020).

A metodologia do Modelo LCM pode ser segmentada em duas etapas principais: (a) Modelagem do potencial de transição e (b) Modelagem das mudanças de uso da terra. Na primeira etapa, são agrupadas informações do período atual que possibilitam representar as tendências mais expressivas de mudanças na cobertura terrestre. Já a segunda etapa visa validar a etapa anterior e realizar simulações destas mudanças para o período futuro.

5.3.2. Modelagem do potencial de transição

5.3.2.1.Calibração

A calibração do módulo LCM foi realizada a partir dos mapas de cobertura terrestre dos anos de 2005 e 2015. Para isso, primeiramente, selecionou-se as classes de uso da terra mais representativas na BHRC. Em seguida, determinou-se, por meio de um parâmetro polinomial de terceira ordem, a tendência espacial das transições das classes ao longo dos anos avaliados. Esta tendência caracteriza-se como um importante critério para as simulações futuras (MISHRA *et al*, 2018).

5.3.2.2.Seleção das transições de interesse

Tendo como base o item anterior, as seguintes transições de interesse foram selecionadas: Pastagem para Mosaico de Agricultura e Pastagem; Soja para Cana; Pastagem para Cana; Mosaico de Agricultura e Pastagem para Cana; Mosaico de Agricultura e Pastagem para Formação Florestal e; Mosaico de Agricultura e Pastagem para Pastagem.

5.3.2.3.Teste e definição das variáveis explanatórias

Neste item, foram avaliadas diversas variáveis associadas a fatores físicos e socioeconômicos que podem exercer grande influência nas mudanças dos usos da terra. Nesse sentido, utilizou-se o teste de Cramer-V disponibilizado pela própria plataforma LCM. O critério de seleção adotado foi ser superior a 0,15, visto que a partir deste valor é detectada a relação entre a mudança de cobertura e a variável avaliada (EASTMAN, 2009).

Portanto, as seguintes variáveis foram selecionadas: altitude (m); declividade (%); precipitação média (mm); distância de rodovias (m); distância de centros urbanos (m) e distância dos cursos d’água (m).

5.3.2.4.Modelagem do potencial de transição

Nesta etapa, cada transição de interesse selecionada foi modelada a partir do método de Rede Neural de Percepção Multicamada (MLPNN). Este método foi escolhido pois permite modelar todas as transições de uma única vez.

Como resultado da modelagem, gerou-se um mapa de potencial de transição. Este mapa demonstra a probabilidade de cada célula sofrer ou não mudanças na cobertura da terra. Os valores de probabilidade variam de 0 a 1, de modo que quanto

mais próximo a 1, maior o potencial de mudança.

5.3.3. Modelagem das mudanças de uso da terra

5.3.3.1. Validação da simulação de mudanças na cobertura da terra

Após a modelagem do potencial de transição, a validação da simulação da cobertura da terra foi realizada mediante a comparação dos mapas de uso da terra da plataforma MapBiomas e simulado no LCM, ambos para o ano de 2020. Utilizou-se a ferramenta *Minus* como instrumento de validação. Tal ferramenta subtrai os valores dos pixel de cada dos mapas avaliados e identifica erros (valores diferentes de zero) e acertos (valores iguais a zero) (SOUZA, 2010).

5.3.3.2. Simulação futura da cobertura da terra

Validada a simulação para o ano de 2020, foi iniciada a etapa de simulação da cobertura da terra para o período futuro. Assim, construiu-se uma matriz referente as mudanças na cobertura terrestre que foram corretamente simuladas no item anterior. Para tanto, utilizou-se a ferramenta de processo de predição Cadeia de *Markov*.

Posteriormente, foi realizada a simulação futura das classes de uso da terra através da análise da interação da matriz criada com o potencial de transição de cada pixel. Isto posto, foi gerado um mapa de simulação para o ano 2070. Ressalta-se que a metodologia utilizada pelo módulo LCM parte do pressuposto que as transições de interesse observadas serão mantidas no futuro.

5.3.4. Aplicação do mapa de simulação futura de uso da terra na USLE

O mapa do módulo LCM foi gerado em formato *raster*. Sendo assim, após adicionar o referido mapa no QGIS 3.22.9, cada classe de uso da terra foi correlacionada a um valor do Fator C (Tabela 3). Para o Fator P adotou-se o valor 1. Portanto, esta etapa seguiu a metodologia do tópico 4.2.4.

5.4. Construção de cenários futuros

Os cenários construídos nesta etapa visam avaliar a influência das mudanças climáticas e da cobertura da terra nas perdas de solo na BHRC, de acordo com o modelo USLE.

O cenário 01 avaliou, a resposta da bacia frente às mudanças climáticas. Sendo assim, utilizou-se os dados do modelo ETA para o cálculo do Fator R, conforme

descrito o item 4.3.3 Os valores de uso da terra foram mantidos iguais ao período atual. No cenário 02, os dados de precipitação foram os mesmos do cenário anterior, porém, utilizou-se o mapa da distribuição das classes da terra gerado pelo módulo LCM para o ano de 2070, vide item 4.4.4. A Tabela 5 apresenta os critérios utilizados em cada cenário.

É importante destacar que, previamente, os valores do Fator R gerados a partir do Modelo ETA seriam avaliados isoladamente para o RCP4.5 e para o RCP8.5. Ou seja, seriam avaliados cinco cenários. Entretanto, optou-se por utilizar a média entre estes dois RCPs, uma vez que não foram constatadas diferenças significativas entre ambos.

Tabela 5. Critérios avaliados em cada cenário

	Cenário 01	**Cenário 02**
Fator R	Dados de precipitação da média entre os cenários do Modelo ETA	Dados de precipitação da média entre os cenários do Modelo ETA
Fator K	Valores do período atual	Valores do período atual
Fator LS	Valores do período atual	Valores do período atual
Fator CP	Valores do período atual	Valores obtidos pelo LCM

6. RESULTADOS

6.1.Avaliação da variabilidade da precipitação

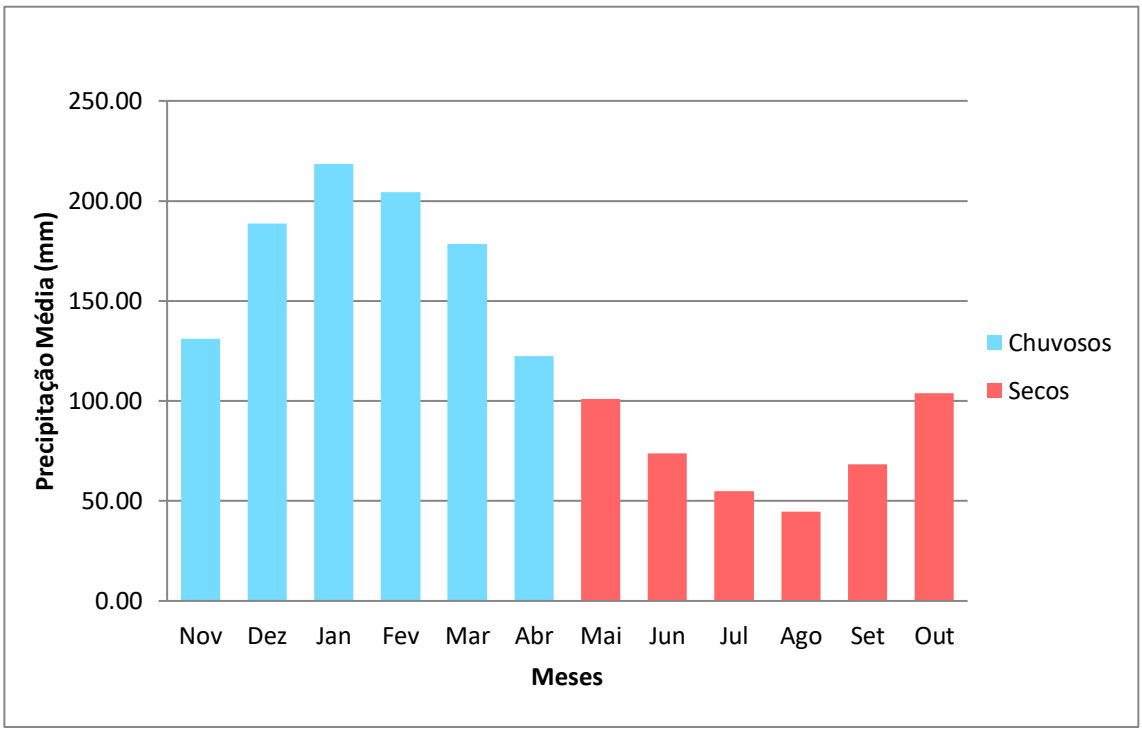
6.1.1. Variabilidade temporal

O conhecimento sobre as características da bacia é fundamental para a conservação dos solos e para o manejo dos recursos hídricos. Neste contexto, o presente item visa compreender as tendências anuais e mensais da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio Corumbataí tanto no âmbito temporal, quanto no espacial. O período de análise abrange os anos de 1970 a 1999.

As análises anuais da precipitação representam a média ou o total pluvial. Entretanto, a distribuição das chuvas em uma bacia hidrográfica, via de regra, ocorre de maneira desigual no decorrer do ano. Isso significa que as precipitações podem se concentrar em um determinado período, formando estações secas e chuvosas. Daí a importância do estudo das médias mensais (SILVA, 2010).

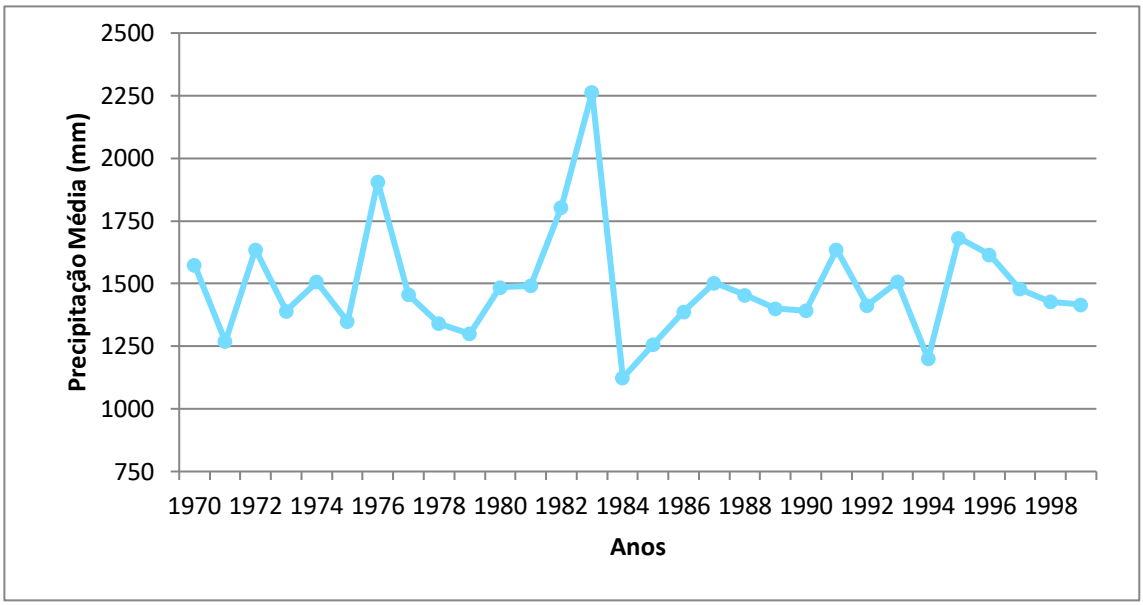
A partir dos dados dos postos pluviométricos, observou-se a formação de duas estações bem definidas (Figura 7). A estação chuvosa ocorre entre os meses de novembro a abril, com média em torno de 174 mm mês^{-1}. Já os meses de março a outubro pertencem a estação seca, com precipitação média mensal de 75 mm.

Figura 7. Distribuição mensal da precipitação na BHRC



Os dados anuais mostram que a BHRC possui precipitação média de 1488,9 mm, conforme a Figura 8. Os anos de 1976, 1982 e 1983 tiverem precipitações anuais acima da médica, com destaque a 1983 com 2267 mm. As precipitações abaixo da média abrangem os anos de 1984, 1985 e 1994, sendo que em 1984 registrou-se a mínima precipitação anual de 1.123,8 mm.

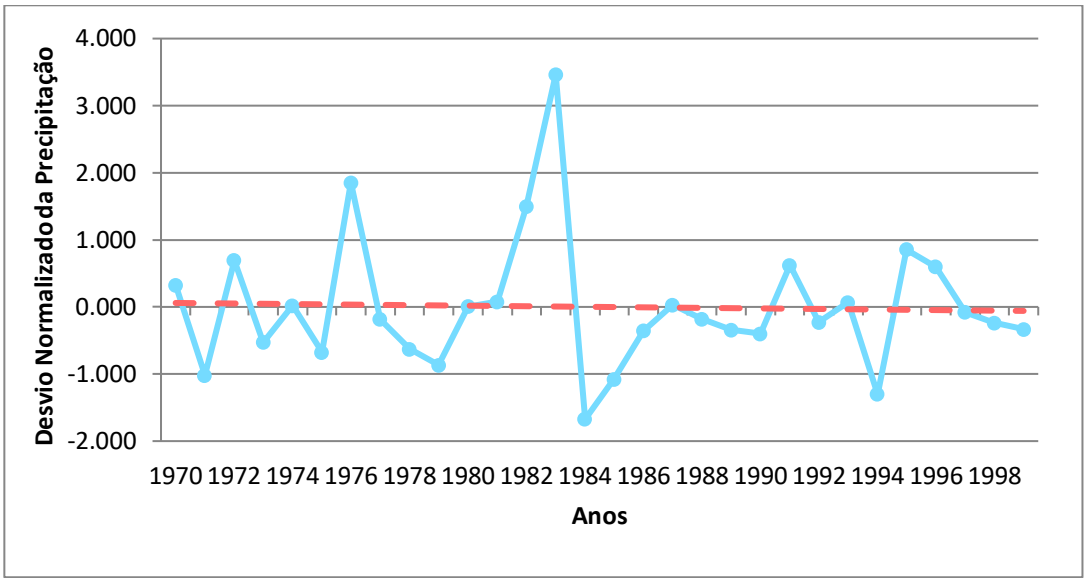
Figura 8. Evolução da precipitação média anual da BHRC para os anos de 1970 a 1999



Ao analisar médias anuais da precipitação de cada posto pluviométricos, destacam-se as menores médias anuais para os postos 2247032 (Artemis) de 1294,3 mm; 2247100 (Artur Nogueira) de 1345,8 mm e; 2247027 (Limeira) de 1353,0 mm. Em oposição, os maiores valores encontrados foram: 1728, 7 mm para o posto 2247075 (UHE Americana Jusante); 1655,7 mm para o posto 2147037 (Fazenda Monte Alegre) e; 1620,4 mm para o posto 2147043 (Fazenda Santa Rita). Os demais postos possuem valores próximos a média da BHRC (1488,9 mm).

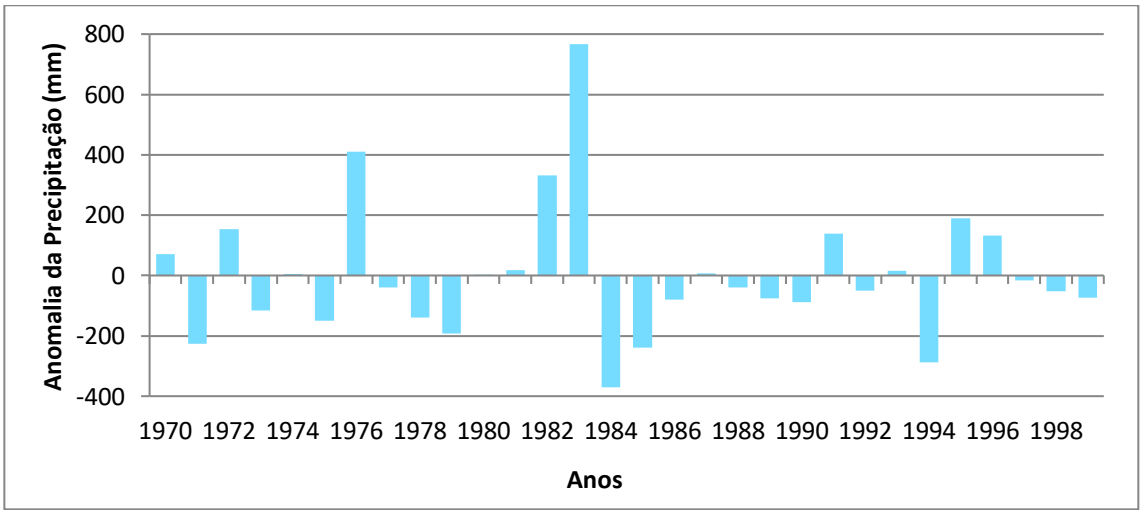
O desvio normalizado da variabilidade anual da precipitação da bacia foi avaliado tendo como base a Figura 9. Nota-se que os anos de 1984, 1994, 1985 e 1971 apresentaram os menores valores. Estes valores indicam desvios negativos da precipitação normalizada. Portanto, para cada ano citado houve redução na precipitação de 24,5%, 19,4%, 15,6% e 14,8%, respectivamente. Os desvios positivos de ordem de 20% foram encontrados para os anos de 1976 e 1982. O aumento da precipitação em relação a média histórica mais expressivo foi de 52% em 1983. A linha de tendência da figura possibilita afirmar que não houve variações significativas na precipitação da bacia ao longo dos anos analisados.

Figura 9. Desvio normalizado da precipitação na BHRC. (Desvio padrão: 222,07)



Outra forma de análise das chuvas utilizada neste trabalho foi a tendência de anomalias. Por meio da Figura 10, observa-se que, no período estudado, a maior parte dos anos (17 anos) registrou precipitação média anual inferior à média histórica da bacia. Ainda em relação à média histórica, 9 anos apresentaram chuvas superiores e 4 anos, valores semelhantes. Embora, a quantidade de anos com valores de anomalia negativos seja maior que os positivos, estes últimos são bastante significativos, vide 1976 (410,6 mm) e 1983 (767,7 mm). Este fato concorda com a linha de tendência da Figura anterior.

Figura 10. Tendência de anomalias das precipitações médias anuais da BHRC



Todas as análises realizadas até esse momento reforçam que os eventos extremos de precipitação na BHRC, dentro do período estudado, ocorreram nos anos de 1976, 1982 e 1983 (cheias) e 1984, 1985 e 1994 (estiagem). Andreoli e Kayano (2007) afirmam que, do ponto de vista climatológico, a ocorrência de anomalias está associada

ao El Niño e La Niña. Estes integram o fenômeno atmosférico-oceânico intitulado de El Niño Oscilação Sul (ENOS). De maneira simplificada, os ENOS são eventos que influenciam na temperatura da superfície do oceano Pacífico Equatorial, tornando-a mais quente (El Niño) ou mais fria (La Niña) que a média histórica. Tais mudanças transportam consigo consequências para a temperatura e precipitação globais (CPTEC/INPE, 2016).

Em todos os anos de anomalias intensas levantados acima foi constatada a presença dos fenômenos ENOS. O ano de 1976 foi o único influenciado pelos dois eventos, com La Niña forte e El Niño fraco. Em 1982, 1983 e 1994 observou-se a ocorrência severa El Niño, sendo o último menos intenso que os restantes. La Niña foi registrada em 1984 e 1985, com fraca intensidade (CAVALCANTI, 1997).

O fenômeno El Niño nos anos de 1982 e 1983 contribuiu para a ocorrência de anomalias na temperatura e na precipitação média em toda a área da Bacia do Rio Corumbataí. O evento de 1983 foi considerado o episódio extremo do século, com chuvas intensas distribuídas pelo ano. Vale considerar que nos trimestres de março/abril/maio e de junho/julho/agosto, a precipitação superou a normal climatológica em mais de meio desvio padrão na região Sudestes do Brasil (NERY e MARTINS, 1998).

A avaliação das anomalias dos anos de 1982 a 1985 é muito interesse, uma vez que nos dois anos iniciais ocorreram eventos históricos de precipitação intensa, enquanto que os anos seguintes foram identificados como períodos de estiagem significativa. Ainda segundo Nery e Martins (1998), foram observados poucos dias de chuva, durante os anos de 1984 e 1985, em todo o estado de São Paulo. Além disso, esses dias apresentaram índices pluviométricos muito baixos. O mês de outubro de 1985 registrou uma redução de aproximadamente 88% da precipitação na capital do estado.

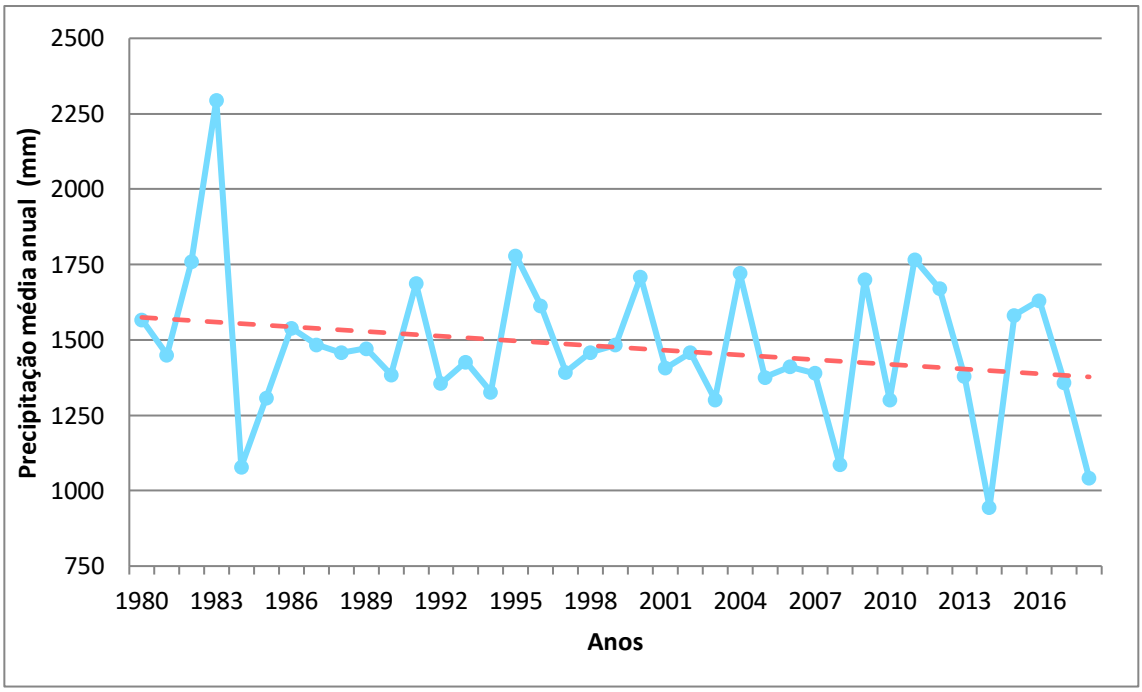
Embora a série histórica da precipitação adotada neste trabalho seja significativa, esta não representa a pluviometria atual da Bacia do Rio Corumbataí, na qual foram registrados eventos climáticos importantes. Nesse sentido, foram coletados dados de precipitação de 1980 a 2018, dos postos pluviométricos presentes na Tabela 6. É importante destacar esse levantamento foi realizado apenas com os postos que abrangem todo o período e que, por não serem numerosos e não apresentarem distribuição em toda a área de estudo, podem ser encontrados erros na caracterização da bacia.

Tabela 6. Postos Pluviométricos analisados no período de 1980 a 2018

Código	Estação	Estado	Município	Latitude (S)	Longitude (O)	Altitude (m)
2247004	Analândia	SP	Analândia	22,13	47,67	660
2247010	Corumbataí	SP	Corumbataí	22,22	47,62	600
2247015	Graúna	SP	Itirapina	22,3	47,75	610
2247184	Itaqueri da Serra	SP	Itirapina	22,34	47,92	894
2247197	Est. Ferroviária Campo Alegre	SP	Brotas	22,24	47,96	747
2248110	Ribeirão Bonito	SP	Ribeirão Bonito	22,07	48,18	486

Assim como feito para a série histórica (1970 – 1999) foram avaliados graficamente os dados de precipitação. A Figura 11 demonstra que os fenômenos de muita chuva não alcançaram a mesma intensidade do ano de 1983. Por outro lado, os eventos de estiagem passaram a ocorrer com mais frequência, destacando os anos de 2008 com 1086,2 mm; 2018 com 1042 mm e; 2014 com 945,2 mm.

Figura 11. Evolução da precipitação média anual da BHRC para os anos de 1980 a2018



Assim como explicado anteriormente, a seca de 2008 esta relacionada com La Niña. Segundo Marengo *el al* (2015), o período de estiagem de 2014 foi provocado pela ocorrência intensa de um sistema de alta pressão atmosférica que bloqueou o transporte

de umidade da Amazônia e dos principais sistemas que ocasionam a precipitação. A combinação desse sistema com fatores socioeconômicos resultou em uma crise hídrica histórica na região sudeste.

Estes episódios revelam que os eventos de estiagem na Bacia do Rio Corumbataí, assim como em todo estado de São Paulo, estão mais duradouros e constantes. A linha de tendência da Figura 11 representa tal fato graficamente, visto que apresenta uma redução de cerca de 10% da precipitação.

O aumento na duração e freqüência de eventos de seca pode influenciar diretamente no comportamento da bacia. De acordo com os trabalhos de Sartori *et al* (2009), Leivas *et al* (2014) e Araújo *et al* (2016), realizados por todo Brasil, os longos períodos de estiagem estudados apresentaram menores valores do Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), ou seja, baixo vigor vegetativo. As anomalias negativas da vegetação resultam em diversos impactos na bacia socioeconômicos e ambientais, como o aumento da erosão por escoamento superficial, por exemplo. Desse modo, ressalta-se a importância do estudo acerca dos fenômenos climáticos atuais na previsão da precipitação e na perda do solo.

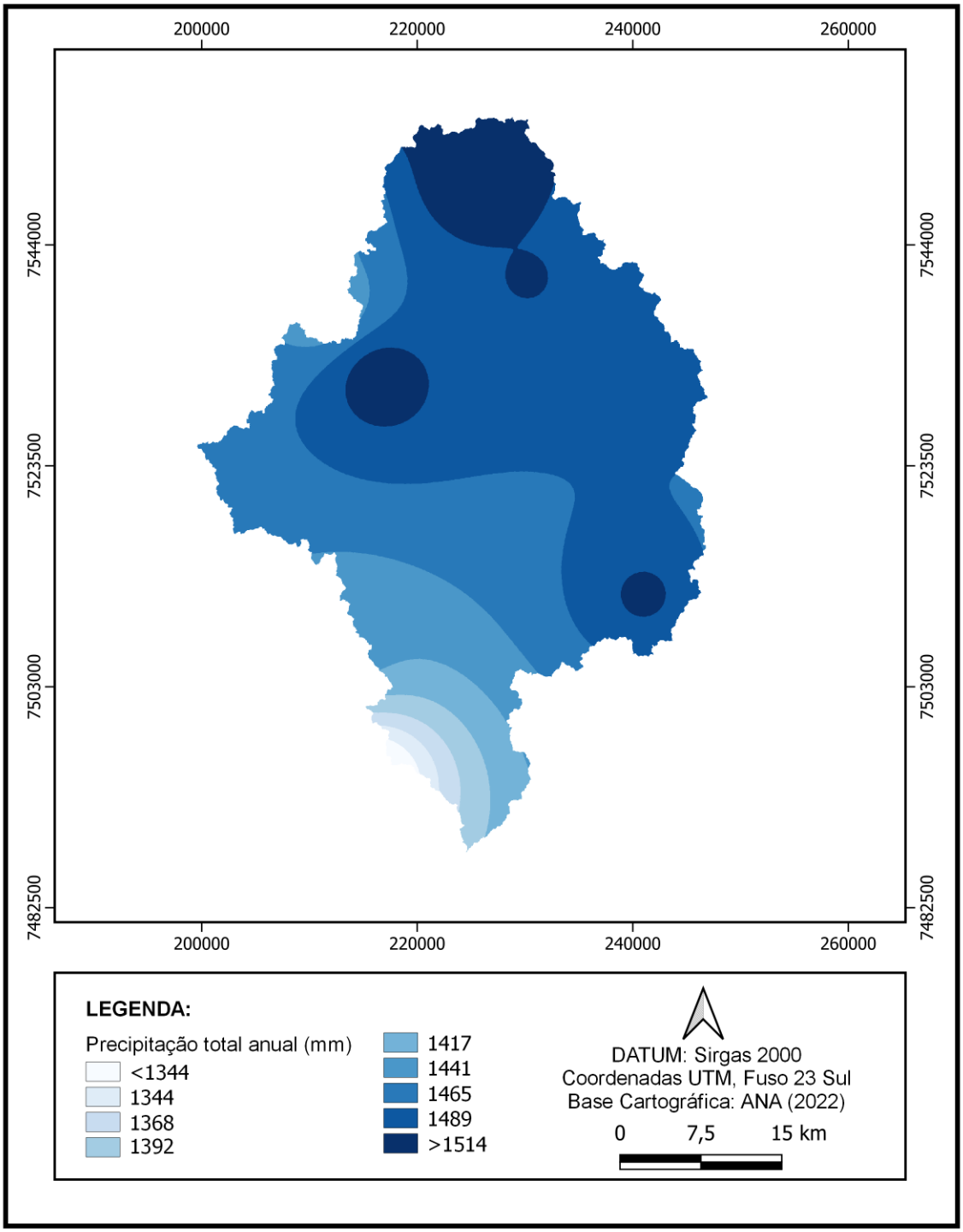
6.1.2. Variabilidade espacial

A avaliação da variabilidade espacial da precipitação na Bacia do Rio Corumbataí foi realizada utilizando-se a Interpolação IDW, como explicado no item 4.2.1. Assim, como item citado, adotou-se o Datum SIRGAS 2000, com projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) no fuso 23 Sul. Na Figura 12, têm-se a espacialização da precipitação total anual no período de 1970 a 1999.

É possível observar na Figura que variação da precipitação anual ocorre no sentido norte/sul, com os valores maiores concentrando-se ao norte da bacia (1514 mm) e os menores ao sul (1344 mm). Apesar desta observação, nota-se que a variabilidade anual da precipitação não é muito expressiva. De acordo com Ramalho *el al* (2016), a altitude se apresenta como um fator importante para os altos índices pluviométricos na região das cuestas, localizadas mais ao norte da bacia. Ademais, as nascentes do Rio Corumbataí concentram-se nesta mesma região.

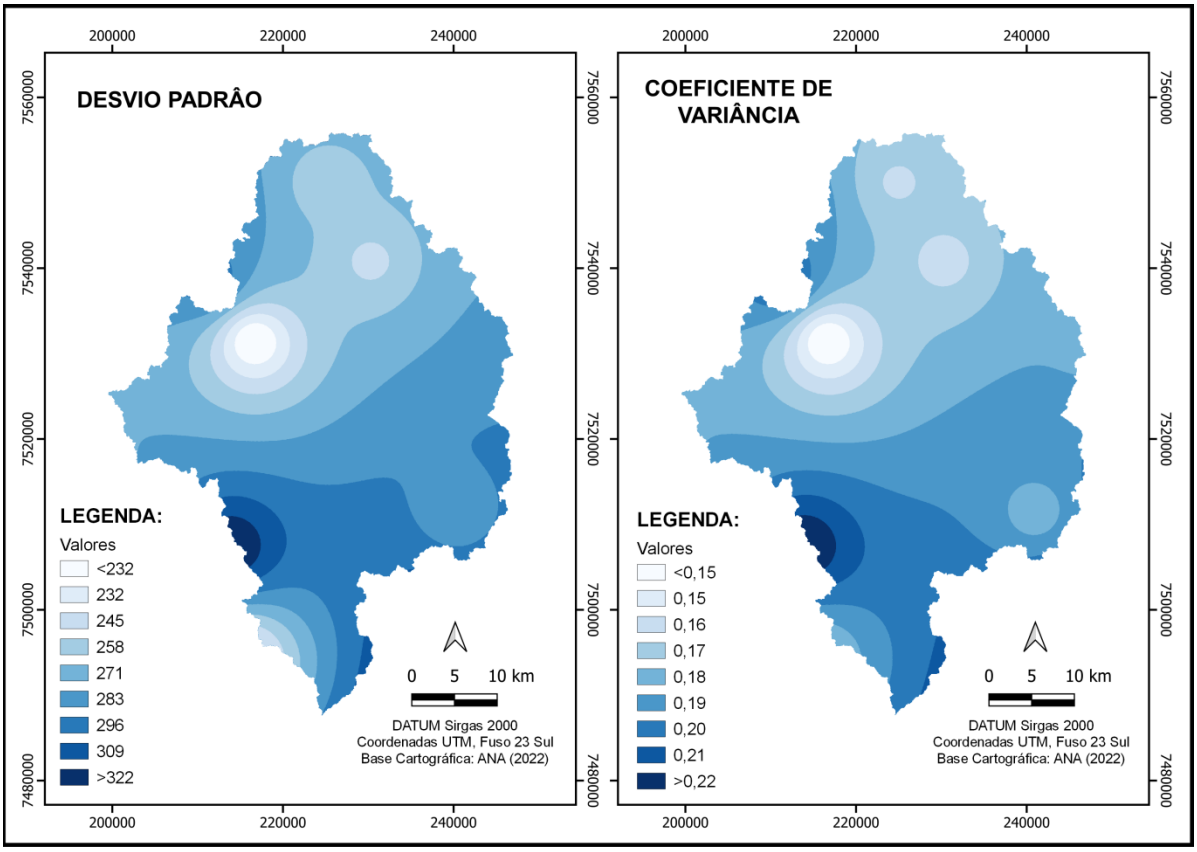
Estudos sobre a distribuição espacial das médias mensais para os períodos secos e chuvosos, do desvio padrão e do coeficiente de variância da precipitação também foram realizados.

Figura 12. Distribuição espacial da precipitação total anual



A Figura 13 mostra o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variância (CV) da precipitação anual da BHRC para 1970 a 1999.

Figura 13. Distribuição espacial do desvio padrão e do coeficiente de variância da precipitação total anual



Observa-se que os maiores valores de desvio padrão encontram-se na região sudoeste da bacia. Os menores valores estão situados pontualmente no norte, sul e centro-oeste. Comparando as duas figuras, nota-se que DP e CV possuem distribuição espacial muito semelhante, com os valores de máximo e mínimo presentes nas mesmas regiões.

Pimentel-Gomes e Garcia (2002) agrupam o CV em quatro classes: (a) baixo, com valores inferiores a 0,10; (b) médio, com valores entre 0,10 e 0,20; (c) alto, com valores entre 0,20 e 0,3 e; (d) muito alto, com valores superiores a 0,30. O coeficiente de variância médio da bacia é considerado alto, aproximadamente 0,21, porém são encontrados valores classificados como muito alto, alcançando valores de até 0,7.

A variabilidade da distribuição das chuvas ocasiona em um maior impacto na paisagem. De acordo com Silva (2010), os períodos de anomalias climáticas, sejam elas intensas ou não, geram conseqüências ambientais, sociais e econômicas que podem se prolongar por muitos anos após o seu término.

Em relação à Figura 12, verifica-se que os menores valores dos parâmetros estatísticos ocorrem tanto nas regiões de maiores quanto de menores índices

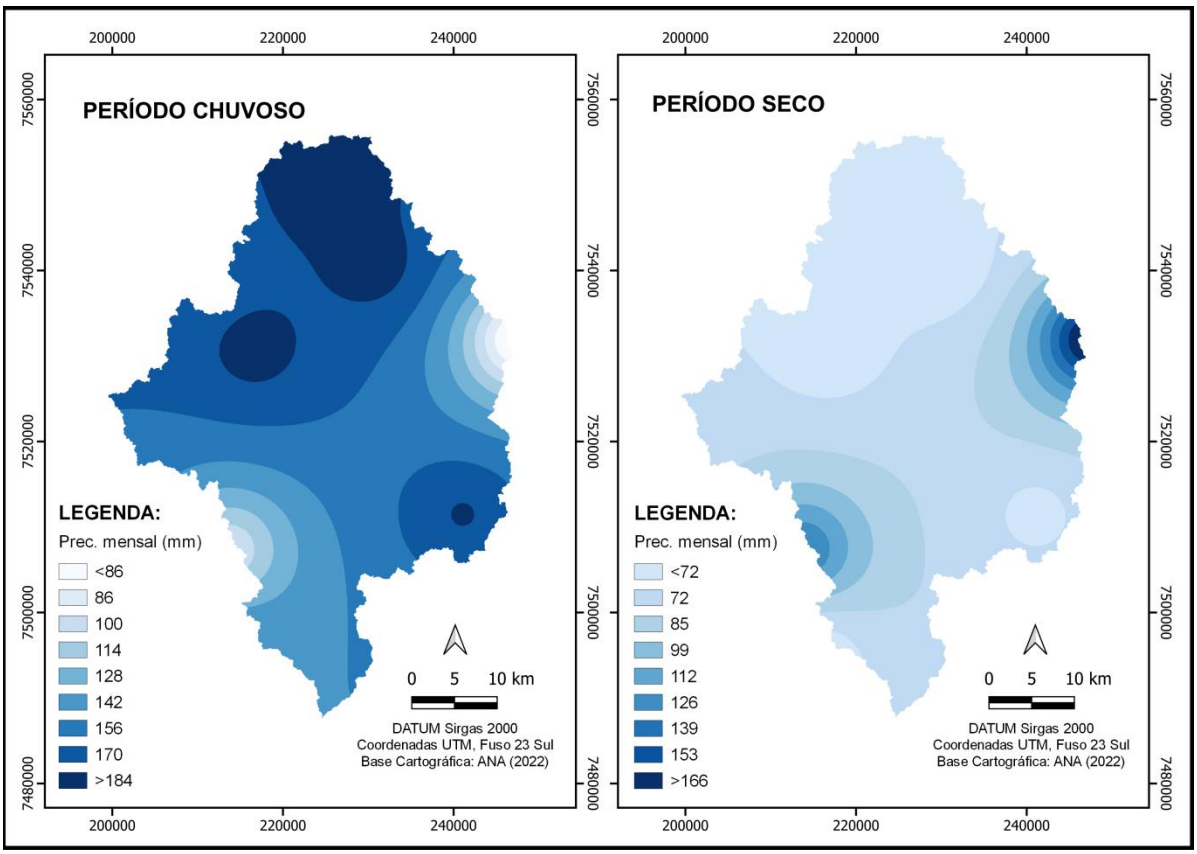
pluviométricos. Deste modo, pode se afirmar que as variáveis analisadas não possuem relação definida.

Para tentar entender o porquê da não relação entre a chuva e as variáveis de análise, foram utilizados os mapas de distribuição da precipitação (Figura 14) na estação chuvosa, entre os meses de Novembro e Abril, e o período seco, de Março a Outubro.

A precipitação no período úmido foi estatisticamente superior do período seco, com máximo de 205 mm mês^{-1} e mínimo de 67 mm mês^{-1}. Na estação de estiagem, observa-se máximo de 185 mm mês^{-1} e mínimo de 57 mm mês^{-1}, com anomalias presentes nas duas estações.

A partir da análise das figuras nota-se que os valores máximos e mínimos se distribuem de maneira contrária nas duas estações existentes. Nas regiões norte, sudeste e centro-oeste encontram-se as maiores precipitações, no período chuvoso, e os menores índices pluviométricos do período seco. Isso também ocorre no nordeste e sudoeste da bacia, onde a concentração de chuva é maior na estação seca e menor no período chuvoso.

Figura 14. Distribuição espacial da precipitação média mensal para os períodos chuvoso e seco



6.2.Alterações na Cobertura Vegetal e no Uso e Ocupação da terra

6.2.1. Cobertura Vegetal

A avaliação da evolução anual da cobertura vegetal foi realizada com o auxilio do Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI), gerado com imagens Landsat 7. Pra isso, selecionaram-se os anos de 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 e 2020, conforme a Figura 15. Como pode ser visto na imagem, as áreas com coloração esverdeada apresentam maio densidade vegetacional enquanto que, as regiões que tendem do amarelo ao vermelho indicam menor densidade da vegetação.

O NDVI é um dos índices mais utilizados para estudos acerca da vegetação. Este foi desenvolvido por Rouse *el al* (1973) avalia as propriedades biofísicas da vegetação por meio da utilização das faixas espectrais do vermelho e infravermelho próximo (BORATTO e GOMIDE, 2013), conforme a Equação 17.

$$NDVI = \frac{\rho_{IP} - \rho_V}{\rho_{IP} + \rho_V} \qquad \text{Equação 14}$$

onde,

$NDVI$: Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

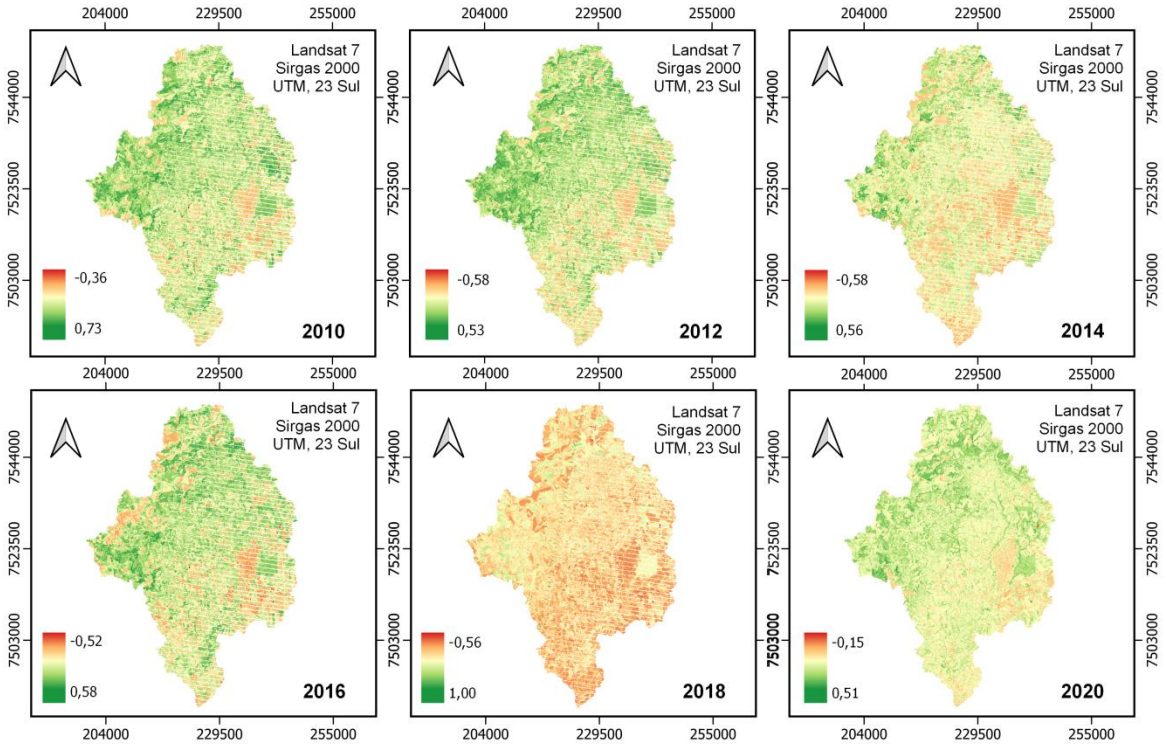
ρ_V: Fator de reflectância bidirecional no vermelho;

ρ_{IP}: Fator de reflectância bidirecional no infravermelho próximo

Os valores de NDVI variam de -1 a 1. Os valores negativos e iguais a zero indicam falta de vegetação e os valores positivos referem-se à presença de vegetação, de modo que quanto mais próximo a 1, mais densa é a vegetação (GINCIENE e BITENCOURT, 2011).

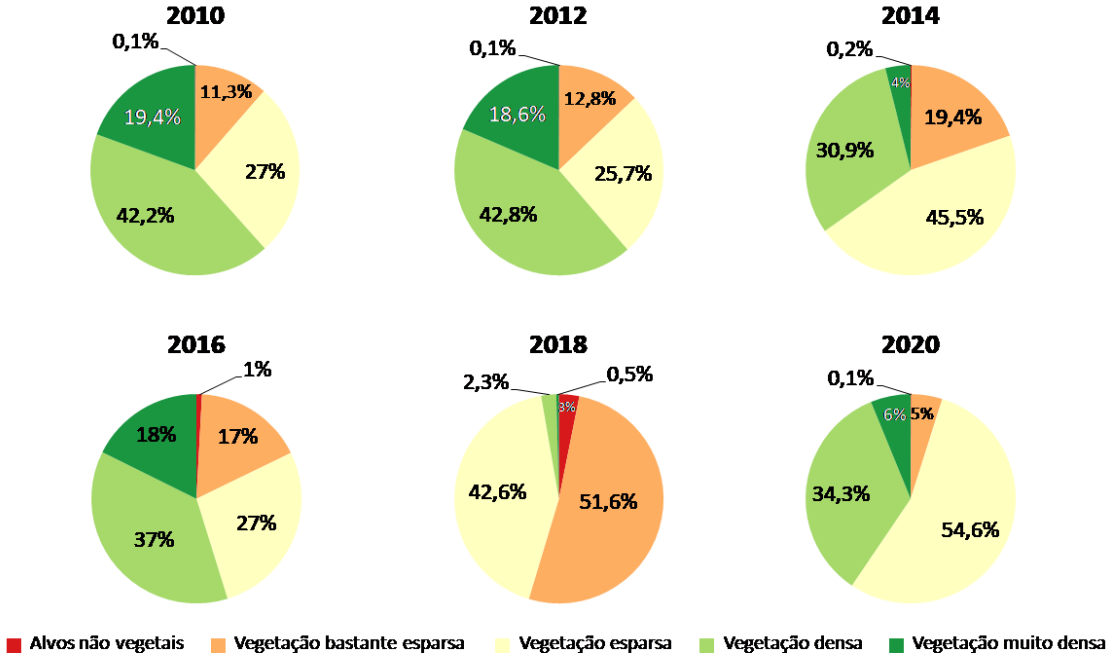
De acordo com Tucker e Sellers (1986), a vegetação tem respostas diferentes para cada faixa espectral avaliada no índice. No infravermelho próximo, em detrimento dos tecidos da folha, a resposta da vegetação sadia é menor. No entanto, o contrário ocorre no vermelho, devido à absorção por clorofila. Sendo assim, alvos diferentes da vegetação, como corpos hídricos e solo exposto, são facilmente detectados.

Figura 15. Evolução anual do Índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI)



A Figura 16, distribui os resultados obtidos graficamente para melhor visualização.

Figura 16. Análise gráfica da evolução do NDVI



As figuras mostram que as diferenças do NDVI para os diferentes anos são

bastante evidentes. Vale ressaltar que todas as imagens geradas foram referentes ao mês de Novembro, que é um mês naturalmente chuvoso na BHRC. Os anos de 2010, 2012 e 2016 apresentam os melhores índices de vegetação. Observa-se que 42,2%; 42,8% e 37%, respectivamente, da área analisada possuem vegetação considerada muito densa. Em contrapartida, em 2014, 45,5% da vegetação era esparsa e em 2018, 51,6% era bastante esparsa. Diversos fatores podem ser utilizados para explicar tal variação, nesse caso, destaca-se a precipitação.

Como mencionado anteriormente no item 4.1.1., os anos de 2014 e 2018 registraram períodos de estiagem históricos na região sudeste. De acordo com Chaves *et al* (2014), o vigor da vegetação é proporcional a precipitação, visto que tende a aumentar nos períodos chuvosos. Desse modo, é possível averiguar o NDVI da área de estudo apresentou um comportamento de tendência.

Nos anos em que os melhores índices de vegetação foram encontrados, a média mensal da precipitação também foi maior, com valores de 225,2 mm mês^{-1} para 2016; 157,3 mm mês^{-1} para 2012 e 150,5 mm mês^{-1}. Por outro lado, os anos de 2014 e 2018 apresentaram precipitação igual a 101,7 mm mês^{-1} e 87,8 mm mês^{-1}, respectivamente.

Barbosa (1998) aponta que a precipitação total anual se caracteriza como uma condição do habitat, uma vez que afeta a fisionomia e, consequentemente, a reflectância da vegetação. Portanto, afirma-se que a tanto a variabilidade temporal quanto a espacial da precipitação interfere no comportamento do índice de vegetação na bacia.

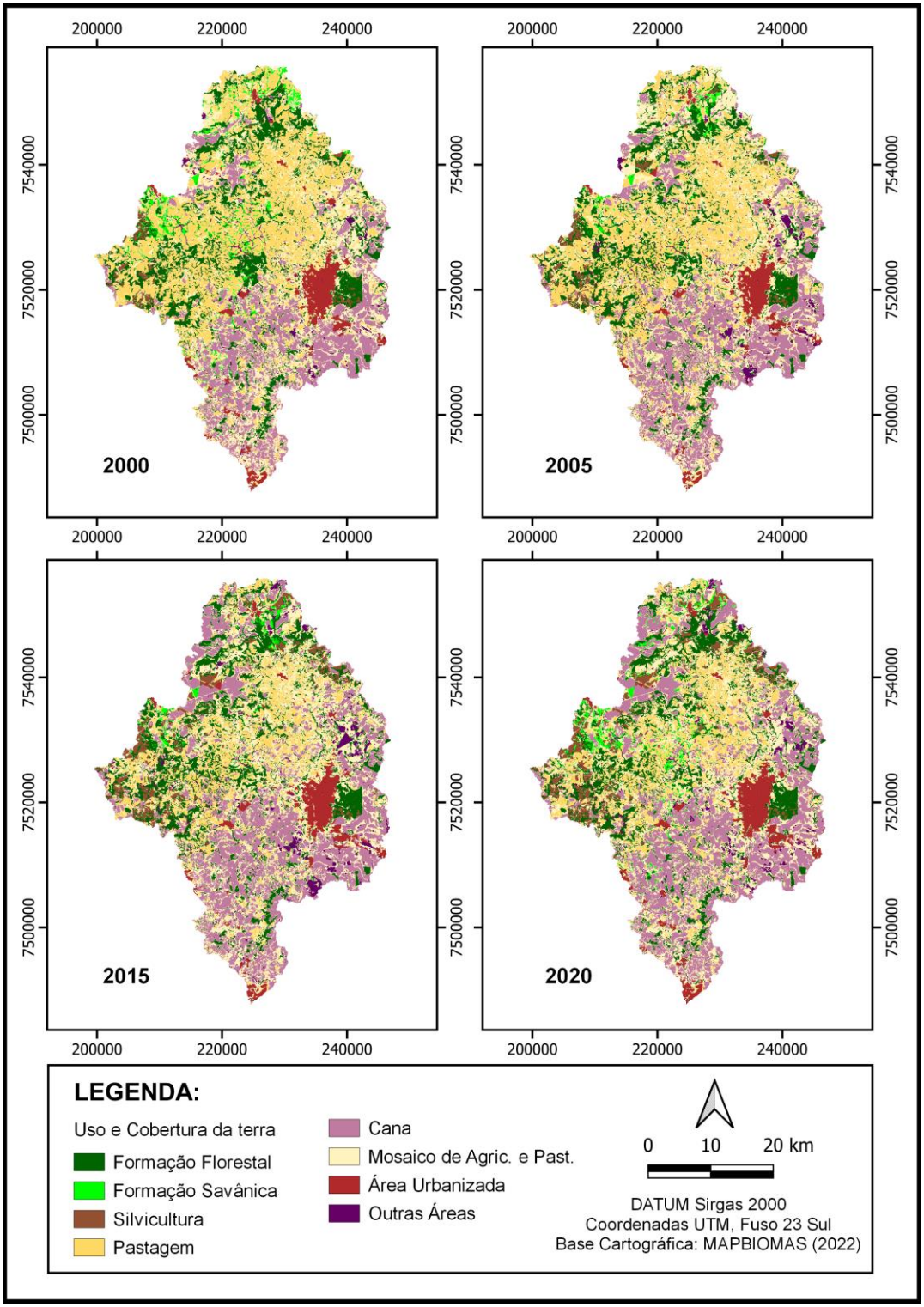
O estudo de Becerra *et al* (2015) obteve-se um índice de relação entre a precipitação e o NDVI igual a 0,55 ao avaliar como o padrão da precipitação afeta a sazonalidade da vegetação no bioma Caatinga. Dutra (2021) concluiu que a sazonalidade da chuva associa-se com a vegetação através do monitoramento da resposta da sub-bacia do Ribeirão Serra Azul (MG) aos eventos de seca. Dias (2017) também avaliou os tópicos NDVI e a precipitação pluvial, concluindo que os maiores valores do índice correspondem aos períodos chuvosos e vice-versa.

Outro importante estudo sobre o vínculo entre a cobertura vegetal, por meio do NDVI, e a variabilidade climática anual e interanual no Brasil foi realizado por Gurgel e Ferreira (2003). Os autores observaram uma alta correlação entre os dois parâmetros avaliados e constatam que, de modo geral, a cobertura vegetal do território brasileiro é moldada através de seu regime climático.

6.2.2. Uso e Ocupação da terra

A avaliação do uso e ocupação da terra fez-se através dos mapas retirados do Projeto MapBiomas, dado ao seu nível de detalhamento, principalmente no que se refere à cana, cultura esta muito presente na BHRC (Figura 17).

Figura 17. Evolução anual da distribuição espacial do uso e ocupação da terra



Para melhor entendimento, os dados foram dispostos quanto à área de cada classe, em km², e a porcentagem da mesma em relação à área total da bacia (Tabela 7).

Tabela 7. Distribuição percentual do uso e ocupação da terra na BHRC

Uso da terra	1985	2000	2005	2015	2020
Formação Florestal	16,9%	15,7%	16,1%	17,0%	15,6%
Formação Savânica	3,4%	3,0%	0,8%	0,9%	2,7%
Silvicultura	0,3%	1,2%	1,6%	3,9%	4,6%
Pastagem	34,9%	29,0%	25,8%	14,3%	15,2%
Cana	14,3%	17,7%	19,5%	24,5%	24,9%
Mosaico de Agricultura e Pastagem	25,4%	27,7%	30,0%	32,0%	29,8%
Área Urbana	2,7%	3,9%	3,7%	4,3%	4,6%
Outras Áreas	2,1%	1,8%	2,5%	3,1%	2,6%

Analisando a Figura e a Tabela acima, pode-se constatar a predominância de cincos classes na Bacia do Rio Corumbataí. São elas: Formação Florestal, Pastagem, Cana, Mosaico de Agricultura e Pastagem e Área Urbana. A formação florestal da área de estudo permaneceu razoavelmente constante ao decorrer dos anos, com área máxima de 289,5 km² em 2015 e mínima de 265,4 km² em 2020.

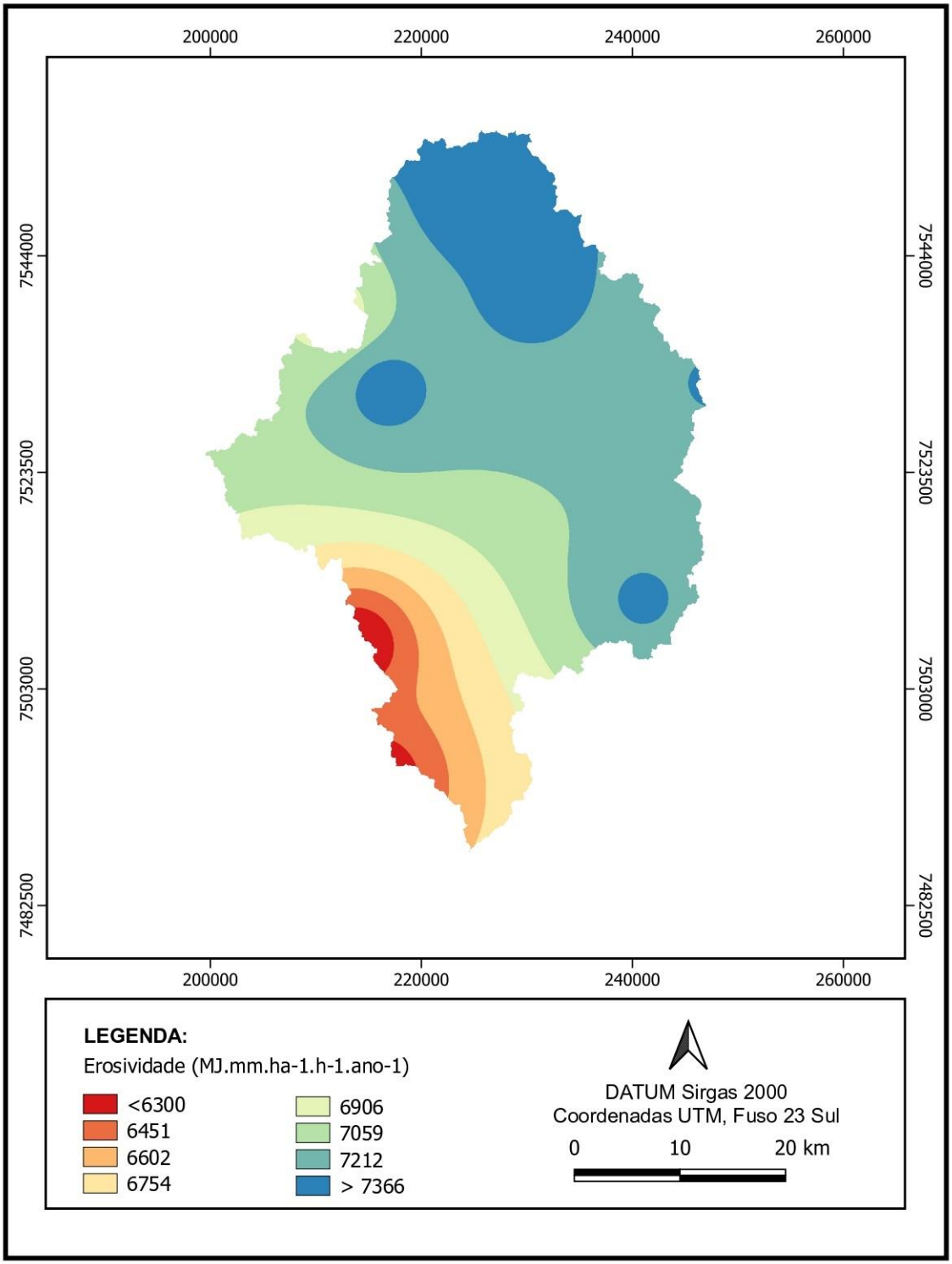
A pastagem, embora ainda muito evidente na bacia, apresentou uma redução constante significativa, com área inicial de 594,4 km², em 1985, e final de 259,1 km², em 2020. Por outro lado, observa-se aumento moderado do Mosaico de Agricultura e Pastagem em aproximadamente 15% e forte crescimento nas classes Cana (em 43%), da Área Urbana (em 42%) e da Silvicultura (em 94%), que passou a integrar as classes com maior presença na BHRC.

6.3. Estimativa da perda de solo por erosão hídrica na BHRC através da USLE

6.3.1. Erosividade da Chuva (Fator R)

Conforme a metodologia descrita anteriormente, foi gerado um mapa da distribuição espacial do Fator R na Bacia do Rio Corumbataí (Figura 18).

Figura 18. Distribuição espacial do fator de erosividade da chuva para BHRC



É possível observar na figura que a erosividade da precipitação variou de 6134,3 a 8060,6 MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}. A média calculada foi de 7090,4 MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}. Os valores obtidos estão próximos ao mapeamento realizado por IPEF/SEMAE (2002) para a mesma área. Em tal estudo, o máximo avaliado foi de 848 e o mínimo de 600 MJ.mm.ha^{-1}.mês^{-1}.h^{-1}. A diferença encontrada pode estar relacionada com o período e os postos

pluviométricos selecionados.

De modo geral, o comportamento da erosividade é bem semelhante ao da precipitação na bacia, salvo algumas exceções dos valores mais baixos. Entretanto, de acordo com Oliveira *et al* (2013), no Brasil, estes fatores não possuem necessariamente uma relação de concordância, vide a grande variabilidade climática presente no país. Deste modo, os períodos de chuva intensa e duradoura acarretam em maiores valores de erosividade.

Esse fato pode ser analisado ao compararmos a erosividade dos meses secos e chuvosos. A priori, ressalta-se que o período chuvoso compõe 80% do total de precipitação da bacia. No período de estiagem os valores máximos e mínimos encontrados foram de 6069,8 e 827,4 $MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}$, respectivamente, enquanto na estação chuvosa a variação foi 1158,5 a 6879,1 $MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}$.

Por fim, os valores do Fator R foram agrupados de acordo com a sua intensidade, conforme a classificação proposta por Carvalho (2008) para sua posterior avaliação (Tabela 8). Nota-se que a erosividade calculada encontra-se entre as classes: média e alta, sendo que a primeira representa aproximadamente 73% da área da bacia.

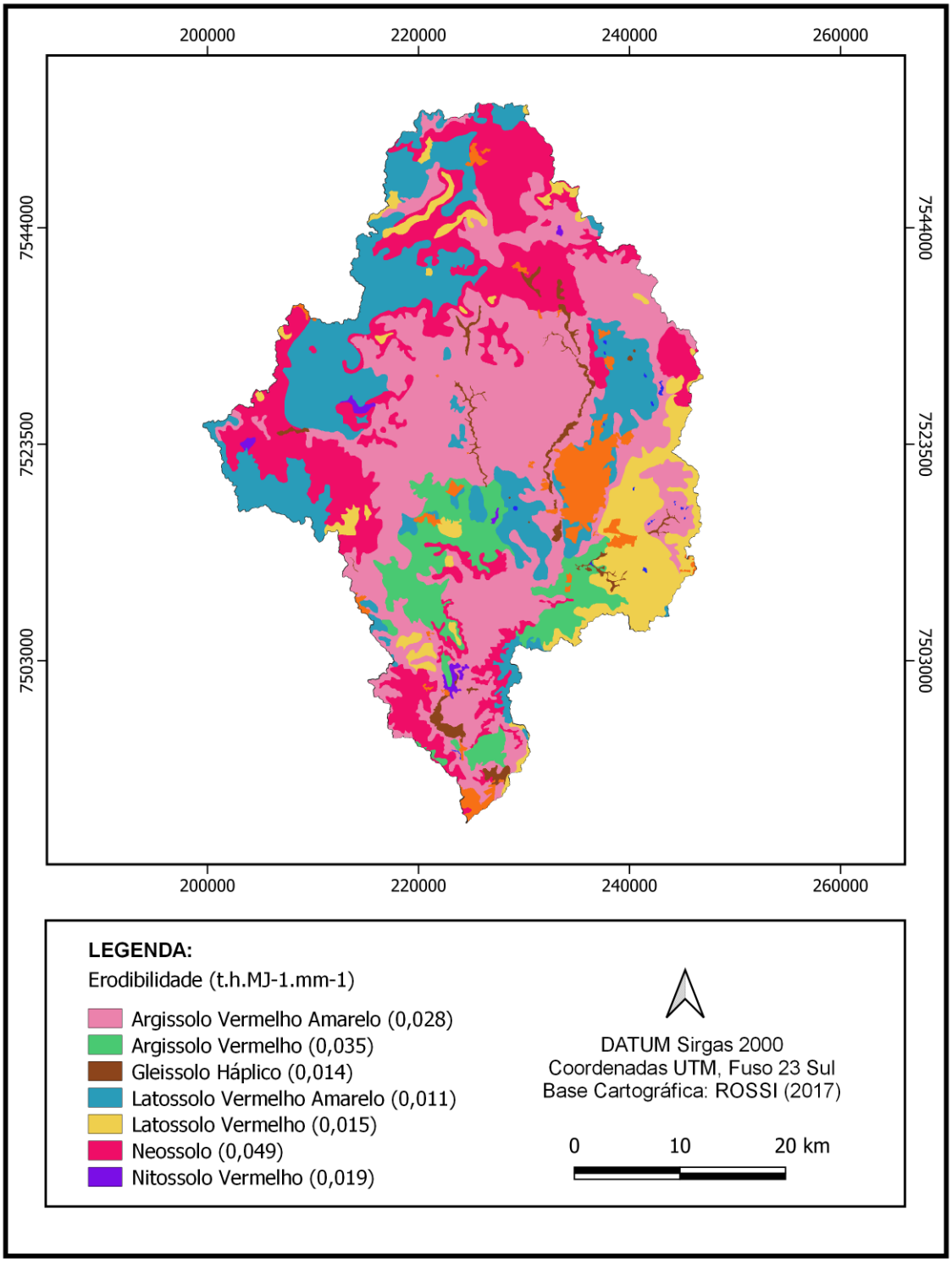
Tabela 8. Classificação da média anual da erosividade da chuva

Classe de erosividade	**Fator R ($MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}$)**	**Área (%)**
Muito Baixa	< 2452	0,0%
Baixa	2452 a 4905	0,0%
Média	4905 a 7357	72,7%
Alta	7357 a 9810	27,3%
Muito Alta	> 9810	0,0%

6.3.2. Erodibilidade do solo (Fator K)

A Figura 19 apresenta a distribuição espacial dos tipos de solos e seus respectivos valores de erodibilidade para a área de estudo.

Figura 19. Distribuição espacial do fator de erodibilidade do solo para BHRC



Capa tipos de solo presente na bacia apresenta diversas variações. Nesse sentido, para fins de simplificado os valores apresentados na figura correspondem àqueles com maior área. Para melhor visualização, os dados foram dispostos na Tabela 9.

Tabela 9. Valores do Fator K para cada tipo de solo e suas respectivas áreas

Tipos de Solo	Fator K ($t.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$)	Área (km^2)	Área (%)
Área Urbana	0	61,53	3,61%
Argissolos Vermelho-Amarelos Abrúptico	0,028	561,99	33,01%
Argissolos Vermelho-Amarelos Distrófico	0,055	78,27	4,60%
Argissolos Vermelhos; textura argilosa	0,035	124,49	7,31%
Argissolos Vermelhos; textura média	0,034	1,07	0,06%
Camissolos Háplicos	0,035	3,90	0,23%
Chernossolos Argilúvicos	0,023	2,56	0,15%
Gleissolos Háplicos	0,014	19,88	1,17%
Latossolos Vermelho-Amarelos; textura argilosa	0,011	0,33	0,02%
Latossolos Vermelho-Amarelos; textura média	0,014	323,59	19,01%
Latossolos Vermelhos Distroférrico	0,013	93,84	5,51%
Latossolos Vermelhos Eutroférrico	0,012	17,39	1,02%
Latossolos Vermelhos, textura argilosa	0,015	31,55	1,85%
Latossolos Vermelhos, textura média	0,017	3,831	0,23%
Neossolos Litólicos	0,053	232,98	13,68%
Neossolos Quartzarênicos	0,049	137,10	8,05%
Nitossolos Vermelhos latossólico	0,052	3,06	0,18%
Nitossolos Vermelhos típico	0,019	3,75	0,22%
Rios, represas e lagoas	0	1,51	0,09%

A partir da figura e da tabela anteriores, contata-se que a erodibilidade média da bacia é de 0,025 $t.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$. Os valores do Fator K variam de 0,011 para Latossolos Vermelho-Amarelos de textura argilosa a 0,055 $t.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$ para Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos. Para a área urbana e os corpos hídricos o valor atribuído foi zero.

Ainda segundo Oliveira *et al* (2013), os maiores e menores valores de erodibilidade do solo ocorrem nos Argissolos e Latossolos, respectivamente. Isso ocorre pois os Argissolos apresentam baixa permeabilidade no horizonte subterrâneo, o que facilita o escoamento superficial e, por sua vez, a erosão.

O Fator K também foi avaliado quanto à sua intensidade em conformidade com a metodologia por Bertoni e Lombardi Neto (1985) presente na Tabela 10. Nota-se que a erodibilidade da bacia é bem distribuída, as classes mais predominantes são: baixa (29,0%), média (33,2%) e muito alta (26,5%).

Tabela 10. Classificação da média anual da erodibilidade do solo

Classe de erosividade	Fator K ($t.h.ha^{-1}.MJ^{-1}.mm^{-1}$)	Área (%)
Muito Baixa	< 0,0113	3,7%
Baixa	0,0113 a 0,0220	29,0%
Média	0,0220 a 0,0328	33,2%
Alta	0,0328 a0,0432	7,6%
Muito Alta	> 0,0432	26,5%

6.3.3. Comprimento de Rampa e Declividade (Fator LS)

O conhecimento acerca da distribuição espacial do Fator LS é relevante para fins de planejamento dos recursos hídricos. O comprimento de rampa retrata a relação entre a projeção horizontal e a declividade. Desse modo, tal fator é tão importante quanto à declividade, uma vez que, dependendo de seu comprimento, pode acarretar no aumento da velocidade do escoamento superficial (TOMAZONI e GUIMARÃES, 2005). Tonello *et al* (2006) ressaltam que altos valores do Fator LS associados ao regime climático e a cobertura da vegetação na área de interesse favorecem a ocorrência de erosão.

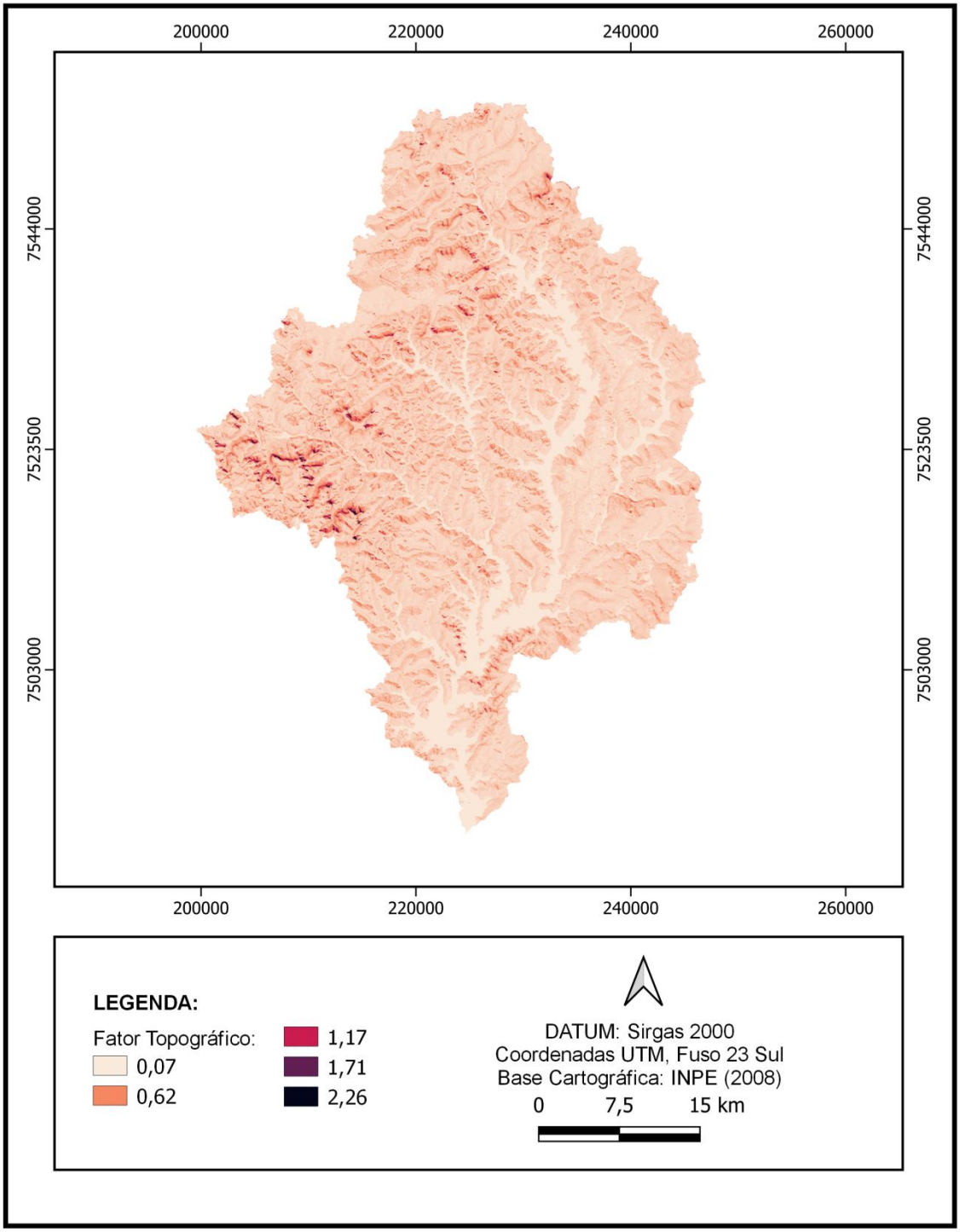
A Figura 20 apresenta a distribuição espacial do fator de comprimento de rampa e declividade na bacia. Os valores variam de 0,07 a 2,99. A classe predominante foi a de 0,07 a 0,62, que representa 98% da área da BHRC. Em relação aos dados de elevação, o aumento ocorre no sentido sul-norte, com altitude mínima de 470 e máxima de 840 m.

Os baixos valores do Fator LS encontrados na bacia podem ser explicados pela presença de áreas com as declividades: suave ondulado (18,7%) e ondulado (56,1%), vide classificação proposta pela EMBRAPA (2018) (Tabela 11). Além disso, constata-se que as poucas áreas de declividade montanhosa e escarpado presentes apresentaram comprimento de rampa de médio a baixo.

Tabela 11. Classificação da declividade da BHRC

Classe	Declividade (%)	Área (%)	Frequência acumulada (%)
Plano	0 a 3	11,3%	11,3%
Suave Ondulado	3 a 8	35,0%	46,3%
Ondulado	8 a 20	43,5%	89,8%
Forte Ondulado	20 a 45	9,1%	98,8%
Montanhoso	45 a 75	1,1%	99,9%
Escarpado	> 75	0,1%	100,0%

Figura 20. Distribuição espacial do fator de comprimento de rampa e declividade para BHRC



6.3.4. Uso e Manejo do Solo (Fator C) e Práticas Conservacionistas (Fator P)

A Figura 21 apresenta o mapa de distribuição das classes de uso e ocupação da terra na Bacia do Rio Corumbataí, obtido através do MapBiomas para o ano de 2020. Cabe relembrar que foi adotado valor do Fator P igual a 1, para todas as classes, devido

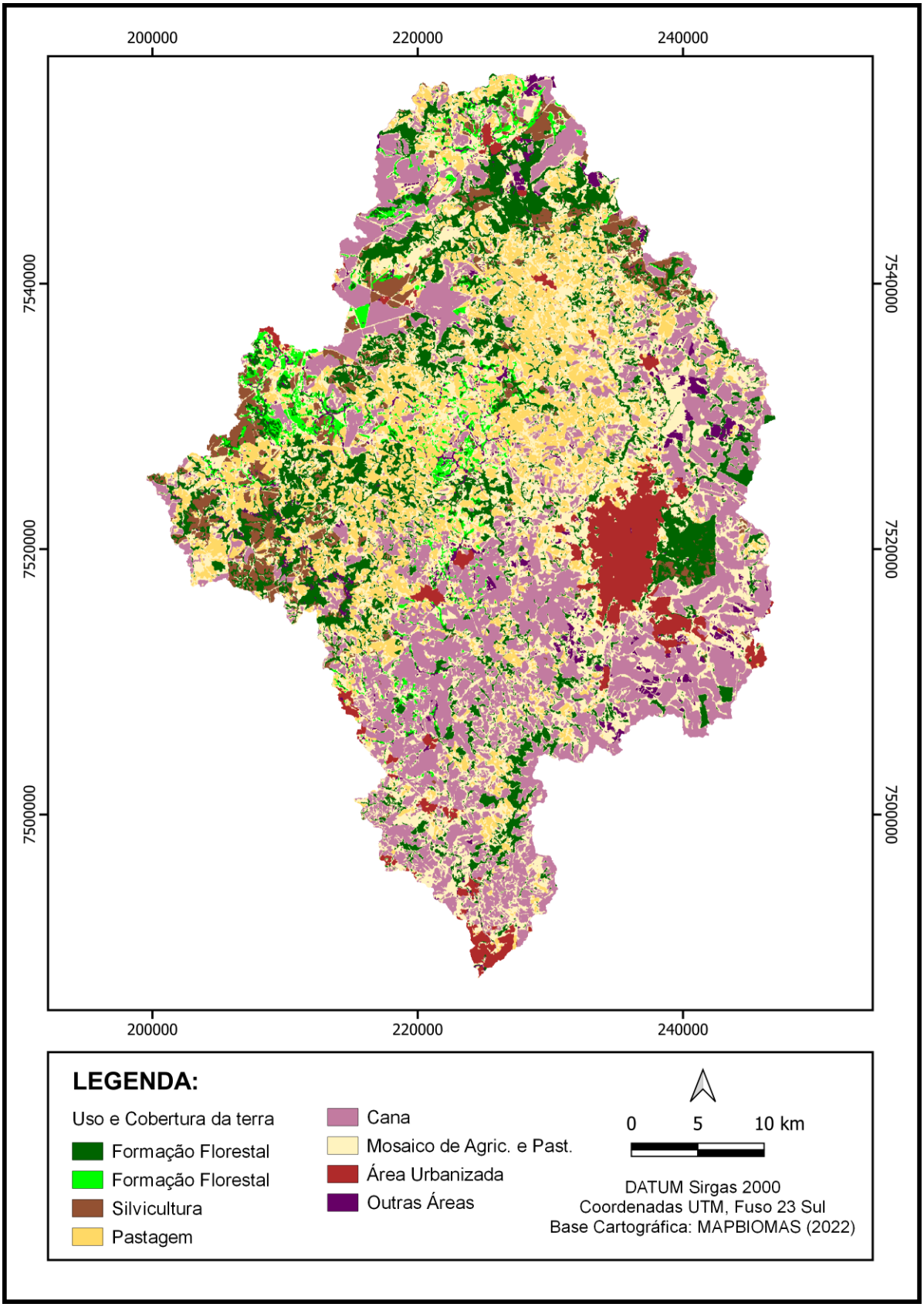
à dificuldade de identificação das práticas conservacionistas em grandes áreas.

Sendo assim, nota-se que os valores do Fator CP variam de 0,0001 (para Silvicultura) a 1,0 (para mineração). Nas áreas com a presença de corpos hídricos os valores foram nulos. Além disso, observa-se que, como mencionado no item 6.2.2., cerca de 95% da área da bacia é composta pelas classes: Mosaico de Agricultura e Pastagem (29,8%); Cana (24,9%); Formação Florestal (15,6%); Pastagem (15,2%); Silvicultura e Área Urbana (4,6%), conforme a Tabela 12.

Tabela 12. Classes de uso e ocupação da terra

ID	Uso da terra	Fator CP	Área (km^2)	Área (%)
3	Formação Florestal	0,0004	265,43	15,6%
4	Formação Savânica	0,0007	45,09	2,7%
9	Silvicultura	0,0001	78,29	4,6%
15	Pastagem	0,01	259,07	15,2%
20	Cana	0,05	424,68	24,9%
21	Mosaico de Agricultura e Pastagem	0,25	507,2	29,8%
24	Área Urbana	0,0688	79,16	4,6%
48	Outras Áreas	0,46	45,46	2,7%

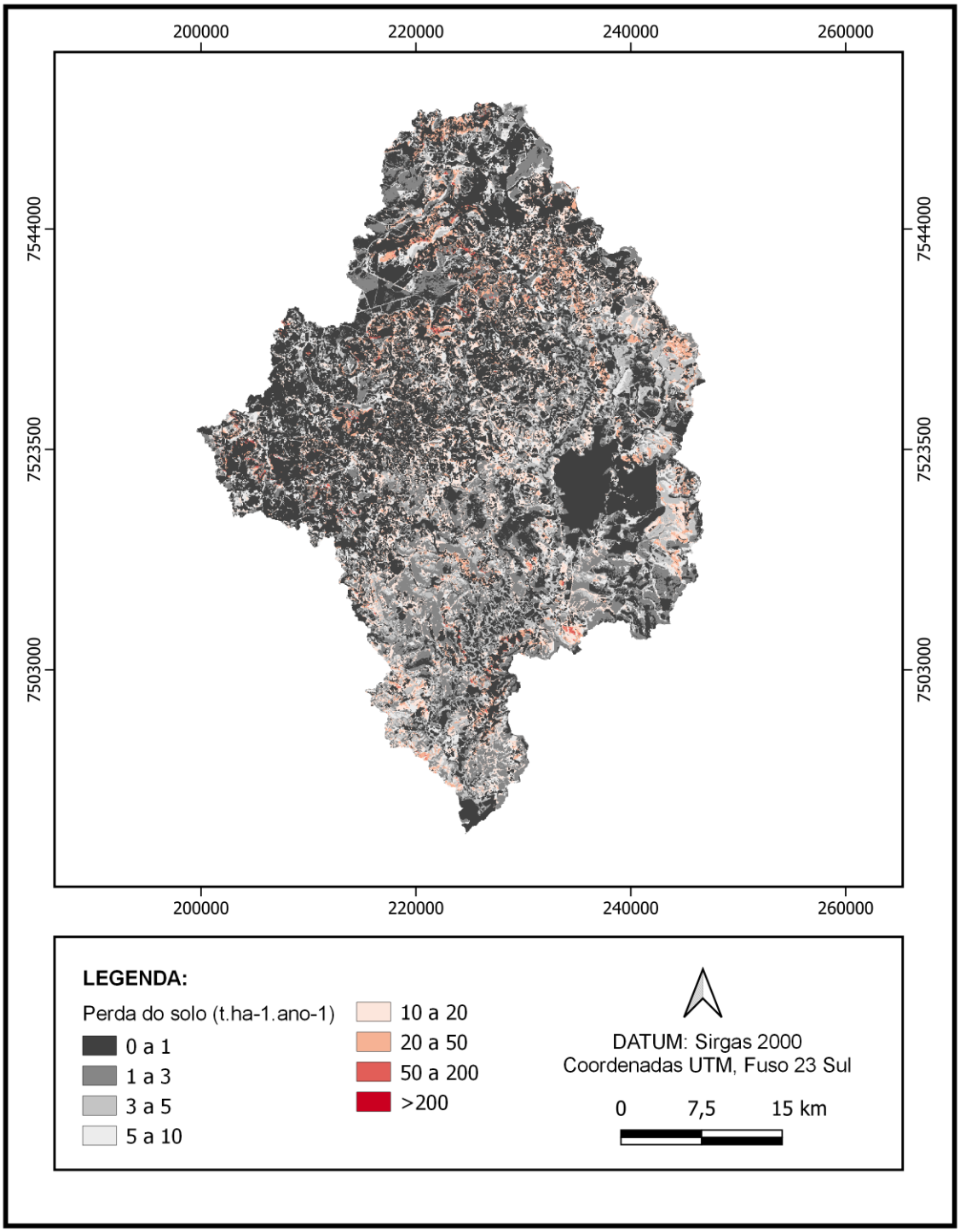
Figura 21. Distribuição espacial dos fatores de uso e manejo do solo e de práticas conservacionistas na BHRC



6.3.5. Perda de solos na Bacia do Rio Corumbataí (Fator A)

O mapa da distribuição espacial da perda de solos na bacia é apresentado na Figura 22. O Fator A, obtido pela USLE, foi agrupado de acordo com as classes propostas pela FAO (1967), conforme a Tabela 4.

Figura 22. Distribuição espacial da perda de solos a BHRC



Desse modo, têm-se que perda de solos varia de 0 a 203,8 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$, com

média de aproximadamente, 7,1 t.ha^{-1}.ano^{-1}. Além disso, ressalta-se que 87% da BHRC encontra-se na classe nenhuma ou ligeira.

A produção de sedimentos corrobora com a distribuição espacial dos fatores de declividade e de uso e ocupação do solo, uma vez que o último compõe as variáveis mais sensíveis na USLE. Observa-se que as áreas com os maiores valores do Fator A coincidem com aquelas com as declividades mais altas da bacia.

A Tabela 13 mostra a relação das classes de perda do solo com os principais usos presentes na bacia. Nota-se Mosaico de Agricultura e Pastagem é a classe mais diversa em relação ao Fator A, com 42% moderada e 57% nenhuma ou ligeira. Os demais usos da terra apresentam ligeira perda de solo. As perdas de solo no cultivo da cana variam de 0 a 10 t.ha^{-1}.ano^{-1}. Além disso, observa-se que, como esperado, as classes formação florestal e silvicultura apresentaram perda de solos nula.

Tabela 13. Relação entre o Fator A e o Fator CP

Classe	Fator A (t.ha^{-1}.ano^{-1})	Mosaico de Agric. Past.	Cana	Pastagem	Floresta	Área Urbana	Silvicultura
Nenhuma ou ligeira	0 a 1	20,77%	26,72%	88,01%	100,00%	69,56%	100,00%
Nenhuma ou ligeira	1 a 3	2,51%	52,95%	11,30%	0,00%	24,11%	0,00%
Nenhuma ou ligeira	3 a 5	0,00%	15,90%	0,60%	0,00%	4,27%	0,00%
Nenhuma ou ligeira	5 a 10	33,92%	4,26%	0,09%	0,00%	1,84%	0,00%
Moderada	10 a 20	28,73%	0,17%	0,00%	0,00%	0,22%	0,00%
Moderada	20 a 50	12,95%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Alta	50 a 200	1,11%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Muito Alta	>200	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Os dados de perda de solos e das classes de uso e ocupação do solo foram ainda sobrepostos com as informações acerca dos tipos de solos encontrados na bacia. Essa sobreposição foi realizada com o intuito de avaliar se as perdas do solo encontram-se abaixo do seu limite de tolerância. Além disso, foi analisado também o índice de fragilidade por meio do quociente entre o Fator A e a tolerância de perda de solos. Os limites de tolerância foram obtidos com base no estudo de Demarchi *et al* (2018). A Tabela 14 demonstra os resultados obtidos.

Tabela 14. Sobreposição do Fator A, CP e K em relação aos limites de tolerância de perda do solo

Tipos de solos	Tolerância de perda de solos (t.ha^{-1}.ano^{-1})	Mosaico de Agric. e Past.		Cana		Pastagem	
		Fator A	IF	Fator A	IF	Fator A	IF
Argissolo Vermelho Amarelo Abr	3,08	6,39	2,07	0,54	0,17	0,31	0,10
Latossolo Vermelho Amarelo, medio	10,49	4,85	0,46	1,01	0,10	0,13	0,01
Neossolo Litolico	5,28	5,71	1,08	0,42	0,08	0,22	0,04
Argissolo Vermelho, argiloso	11,26	4,68	0,42	1,73	0,15	0,07	0,01
Latossolo Vermelho Distroferrico	13,9	4,17	0,30	1,42	0,10	0,02	0,00

A partir da análise da tabela nota-se que as perdas de solo estão dentro do limite de tolerância, com exceção das sobreposições Neossolo Lítico x Mosaico e Argissolo Vermelho Amarelo x Mosaico. Estas apresentam índices de fragilidade de 1,08 e 2,07, respectivamente. Esse fato ocorre devido à baixa tolerância que esses tipos de solo tem em relação a erosão hídrica. Além disso, ressalta-se que tais solos compõem aproximadamente 47% da área total da bacia. Portanto, verifica-se a necessidade de medidas mitigatórias para evitar a erosão do solo.

6.4. Análise estatística da correção dos dados de precipitação

A correção da precipitação foi realizada com base na metodologia de Férnandes Bou *et al* (2015), conforme supracitado. O método foi aplicado pois os valores de correlação para a escala mensal não foram significativos e, como a influência das mudanças climáticas no processo de erosão foi avaliada mensalmente, seu uso não fazia sentido.

Os índices estatísticos avaliados nesse estudo estão presentes na Tabela 14. Os mesmos foram calculados para dados da precipitação simulada com e sem a correção de viés.

Tabela 15. Índices estatísticos para a precipitação do modelo ETA.

	Precipitação Observada	**Precipitação Simulada**	**Precipitação Simulada Corrigida**
Média	123,7	145,9	116,4
Mediana	110,6	129,8	115,3
Máximo	448,5	564,7	302,6
Mínimo	8,5	0,1	14,0
bias	-	1,179	0,940
EMA	-	70,1	39,3
EMR	-	0,869	0,433
EMQ	-	91,1	53,3
RV	-	0,749	0,974
DP	70,3	100,4	58,3
CV	0,568	0,688	0,501
Teste T	-	0,0003	0,063

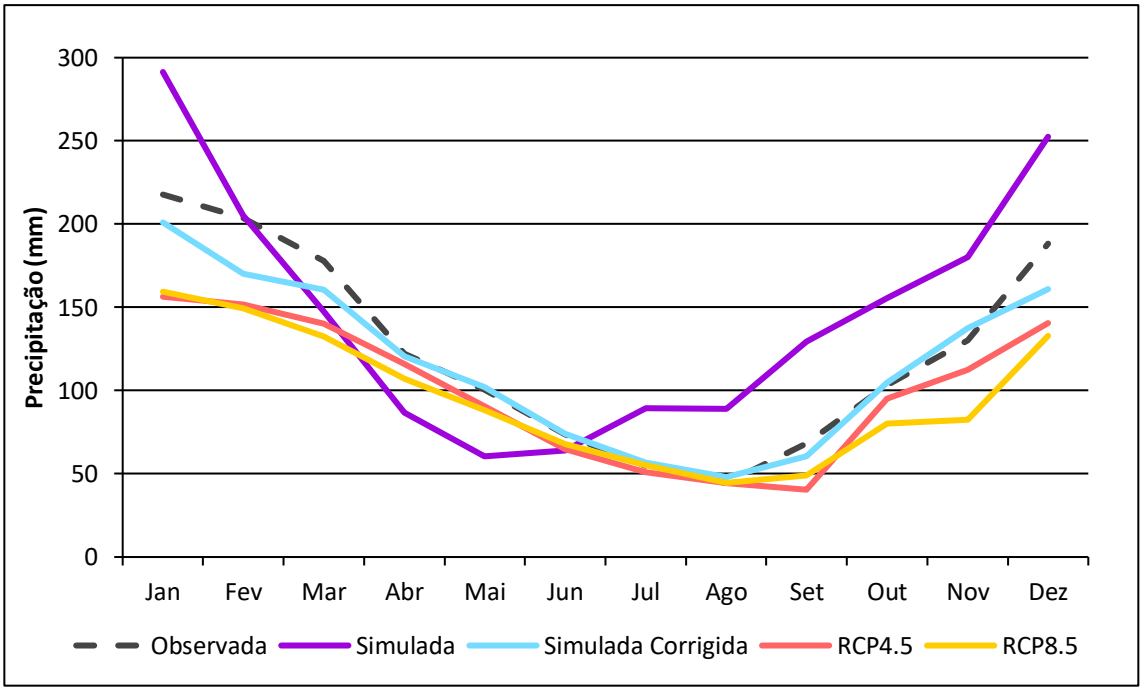
Observa-se que ocorreu uma redução do índice de *bias*, da precipitação sem correção para a corrigida. Inicialmente, nota-se que o modelo ETA apresentava uma

tendência de superestimar a precipitação, vide o valor superior a 1. Após a correção, os valores tenderam a ser subestimados. Entretanto, a correção revelou melhores resultados em comparação com aqueles gerados pelo modelo.

Esse fato pode se explicado através da análise do Teste T-Student. Nesse caso, a hipótese nula adotada foi de que precipitações simuladas fossem semelhantes às observadas. Desse modo, a hipótese é rejeitada, ou seja, existem diferenças entre os parâmetros avaliados, se o valor do teste for inferior a 0,05, o que pode ser visto na coluna da precipitação sem correção.

Os outros índices estatísticos também demonstram um melhor resultado da precipitação simulada corrigida com os erros EMA, EMR e EMQ menores e o valor de RV mais próximo a 1. A Figura 23 apresenta os valores mensais para os parâmetros avaliados.

Figura 23. Análise da precipitação simulada com e sem correção em relação aos valores observados



Apesar os índices apresentarem resultados positivos, observa-se que os totais anuais da precipitação observada e da simulada corrigida apresentam certa diferença, com valores de 1484, 9 mm.ano^{-1} e 1396,3 mm.ano^{-1}, respectivamente.

Como a precipitação simulada foi obtida por meio da média das precipitações de seis pontos da grade, foram avaliadas, para cada ponto, a diferença destes dados em relação à precipitação observada (Tabela 15). Essa etapa foi realizada para entender melhor a origem das diferenças apontadas.

Tabela 16. Comparação da precipitação observada e simulada para cada ponto de grade

Pontos	Latitude	Longitude	Prec. Corrigida	Dif. P obs
P1	-21,825	-47,975	1376,9	108,0
P2	-22,275	-47,975	1469,4	15,5
P3	-22,725	-47,975	1441,9	43,0
P4	-21,825	-47,375	1390,3	94,6
P5	-22,275	-47,375	1345,2	139,8
P6	-22,725	-47,375	1376,5	108,4

6.5. Simulação futura da perda do solo em diferentes cenários

As simulações das perdas de solo hipotéticas para a Bacia do Rio Corumbataí foram avaliadas para dois cenários distintos. Nesta etapa, a precipitação utilizada foi a disponibilizada pela Plataforma PROJETA para o modelo HADGEM2-ES para os anos de 2030 a 2070 (RCP4.5 e RCP8.5). No Cenário 01, a classificação dos usos da terra foram mantidos iguais ao período atual. No Cenário 02, os valores de uso e ocupação foram obtidos pelo modelo LCM.

As simulações foram realizadas utilizando-se o modelo USLE, dados os bons resultados obtidos na Bacia do Rio Corumbataí.

Os fatores de erosividade da chuva para os cenários RCP4.5 (otimista) e RCP8.5 (pessimista) apresentaram distribuição espacial e temporal muito semelhantes (Figura 24). Nesse sentido, foram utilizadas as médias dos dois cenários. A Figura 25 apresenta a perda de solos no cenário 01.

Figura 24. Distribuição espacial do fator de erosividade da chuva para RCP4.5 e RCP8.5

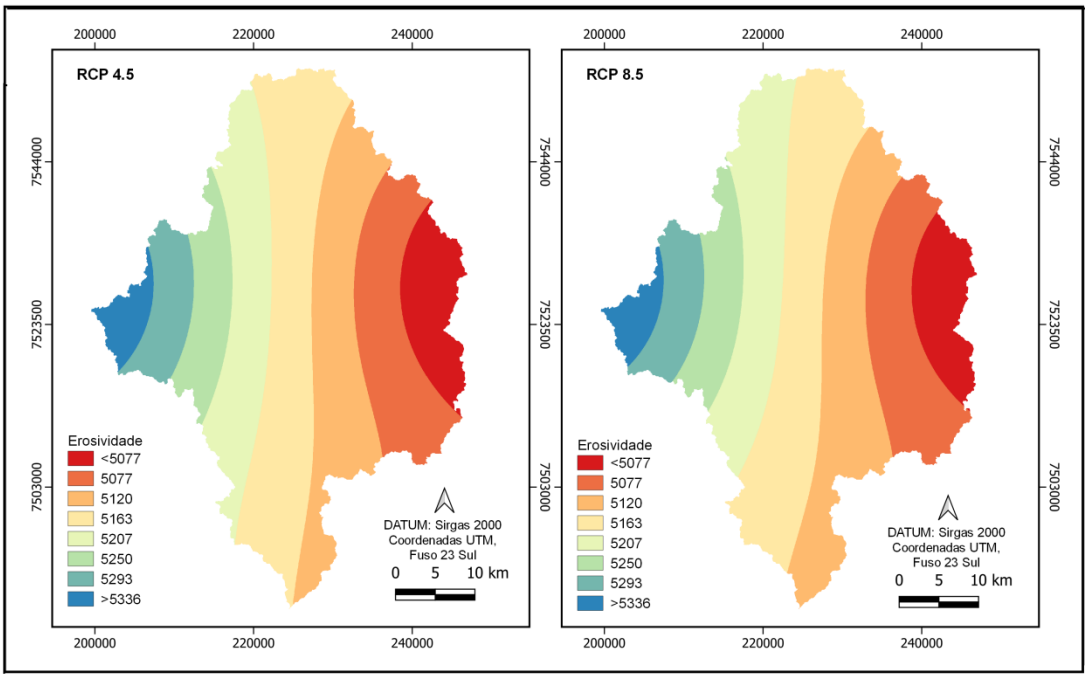
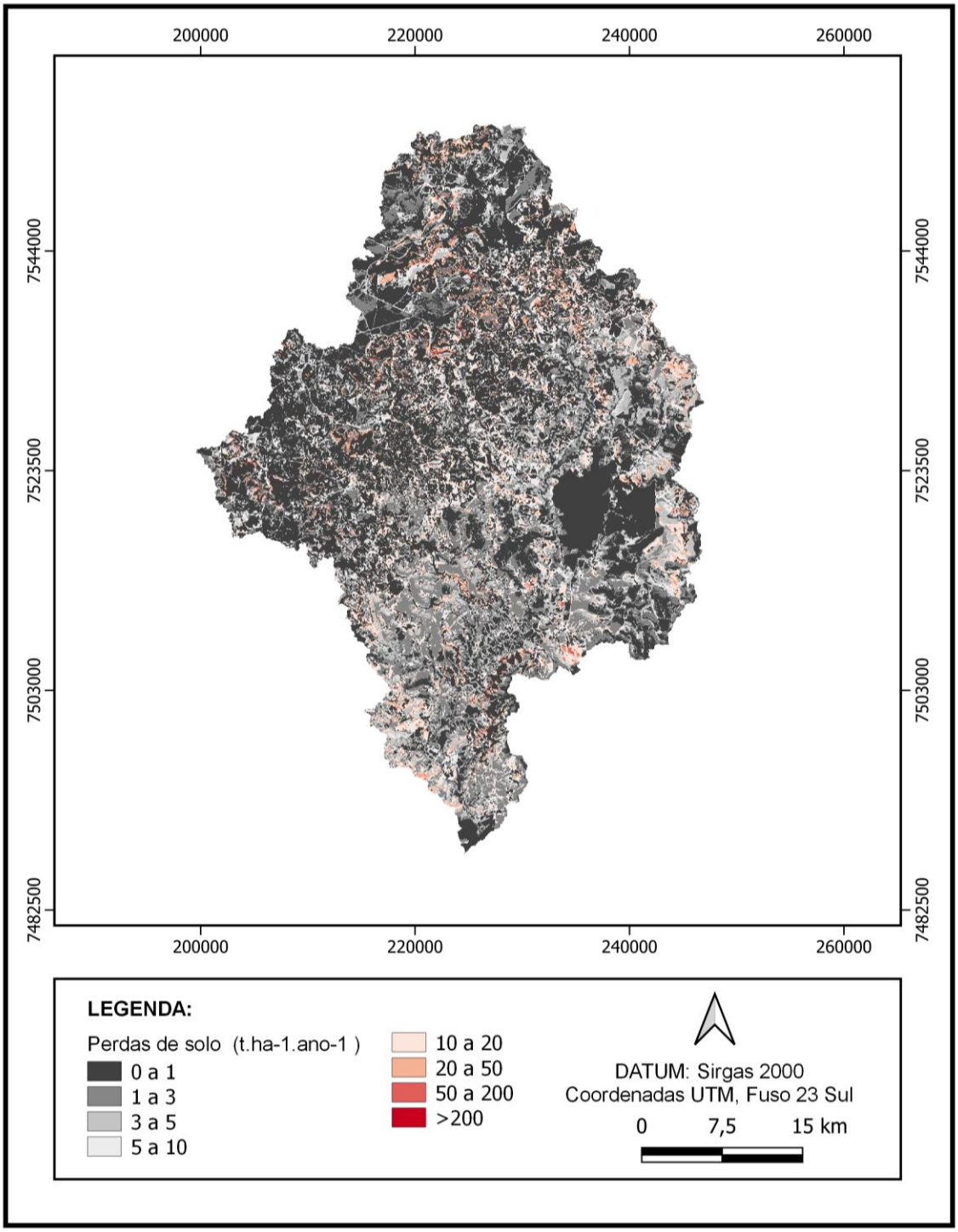


Figura 25. Distribuição espacial da perda de solo (Cenário 01)



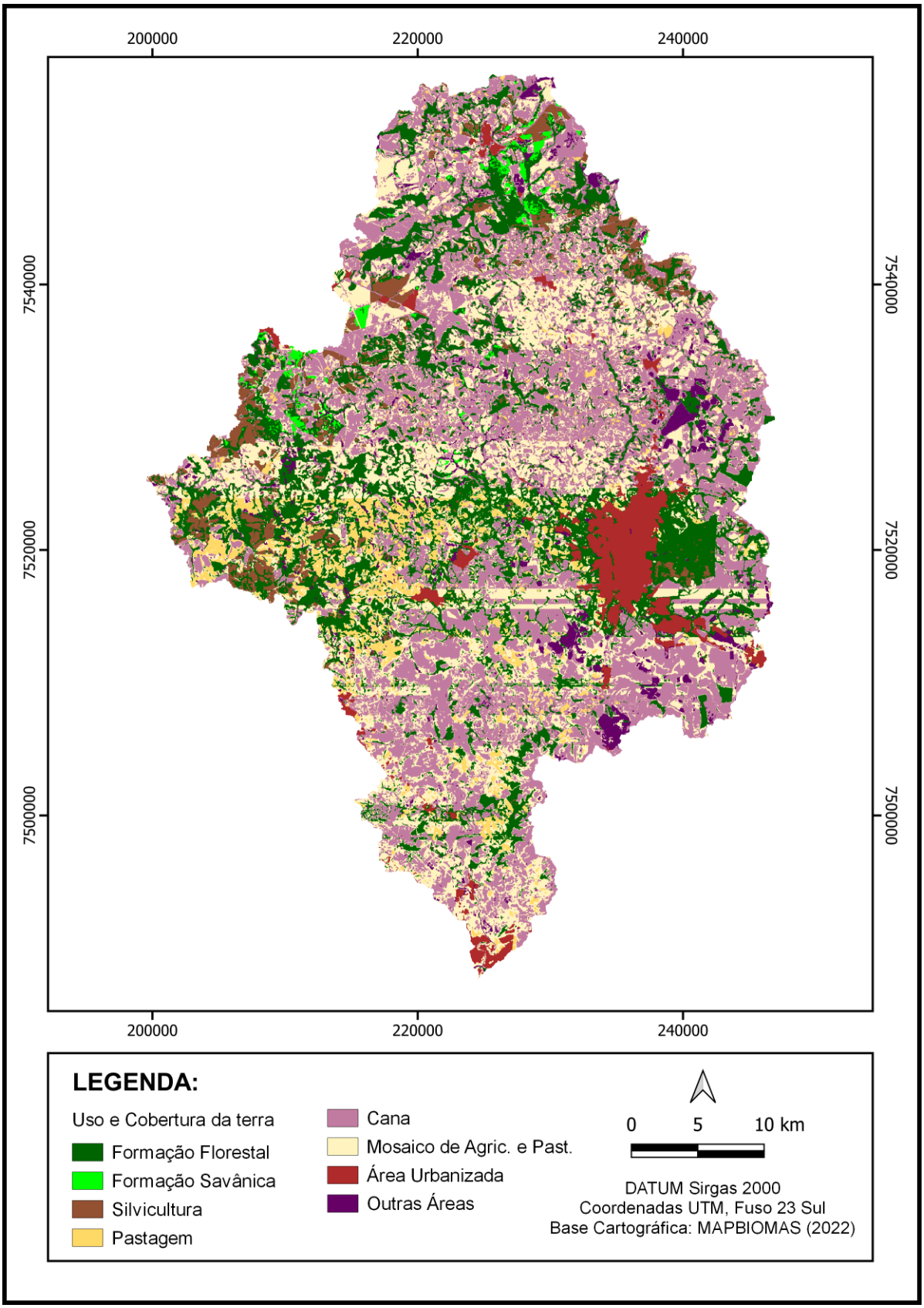
A figura acima apresenta um comportamento bastante parecido ao obtido para o período atual de análise. O valor de mínimo foi de 0 e o máximo de 160, 9 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$. A média foi de cerca de 6,0 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$. Essa semelhança explica-se pelo fato de que o a erosividade da chuva não se enquadra nos fatores mais relevantes quanto ao controle dos processos de erosão. Além disso, ressalta-se que os valores simulados pelo modelo ETA após correção exibem tendência de subestimar a precipitação, o que pode explicar os menores valores de perda do solo por erosão na área de estudo.

Os cenários seguintes, 02 e 03, avaliam a construção de um cenário futuro dos usos da terra, para o ano de 2070, na Bacia do Rio Corumbataí. A Figura 26 permite a visualização do cenário. Como mencionado anteriormente na seção metodologia, o modelo LCM foi utilizado para tal propósito. A partir desse ponto, o *software* observou alterações nas classes: Formação Florestal. Pastagem, Cana, Soja e Mosaico de Agricultura e Pastagem. As alterações foram validadas e posteriormente o cenário foi criado. Nesse sentido, a Tabela 17 apresenta as classes de uso da terra para 2070 em comparação com 2020.

Tabela 17. Classes de usos da terra para os anos de 2020 e 2070

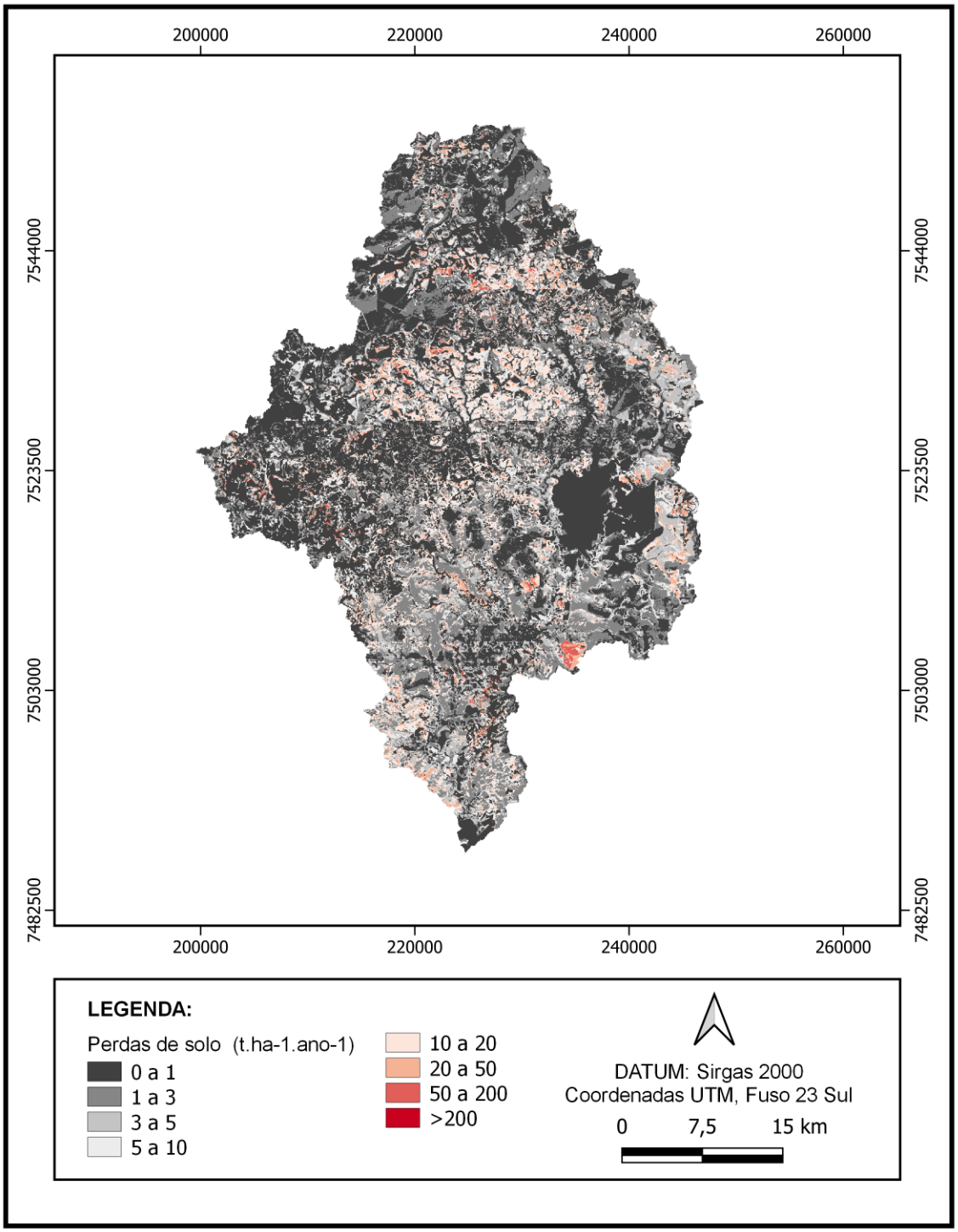
Uso da terra	**2020**		**2070**	
	Área (km²)	**Área (%)**	**Área (km²)**	**Área (%)**
Formação Florestal	265,43	15,57%	374,72	21,99%
Formação Savânica	45,09	2,65%	14,79	0,87%
Silvicultura	78,29	4,59%	65,68	3,85%
Pastagem	259,07	15,20%	92,55	5,43%
Cana	424,68	24,92%	592,43	34,76%
Mosaico de Agricultura e Pastagem	507,2	29,76%	436,16	25,59%
Área Urbana	79,16	4,64%	72,5	4,25%
Outras Áreas	45,46	2,67%	55,54	3,26%

Figura 26. Distribuição espacial do uso e ocupação da terra para o ano de 2070



A Figura 27 apresenta o mapa de perdas do solo para o Cenário 02.

Figura 27. Distribuição espacial da perda de solo (Cenário 02)



Comparando-se o Cenário 01 e o Cenário 02 é nítida a influência que os tipos de usos da terra exercem na perda de solos por erosão em uma bacia. No Cenário 02, embora já muito presentes na bacia, as classes: cana e mosaico de agricultura e pastagem passaram a ocupar ainda mais as áreas da BHRC. Além disso, observa-se que a perda de solos variou de 0 a 213,3 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$ e a média foi de aproximadamente 6,0 $t.ha^{-1}.ano^{-1}$.

Esse aumento nos valores máximos do Fator A, pode estar relacionado justamente com o aumento das áreas agrícolas, visto que estas classes do solo alteram a proteção dada ao solo em relação ao impacto direto da chuva e consequentemente do escoamento superficial. A Tabela 18 exibe a relação de cada cenário com as classes de perda do solo

Tabela 18. Classes de perda de solo para os Cenários 01 e 02

Classe de perda de solo	**Fator A ($t.ha^{-1}.ano^{-1}$)**	**Cenário 01**		**Cenário 02**	
		Área (km^2)	**Área (%)**	**Área (km^2)**	**Área (%)**
Nenhuma ou ligeira	0 a 1	899,81	52,8%	866,28	50,8%
Nenhuma ou ligeira	1 a 3	274,59	16,1%	353,27	20,7%
Nenhuma ou ligeira	3 a 5	185,49	10,9%	168,84	9,9%
Nenhuma ou ligeira	5 a 10	193,07	11,3%	177,59	10,4%
Moderada	10 a 20	116,82	6,9%	105,79	6,2%
Moderada	20 a 50	32,26	1,9%	30,03	1,8%
Alta	50 a 200	2,96	0,2%	3,69	0,2%
Muito Alta	>200	0,01	0,0%	0,00	0,0%

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho estimou as perdas de solo na Bacia do Rio Corumbataí através do uso da USLE que avalia a variabilidade da precipitação sobre a área de estudo, as mudanças nas classes de uso e ocupação da terra e as características físicas da bacia. Além disso, tais perdas foram avaliadas em condições de mudanças climáticas e de cobertura vegetal futuras, por meio da criação de cenários.

Em relação à distribuição espacial e temporal da precipitação, conclui-se que a bacia apresentou grande variabilidade anual e interanual com valores de coeficiente de variância de 0,21 e desvio padrão de 222,07 mm. Ademais, a bacia possui duas estações bem definidas, sendo que o período chuvoso representa 80% do total da precipitação, com média de 174 $mm.mês^{-1}$, e o período de estiagem com medial mensal de 75 mm.

As classes de cobertura vegetal mais presentes na área de estudo foram cana, mosaico de agricultura e pastagem, formação florestal, pastagem e área urbana. Por mais que as atividades agrícolas exerçam grande influência no processo de erosão, as declividades da BHRC são consideradas suaves e onduladas, o que explica os baixos valores de perdas do solo encontrados.

Por fim, as simulações futuras da precipitação e do uso da terra foram utilizadas a construção de cenários. Comparando-se os mesmos, conclui-se que a perda de solos é ligeiramente superior no Cenário, vide as alterações na cobertura vegetal.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Hidroweb: **Sistemas de informações hidrológicas**. Disponível em: <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em: 26 de março de 2022.

ANDREOLI, R . V. KAYANO, M. T. A importância relativa do atlântico tropical sul e pacifico leste na variabilidade da precipitação do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 22(1), p. 63-74. 2007.

ARAÚJO, C. L.; MEDEIROS, J. J. B.; SILVA, I. A.; PINTO, E. M. C.; SILVEIRA, B. D. A. Utilização do NDVI para análise dos efeitos da seca na vegetação da Bacia Piranhas-Açu. **Anais...** Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências. 2016.

BAGHERZADEH, A. Estimation of soil losses by usle model using gis at mashhad plain, northeast of iran. **Arab J Geosci**. 2012.

BAHIA, V. G.; CURI, N.; CARMO, D. N. Fundamentos de erosão do solo. **Informe Agropecuário**, v. 16, n. 176, p.25-31, 1992

BARBOSA, H. A. **Análise espaço-temporal de índice de vegetação AVHRR/NOAA e precipitação na região Nordeste do Brasil em 1982-85**. 1998. 169f. Dissertação - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos campos. 1998.

BATISTA, P. V. G. *el al.* Modelling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin-Brazil. **Catena**, v. 157, n. 1, p. 139-150, 2017.

BECERRA, J. A. B.; CARVALHO, S.; OMETTO, J. P. H. B. **Relação das sazonalidades da precipitação e da vegetação no bioma caatinga: abordagem multitemporal**. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, v. 25, p. 6668 6674, 2015.

BENAVIDEZ, R.; JACKSON, B.; MAXWEL, D.; NORTON, K. A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 6059–6086, 2018.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7ª ed. São Paulo: Editora Ícone, 2010. 355 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 8. ed. São Paulo: Ícone, 2014. 355 p.

BORATTO, I. M. P.; GOMIDE, R. L. **Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2013.

BORGES, K. M. R. 2009. **Avaliação da susceptibilidade erosiva da Bacia do Rio Carinhanha (MG/BA) por meio da USLE – Equação Universal de Perda de Solos.** Brasília. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade de Brasília.

BRAGA, R. S., CATALDI, M., OLIVEIRA, H. C. Metodologia para Previsão de Vazões na Bacia do Rio Grande. In: **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande. 2009.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; SILVA, C. M. S. E.; ALMEIDA, H. A. Comparação mensal, sazonal e anual de métodos de estimativas da evapotranspiração de referência para Juazeiro-BA e Petrolina-PE. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 3, p. 23-42, 2017.

CARMONA, E. C.; FAGUNDES, P.; GIMENEZ, D. D.; JORDÃO, M. W.; JORDÃO, S. E. R.; REIS, J. C.; RIBEIRO, M. A. H. W.; SANCHEZ, M. C.; SENEDA, R. M.; SOUZA, A. M. G. de F. **Diagnóstico da Água no Município de Rio Claro**. Rio Claro, 110 p., 2004.

CARVALHO, M. de P. **Predição de perda de terra por erosão na lavoura canavieira paulista**. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitossanidadeengenhariaruralesolos715/erosao-cana.pdf>. UNESP, 2012. Acesso em: 10 de abril de 2022.

CARVALHO, N. O. O. **Hidrossedimentologia prática**. Rio de Janeiro: CPRM, v. 372, 2008.

CAVALCANTI, I. F. A. Episódios El Niño/Oscilação Sul durante a década de 1986 a 1996 e sua influências sobre o Brasil. **Climanalise**, 1997. Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/nino.html>. Acesso em 23 de maio de 2022

CHAVES, M. E. D.; MATAVELI, G. A. V.; JUSTINO, R. C. Uso da modelagem estatística para monitoramento da vegetação no Parque Nacional da Serra da Canastra, Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, v. 24, n. 1, p. 120–132, 2014.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. **Applied hydrology**. New York: McGraw-hill Book, 1988. 572p.

COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, L.; TUCCI, C. E. M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forescasts from a regional weather-prediction model. **Journal of Hydrology**, 205(!), p.87-98. 2005.

CPTEC/INPE. **ETA Model**. Disponível em: <http://etamodel.cptec.inpe.br/history/> .

CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Condições atuais dos ENOS: Lã Niña.** c2016. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 23 de maio de 2022.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. 1996. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, p.427-433.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 51, n° 5, 1996. P. 427-433.

DIAS, I. M. **Relação entre índices de vegetação e precipitação pluvial no estado de Sergipe**. 2017. 131 f. Dissertação (Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

DUTRA, D. J. **Uso do sensoriamento remoto para análise de eventos de seca em bacias hidrográficas: estudo de caso na sub-bacia do Ribeirão Serra Azul, MG**. 2021. 222 f. Dissertação (Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2018. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª. ed., rev. e ampl.: Embrapa, 2018. 356 p.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS.1967. La erosión del suelo por el água. **Algunas medidas para combatirla**

en las tierras de cultivo. Cuadernos de fomento agropecuário da Org. de Las Naciones Unidas-FAO. Roma, n. 81, 207 p.

FELGUEIRAS, C.A et al Uso de simulação estocástica não linear para inferências de atributos espaciais numéricos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE e Sociedad de Especialistas Latino-americanos en Percepción Remota, 2001. p.437-446

FERNÁNDEZ BOU, A. S., VENTURA DE SÁ, R., CATALDI, M. Flood forecasting in the upper Uruguay River basin, **Natural Hazards,** 79, 1239- 1256. 2015.

FOSTER, G. R.; MEYER, L. D; ONSTAD, C. A. A runoff erosivity factor and variable slope length exponents for soil loss estimates. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 20:683-687, 1977.

FRAUCHES, M. S.; OLIVEIRA, T. A.; SANCHES, F. O.; FERREIRA, C. C. M. Chapéu D'Uvas: um estudo sobre as chuvas locais em reservatórios em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 289-302, 2020.

GANASRI, B. P.; RAMESH, H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - a case study of Nethravathi Basin. **Geoscience Frontiers,** v.7, p. 953-961, 2016.

GINCIENE, B. R.; BITENCOURT, M. D. **Utilização do EVI (Enhanced Vegetation Index) para maior sensibilidade na detecção de mudanças temporais em fragmentos de floresta estacional semidecidual**. Curitiba - PR, p. 1620-1627, 2011.

GUERRA, A. J. T. 2005. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Revista do Departamento de Geografia,** p.32-37.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J, T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e conservação de solos**. 7ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012, p.17-56

GURGEL, H.C.; FERREIRA, N.J. Annual and interannual variability of NDVI in Brazil and its connections with climate, **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 18, p. 3595-3609, 2003.

HOEGH-GULDBERG, O; JACOB, D.; TAYLOR, M. Chapter 3 – Impacts of 1.5ºC Global Warming on Natural and Human Systems. In: **Global warming of 1.5ºC**, 2018.

IPCC, 2021: Sumário para Formuladores de Políticas. Em: Mudança do Clima 2021: **A Base da Ciência Física. Contribuição do Grupo de Trabalho I ao Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas** [MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J.B.R. MATTHEWS, T. K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU AND B. ZHOU (EDS.)]. Cambridge University Press.

IPCC, 2022a: Summary for Policymakers [H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, E.S. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, M. TIGNOR, A. ALEGRÍA, M. CRAIG, S. LANGSDORF, S. LÖSCHKE, V. MÖLLER, A. OKEM (EDS.)]. In: **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, M. TIGNOR, E.S. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, A. ALEGRÍA, M. CRAIG, S. LANGSDORF, S. LÖSCHKE, V. MÖLLER, A. OKEM, B. RAMA (EDS.)]. Cambridge University Press.

IPCC, 2022b: Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [P.R. SHUKLA, J. SKEA, R. SLADE, A. AL KHOURDAJIE, R. VAN DIEMEN, D. MCCOLLUM, M. PATHAK, S. SOME, P. VYAS, R. FRADERA, M. BELKACEMI, A. HASIJA, G. LISBOA, S. LUZ, J. MALLEY, (EDS.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and 34 New York, NY, USA.

IPCC. **History – IPCC.** Disponível em: <https://ipcc.ch/about/history/>. Acesso em: 12 de outubro de 2022c..

JAIN. M. K.; DAS, D. 2009. Estimation of sediment yield and areas of soil erosion and deposition for watershed prioritization using GIS and Remote Sesing. **Water Resources Management**, p.2091-2112.

JENSEN, S.K.; DOMINGUE, J.O. 1988. Extracting structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogram Engineering**. Remote Sensing 54 (11): 1593- 1600.

JIMENEZ, K. Q.; DOMECQ, F. M. **Estimação de chuva usando métodos de interpolação**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p.16, 2008.

JÜRGENS, C. FANDER, 1992. Soil erosion assessment and simulation by means of satellite remote sensing and ancillary digital data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, p.27-31.

KARAMAGE, F. *el al*. Usle-based assessment of soil erosion by water in the Nyabarongo River Catchment, Rwanda. **International journal of environmental research and public health**, v. 13, n. 8, p. 1-16, 2016.

KINNELL. A Review of the science and logic associated with approach used in the universal soil loss equation family of models. **Soil Systems**, v. 3, n. 4, p. 62, 2019.

KOFFLER, N. F. O uso das terras da Bacia do Rio Corumbataí em 1990. In: **Geografia**, Rio Claro, 18 (1): 135-150, 1994.

LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; VICTORIA, D. C.; TORRESAN, F. E.; VICENTE, L. E.; TEIXEIRA, A. H. C.; BOLFE, E. L.; BARROS, T. R. Avaliação do índice de vegetação padronizado no monitoramento de estiagens em períodos críticos da soja no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia,** Rio de Janeiro, n. 66/5, p. 1145-1155, 2014.

LI, Z. et al. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydology in agricultural catchment on the Loess Plateau of China. **Journal of Hydrology**, p.35-42.

MACHADO, R. E. **Simulação do escoamento e produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

MACHADO, R. F. VETTORAZZI, C. A. 2003 Simulação da produção de sedimentos para a microbacia do Ribeirão Martins (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo.**

MAPBIOMAS . Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. (2021). **Mapa de Biomas do Brasil**. Escala 1:5.000.000. https://mapbiomas.org/mosaicos-landsat?cama_set_language=pt-BR.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. N. SELUCHI, M. E.; CUARTAS, A.; ALVES, L. M.; MENDIONDO, E. M.; OBREGÓN, G. SAMPAIO, G. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, São Paulo, n.106, p. 31-44, 2015.

McCOOL, D.K.; FOSTER, G.R.; MUTCHLER, C.K; MEYER, L.D. Revised slope length factor for the universal soil loss equation. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, 32(5):1571-1576, 1989.

MENDES, C. A. B. 1988. **Planejamento Nacional de Recursos Hídricos Baseado no Uso de Técnicas de Geoprocessamento,** 9p.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Rivista di Meteorologia Aeronautica**, v. 44, n. 1-4, p. 195-202, 1984

MOLINA, A et al . Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. **Journal of Hydrology** , v. 472– 473, p. 25–35, 2012.

MORAES, G. M. Características hidrogeoquímicas das bacias de drenagem dos rios Capivari e Jundiaí, SP: **aspectos das influências antrópicas**. 2016. 218 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de energia nuclear na agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

MORGAN, R. P. C. **Soil Erosion and Conservation**. Blackwell, Oxford, 304 p., 2005.

MORI, G.B.; CASSIANO, C.C.; FERRAZ, S.F.B.; CAMARGO, A.F.M. Bacia do rio Corumbataí: uso do solo e características limnológicas. In: MORAES, MEB., and LORANDI, R., orgs. **Métodos e técnicas de pesquisa em bacias hidrográficas** [online]. Ilhéus, BA: Editus, 2016, pp. 219-239. ISBN 978-85-7455-443-3.

NIGEL, R.; RUGHOOPUTH, S. D. D. V. 2010. Soil erosion risk mapping with new datasets: An improve identification an prioritization of high erosion risk areas. , p.191-205.

PALMA-SILVA, G.M. **Diagnóstico ambiental, qualidade da água e índice de depuração do Rio Corumbataí - SP**. 1999. 155 f. Dissertação (Mestrado em Manejo Integrado de Recursos) - Centro de Estudos Ambientais, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.

PIMENTEL, D.; et al Enviroment and economics cost of soil erosion and conservation benefits. **Science**, v.265, p.6, 1995.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais: **exposição com exemplos e orientações pra uso de aplicativos**. Piracicaba: Fealq, 2002. 309 p.

PIRES, F.R., SOUZA, C.M., 2013. P**ráticas mecânicas de conservação do solo e da água**, 3 ed. Editora UFV, Viçosa.

PROJETO CORUMBATAÍ. Plano Diretor: Conservação dos recursos hídricos por meio da recuperação e a conservação da cobertura florestal da bacia do rio Corumbataí. **Piracicaba, SP: Relatório Técnico do IPEF**, 2002.

QUIQUEREZ, A. et al. 2008. Soil degradation caused by a high-intensity rainfall event Implications for medium-term soil sustainability in Burgundian vineyars**.** , p. 89-97.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTY, A.; BAMLER, R. The Shuttle Radar Topographic Mission: **a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar**. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, v. 57, p. 241-262, 2003.

RIAHI, K., GRÜBLER, A., NAKICENOVIC, N. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. **Technological Forecasting and Social Change,** *74*(7), 887-935. 2007.

RODRIGUES FILHO, S. LINDOSO, D. P.; BURSZTYN, M; NASCIMENTO, C. G. O Clima em transe: políticas de mitigação e adaptação no Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 19, n. 12, p. 74-90, 2016.

RODRIGUES, M. Introdução ao geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORAMENTO REMOTO, 1., São Paulo, 1990. **Anais...** São Paulo: Escola Politécnica, 1990. p.1-26.

ROSSI, M. 2017. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. V.1. 118p.

ROUSE, J. W. *el al*. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium**, v. 1, p. 309–317, 1973.

SALGADO, M. P. G. **Avaliação dos dados SRTM e GDEM aplicados à modelagem do fator topográfico da USLE.** 2011. 151f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

SANTOS, G.G.; NORI, P.G.; OLVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.14, n.2, 2010

SARAIVA, F. Considerações acerca da pesquisa em Geografia Física aplicada ao Planejamento Ambiental a partir de uma perspectiva sistêmica. **Revista RA'E GA**, Curitiba, n.9, p.83-93, 2005.

SARTORI, A. A. C.; SILVA, R. F. B.; PIANUCCI, M. N.; ZIMBACK, C. R. L. Influência do período de estiagem no índice de Vegetação (NDVI), no município de Botucatu-SP. **Anais...** XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, INPE, p. 4363-4369, 2009.

SHRESTHA, D. P. et al. 2004. Modelling land degradation in the Nepalese Himalaya. , 57(2), p.135-156.

SILVA, A. M. et al. 2003. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2003. 140p.

SILVA, C.G. **Perdas de solo e de água e características de infiltração em sistemas deplantio direto e convencional.** Dourados, MS: UFMS, 2003.42p. (Tese de Doutorado).

SILVA, E. E. R. **Modelagem de Perda de Solo por Erosão Laminar em Cenários Pré e Pós Cadastro Ambiental Rural no Município de Mineiros – GO**. 2021. 75 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2021.

SILVA, J. G. **O novo rural brasileiro**. Campinas: UNICAMP, Instituto de Economia, 1999. 153p.

SILVA, R. M. **Análise da perda de solo na Bacia do Rio Tapacurá mediante previsão climática e modelos de erosão**. 2010. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

SOUZA, B. I. et al. 2004. Contribuição ao estudo da desertificação na Bacia do Taperoá. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** p. 292-298.

SOUZA, K. B. **Modelagem atual e futura de biomassa e estoques de carbono associadas a mudanças na cobertura da terra no bioma Amazônia.** 2020. 182 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2020.

STROOSNIJDER, L. Measurement of erosion: is it possible? , v.64, nº 2-3, p.162-173, 2005.

TOMAZONI, J. C.; GUIMARÃES, E. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão laminar na bacia do rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, p.235-244, 2005.

TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; ALVARES, C. A.; RIBEIRO, S.; LEITE, F. P. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães - MG. **Revista Árvore**, v.30, n.5, p.849-857, 2006.

TUCCI, C. E. M. et al. 2002. **Previsão de médio prazo da influência de reservatório com base na previsão climática.** Instituto de pesquisas hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Projeto BRA/00/09, Relatório Final.

TUCCI. C. E. M. 1998. **Modelos hidrológicos.** 2. Ed. Porto Alegre: Ed da Universidade/UFRGS, 1998.

TUCKER, C.J.; SELLERS, P.J. Satellite remote sensing of primary production, **International Journal of Remote Sensing,** v. 7, n. 11, p. 1395-1416, 1986.

VERMANG, B; et al. Characterization of Soil Surface Roughness Effects on Runoff and Soil Erosion Rates under Simulated Rainfall. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, p. 903–916, jul. 2015.

VIADANNA, A. G. **Análise de qualidade hídrica do alto e médio Corumbataí (SP) pela aplicação de bioindicadores**. Rio Claro, 1985 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

WALTRICK, P. C. et al. Estimativa da erosividade de chuvas no Estado do Paraná pelo método da pluviometria: atualização com dados de 1986 a 2008. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 256-267, 2015.

WISCHEMEIRE, W. H.; SMITH, D. D. **Predicing rainfaal erosion losses: Guide to Conservation Farming**. US Departament of Agriculture Handbook, n537. 58 p. 1978.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA, 1978. **Agriculture handbook**, 537.

WISE, M., CALVIN, K., THOMSON, A., CLARKE, L., BOND-LAMBERTY, B., SANDS, R. EDMONDS, J. Implications of limiting CO2 concentrations for land use and energy. **Science**, *324*(5931), 1183-1186. 2009.

WOOLHISER, D. A.; BRAKENSIEK, D. L. Hydrologic system synthesis. In: HANN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. (Ed.) **Hydrologic Modeling of Small Watershed**, St. Joseph: ASAE, 1972. p.3-16. (ASAE Monograph).

ZEJUN, T.; TINGWU, L.; QINGWEN, Z.; JUN, Z. The sealing process and crust formation att soil surface under the impacts of raindrop and polycrylamine. ISCO Conference, 12. **Anais...** China Agriculture University, Beijing, 2002

EESC • USP