



THAÍSA INÁCIA DE MOURA

**MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PANDEIROS EM CENÁRIOS DE
MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS**

**LAVRAS – MG
2023**

THAÍSA INÁCIA DE MOURA

**MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO
PANDEIROS EM CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, área de concentração de Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola
Orientador

Prof. Dr. Junior César Avanzi
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Moura, Thaísa Inácia de.

Modelagem da Erosão Hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio
Pandeiros em Cenários de Mudanças Climáticas Futuras / Thaísa
Inácia de Moura. - 2023.

67 p. : il.

Orientador(a): Marcelo Ribeiro Viola.

Coorientador(a): Junior César Avanzi.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2023.

Bibliografia.


1. Conservação do solo. 2. Processo erosivo. 3. SIG. I. Viola,
Marcelo Ribeiro. II. Avanzi, Junior César. III. Título.

THAÍSA INÁCIA DE MOURA


**MODELAGEM DA EROSÃO HÍDRICA NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO PANDEIROS EM CENÁRIOS DE
MUDANÇAS CLIMÁTICAS FUTURAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, área de concentração de Hidrologia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 15 de setembro de 2023.
Dr. Marcelo Ribeiro Viola – DRH/UFLA
Dr. Carlos Rogerio de Mello – DRH/UFLA
Dr. Samuel Beskow – UFPel

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO RIBEIRO VIOLA**
Data: 25/10/2024 15:33:07-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Ribeiro Viola
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **JUNIOR CESAR AVANZI**
Data: 23/10/2024 15:07:49-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Junior César Avanzi
Coorientador

LAVRAS – MG

2023

AGRADECIMENTO

Em primeiro momento, agradeço a Deus, pela vida, pela presença em todas as etapas da minha, amparando-me nas dificuldades, pelas conquistas alcançadas e por permitir a realização deste trabalho.

À minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã, pelo amor incondicional e que mesmo de longe me apoiaram, incentivaram e me deram forças.

Agradeço ao meu orientador Dr. Marcelo Ribeiro Viola, pela orientação concedida, paciência, comprometimento e dedicação, pois, a todo momento solicitado, estava pronto para me atender. Estendo meu agradecimento ao professor Dr. Junior César Avanzi pela coorientação, ao professor Dr. Carlos Rogério de Mello pela colaboração na modelagem estatística do fator R, ao professor Dr. Samuel Beskow pela participação na banca de defesa, e à Dra. Nelva Bugoni Riquetti pela disponibilização dos mapas de mudanças climáticas de precipitação para o conjunto médio dos modelos climáticos do Projeta/INPE.

Também agradeço ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Lavras, pela disponibilização do curso e estrutura, aos professores, que contribuíram de forma direta ou indireta para minha formação, ao órgão de fomento Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão de bolsa de estudos que facilitou a dedicação à pesquisa (processo: ID-11708), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa produtividade em pesquisa do orientador (processo 311191/2021–5) e ao projeto Pesquisa & Desenvolvimento da Agência Nacional de Águas e Energia Elétrica e Companhia Energética de Minas Gerais (P&D Aneel/Cemig GT-611).

Aos amigos e colegas, também registro meus agradecimentos pelo companheirismo nos momentos formais e informais e na troca de ideias.

RESUMO

O estudo da erosão hídrica e dos fatores intervenientes possibilita a identificação de áreas prioritárias para a preservação, visando a redução do aporte de sedimentos. O rio Pandeiros é afluente do rio São Francisco, no norte de Minas Gerais, em região de transição entre os biomas cerrado e caatinga. Em seu baixo curso ocorre um pantanal que tem reconhecida função de reprodução da ictiofauna do trecho do rio São Francisco compreendido entre os reservatórios de Três Marias e Sobradinho. Tendo-se em vista a presença de áreas degradadas tais como voçorocas e estradas vicinais, uma preocupação refere-se ao aporte de sedimentos e assoreamento do pantanal. Neste contexto, objetivou-se o mapeamento da susceptibilidade à erosão hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP) a partir da avaliação qualitativa dos resultados obtidos pela Equação Universal de Perda de Solo Revisada (Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE). Especificamente, objetivou-se avaliar os impactos de mudanças climáticas futuras sobre a susceptibilidade à erosão hídrica, a partir dos cenários RCPs (representative concentration pathways) 4.5 e 8.5 do IPCC-AR5. O modelo estatístico para estimativa da erosividade (fator R), tendo a precipitação média anual como variável explicativa, apresentou coeficiente de determinação ajustado 0,564. Para a situação atual foram obtidos os seguintes resultados para os fatores da RUSLE: erosividade entre 6.547 e 7.116 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, erodibilidade (fator K) entre 0,0067 e 0,0295 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, fator LS entre 0,01 e 62,5 e fator C entre 0,0004 e 0,29. O mapeamento da susceptibilidade à erosão hídrica identificou áreas de maior propensão principalmente nas porções noroeste, centro-norte, leste e sudeste. Nos cenários de mudanças climáticas futuras foi projetada redução da precipitação média anual no século XXI, resultando em anomalias negativas para o fator R e para a susceptibilidade à erosão hídrica. Entretanto, entende-se que as preocupações associadas com a preservação das áreas de maior susceptibilidade à erosão hídrica e com a recuperação das áreas degradadas permanecem inalteradas, pois os fatores relacionados com o relevo (fator LS), solos (fator K) e uso do solo (fator C) foram relevantes para os locais de maior susceptibilidade à erosão hídrica. Recomenda-se cautela na utilização dos resultados associados com os cenários de mudanças climáticas futuras devido às diversas fontes de incertezas, e sugere-se o desenvolvimento de novas pesquisas abordando os cenários do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC-AR6; o estudo do fator R nos cenários de mudanças climáticas futuras na escala temporal de eventos de precipitação; e o estudo do fator C a partir de um mapa detalhado de uso e ocupação do solo e a avaliação de seu comportamento temporal ao longo do século XXI.

Palavras-chave: conservação do solo; processo erosivo; SIG.

ABSTRACT

The study of water erosion and intervening factors makes it possible to identify priority areas for preservation, aiming to reduce of the sediments yield. The Pandeiros River is a tributary of the São Francisco River, in the north of Minas Gerais, in a transition region between the cerrado and caatinga biomes. In its lower course, there is a wetland that has a recognized function of reproducing the ichthyofauna of the stretch of the São Francisco River between the Três Marias and Sobradinho reservoirs. Given the presence of degraded areas in the BHRP, such as gully and eroded roads, a growing concern is about sediment yield and siltation of the wetlands. In this context, the objective of this study was to map the susceptibility to water erosion in the Pandeiros River Basin (BHRP) based on the qualitative evaluation of the results obtained by the Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE. Specifically, the objective was to evaluate the possible impacts of future climate change on susceptibility to water erosion, based on the RCPs (Representative Concentration Pathways) 4.5 and 8.5 of IPCC-AR5. The statistical model for estimating erosivity (R factor) presented an adjusted coefficient of determination of 0.564, with precipitation as explanatory variable. For the current situation, the following values were obtained for the RUSLE factors: erosivity between 6,547 and 7,116 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ year⁻¹, erodibility (K factor) between 0.0067 and 0.0295 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, LS factor between 0.01 and 62.5, and C factor between 0.0004 and 0.29. The mapping of the susceptibility to water erosion identified areas with the greatest propensity, mainly in the northwest, central-north, east and southeast portions of the basin. The future climate changes scenarios projected reducing in annual precipitation of the 21st century, resulting in negative anomalies for the R factor and consequent attenuation of susceptibility to water erosion. However, it is understood that the concerns associated with the preservation of areas most susceptible to water erosion and the recovery of degraded areas remain unchanged, as the factors related to relief (LS factor), soils (K factor) and land use (factor C) were decisive in places most susceptible to water erosion. Caution is recommended when using the results associated with future climate change scenarios due to the various sources of uncertainty, and is suggested the development of new research addressing the scenarios of the Sixth Assessment Report of the IPCC-AR6; the study of the R factor in future climate change scenarios on the temporal scale of precipitation events; the study of C factor based on a detailed land use map, and the assessment of its temporal behavior throughout the 21st century.

Keywords: soil conservation; erosive process; GIS.

Impactos sociais, tecnológicos, econômicos e culturais

A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP) é uma Área de Preservação Ambiental (APA Pandeiros), inserida em região de transição ecológica entre os biomas cerrado e caatinga. Importantes biomas, por apresentarem grande biodiversidade, contribuem para o clima, e recursos hídricos. A preservação do cerrado e da caatinga é fundamental para a conservação ambiental e para o desenvolvimento sustentável das comunidades locais. Em seu baixo curso ocorre um pantanal que tem reconhecida função de reprodução da ictiofauna do trecho do rio São Francisco compreendido entre os reservatórios de Três Marias e Sobradinho. Tendo-se em vista a identificação de áreas prioritárias para a preservação, redução do aporte de sedimentos e assoreamento do pantanal, foi realizado o mapeamento da susceptibilidade à erosão hídrica na bacia, a partir da avaliação qualitativa dos resultados obtidos pela Equação Universal de Perda de Solo Revisada (Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE). E avaliar os impactos de mudanças climáticas futuras sobre a susceptibilidade à erosão hídrica, a partir dos cenários RCPs (representative concentration pathways) 4.5 e 8.5 do IPCC-AR5. Foi possível identificar, que as classes de maior susceptibilidade a erosão (“moderada/alta”, “alta”, “muito alta” e “extremamente alta”), totalizaram 8,41% e ocorreram principalmente no noroeste, centro-norte, leste e sudeste, sendo regiões prioritárias no desenvolvimento de um plano integrado de manejo e planejamento de ações mitigadoras. Na análise dos cenários de mudanças climáticas futuras RCPs 4.5 e 8.5 do IPCC (AR5), mostrou possibilidade de redução da precipitação no século XXI, caracterizando-se como uma projeção preocupante em termos da disponibilidade hídrica na BHRP. Como consequência, resultaram na expansão das classes de menor susceptibilidade à erosão hídrica (“suave”, “suave/moderada”, “moderada” e “moderada/alta”) no lugar das classes de maior susceptibilidade (“alta”, “muito alta” e “extremamente alta”), favorável para as comunidades locais.

Social, technological, economic and cultural impacts

The Pandeiros River Basin (BHRP) is an Environmental Preservation Area (APA Pandeiros), located in a region of ecological transition between the cerrado and caatinga biomes. These are important biomes, as they are highly biodiverse and contribute to the climate and water resources. The preservation of the cerrado and caatinga is fundamental for environmental conservation and the sustainable development of local communities. In the lower reaches of the river there is a wetland which is known for its role in reproducing the ichthyofauna of the stretch of the São Francisco river between the Três Marias and Sobradinho reservoirs. In order to identify priority areas for the preservation, reduction of sediment input and siltation of the wetland, the susceptibility to water erosion in the basin was mapped, based on a qualitative assessment of the

results obtained by the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). And to assess the impacts of future climate change on susceptibility to water erosion, based on the IPCC-AR5 RCPs (representative concentration pathways) 4.5 and 8.5 scenarios. It was possible to identify that the classes with the highest susceptibility to erosion (“moderate/high”, “high”, “very high” and “extremely high”) totaled 8.41% and occurred mainly in the northwest, north-central, east and southeast, making them priority regions for developing an integrated management plan and planning mitigating actions. The analysis of the future climate change scenarios RCPs 4.5 and 8.5 of the IPCC (AR5) showed the possibility of a reduction in precipitation in the 21st century, characterizing it as a worrying projection in terms of water availability in the BHRP. As a consequence, this has resulted in the expansion of the classes of lower susceptibility to water erosion (“mild”, “mild/moderate”, “moderate” and “moderate/high”) in place of the classes of higher susceptibility (“high”, “very high” and “extremely high”), which is favorable for local communities.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Pandeiros no contexto de região hidrográfica, estado e país (A), com destaque para os biomas e rios principais (B), e municípios (C).....	22
Figura 2 - Uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Pandeiros	23
Figura 3 - Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros, regiões Norte e Noroeste de Minas Gerais, e localização dos postos pluviométricos utilizados para a modelagem e validação do fator R	26
Figura 4 - Modelo Digital de Elevação Alos (Advanced Land Observing Satellite) Palsar (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar) ³ com altitude em metros (A) e mapa de declividade da bacia, em percentagem (B)	28
Figura 5 - Precipitação por satélite IMERG (Nasa Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) média anual do período de 2001 a 2020, em mm.ano-1	29
Figura 6 - Matriz de dispersão entre as variáveis avaliadas para a modelagem do fator R na BHRP	33
Figura 7 - Gráfico de dispersão do fator R em torno da reta 1:1	33
Figura 8 - Mapa da erosividade da chuva (fator R), em MJ mm ha-1 h-1 ano-1, para a Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros	34
Figura 9 - Mapa da erodibilidade do solo (fator K), Mg h MJ-1 mm-1, para a Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros	35
Figura 10 - Mapa do fator topográfico (fator LS) para a Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros	36
Figura 11 - Mapa do fator de uso e manejo do solo (fator C) para a Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros.....	37
Figura 12 - Classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica obtidas a partir de modelagem pela RUSLE para a bacia hidrográfica do Rio Pandeiros	38
Figura 13 - Destaca a localização das classes de susceptibilidade à erosão hídrica “suave”, “suave/moderada” e “moderada” (A), e “moderada/alta”, “alta”, “muito alta” e “extremamente alta” (B).....	40
Figura 14 - Conjunto médio de precipitação (mm ano-1) simulado pelos modelos climáticos ETA-CanESM2, ETA-HadGEM2-ES, ETA-MIROC5 e ETA-BESM para a BHRP no período histórico e cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 nos três períodos do século XXI: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099	43

Figura 15 - Anomalias de precipitação (mm ano-1) simuladas para os cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 para o século XXI subdividido em três períodos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099	45
Figura 16 - Fator R, em MJmm ha-1 h-1 ano-1, calculado para o período histórico e cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5	46
Figura 17 - Anomalias do fator R (MJ mm ha-1 h-1 ano-1) calculadas para a BHRP nos cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 subdivididos em três períodos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099	47
Figura 18 - Susceptibilidade à erosão hídrica calculada para o período histórico e cenários climáticos futuros RCPs 4.5 e 8.5	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos empíricos para estimar a taxa de perdas de solo	15
Tabela 2 - Valores do fator C obtidos na literatura como função do uso e ocupação do solo	30
Tabela 3 - Matriz de correlação entre as variáveis independentes avaliadas para a modelagem do fator R.....	32
Tabela 4 - Modelo estatístico ajustado para estimativa do fator R na BHRP em função da precipitação média anual (P).....	32
Tabela 5 - Distribuição da área da bacia hidrográfica do rio Pandeiros, em %, por classes qualitativas de perda de solo.....	38
Tabela 6 - Distribuição da área da BHRP, em %, por classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica para o período histórico	49
Tabela 7 - Distribuição da área da BHRP, em %, por classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica, simulada para o cenário RCP 4.5 para os períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, e respectivas alterações (Δ) em relação ao período histórico, em %	50
Tabela 8 - Distribuição da área da BHRP, em %, por classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica, simulada para o cenário RCP 8.5 para os períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, e respectivas alterações (Δ) em relação ao período histórico, em %	50

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	12
1. REVISÃO DE LITERATURA	14
1.1 Erosão hídrica	14
1.1.1 Modelagem da erosão hídrica por modelos empíricos	15
1.1.2 Sistemas de Informações Geográficas (SIG) aplicados na modelagem da erosão hídrica	15
1.2 Equação universal de perda de solo revisada (RUSLE)	16
1.2.1 Erosividade da chuva (R)	17
1.2.2 Erodibilidade do solo (K)	18
1.2.3 Fator topográfico (LS)	19
1.2.4 Fator de uso e manejo do solo (C)	19
1.2.5 Fator de práticas conservacionistas (P)	19
1.3 Impactos das mudanças climáticas sobre a erosão hídrica	20
2. Material e Métodos	21
2.1 Área de Estudo	21
2.2 Estimativa da taxa de perda de solo anual para a situação atual da BHRP	24
2.2.1 Fator de erosividade da chuva (R)	25
2.2.2 Fator de Erodibilidade do solo (K)	29
2.2.3 Fator Topográfico (LS)	29
2.2.4 Fator de Uso e Manejo do Solo (C) e de Práticas Conservacionistas (P)	30
2.3 Estimativa da taxa de perda de solo anual visando cenários de mudanças climáticas futuras	30
3. Resultados e Discussões	31
3.1 Erosividade da chuva (R)	31
3.2 Erodibilidade do solo (K)	34
3.3 Fator topográfico (LS)	35

3.4 Fator de uso e manejo do solo (C)	37
3.5 Susceptibilidade à erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Pandeiros para a situação atual.....	37
3.6 Projeções de precipitação para a BHRP nos cenários de mudanças climáticas futuras RCPs 4.5 e 8.5	42
3.7 Estimativa do fator R nos cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 para o século XXI	45
3.8 Susceptibilidade à erosão hídrica na BHRP em cenários de mudanças climáticas futuras.....	47
4. CONCLUSÕES.....	51
REFERÊNCIAS.....	53

INTRODUÇÃO

Os recursos naturais solo e água interagem dinamicamente no ciclo hidrossedimentológico e sua gestão com vistas ao desenvolvimento sustentável é um dos principais desafios da atualidade. A erosão hídrica acarreta na perda de uma camada agricultável do solo podendo causar o assoreamento de mananciais, demandando estudos para a identificação de locais e fatores críticos, assim como planejamento de ações mitigadoras. Também é tida como um dos fatores que contribui para a degradação dos solos, reduzindo a capacidade produtiva dos solos (BORRELI *et al.*, 2017). Ela é intensificada pelas atividades humanas, alterações no uso da terra e práticas de manejo inadequadas, como plantio em desnível, pastoreio exagerado, queimadas e trânsito excessivo de maquinário agrícola (PANDEY *et al.*, 2016). É resultado da associação entre o desprendimento, o transporte e a deposição de partículas sólidas, provocada pela ação da energia cinética da precipitação e do escoamento superficial (LI; WEI, 2014).

O desenvolvimento de modelos de estimativa da erosão hídrica é amplamente pesquisado (BESKOW *et al.*, 2009). Dentre estes modelos, a equação a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE*) (RENARD *et al.*, 1997) é amplamente utilizada em diferentes localidades (BATISTA *et al.*, 2017; MONDAL; KHARE; KUNDU, 2018; COUTO JÚNIOR *et al.*, 2019).

A utilização da RUSLE integrada a tecnologias de geoprocessamento torna viável o zoneamento da susceptibilidade da bacia hidrográfica à erosão hídrica, possibilitando a identificação das áreas prioritárias para intervenções de caráter conservacionista (ALATORRE; BEGUERÍA, 2009; ASHIAGBOR *et al.*, 2013; OLIVEIRA; SERAPHIM; BORJA, 2015; ALI; HAGOS, 2016; DE SOUSA BARROS *et al.*, 2018; PHAM; DEGENER; KAPPAS, 2018).

Na análise ambiental em bacias hidrográficas a avaliação dos possíveis impactos de mudanças climáticas futuras de precipitação é relevante, visto o seu importante papel nos processos erosivos. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) produz relatórios científicos que auxiliam na compreensão sobre as mudanças climáticas (MARENCO, 2014). Segundo o IPCC, as mudanças climáticas são uma realidade e seus impactos sobre o padrão das precipitações pode afetar o potencial erosivo (NEARING; PRUSKI; O'NEAL, 2004; GARBRECHT *et al.*, 2014). Conforme Bertol e Miquelluti (1993), chuvas de alta erosividade contribuem para que haja quebra de agregados e seja rapidamente atingido o limite de saturação hídrica do solo. Assim, estudos centrados na análise dos possíveis impactos das mudanças climáticas sobre o potencial erosivo das chuvas são relevantes para subsidiar ações

de prevenção e mitigação pelos órgãos de gestão ambiental (RIQUETTI *et al.*, 2020; DOS SANTOS *et al.*, 2022).

A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP) possui área de aproximadamente 3.946 km², estando localizada na região norte de Minas Gerais, na transição entre os biomas cerrado e caatinga. O rio Pandeiros é afluente pela margem esquerda do rio São Francisco em seu médio curso, no trecho entre as barragens de Três Marias (MG) e Sobradinho (BA). Em seu baixo curso ocorre um pantanal, que é conhecido como “pantanal mineiro” e que é essencial para a reprodução e o desenvolvimento da ictiofauna do médio curso do rio São Francisco (NUNES *et al.*, 2009).

Devido à relevância ecológica da BHRP, a Lei Estadual nº 11.901 de 1995 criou a Área de Proteção Ambiental do Rio Pandeiros (NUNES *et al.*, 2009). Contudo, na BHRP há locais com solos degradados, com a ocorrência de voçorocas, sendo uma preocupação no contexto do assoreamento do pantanal mineiro (LIMA, 2019). Neste contexto, a elaboração de estudos ambientais que abordem o regime hidrológico e as perdas de solos são relevantes para subsidiar a implantação de planos de gestão para a APA Pandeiros.

Deste modo, objetivou-se no presente estudo o mapeamento da susceptibilidade da BHRP à erosão hídrica a partir da avaliação qualitativa dos resultados da RUSLE para a situação atual e para os cenários de mudanças climáticas futuras RCPs (*representative concentration pathways*) 4.5 e 8.5 para o século XXI. Especificamente, objetivou-se identificar as áreas de maior susceptibilidade à erosão hídrica e avaliar os fatores críticos da RUSLE inerentes a estes locais.

1. REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Erosão hídrica

O solo é um recurso natural essencial para a humanidade, caracterizando-se como a base física para o desenvolvimento de atividades agrícolas (PEREIRA *et al.*, 2018). Segundo Sousa, Araújo e Vital (2016) a degradação dos solos vem ocorrendo intensivamente. Fatores como clima, relevo e práticas de manejo estão relacionadas com sua deterioração (EFTHIMIOU *et al.*, 2016).

Entre as formas de degradação dos solos, destaca-se a erosão hídrica, a qual pode gerar perdas de solo maiores que as taxas naturais de formação do solo (NEEDELMAN, 2013). De acordo com Merten e Minella (2013), Hernani *et al.* (2002) e Sartori *et al.* (2019), ao longo dos continentes ocorrem grandes perdas anuais de solo, o que afeta fortemente a produção de alimentos agrícolas.

A erosão hídrica consiste na fragmentação das partículas de solo (LORANDI *et al.*, 2001; MEDEIROS *et al.*, 2016), no transporte e na deposição, e está relacionada com fatores naturais e antrópicos (FERREIRA; TAVARES FILHO; FERREIRA, 2010; DECHEN *et al.*, 2015), dentre eles, as práticas agrícolas (AMUNDSON *et al.*, 2015). Sua ocorrência tem início com a precipitação, que dá origem ao escoamento superficial (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008; GUERRA; DA SILVA; BOTELHO, 2009; CÂNDIDO *et al.*, 2014), e é agravada em eventos de precipitação intensa (SANTOS; GRIEBELER; OLIVEIRA, 2010).

A velocidade do escoamento superficial é condicionada pelo relevo. Quanto maior a declividade do terreno, maior é a sua velocidade, e como consequência, maior é a erosão hídrica (SILVA; CHAVES; CAMELO, 2011). A erosão hídrica também é condicionada pelo tipo de solo, práticas de manejo, cobertura vegetal, uso e práticas conservacionistas do solo, dentre outras (HUDSON, 1977; KOULOURI; GIOURGA, 2007; VANMAERCKE *et al.*, 2011; MEDEIROS *et al.*, 2016; SHEN *et al.*, 2016; DIDONÉ; MINELLA; EVRARD, 2017).

A erosão hídrica atua na perda da camada de solo agricultável, afeta a sustentabilidade dos sistemas agrícolas produtivos (RAMOS-SCHARRÓN; FIGUEROA-SÁNCHEZ, 2017), deteriora a qualidade da água e o volume útil de reservatórios (HAGHIZADEH; SHUI; GODARZI, 2009; CERDAN *et al.*, 2010; MINELLA *et al.*, 2010; GRAVES *et al.*, 2015; MELLO *et al.*, 2015), e ocasiona a perda de nutrientes, agroquímicos, contaminantes e matéria orgânica (AVANZI *et al.*, 2013).

1.1.1 Modelagem da erosão hídrica por modelos empíricos

A modelagem da erosão hídrica é uma alternativa viável para a escala de bacia hidrográfica (DICKINSON *et al.*, 1998; RICKSON, 2006; GANASRI; RAMESH, 2016; EFTHIMIOU; LYKOUDI; KARAVITIS, 2017). Com ela, é possível obter informações sobre erosão, suas tendências e distribuição espacial, que podem ser utilizadas para avaliar, simular contextos e cenários alternativos de manejo do solo (GANASRI; RAMESH, 2016).

Segundo Stefanidis e Stathis (2018), essa modelagem se baseia em fatores capazes de explicar a ocorrência da erosão hídrica. O desenvolvimento de modelos empíricos se iniciou com Zingg (1940), que relacionou a erosão com o comprimento e o declive do terreno. Posteriormente esse estudo foi aperfeiçoado, tendo sido adicionados os fatores relativos a culturas, práticas conservacionistas, solo e manejo (WISCHMEIER; SMITH, 1978), e precipitação (DULEY *et al.*, 1940; ELLISON, 1947).

Os modelos empíricos são aplicados para estimar a taxa de perda de solo e contribuem para o planejamento de ações visando o controle da erosão (IGWE *et al.*, 2017). A Tabela 1 mostra a cronologia de desenvolvimento de alguns modelos (LOVRIC; TOSIC, 2018).

Tabela 1 - Modelos empíricos para estimar a taxa de perdas de solo.

SIGLA	MODELO	AUTORES
EPM	Erosion Potential Method	Gavrilovic, 1962
USLE	Universal Soil Loss Equation	Wischmeier; Smith, 1978
AGNPS	Agricultural Non-Point Source Pollution	Young <i>et al.</i> , 1987
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation	Renard <i>et al.</i> , 1997

Fonte: Adaptado de LOVRIC; TOSIC, 2018.

O uso de modelos empíricos para estimar a taxa de perda de solo por erosão hídrica é tido como alternativa para o planejamento conservacionista, em razão do custo e tempo relacionado com estudos desenvolvidos *in situ*. Tais modelos são uma representação da realidade, estando propícios a erros, sendo esses toleráveis (ALEWELL *et al.*, 2019).

1.1.2 Sistemas de Informações Geográficas (SIG) aplicados na modelagem da erosão hídrica

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são amplamente difundidos em estudos na escala de bacia hidrográfica (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991; WANG *et al.*, 2013; XU; XU; MENG, 2013; PANAGOS *et al.*, 2015; FUJACO; LEITE; NEVES, 2016), inclusive em estudos sobre a erosão hídrica (YUSOF; BABAN, 1999; TERRANOVA *et al.*, 2009; TEH,

2011).

A combinação entre SIG e os modelos empíricos provou ser uma poderosa ferramenta de análise ambiental (AKSOY; KAVVAS, 2005; PRASANNAKUMAR *et al.*, 2012; (IMAMOGLU; DENGIZ, 2017). Essa combinação permite a geração de mapas com estimativas de taxas de perda de solo, possibilitando a identificação dos locais com alto risco de erosão, contribuindo para a implementação de planos de manejo de bacias hidrográficas (IGWE *et al.*, 2017), além de facilitar a execução dos cálculos e proporcionar maior confiabilidade aos resultados gerados (SHAHABI *et al.*, 2016).

A análise em ambiente SIG também apresenta diversas vantagens, tais como: análise de cenários futuros, quantificação da distribuição espacial das perdas de solo (ALATORRE; BEGUERÍA, 2009; MODESTE *et al.*, 2016), processamento de extensas bases de dados, análise de práticas conservacionistas, entre outras (MINGOTI, 2009; MAEDA *et al.*, 2010; MONDAL *et al.*, 2015).

1.2 Equação universal de perda de solo revisada (RUSLE)

Vários modelos para a estimativa da erosão hídrica vem sendo desenvolvidos (LOVRIC; TOSIC, 2018). Tais modelos apresentam como vantagens a facilidade de execução quando comparados a métodos diretos (DE SOUSA BARROS *et al.*, 2018).

Entre os diversos modelos disponíveis, a Equação Universal de Perda de Solo (*Universal Soil Loss Equation – USLE*) (WISCHMEIER; SMITH, 1978) e sua versão revisada, a equação Universal da Perda de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation – RUSLE*) (RENARD *et al.*, 1997), são difundidas para estimar a perda anual de solo (NAPOLI *et al.*, 2016; FANG *et al.*, 2019).

A RUSLE é geralmente aplicada na escala de bacia hidrográfica de forma eficiente (SILVA, 2008; XU; XU; MENG, 2013; LIN; MA; HE, 2016), pois apresenta a caracterização do fato topográfico (LS), que está relacionado com a movimentação da água e sedimentos nas vertentes (MOORE; GRAYSON; LADSON, 1991).

Sua ampla utilização pode ser justificada pela viabilidade de uso associada aos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (RENSCHLER; HARBOR, 2002; MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003; LIN; MA; HE, 2016). Esta associação possibilita a estimativa da erosão hídrica e a avaliação da sua distribuição espacial a nível de bacia hidrográfica (CHEN *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2013; FUJACO; LEITE; NEVES, 2016), com economia de tempo e resultados satisfatórios, embora existam desafios e limitações inerentes à modelagem (LU *et al.*, 2004; TERRANOVA *et al.*, 2009; PRASANNAKUMAR *et al.*, 2012; XU, XU, MENG, 2013;

AYER *et al.*, 2015; OLIVETTI *et al.*, 2015; XIAOYING *et al.*, 2015; PANAGOS *et al.*, 2015; UDDIN *et al.*, 2016; ALEWELL *et al.*, 2019).

Os resultados obtidos com a RUSLE podem ser úteis para a elaboração de planos de conservação dos solos (CHEN *et al.*, 2011), sobretudo no contexto da avaliação dos possíveis impactos associados com cenários de mudanças climáticas futuras (TENG *et al.*, 2018; PAL; CHAKRABORTTY, 2019; BHATTACHARYA; CHATTERJEE; DAS, 2020; BORRELLI *et al.*, 2021; CHUENCHUM; XU; TANG, 2020).

A RUSLE (Equação 1) estima a perda de solo por meio do cruzamento de cinco fatores (RENARD *et al.*, 1997):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Em que, A representa a perda média anual de solo por unidade de área e tempo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$); R é o fator de erosividade da chuva ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$); K é o fator de erodibilidade do solo ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); LS é o fator topográfico, em que o L é o comprimento da rampa e S é o declive (adimensional); C é o fator de uso e manejo do solo (adimensional, variando entre 0 e 1); e P é o fator de práticas conservacionistas (adimensional, variando entre 0 e 1).

A partir da estratificação da bacia hidrográfica com base nestes fatores, torna-se viável a identificação dos usos e manejos mais adequados para cada local, assim como os locais de maior susceptibilidade à erosão hídrica (LAFLEN; MOLDENHAUER, 2003; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008; BRADY; WEIL, 2009; DE SOUSA BARROS *et al.*, 2018).

A aplicação da RUSLE tem sido validada em diferentes condições com resultados considerados aceitáveis no que diz respeito à modelagem das perdas potenciais de solo (AMORE *et al.*, 2004; BONILLA; REYES; MAGRI, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2014; SEGURA *et al.*, 2014; TANG *et al.*, 2015).

1.2.1 Erosividade da chuva (R)

A precipitação atua diretamente na erosão hídrica. É por sua influência que ocorre o desprendimento das partículas de solo e seu arraste pelo escoamento superficial (OLIVEIRA; WENDLAND; NEARING, 2013).

O fator R representa o potencial natural da chuva em causar erosão no solo, sendo influenciado por sua intensidade e pela energia cinética gerada no impacto das gotas de chuva associado ao arraste do solo pelo escoamento superficial (SILVA, 2008; BESKOW *et al.*, 2009;

OLIVEIRA, 2012; BAGHERZADEH, 2014). É considerado uma das principais variáveis explicativas em modelos de estimativa da erosão hídrica (GUPTA; KUMAR, 2017; PANAGOS *et al.*, 2017; PAL *et al.*, 2021).

As mudanças climáticas podem modificar a erosividade devido a possíveis alterações nos padrões de precipitação (AZIM *et al.*, 2016; MONDAL *et al.*, 2015; RIQUETTI *et al.*, 2020; DOS SANTOS *et al.*, 2022). A ocorrência de eventos de maior intensidade, por exemplo, acarretaria no aumento da erosividade (MONDAL *et al.*, 2016; PAL; CHAKRABORTTY, 2019; RIQUETTI *et al.*, 2020). De acordo com Riquetti *et al.* (2020) o fator R é um indicador climático que pode ser avaliado frente a cenários de mudanças climáticas futuras, possibilitando o planejamento ambiental.

A forma mais difundida de cálculo da erosividade da chuva é pelo índice de erosividade EI30 (TRINDADE *et al.*, 2016; BACK; POLETO, 2017). Segundo Hickmann *et al.* (2008) o EI30 é o produto da energia cinética total da chuva pela intensidade máxima em 30 minutos. O seu cálculo demanda séries históricas pluviográficas (MELLO *et al.*, 2013), as quais são escassas. Neste contexto estudos vêm sendo empenhados no sentido de desenvolvimento de equações para a estimativa da erosividade em função de dados pluviométricos (DE OLIVEIRA JÚNIOR, 1996; SILVA *et al.*, 1997; ALMEIDA, 2009).

Ainda no contexto da estimativa do fator R, outra abordagem recente refere-se ao desenvolvimento de modelos de regressão para a sua estimativa em função de variáveis explicativas de fácil obtenção, como latitude, longitude, altitude e precipitação anual. Tais modelos apresentam como vantagem a possibilidade de mapeamento do fator R para a escala de bacia hidrográfica a partir de um Modelo Digital de Elevação e de um mapa de precipitação média anual (MELLO *et al.*, 2013; AVANZI *et al.*, 2019).

1.2.2 Erodibilidade do solo (K)

Segundo Wang *et al.* (2016) e Kayet *et al.* (2018), o fator K representa a suscetibilidade natural do solo ao processo erosivo. Está relacionado com a resistência do solo à erosão hídrica e é dependente dos fatores químicos, físicos, mineralógicos e morfológicos (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD *et al.*, 1997), e também é afetado por fatores tais como a infiltrabilidade, capacidade de armazenamento de água, dentre outros (LOMBARDI NETO; BERTONI, 1985).

O Fator K deve ser preferencialmente determinado por meio de experimentos realizados *in situ*. No entanto, os ensaios de campo demandam tempo e recursos financeiros, e portanto, é comum o seu estabelecimento a partir de métodos indiretos ou revisão de literatura (BESKOW

et al., 2009).

1.2.3 Fator topográfico (LS)

O fator topográfico LS representa o impacto relacionado ao movimento do escoamento superficial sobre o terreno, tendo como componentes o comprimento de rampa (L) e o declive (S) (BESKOW *et al.*, 2009; BISWAS; PANI, 2015). Esses componentes tipicamente são analisados separadamente; entretanto, na aplicação da RUSLE, são analisados conjuntamente (NISAR; GOPAL; MURTHY, 2000). Segundo Oliveira (2013), quanto maiores os valores de L e S, mais intenso é o processo erosivo.

O cálculo do fator LS para a modelagem da susceptibilidade à erosão hídrica em bacias hidrográficas geralmente é realizado em ambiente SIG a partir de informações contidas nos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) (VAN REMORTEL; MAICHLE; HICKEY, 2004; MINELLA *et al.*, 2010, KINNEL, 2005). Nesse contexto cabe destaque para a ferramenta GISus (OLIVEIRA, 2014; OLIVEIRA *et al.*, 2015), que é baseada no programa LS tool proposto por Zhang *et al.* (2013).

1.2.4 Fator de uso e manejo do solo (C)

A determinação do fator C leva em consideração a cobertura vegetal, pois esta dissipa a energia cinética da chuva, retarda a velocidade do escoamento superficial e atua sobre as propriedades biológicas, físicas e químicas do solo (BONILLA; JOHNSON, 2012; ABDO, 2017). O sistema radicular, por sua vez, contribui para o fluxo de água no solo e na porosidade e teor de matéria orgânica (NASCIMENTO, PEREIRA; MEDEIROS, 2014).

O fator C é calculado pela razão entre as taxas de perda de solo de uma área com cobertura e manejo do solo e outra sob as mesmas condições, porém, em solo exposto (WISCHMEIER; SMITH, 1978; KARABURUN *et al.*, 2010). Ele pode variar no intervalo de 0 a 1, sendo que, os valores próximos a 0 representam vegetação densa e manejo conservacionista; e na medida em que os valores aumentam em direção a 1 indica menor cobertura vegetal e manejo não conservacionista (BERTOL; SCHICK; BATISTELA, 2002; VATANDASLAR; YAVUZ, 2017).

1.2.5 Fator de práticas conservacionistas (P)

O fator P visa analisar as práticas de manejo conservacionistas, as quais afetam a erosão hídrica (RENARD *et al.*, 1997; PANAGOS *et al.*, 2015), com potencial de preservar as características da superfície (WISCHMEIER; SMITH, 1978; DE OLIVEIRA *et al.*, 2011).

Com a presença de práticas conservacionistas ocorre a redução das perdas de solo. Estas podem ser de origem vegetativa, por adubação (química ou orgânica) e mecânica (AVANZI, 2010; RIGHETTO, 2013). Destacam-se como exemplo o plantio em nível, plantio em faixas ou em contorno, terraceamento, todas práticas conservacionistas mecânicas (EDUARDO *et al.*, 2013; MARKOSE; JAYAPPA, 2016).

O fator P pode variar no intervalo de 0 a 1 (WISCHMEIER; SMITH, 1978). Valores próximos a 0 indicam locais com práticas conservacionistas (PANAGOS *et al.*, 2015), e os valores próximos a 1 representam locais sem adoção de práticas conservacionistas.

Vale ressaltar que a eficácia do controle erosivo pode ser inferida com base na análise conjunta dos fatores C e P, relacionando diferentes tipos de uso e manejo do solo (cobertura vegetal) às práticas conservacionistas (AVANZI *et al.*, 2013; BORGES *et al.*, 2014).

1.3 Impactos das mudanças climáticas sobre a erosão hídrica

As discussões acerca das mudanças climáticas estão em evidência, devido aos seus potenciais impactos sobre o meio ambiente (GIANG; GIANG; TOSHIKI, 2017; HATFIELD *et al.*, 2020). Nesse contexto é importante analisá-las, visto que podem causar modificações ambientais, econômicas e sociais (CORFEE-MORLOT *et al.*, 2009). Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), o termo “mudanças climáticas” pode ser entendido como “[...] uma mudança de clima que possa ser direta ou indiretamente atribuída à atividade humana, que altere a composição da atmosfera mundial e que se some àquela provocada pela variabilidade climática natural observada ao longo de períodos comparáveis”.

De acordo com IPCC (2019), as mudanças climáticas estão relacionadas com a degradação do solo e intensificação dos processos erosivos, o que segundo Panagos *et al.* (2018) caracteriza uma ameaça futura aos solos. O Brasil possui alta vulnerabilidade às mudanças climáticas, devendo-se considerar que os efeitos dessas modificações podem se agravar ou atenuar quando associados ao uso e ocupação do solo (PRUSKI; NEARING, 2002; WEILL; SPAROVEK, 2008; MINGOTI, 2009; MAEDA *et al.*, 2010; MIQUELONI; BUENO; FERRAUDO, 2012; IPCC, 2013; GARBRECHT *et al.*, 2014; DOS SANTOS, 2022).

Uma alternativa para avaliar os possíveis impactos de mudanças climáticas futuras sobre a erosão hídrica é a partir da modelagem computacional, levando-se em consideração cenários futuros de precipitação projetados por modelos climáticos (RIQUETTI *et al.*, 2023).

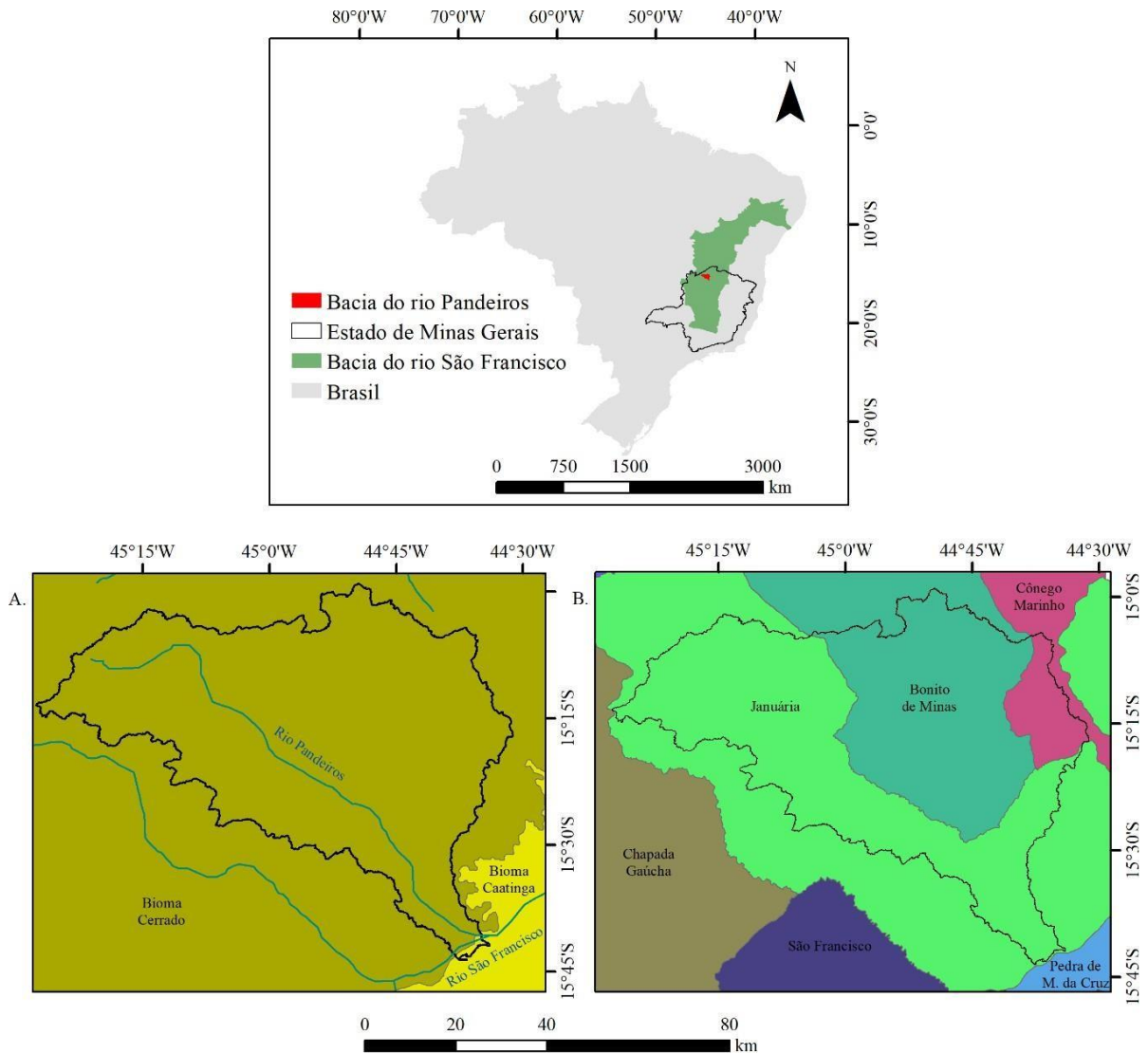
2. Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros (BHRP) está inserida na transição entre os biomas cerrado e caatinga (Figura 1a), localizada no extremo Norte do Estado de Minas Gerais, compreendendo os municípios de Januária, Bonito de Minas e Cônego Marinho (Figura 1b), entre as coordenadas de latitude Sul 15°02'50" e 15°43'38" e de longitude Oeste 45°17'26" e 44°37'29", com área de aproximadamente 3.946 km². O clima predominante é o Aw (clima tropical com verão chuvoso e inverno seco), de acordo com a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). De acordo com as normais climatológicas de 1991-2020 para a estação meteorológica de Januária, localizada nas imediações da bacia, a temperatura média anual é de 24,5°C, com máxima mensal de 34,7°C em outubro e mínima mensal de 14°C em julho (INMET, 2024). A precipitação média anual é de 1.085 mm, com concentração de 92% entre os meses de outubro a março (JUNQUEIRA *et al.*, 2020).

A BHRP constitui a maior Unidade de Conservação (UC) de uso sustentável de Minas Gerais, denominada Área de Proteção Ambiental (APA) do Rio Pandeiros, que foi criada pela Lei nº 11.901, de 1995. A APA é administrada pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF-MG). Em 2004, foi criado o Refúgio de Vida Silvestre do Rio Pandeiros (RVS), com o intuito de proteger a ictiofauna da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e contribuir para a proteção do rio Pandeiros e o pantanal (BAHIA *et al.*, 2009).

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio Pandeiros no contexto de região hidrográfica, estado e país (A), com destaque para os biomas e rios principais (B), e municípios (C).

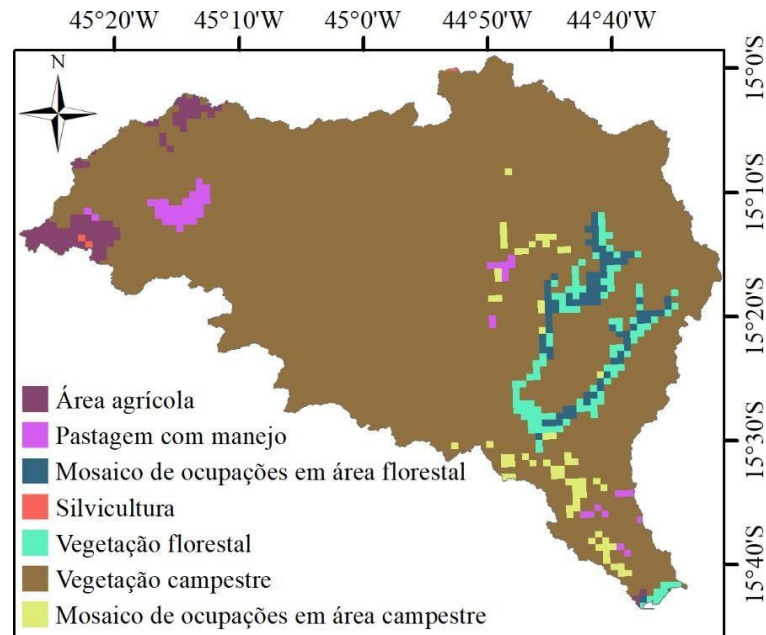


Base de dados cartográfica da ANA e IBGE. Sistema de Coordenadas Geográficas Datum Sirgas 2000

Fonte: Elaborado pela autora a partir da base de dados geográfica do IBGE e da ANA.

De acordo com o mapa de uso e ocupação do solo do IBGE (2018) (Figura 2), ocorrem as seguintes classes de vegetação na BHRP: área agrícola, pastagem com manejo, mosaico de ocupações em área florestal, silvicultura, vegetação florestal, vegetação campestre e mosaico de ocupações em área campestre.

Figura 2 – Uso e ocupação do solo na Bacia do Rio Pandeiros.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do mapa de vegetação do Brasil do IBGE (2018).

Abaixo está transcrita a descrição de cada classe de vegetação conforme o arquivo de simbologia dos vetores disponibilizado pelo IBGE (2023):

- Área Agrícola: “Área caracterizada por lavouras temporárias, semi-perenes e permanentes, irrigadas ou não, sendo a terra utilizada para a produção de alimentos, fibras, combustíveis e outras matérias-primas. Segue os parâmetros adotados nas pesquisas agrícolas do IBGE e inclui todas as áreas cultivadas, inclusive as que estão em pousio ou localizadas em terrenos alagáveis. Pode ser representada por zonas agrícolas heterogêneas ou extensas áreas de plantações. Inclui os tanques de aquicultura”.

- Pastagem com Manejo: “Áreas destinadas ao pastoreio do gado e outros animais, com vegetação herbácea cultivada (braquiária, azevém, etc) ou vegetação campestre (natural), ambas apresentando interferências antrópicas de alta intensidade. Estas interferências podem incluir o plantio; a limpeza da terra (destocamento e despedramento); eliminação de ervas daninhas de forma mecânica ou química (aplicação de herbicidas); gradagem; calagem; adubação; entre outras que descaracterizem a cobertura natural”.

- Mosaico de Ocupações em Área Florestal: “Área caracterizada por ocupação mista de área agrícola, pastagem e/ou silvicultura associada ou não a remanescentes florestais, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área”.

- Silvicultura: “Área caracterizada por plantios florestais de espécies exóticas ou nativas como monoculturas. Segue os parâmetros adotados nas pesquisas de extração vegetal e silvicultura do IBGE”.
- Vegetação Florestal: “Área ocupada por florestas. Consideram-se florestais as formações arbóreas com porte superior a 5 metros de altura, incluindo-se aí as áreas de Floresta Ombrófila Densa, de Floresta Ombrófila Aberta, de Floresta Estacional, além da Floresta Ombrófila Mista. Inclui outras feições em razão de seu porte superior a 5 m de altura, como a Savana Florestada, Campinarana Florestada, Savana-Estépica Florestada, os Manguezais e os Buritizais, conforme o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013)”.
- Vegetação Campestre: “Área caracterizada por formações campestres. Entende-se como campestres as diferentes categorias de vegetação fisionomicamente bem diversas da florestal, ou seja, aquelas que se caracterizam por um estrato predominantemente arbustivo, esparsamente distribuído sobre um estrato gramíneo-lenhoso. Incluem-se nessa categoria as Savanas, Estepes, Savanas-Estépicas, Formações Pioneiras e Refúgios Ecológicos. Encontram-se disseminadas por diferentes regiões fitogeográficas, compreendendo diferentes tipologias primárias: estepes planaltinas, campos rupestres das serras costeiras e campos hidroarenosos litorâneos (restinga), conforme o Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013). Essas áreas podem estar sujeitas a pastoreio e a outras interferências antrópicas de baixa intensidade como as áreas de pastagens não manejadas do Rio Grande do Sul e do Pantanal”.
- Mosaico de Ocupações em Área Campestre: “Área caracterizada por ocupação mista de área agrícola, pastagem e/ou silvicultura associada ou não a remanescentes campestres, na qual não é possível uma individualização de seus componentes. Inclui também áreas com perturbações naturais e antrópicas, mecânicas ou não mecânicas, que dificultem a caracterização da área”.

2.2 Estimativa da taxa de perda de solo anual para a situação atual da BHRP

A RUSLE foi utilizada para estimar o potencial anual médio de perda de solo na BHRP. Esta equação é baseada na interação de cinco fatores que afetam a erosão do solo (Equação 1). Os mapas foram elaborados com resolução espacial de 30 metros. Foram utilizados os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) ArcGIS® (ESRI, 2023) e QGIS (QGIS, Development Team, 2022).

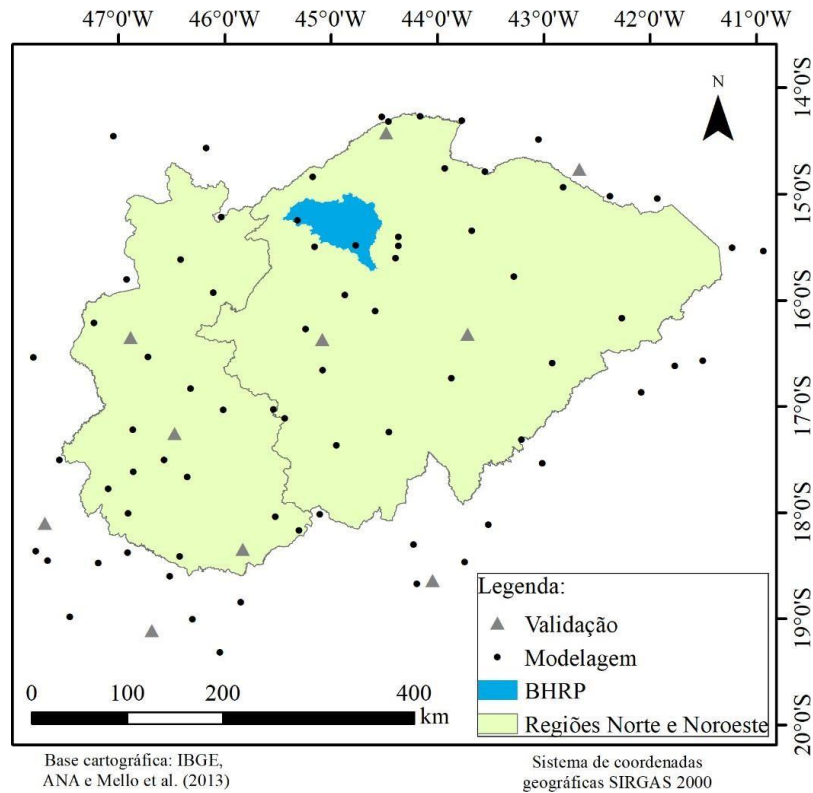
De acordo com Stein *et al.* (1987), Barbosa *et al.* (2015), Rodrigues *et al.* (2017) e Mota e Silva *et al.* (2021), os resultados da RUSLE devem ser analisados de forma qualitativa, ou

seja, de forma que seja estabelecido um ordenamento do potencial de erosão hídrica associado a cada um dos distintos ambientes presentes na bacia. Neste sentido, para a análise dos resultados adotou-se a classificação proposta por Avanzi *et al.* (2013), que classifica a susceptibilidade do solo à erosão hídrica considerando as seguintes classes: Suave: 0 – 2,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹; Suave/Moderada: 2,5 – 5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹; Moderada: 5 – 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹; Moderada/Alta: 10 – 15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹; Alta: 15 – 25 Mg ha⁻¹ ano⁻¹; Muito Alta: 25 – 100 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e Extremamente Alta: >100 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Na sequência descreve-se a obtenção dos mapas associados aos fatores da RUSLE.

2.2.1 Fator de erosividade da chuva (R)

De acordo com Renard *et al.* (1997), o fator erosividade da chuva representa o impacto da gota da chuva e a sua capacidade de gerar perdas de solo. O banco de dados para modelagem do fator R foi obtido do estudo de Mello *et al.* (2013), tendo sido selecionados os dados inseridos nas regiões Norte e Noroeste de Minas Gerais e proximidades. Além destes, foram acrescentados os postos pluviométricos de códigos 1445000, 1544032, 1545006 e 1545005, com dados disponíveis em www.snirh.gov.br, sendo dois localizados na BHRP e dois nas imediações. O banco de dados total foi constituído de 83 postos pluviométricos, dos quais 73 foram utilizados para a modelagem, e 10 selecionados aleatoriamente para validação (Figura 3).

Figura 3 – Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros, regiões Norte e Noroeste de Minas Gerais, e localização dos postos pluviométricos utilizados para a modelagem e validação do fator R.



Fonte: Elaborado pela autora a partir da base de dados geográfica do IBGE, ANA e Mello *et al.* (2013).

A modelagem do fator R foi realizada por regressão linear múltipla pelo método dos mínimos quadrados, no software JMP[®]. Foram avaliadas as variáveis independentes: latitude (graus decimais com sinal negativo para o hemisfério Sul), longitude (graus decimais com sinal negativo para o hemisfério Oeste), altitude (m) e precipitação média anual (mm ano^{-1}), conforme Riquetti *et al.* (2020). Para a avaliação de existência de colineariedade entre as variáveis independentes, foram realizadas análises de correlação e matriz de dispersão.

Para análise da qualidade do ajuste do modelo foi calculado o coeficiente de determinação ajustado (R^2), que corresponde à medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela reta de regressão, sendo que, quanto mais próximo de um (1) estiver o resultado, melhor o ajuste do modelo. A partir do modelo estatístico, foi obtido o mapa do fator R com resolução espacial de 30 metros para a BHRP em ambiente SIG.

Especificamente a partir do banco de dados de validação foi obtido o gráfico de dispersão, percentual de viés (PBias) e erro médio percentual absoluto (Empa). O gráfico de dispersão mostra a distribuição dos dados ao redor da reta 1:1, possibilitando a análise da

ocorrência de subestimativa ou superestimativa pelo modelo (MARCUIZZO *et al.*, 2011). O percentual de viés (PBias) quantifica a tendência que a média dos valores calculados tem em relação aos observados, e desse modo o valor ideal de PBias é 0 (zero) (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016).

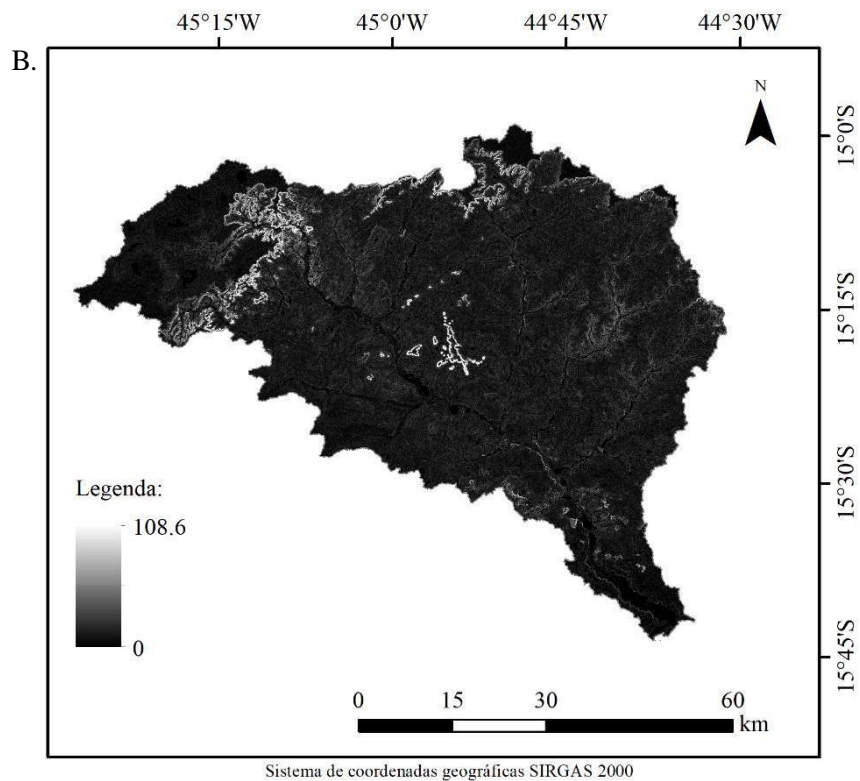
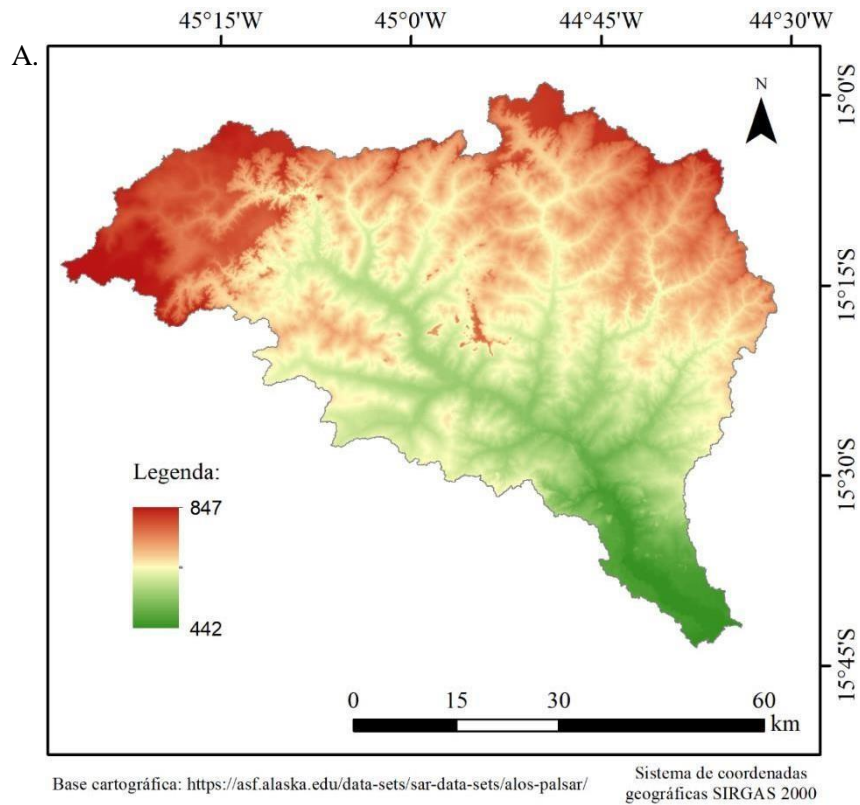
Foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) Alos (*Advanced Land Observing Satellite*) Palsar (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*)¹, com resolução espacial de 12,5 m (LAURENCELLE *et al.*, 2015), tendo sido verificada elevação variando entre 442 e 847 metros na BHRP (Figura 4A). Em razão da baixa densidade de postos pluviométricos para a interpolação da precipitação na BHRP, conforme pode ser observado na Figura 3, foi selecionado o produto de precipitação por satélite IMERG V06 *Final Run* (NASA *Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*)², com resolução de 10 km, conforme Junqueira *et al.* (2022a). Os referidos autores avaliaram os produtos de precipitação por satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA)* e *Integrated Multi-satellitE Retrievals for Global Precipitation Measurement (IMERG)* para a BHRP, tendo concluído que apresentam qualidade satisfatória na representação da precipitação média na bacia, e que o IMERG teve melhor desempenho que o TMPA.

Previamente ao processamento, o MDE foi reamostrado para a resolução de 30 metros, e o grid de precipitação IMERG foi interpolado por krigagem ordinária com o modelo de semivariograma exponencial, tendo sido, posteriormente, convertido para o formato *raster* com resolução de 30 metros. A Figura 5 traz o mapa de precipitação média anual na BHRP, no qual observam-se maiores lâminas precipitadas na porção oeste da bacia, com lâminas de até 1.164 mm ano⁻¹, e as menores nas proximidades do exutório, chegando a 1.027 mm ano⁻¹.

¹ Disponível em: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/>.

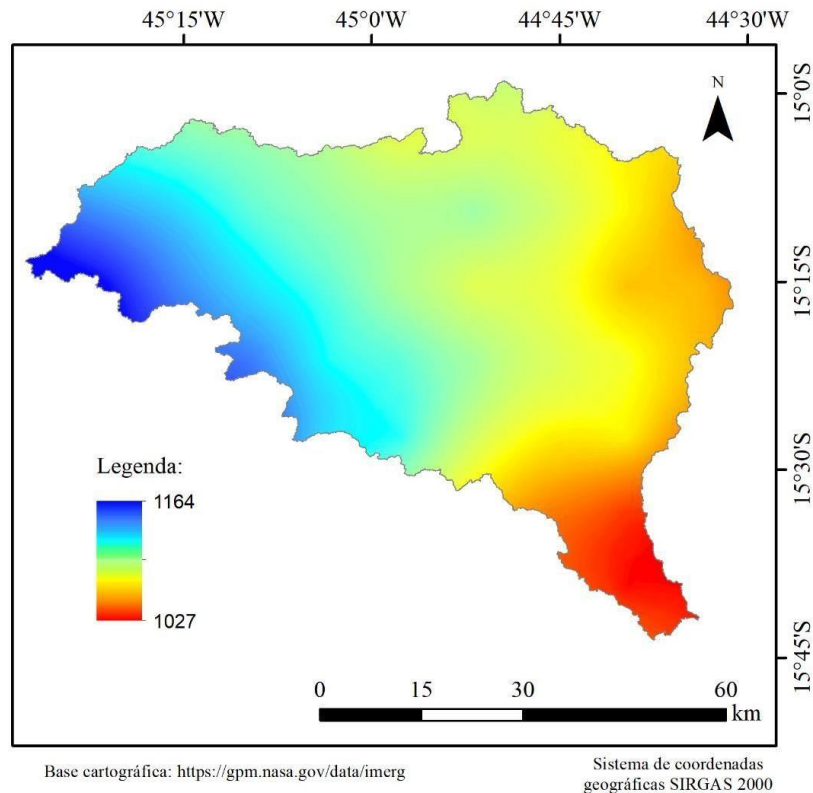
² Disponível em: <https://disc.gsfc.nasa.gov/>.

Figura 4 – Modelo Digital de Elevação Alos (*Advanced Land Observing Satellite*) Palsar (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*)³ com altitude em metros (A) e mapa de declividade da bacia, em percentagem (B).



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 5 – Precipitação por satélite IMERG (*Nasa Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*) média anual do período de 2001 a 2020, em mm.ano⁻¹.



Fonte: Elaborado pela autora.

2.2.2 Fator de Erodibilidade do solo (K)

A erodibilidade é essencial para estimar a perda de solo e avaliar seus efeitos ambientais (WANG *et al.*, 2016), indicando a condição do solo, sua suscetibilidade natural ao descolamento e transporte por processos erosivos (WISCHMEIER; SMITH, 1978; RENARD *et al.*, 1997).

O fator K foi obtido do estudo de De Faria Godoi *et al.* (2021), no qual foi mapeada erodibilidade dos solos para o Brasil. Neste contexto, a partir do mapa de erodibilidade do solo disponibilizado pelos autores supracitados, procedeu-se o recorte para a extensão da BHRP, em ambiente SIG.

2.2.3 Fator Topográfico (LS)

O comprimento de rampa (L) e o declive (S) são dois fatores com grande influência na erosão hídrica. Quanto mais longo e íngreme o declive, maior a propensão a erosão. Para a elaboração do mapa do fator LS para a BHRP, foi utilizado o modelo digital de elevação

Alos/Palsar (Figura 4A). O procedimento de cálculo se deu a partir da extensão SIG GISus³. No GISus, está implementado o programa *LS tool* proposto por Zhang *et al.* (2013). O detalhamento do procedimento de cálculo do fator LS pode ser encontrado em Oliveira *et al.* (2015).

2.2.4 Fator de Uso e Manejo do Solo (C) e de Práticas Conservacionistas (P)

De acordo com Didoné, Minella e Merten (2015), o fator de uso e manejo do solo (C) expressa como a cobertura vegetal afeta as perdas de solo. Concerne à relação entre a perda de solo ocorrida em uma área com cobertura vegetal e a perda de solo em uma área com as mesmas condições, porém sem cobertura vegetal. O fator C pode variar entre 0 e 1, sendo o valor 1 referente à máxima perda de solo, decorrente de ausência de vegetação (RODRIGUES *et al.*, 2017).

A partir do mapa de uso e ocupação do solo da BHRP, obtido de IBGE (2018) (Figura 2), atribuíram-se os respectivos valores do fator C fundamentados na literatura, conforme está mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores do fator C obtidos na literatura como função do uso e ocupação do solo.

Uso e ocupação do solo	Valor do fator C	Fonte
Corpos d'água	0	Farinasso <i>et al.</i> (2006)
Área agrícola	0,29	Ruhoff <i>et al.</i> (2006)
Pastagem com manejo	0,220	Silva <i>et al.</i> (2014)
Mosaico de ocupações em área florestal	0,090	Silva <i>et al.</i> (2014)
Silvicultura	0,0489	Oliveira <i>et al.</i> (2007)
Vegetação florestal	0,0004	Silva <i>et al.</i> (2010)
Vegetação campestre	0,042	Farinasso <i>et al.</i> (2006)
Mosaico de ocupações em área campestre	0,042	Farinasso <i>et al.</i> (2006)

Fonte: Elaborado pela autora.

O fator P foi considerado igual a 1, conforme também adotado por Ozcan *et al.* (2008), Beskow *et al.* (2009), Vemu e Pinnamaneni (2011), Silva, Montenegro e Santos (2012), Avanzi *et al.* (2013), Oliveira *et al.* (2014) e Dias e Silva (2015).

2.3 Estimativa da taxa de perda de solo anual visando cenários de mudanças climáticas futuras

Com o objetivo de analisar os possíveis impactos de mudanças climáticas futuras sobre a erosividade da chuva na BHRP, o modelo estatístico ajustado para predição do fator R foi

³ Disponível em: <https://www2.ufrb.edu.br/gisus-m/>.

alimentado com as projeções de precipitação para o século XXI disponibilizadas na Plataforma PROJETA - Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul Regionalizadas pelo Modelo ETA⁴ (CHOU *et al.*, 2014a; CHOU *et al.*, 2014b; LYRA *et al.*, 2017; MCTI, 2016) referentes aos modelos ETA-CanESM2, ETA-HadGEM2-ES, ETA-MIROC5 e ETA-BESM, nos cenários RCPs 4.5 e 8.5. Os resultados foram obtidos para o conjunto médio dos quatro modelos (GCM-*Ensemble*) conforme Riquetti *et al.* (2023). Foram quantificadas as anomalias do fator R pela diferença entre o valor para o período histórico (1976-2005) e os três períodos futuros: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099.

Por fim foram elaborados mapas qualitativos de susceptibilidade à erosão hídrica pela RUSLE considerando-se a variação do fator R nos cenários de mudanças climáticas futuras e tendo sido mantidos fixos os demais fatores da RUSLE. Especificamente quanto ao uso do solo (fator C), embora a bacia seja uma área de preservação ambiental para uso sustentável desde 1995, com menor propensão a alterações no uso do solo, entende-se que sua manutenção constante ao longo do século XXI seja uma simplificação, e recomendando-se, para estudos futuros, a sua avaliação temporal.

As projeções de alterações quanto a susceptibilidade à erosão hídrica nos cenários de mudanças climáticas futuras foram analisadas a partir da quantificação da alteração na abrangência das classes mapeadas.

3. Resultados e Discussões

3.1 Erosividade da chuva (R)

A Tabela 3 mostra a matriz de correlação entre as variáveis independentes avaliadas para a modelagem do fator R. Nesta tabela, observa-se a existência de correlação entre as variáveis, o que é reforçado pela matriz de dispersão (Figura 6). Desta maneira, com o objetivo de evitar a colinearidade, procedeu-se o ajuste do modelo estatístico assumindo como variável independente apenas a precipitação.

⁴ Disponível em: <https://projeta.cptec.inpe.br/>.

Tabela 3 – Matriz de correlação entre as variáveis independentes avaliadas para a modelagem do fator R.

	Fator R	Precipitação	Altitude	Latitude	Longitude
Fator R	1,0000	0,7552	0,2512	-0,2677	-0,4897
Precipitação	0,7552	1,0000	0,5506	-0,5053	-0,7405
Altitude	0,2512	0,5506	1,0000	-0,4567	-0,3409
Latitude	-0,2677	-0,5053	-0,4567	1,0000	0,3944
Longitude	-0,4897	-0,7405	-0,3409	0,3944	1,0000

Fonte: Elaborado pela autora.

A Tabela 4 mostra os parâmetros estimados para o modelo estatístico. O coeficiente de determinação ajustado (R^2) foi igual a 0,564, havendo significância estatística para o intercepto e precipitação média anual. Este resultado está próximo daqueles obtidos por outros estudos de modelagem do fator R para outras regiões do Brasil. Avanzi et al. (2019), em estudo para o estado do Tocantins, obtiveram R^2 igual a 0,65. Mello et al. (2013) em estudo para as regiões brasileiras obtiveram R^2 entre 0,658 (região nordeste) e 0,749 (região sudeste).

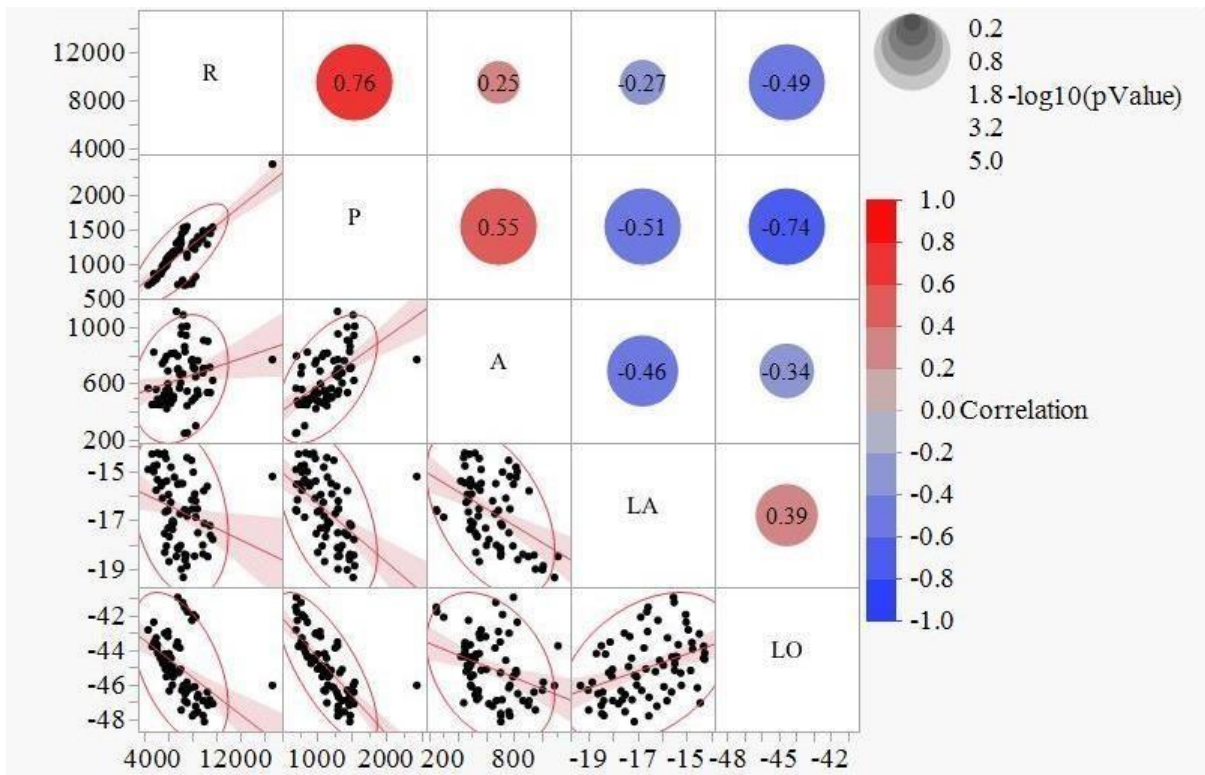
Tabela 4 – Modelo estatístico ajustado para estimativa do fator R na BHRP em função da precipitação média anual (P).

Termo	Valor ajustado	Prob> t
Intercepto	2285,9801	<0,0001
P	4,1493868	<0,0001

Fonte: Elaborado pela autora.

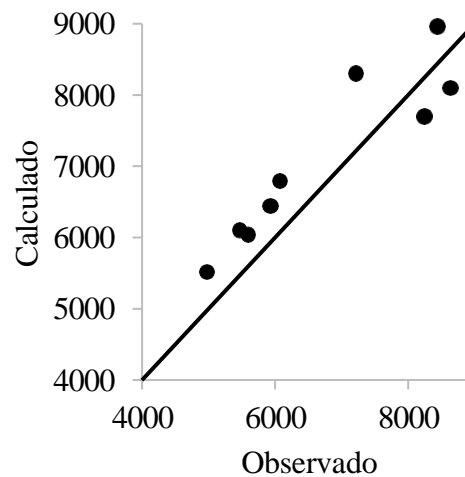
No que tange a avaliação do modelo a partir do banco de dados de dez pontos desconhecidos do processo de modelagem, apresenta-se na Figura 7 o gráfico de dispersão em torno da reta 1:1. Observa-se que houve concordância entre os valores calculados e observados, com tendência de superestimativa do fator R para valores menores que $8.000 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e de subestimativa para valores maiores que este. O percentual de viés (PBias) foi de superestimativa de 4,09%. O erro médio percentual absoluto (Empa), por sua vez, foi de 9,18%, que de acordo com Mello *et al.* (2013) pode ser considerado aceitável em se tratando da modelagem do fator R.

Figura 6 – Matriz de dispersão entre as variáveis avaliadas para a modelagem do fator R na BHRP.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 7 – Gráfico de dispersão do fator R em torno da reta 1:1.

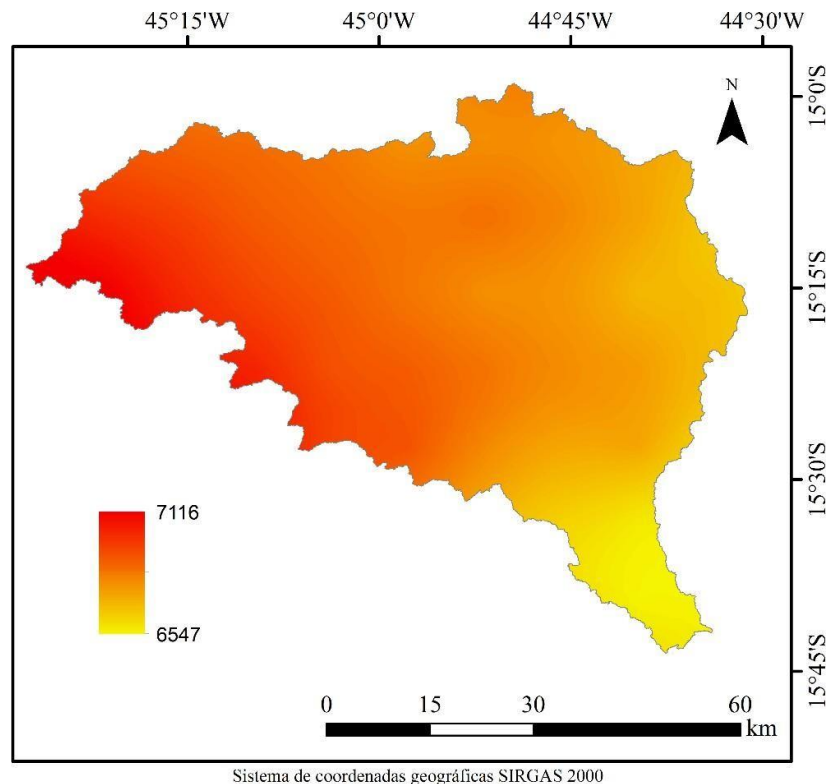


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 8 mostra o mapa do fator R para a BHRP gerado a partir do modelo estatístico. Observam-se valores entre 6.547 e 7.116 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, com maior erosividade na borda noroeste da bacia, nas proximidades do município de Chapada Gaúcha, e com gradiente decrescente em direção ao sudeste. Silva (2004), Mello *et al.* (2013) e Oliveira; Wendland;

Nearing, (2013) em estudos para o território brasileiro obtiveram fator R variando de 3.116 a 20.035 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, 2.216 a 23.187 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹ e de 1.672 a 22.452 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Mello *et al.* (2007), em estudo para o Estado de Minas Gerais encontraram fator R variando de 5.000 a mais de 12.000 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Passos *et al.* (2014), em estudo no alto curso da bacia do rio São Francisco, utilizando precipitação estimada por satélite, encontraram fator R de 6.932,9 a 8.538,66 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Mata *et al.* (2007), em estudo na bacia do rio Urucuia, afluente do rio São Francisco em Minas Gerais, encontraram fator R de 6.600 a 8.200 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Borges *et al.* (2012) ao estudarem a bacia do rio Carinhanha, localizada na divisa dos estados de Minas Gerais e Bahia, na região do médio São Francisco, em Bioma Cerrado, encontraram fator R entre 5.584 e 7.664 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹. Neste contexto observa-se que a faixa de valores obtida para o fator R nos estudos supracitados corroboram com os resultados encontrados no presente trabalho.

Figura 8 - Mapa da erosividade da chuva (fator R), em MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, para a Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros.



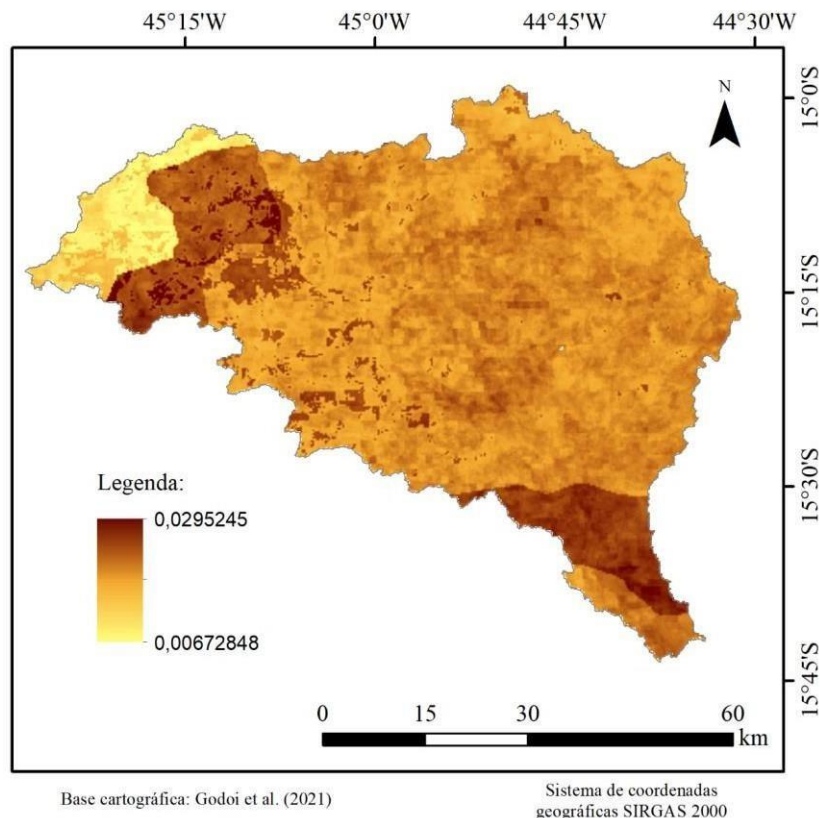
Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 Erodibilidade do solo (K)

A erodibilidade do solo (fator K) variou entre 0,0067 e 0,0295 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹ na BHRP

(Figura 9). Teixeira, Camargo e Junior, (2017), em estudo desenvolvido com o objetivo de analisar o potencial de perda de solos do município de São Francisco, inserido na BHRP, estimaram pelo método indireto proposto por Denardin e Freire (1990) valores para o fator K de 0,017 a 0,063 $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Borges *et al.* (2012), em estudo desenvolvido na bacia do rio Carinhanha, localizada nas proximidades da BHRP, encontraram fator K entre 0 (afloramento rochoso) e 0,06 $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$ (Cambissolos), tendo sido calculado pelo método indireto proposto por Chaves (1994). Desta maneira, embora haja sobreposição da faixa de valores do fator K entre os distintos estudos, os valores máximos obtidos para a BRHP no presente estudo ($0,0295 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$) foram menores que os obtidos por Teixeira, Camargo e Junior, (2017) para o município de São Francisco ($0,063 \text{ Mg h MJ}^{-1}$) e que os obtidos por Borges *et al.* (2012) para a bacia do rio Carinhanha ($0,06 \text{ Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$).

Figura 9 - Mapa da erodibilidade do solo (fator K), $\text{Mg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$, para a Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do mapa de erodibilidade para o Brasil disponibilizado por De Faria Godoi et al. (2021).

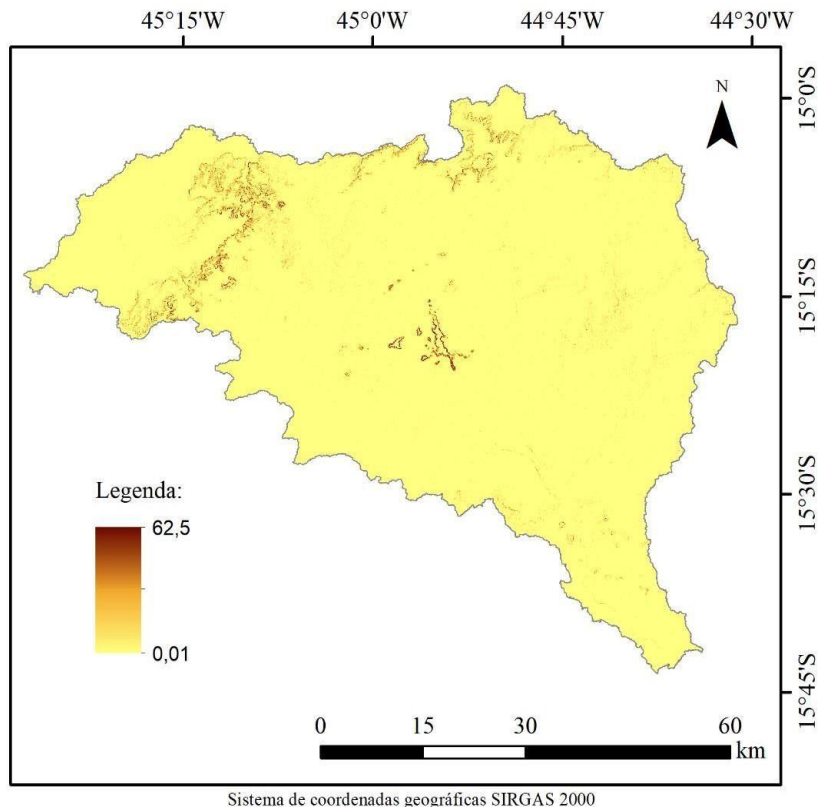
3.3 Fator topográfico (LS)

O fator LS está relacionado com a contribuição do escoamento superficial no processo

de erosão hídrica. Ele constitui um parâmetro de complexa avaliação, tendo em vista a diversidade de situações topográficas e de manejo (LOPES *et al.*, 2011). Para o fator topográfico (LS), constatou-se uma variação de 0,01 a 62,5, em que a distribuição espacial (Figura 10) mostrou que grande parte da bacia se situa no limite inferior desta faixa de valores, o que pode ser justificado pela baixa declividade do relevo que ocorre na BHRP e que resulta em reduzida influência do fator LS para a estimativa da erosão hídrica nestes locais. Os maiores valores de LS, por sua vez, encontram-se em algumas encostas íngremes localizadas principalmente nas regiões noroeste e central da BHRP, como pode ser visto nas Figuras 4B e 10.

Resultado semelhante foi observado por Teixeira, Camargo e Junior, (2017), avaliando o potencial de perda de solos em uma bacia inserida no município de São Francisco, localizada na bacia hidrográfica do rio Pandeiros. Os autores reportaram valores do fator LS variando de aproximadamente 0 a 121,64, sendo que quase 98% da área possui fator LS inferior a 1. Passos *et al.* (2014) estudaram as perdas de solo na bacia do alto São Francisco, tendo sido obtidos valores do fator LS entre 0 e 41,09, em que a maior parte da bacia apresentou valores reduzidos.

Figura 10 - Mapa do fator topográfico (fator LS) para a Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros.

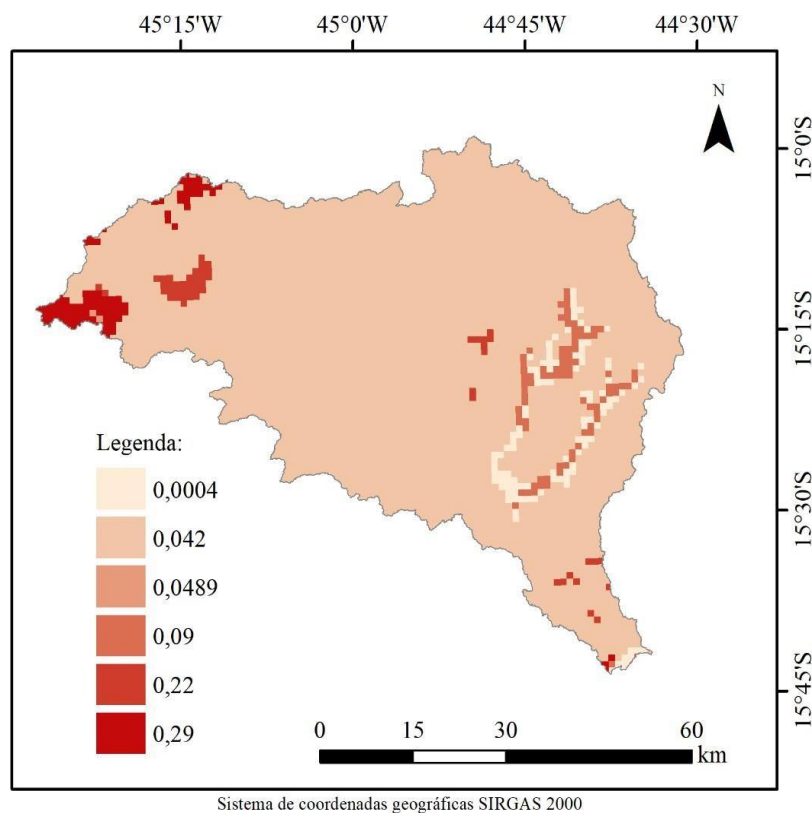


Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 Fator de uso e manejo do solo (C)

O mapa do fator C está apresentado na Figura 11. Observa-se que os valores mais elevados ocorrem de forma localizada nas porções noroeste, centro-leste e sudeste da bacia, indicando que, no que concerne ao uso e manejo do solo, estas são áreas mais susceptíveis ao processo de erosão hídrica. Estas áreas são referentes às classes de área agrícola e pastagem com manejo, que são usos com a presença de práticas antrópicas, contribuindo, assim, para o aumento das taxas de perda de solo. Entretanto, para as demais classes de uso e ocupação do solo presentes na BHRP (Figura 2) os valores do fator C foram reduzidos (Tabela 2). A presença de classes de uso e ocupação do solo com reduzidos valores do fator C contribui para a atenuação da susceptibilidade à erosão hídrica nestes locais.

Figura 11 - Mapa do fator de uso e manejo do solo (fator C) para a Bacia Hidrográfica do Rio Pandeiros.

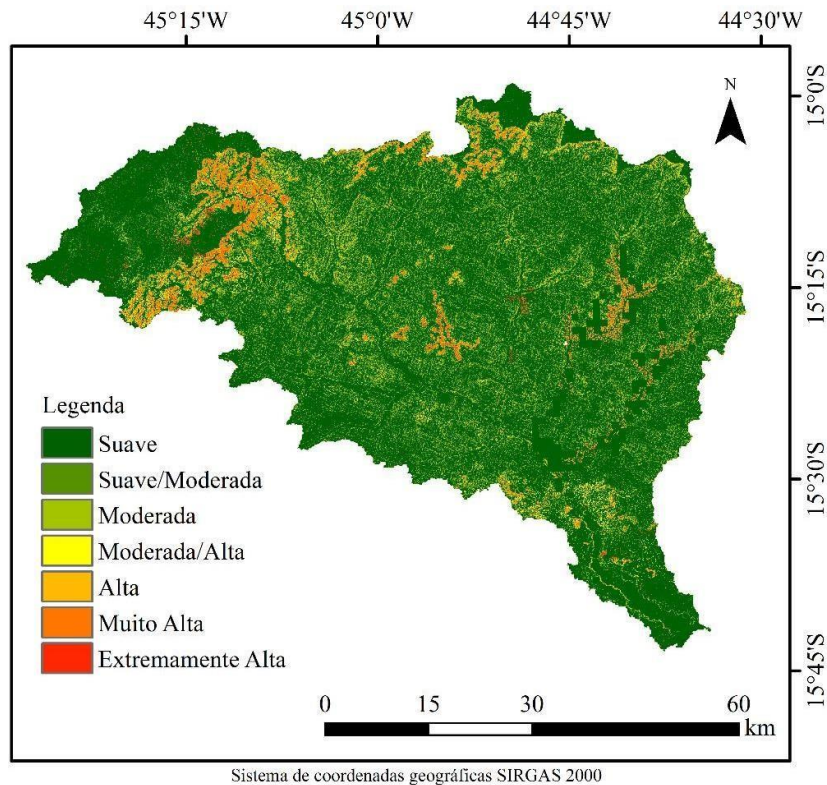


Fonte: Elaborado pela autora.

3.5 Susceptibilidade à erosão hídrica na bacia hidrográfica do rio Pandeiros para a situação atual

O mapa de susceptibilidade dos solos à erosão hídrica na BHRP está apresentado na Figura 12, e na Tabela 5 consta a abrangência de cada classe de susceptibilidade à erosão hídrica.

Figura 12 - Classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica obtidas a partir de modelagem pela RUSLE para a bacia hidrográfica do Rio Pandeiros.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5 – Distribuição da área da bacia hidrográfica do rio Pandeiros, em %, por classes qualitativas de perda de solo.

Perdas de solo (Mg ha⁻¹ ano⁻¹)	Área (%)	Classes de susceptibilidade à erosão hídrica
0 - 2,5	75,75	Suave
2,5 - 5	0,28	Suave/Moderada
5 - 10	15,55	Moderada
10 - 15	2,93	Moderada/Alta
15 - 25	2,70	Alta
25 - 100	2,63	Muito Alta
>100	0,15	Extremamente Alta

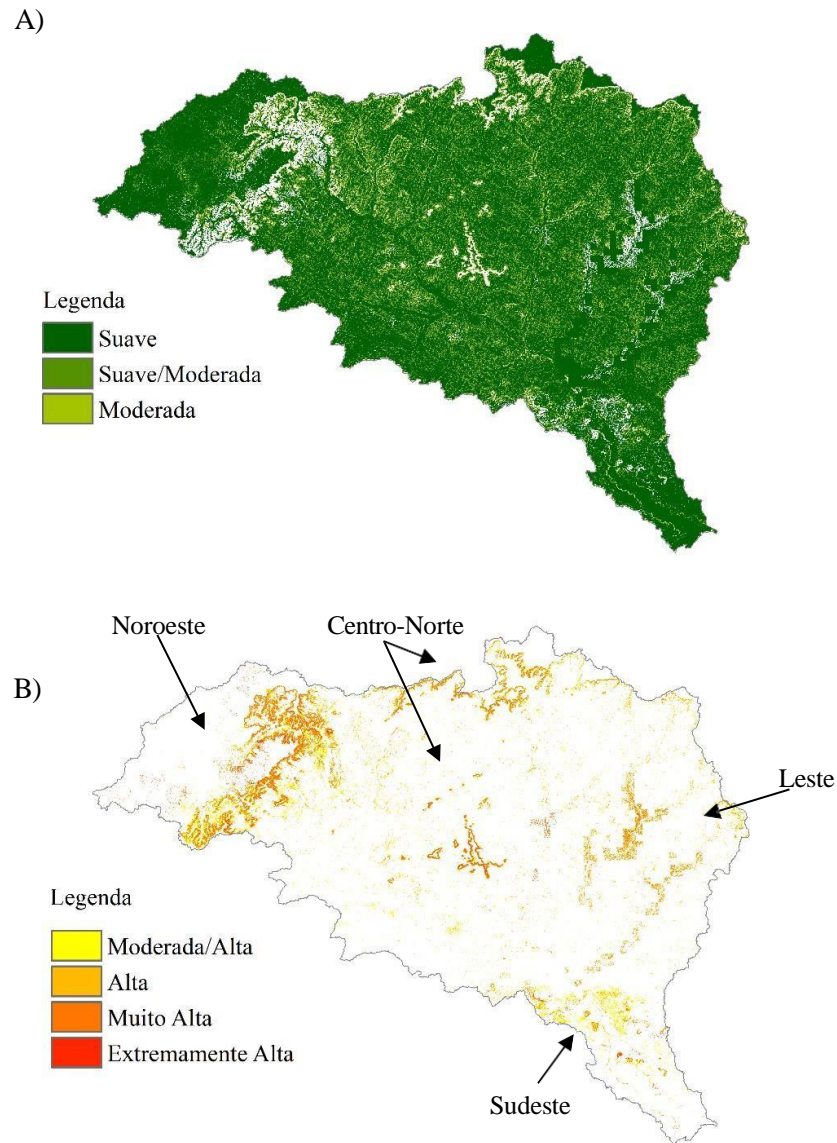
Fonte: Elaborado pela autora.

Pode-se observar que as três classes de menor susceptibilidade à erosão hídrica totalizaram 91,58% da área da bacia, distribuída entre as classes “suave” (75,75%), suave/moderada (0,28%) e “moderada” (15,55%). A Figura 13A destaca a ocorrência destas

classes, que correspondem aos valores da RUSLE menores ou iguais a $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

As classes “moderada/alta”, “alta”, “muito alta” e “extremamente alta”, por sua vez, representaram 2,93%, 2,70%, 2,63% e 0,15% da área da bacia, respectivamente, totalizando 8,41%. A Figura 13B detalha a ocorrência destas classes, que são caracterizadas por perdas médias anuais de solo superiores a $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Ainda de acordo com a Figura 13B, verifica-se que as áreas de maior susceptibilidade ocorrem principalmente nas porções noroeste, centro-norte, leste e sudeste da bacia. Confrontando as áreas de maior susceptibilidade com os mapas dos fatores da RUSLE, verifica-se, de maneira geral, que os resultados podem ser explicados principalmente por: a) noroeste: é a região da BHRP de maior susceptibilidade mapeada, havendo maior erosividade (Figura 8), solos de maior erodibilidade (Figura 9), presença de uso antrópico do solo caracterizado pela classe “pastagem com manejo” (Figura 2), e encostas com alta declividade (Figuras 4B e 10) localizadas nas proximidades dos chapadões de topos planos descritos por Fonseca *et al.* (2011); b) centro-norte: ocorrência de trechos com maiores valores do fator LS; c) leste: maiores valores do fator C relacionados com a ocorrência das classes de vegetação “mosaico de ocupações em área florestal” e “pastagem com manejo” e d) sudeste: ocorrência de solos de maior erodibilidade e alguns locais com a classe de vegetação “pastagem com manejo”.

Figura 13 - Destaca a localização das classes de susceptibilidade à erosão hídrica “suave”, “suave/moderada” e “moderada” (A), e “moderada/alta”, “alta”, “muito alta” e “extremamente alta” (B).



Fonte: Elaborado pela autora.

A bacia hidrográfica do rio Pandeiros conta com estudos prévios visando diferentes objetivos e que descreveram a ocorrência de erosão hídrica na bacia e suas causas. Nunes *et al.* (2009), em levantamento sobre os impactos ambientais na BHRP, relataram que atividades antrópicas tais como a degradação das veredas, desmatamento da vegetação ciliar, construção de estradas vicinais, silvicultura de eucalipto, agropecuária, áreas irrigadas por pivôs, agricultura de subsistência, carvoejamento, compactação do solo, exploração de água em poços tubulares, dentre outras, contribuem para o assoreamento e redução da vazão do rio Pandeiros. Rodrigues *et al.* (2009), em estudo sobre a vegetação ciliar, relataram alterações antrópicas ao

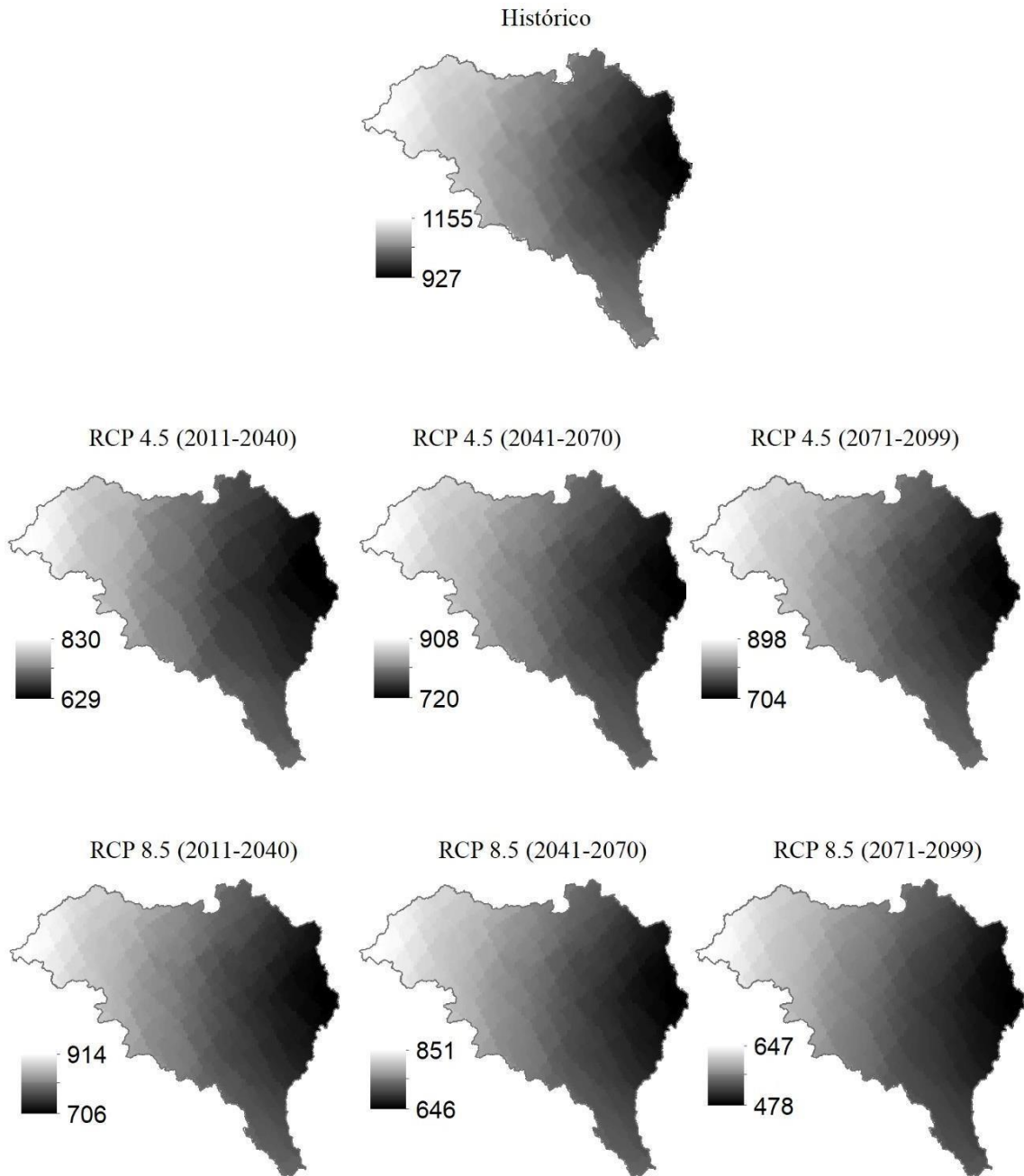
longo de todo o curso do rio, atribuídas principalmente ao desmatamento para atividades agro-pastoris. Fonseca *et al.* (2011) realizaram o diagnóstico do uso do solo e da vegetação, tendo identificado processos erosivos avançados, voçorocas e intervenções tais como estradas que atravessam cursos d'água e uso do solo em locais originalmente constituídos por veredas ou mata ciliar. Ainda de acordo com Fonseca *et al.* (2011), as pressões antrópicas exercidas na borda noroeste da bacia, onde ocorrem a nascente do rio Pandeiros e as principais áreas de recarga justificam a criação de uma área de conservação sob regime de proteção integral. Azevedo *et al.* (2009), em estudo sobre o regime de escoamento, relataram que as vazões durante o longo período de estiagem inerente à região são mantidas pelo efeito de regularização desempenhado pelas veredas, e que a degradação destas corrobora para o assoreamento do pantanal mineiro, que é considerado unidade de conservação de proteção integral visando a proteção da flora e da fauna. Ainda de acordo com Azevedo *et al.* (2009), a população local utiliza os recursos naturais para subsistência, incluindo a extração de lenha do cerrado e a utilização de veredas para agricultura, com utilização de práticas de queimadas e drenagem. Neves (2011) realizou estudo sobre o efeito da preservação de áreas nativas de vereda na vazão do período de estiagem a partir do monitoramento de seis cursos d'água inseridos na bacia do rio Pandeiros, tendo sido observado que a preservação das veredas e de seus solos hidromórficos está diretamente relacionada com a manutenção da vazão durante o período de estiagem. De Magalhães Bethonico e Da Cunha (2009) abordaram a importância da inclusão das comunidades na gestão de uma unidade de conservação, tendo verificado que a produção de carvão vegetal ilegal e as dificuldades da produção agrícola são preocupações centrais para a gestão da APA. Ainda de acordo com De Magalhães Bethonico e Da Cunha (2009), existe estreita relação entre a atividade de carvoejamento e os problemas de erosão hídrica, em razão da retirada da vegetação nativa e pelo tráfego de caminhões que transportam o carvão, relatando que algumas estradas se encontram intransitáveis e até mesmo interrompidas devido à erosão hídrica avançada. Jardim e Moura (2018) avaliaram a influência de massas de ar, relevo e uso do solo sobre a precipitação e temperatura do ar, tendo mencionado que na área de contato com a chapada no oeste da bacia ocorre um ambiente favorável aos processos erosivos em razão do maior índice pluviométrico e alta declividade, recomendando a restrição do uso do solo nestes locais, onde ocorrem extensas voçorocas. Silva (2018) realizou a caracterização morfométrica e um estudo sobre a relação entre a vegetação, o fenômeno *El Nino Oscilação Sul* (ENOS) e a temperatura da superfície do mar (TSM), tendo citado em sua conclusão que o assoreamento do pantanal mineiro é uma preocupação ambiental e que pode ser intensificada por processos erosivos relacionados com atividades antrópicas. Lima (2019) em estudo sobre as vertentes com

voçorocamento mapearam 215 voçorocas na BHRP, distribuídas em cinco grandes grupos, sendo três localizados no noroeste da bacia e dois no sudeste. Confrontando essas regiões com o mapa de susceptibilidade à erosão hídrica obtido no presente estudo (Figura 13B), nota-se que a ocorrência das voçorocas é coerente com as áreas de maior susceptibilidade mapeadas a partir da RUSLE para as regiões noroeste e sudeste. Nota-se também coerência com os apontamentos de Fonseca *et al.* (2011) e Jardim e Moura (2018) no que concerne à maior propensão a erosão hídrica na região de contato com as chapadas no noroeste da bacia. Verifica-se, assim, que a modelagem das áreas mais susceptíveis à erosão hídrica a partir da RUSLE produz resultados pertinentes para o planejamento ambiental na escala de bacia hidrográfica. Neste sentido é relevante o incentivo à preservação das áreas de maior susceptibilidade à erosão hídrica, e também, a recuperação das áreas degradadas e mapeadas pelos autores supracitados, com o objetivo de redução do aporte de sedimentos, citando-se iniciativas já existentes na bacia realizadas pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF), dentre outras.

3.6 Projeções de precipitação para a BHRP nos cenários de mudanças climáticas futuras RCPs 4.5 e 8.5

Na Figura 14 observa-se o conjunto médio de precipitação simulada pelos modelos climáticos ETA-CanESM2, ETA-HadGEM2-ES, ETA-MIROC5 e ETA-BESM para a BHRP no período histórico e cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 para o século XXI.

Figura 14 - Conjunto médio de precipitação (mm ano^{-1}) simulado pelos modelos climáticos ETA-CanESM2, ETA-HadGEM2-ES, ETA-MIROC5 e ETA-BESM para a BHRP no período histórico e cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 nos três períodos do século XXI: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do banco de dados de Riquetti *et al.* (2023).

As lâminas médias de precipitação anual para o período histórico variaram de 927 a 1.155 mm ano^{-1} . Observa-se que o padrão de variabilidade espacial da precipitação nos RCPs 4.5 e 8.5 foi análogo ao do período histórico, com as maiores lâminas médias anuais ocorrendo

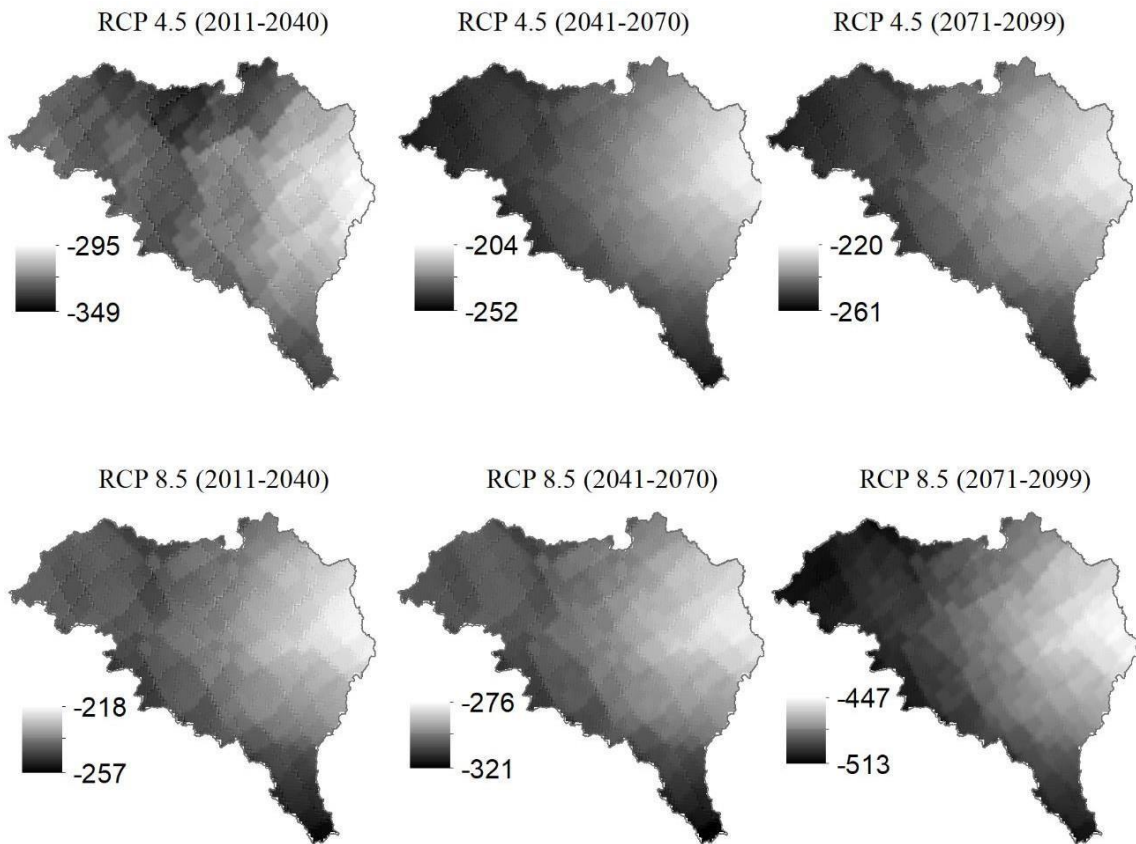
no oeste da bacia e decrescendo em direção ao leste.

Visando quantificar as alterações prognosticadas para a precipitação anual foram calculadas as anomalias, pela diferença entre os cenários futuros e o período histórico (Figura 15). Anomalias negativas indicam projeção de redução da precipitação no cenário futuro em comparação ao período histórico, enquanto anomalias positivas retratam projeção de aumento. Observa-se que para ambos RCPs as projeções do conjunto médio dos quatro modelos foram de redução da precipitação. Para o RCP 4.5 as reduções foram da ordem de -295 a -349 mm ano⁻¹ (2011 a 2040), -204 a -252 mm ano⁻¹ (2041 a 2070) e de -220 a -261 mm ano⁻¹ (2071 a 2099). Comparando estes resultados aos do RCP 8.5, verifica-se maior severidade das projeções para o RCP 4.5 no início do século (2011-2040, sendo de -295 a -349 mm ano⁻¹) e para o RCP 8.5 para meados (2041-2070, sendo de -276 a -321 mm ano⁻¹) e final do século XXI (2071-2099, sendo de -447 a -513 mm ano⁻¹). Resultados obtidos por Silva *et al.* (2021) corroboram com os prognósticos de redução da precipitação nos cenários de mudanças climáticas futuras obtidos para a BHRP. No estudo supracitado foram avaliados os impactos dos cenários de mudanças climáticas e demandas consuntivas no desempenho dos reservatórios do rio São Francisco utilizando os modelos do CMIP6, tendo sido obtidas projeções de redução da precipitação para as bacias de Itaparica, Sobradinho e Três Marias.

Nesta abordagem, entende-se que uma das principais preocupações no que tange à gestão de recursos hídricos na BHRP está relacionada com a disponibilidade hídrica, que conforme estudos recentes já é uma preocupação na bacia. Junqueira *et al.* (2020) estudaram as secas meteorológica e hidrológica na BHRP a partir de dados observacionais de 1977 a 2018. Os autores concluíram que a seca mais longa e severa ocorreu no final do período analisado (2013-2018), justificada pelos menores índices pluviométricos e maiores temperaturas. Junqueira *et al.* (2022b) realizaram uma reanálise hidrológica na BHRP com o modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) para dados de reanálise climática ERA5-Land do período de 1950 a 2018, tendo concluído que a frequência de meses secos aumentou no final do período, tendo sido 51,7% dos meses secos entre 1996 e 2018.

Neste contexto, a redução da precipitação prognosticada pelo conjunto médio dos quatro modelos climáticos frente ao aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEEs) nos RCPs 4.5 e 8.5 é preocupante do ponto de vista da disponibilidade hídrica na BHRP. Tais resultados indicam que o desenvolvimento de políticas públicas que abordem os possíveis impactos de mudanças climáticas futuras é relevante para o planejamento da gestão de recursos hídricos na BHRP.

Figura 15 - Anomalias de precipitação (mm ano^{-1}) simuladas para os cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 para o século XXI subdividido em três períodos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099.



Fonte: Elaborado pela autora a partir do banco de dados de Riquetti *et al.* (2023).

3.7 Estimativa do fator R nos cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 para o século XXI

O fator R foi calculado pelo modelo estatístico desenvolvido neste trabalho (Tabela 4), assumindo-se o conjunto médio de precipitação dos quatro modelos climáticos como variável explicativa. Os resultados do fator R para o período histórico e cenários climáticos futuros está apresentado na Figura 16. Observa-se nesta figura que o período histórico apresentou os maiores valores de erosividade, entre 6.131 e $7.079 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Observa-se também que a variabilidade espacial obtida para a situação atual (Figura 8) está coerente com os mapas obtidos para o conjunto médio dos modelos climáticos (Figura 16).

Figura 16 - Fator R, em $\text{MJmm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$, calculado para o período histórico e cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5.

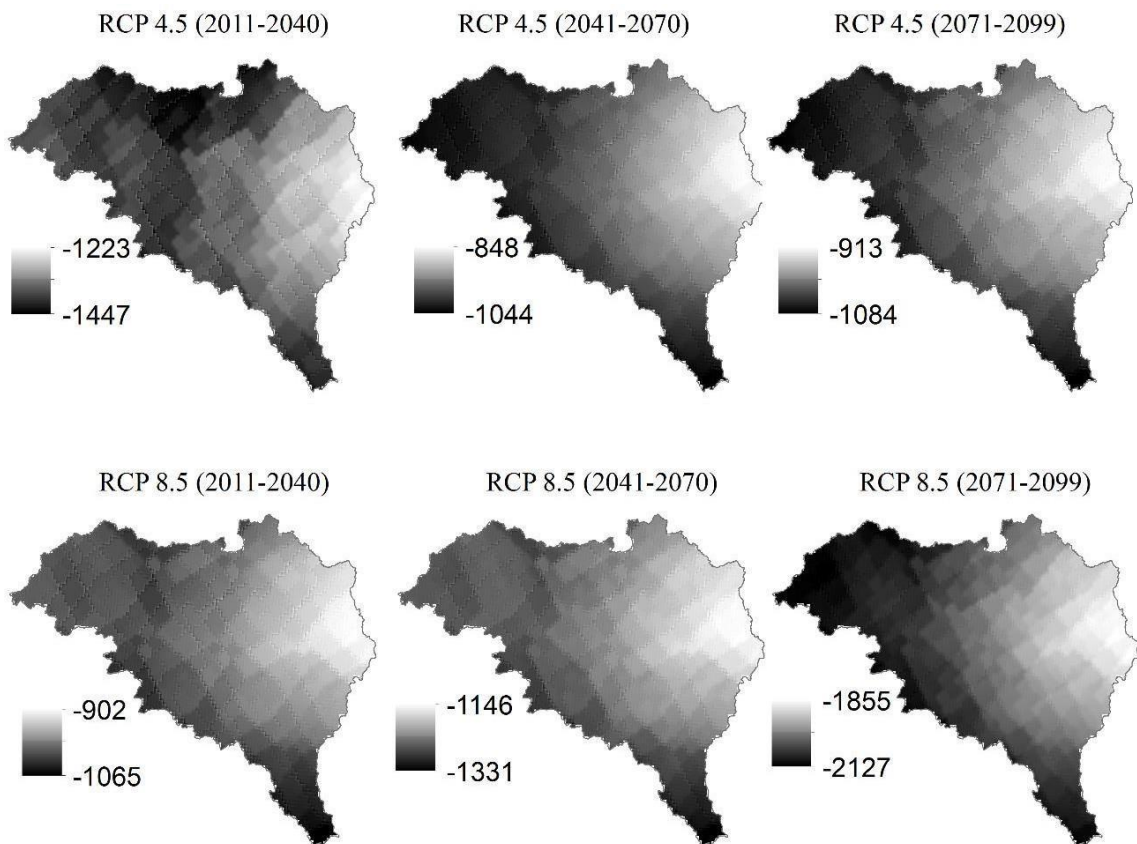


Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 17 mostra as anomalias do fator R calculadas para a BHRP. Foram obtidas anomalias negativas para o fator R nos cenários RCPs 4.5 e 8.5, que são explicadas em razão das anomalias negativas de precipitação. As reduções projetadas foram de até $1.447 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (RCP 4.5), $1.331 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (RCP 8.5) e $2.127 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (RCP

8.5) para o início, meados e final do século XXI, respectivamente. Verifica-se, de maneira geral, maiores reduções para a borda oeste da bacia, sobretudo ao norte, acompanhando o comportamento das anomalias de precipitação (Figura 15).

Figura 17 - Anomalias do fator R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{h}^{-1} \text{ano}^{-1}$) calculadas para a BHRP nos cenários climáticos RCPs 4.5 e 8.5 subdivididos em três períodos: 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099.

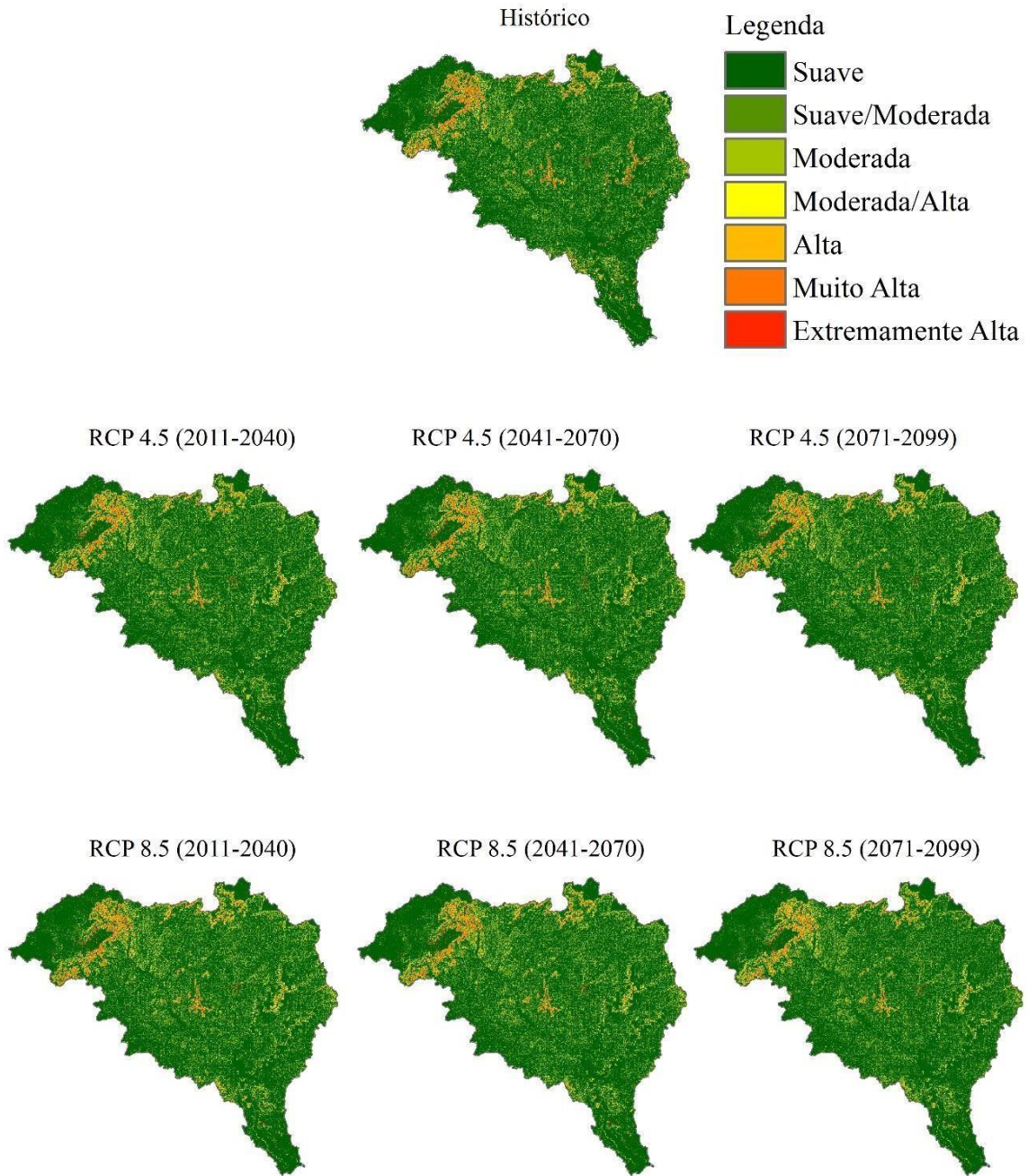


Fonte: Elaborado pela autora.

3.8 Susceptibilidade à erosão hídrica na BHRP em cenários de mudanças climáticas futuras

Na Figura 18 estão expostos os mapas de susceptibilidade a erosão hídrica obtidos para o período histórico e cenários futuros RCPs 4.5 e 8.5. A Tabela 6 traz a distribuição percentual da área da BHRP por classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica para o período histórico.

Figura 18 - Susceptibilidade à erosão hídrica calculada para o período histórico e cenários climáticos futuros RCPs 4.5 e 8.5.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 6 – Distribuição da área da BHRP, em %, por classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica para o período histórico.

Perdas de solo (Mg ha⁻¹ ano⁻¹)	Área (%)	Classes de susceptibilidade à erosão hídrica
0 - 2,5	75,68	Suave
2,5 – 5	0,28	Suave/Moderada
5 – 10	15,96	Moderada
10 – 15	2,68	Moderada/Alta
15 – 25	2,67	Alta
25 – 100	2,59	Muito Alta
>100	0,14	Extremamente Alta

Fonte: Elaborado pela autora.

Ao comparar a abrangência das classes de susceptibilidade à erosão hídrica obtidos para a situação atual (Tabela 5) e para o período histórico dos modelos climáticos (Tabela 6), observa-se coerência na distribuição das classes, o que pode ser explicado pela boa representação da precipitação média anual pelos modelos climáticos para o período histórico.

As Tabelas 7 e 8 mostram as alterações projetadas para as classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica nos cenários de mudanças climáticas futuras nos RCPs 4.5 e 8.5, respectivamente, tomando-se como referência a projeção do período histórico (Tabela 6). Observa-se, de maneira geral, que as projeções foram de aumento da ocorrência das classes “suave”, “suave/moderada”, “moderada” e “moderada/alta”, no lugar das classes “alta”, “muito alta” e “extremamente alta”. Para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099 o aumento total da abrangência territorial das quatro classes de menor susceptibilidade no RCP 4.5 correspondeu a 1,77%, 1,42% e 1,47%, respectivamente, enquanto que, no RCP 8.5, foi de 1,45, 1,68 e 2,11%, respectivamente.

É de grande relevância destacar que o referido prognóstico, de atenuação da susceptibilidade à erosão hídrica nos cenários de mudanças climáticas futuras considerou unicamente o fator erosividade da chuva, pois os demais fatores da RUSLE (K, LS, C e P) foram mantidos inalterados. Uma vez que o relevo (fator LS), o uso do solo (fator C) e a erodibilidade dos solos (fator K) foram relevantes nas áreas de maior susceptibilidade à erosão hídrica, entende-se que as preocupações delineadas quanto à necessidade de recuperação e de preservação da BHRP para a situação atual persistem nos cenários de mudanças climáticas futuras.

Tabela 7 – Distribuição da área da BHRP, em %, por classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica, simulada para o cenário RCP 4.5 para os períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, e respectivas alterações (Δ) em relação ao período histórico, em %.

Perdas de solo (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Classes de susceptibilidade à erosão hídrica	RCP4.5 (2011 a 2040)		RCP4.5 (2041 a 2070)		RCP4.5 (2071 a 2099)	
		Área (%)	Δ (%)	Área (%)	Δ (%)	Área (%)	Δ (%)
0 - 2.5	Suave	75,75	0,07	75,75	0,07	75,75	0,07
2.5 - 5	Suave/Moderada	0,39	0,11	0,35	0,07	0,35	0,07
5 - 10	Moderada	17,43	1,47	16,89	0,93	16,94	0,98
10 - 15	Moderada/Alta	2,80	0,12	3,03	0,35	3,03	0,35
15 - 25	Alta	1,59	-1,08	1,79	-0,88	1,76	-0,91
25 - 100	Muito Alta	1,98	-0,61	2,11	-0,48	2,10	-0,49
>100	Extremamente Alta	0,06	-0,08	0,08	-0,06	0,08	-0,06

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8 - Distribuição da área da BHRP, em %, por classes qualitativas de susceptibilidade à erosão hídrica, simulada para o cenário RCP 8.5 para os períodos de 2011 a 2040, 2041 a 2070 e 2071 a 2099, e respectivas alterações (Δ) em relação ao período histórico, em %.

Perdas de solo (Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Classes de susceptibilidade à erosão hídrica	RCP8.5 (2011 a 2040)		RCP8.5 (2041 a 2070)		RCP8.5 (2071 a 2099)	
		Área (%)	Δ (%)	Área (%)	Δ (%)	Área (%)	Δ (%)
0 - 2.5	Suave	75,75	0,07	75,75	0,07	75,76	0,08
2.5 - 5	Suave/Moderada	0,35	0,07	0,37	0,09	2,30	2,02
5 - 10	Moderada	16,92	0,96	17,24	1,28	16,43	0,47
10 - 15	Moderada/Alta	3,03	0,35	2,92	0,24	2,22	-0,46
15 - 25	Alta	1,77	-0,90	1,64	-1,03	1,59	-1,08
25 - 100	Muito Alta	2,11	-0,48	2,01	-0,58	1,67	-0,92
>100	Extremamente Alta	0,08	-0,06	0,07	-0,07	0,04	-0,10

Fonte: Elaborado pela autora.

4. CONCLUSÕES

Foi possível ajustar um modelo estatístico para a modelagem da erosividade da chuva (fator R) na BHRP, tendo como variável explicativa a precipitação média anual, com coeficiente de determinação ajustado de 0,564.

A análise da variabilidade espacial dos fatores da RUSLE possibilitou um melhor entendimento sobre a susceptibilidade à erosão hídrica ao longo da bacia. O fator R variou entre 6.547 e 7.116 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ ano⁻¹, sendo os maiores valores na borda noroeste da bacia, nas proximidades do município de Chapada Gaúcha. A erodibilidade do solo (fator K) variou entre 0,0067 e 0,0295 Mg h MJ⁻¹ mm⁻¹, sendo identificadas duas faixas de maior erodibilidade, localizadas no noroeste e sudeste da bacia. O fator LS variou de 0,01 a 62,5, em que grande parte da bacia se situa no limite inferior desta faixa, e os maiores valores ocorrem nas encostas íngremes nas proximidades dos chapadões, principalmente nas regiões noroeste e central da bacia. No que concerne o fator C, as porções noroeste, centro-leste e sudeste da bacia, onde há inserção das classes de área agrícola e pastagem com manejo, que são usos com a presença de práticas antrópicas, apresentaram os valores mais elevados.

A aplicação da RUSLE possibilitou a estimativa da susceptibilidade à erosão hídrica para a situação atual na BHRP. As três classes de menor susceptibilidade (“suave”, “suave/moderada” e “moderada”) totalizaram 91,58% da área da bacia. As quatro classes de maior susceptibilidade (“moderada/alta”, “alta”, “muito alta” e “extremamente alta”), por sua vez, totalizaram 8,41% e ocorreram principalmente no noroeste, centro-norte, leste e sudeste, tendo sido possível identificar os principais fatores associados a estes resultados. Confrontando os resultados obtidos com estudos prévios disponíveis para a BHRP, desenvolvidos por outros autores, nota-se, de maneira geral, coerência entre os locais de maior susceptibilidade à erosão hídrica mapeados com a RUSLE e aqueles nos quais há ocorrências mapeadas. Desta maneira, conclui-se que a RUSLE aplicada na escala de bacia hidrográfica produz resultados pertinentes para o planejamento ambiental na escala de bacia hidrográfica.

A análise dos cenários de mudanças climáticas futuras RCPs 4.5 e 8.5 do IPCC (AR5), a partir do conjunto médio de quatro modelos climáticos disponibilizados no PROJETA/INPE, mostrou possibilidade de redução da precipitação no século XXI, caracterizando-se como uma projeção preocupante em termos da disponibilidade hídrica na BHRP. Como consequência foram calculadas anomalias negativas para o fator R nos cenários futuros, e que resultaram na expansão das classes de menor susceptibilidade à erosão hídrica (“suave”, “suave/moderada”, “moderada” e “moderada/alta”) no lugar das classes de maior susceptibilidade (“alta”, “muito alta” e “extremamente alta”). Entretanto, entende-se que as preocupações associadas com a

preservação das áreas de maior susceptibilidade à erosão hídrica e com a recuperação das áreas degradadas identificadas para a situação atual permanecem inalteradas, pois os fatores relacionados com o relevo (fator LS), solos (fator K) e uso do solo (fator C) foram relevantes para as áreas de maior susceptibilidade à erosão hídrica.

Diante da complexidade inerente à simulação dos cenários de mudanças climáticas futuras por modelos climáticos, o que está relacionado, por exemplo, com incertezas quanto à concentração futura de GEEs, limitações dos modelos, heterogeneidade do sistema físico modelado, entre outras, recomenda-se cautela na análise dos resultados de redução da precipitação e consequente redução da erosividade obtidos no presente estudo.

Recomenda-se o desenvolvimento de novas pesquisas sobre a susceptibilidade da BHRP à erosão hídrica abordando: a) os cenários de mudanças climáticas futuras do Sexto Relatório de Avaliação do IPCC-AR6; b) estudo do fator R nos cenários de mudanças climáticas futuras na escala temporal de eventos de precipitação; c) estudo do fator C a partir de um mapa detalhado de uso e ocupação do solo e a avaliação do seu comportamento temporal ao longo do século XXI.

REFERÊNCIAS

- ABDO, H. G. **Geo-modeling approach to predicting of erosion risks utilizing RS and GIS data: a case study of Al-Hussain Basin, Tartous, Syria.** J Environ Geol, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2017.
- AKSOY, Hafzullah; KAVVAS, M. Levent. **A review of hillslope and watershed scale erosion and sediment transport models.** Catena, v. 64, n. 2-3, p. 247-271, 2005.
- ALATORRE, L. C.; BEGUERÍA, Santiago. **Identification of eroded areas using remote sensing in a badlands landscape on marls in the central Spanish Pyrenees.** Catena, v. 76, n. 3, p. 182-190, 2009.
- ALEWELL, Christine et al. **Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling.** International soil and water conservation research, v. 7, n. 3, p. 203- 225, 2019.
- ALI, Syed Ahmad; HAGOS, Hamelmal. **Estimation of soil erosion using USLE and GIS in Awassa Catchment, Rift valley, Central Ethiopia.** Geoderma Regional, v. 7, n. 2, p. 159-166, 2016.
- ALMEIDA, Cristiana Oliveira Silva de. **Erosividade das chuvas no estado de Mato Grosso.** 2010. Dissertação de mestrado – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.
- ALVARES, Clayton Alcarde et al. **Köppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologische zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMORE, Elena et al. **Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins.** Journal of Hydrology, v. 293, n. 1-4, p. 100- 114, 2004.
- AMUNDSON, Ronald et al. **Soil and human security in the 21st century.** Science, v. 348, n. 6235, p. 1261071, 2015.
- ASHIAGBOR, George et al. **Modeling soil erosion using RUSLE and GIS tools.** Int J Remote Sens Geosci, v. 2, n. 4, p. 1-17, 2013.
- AVANZI, J. C. **Técnicas de prevenção e de controle da erosão laminar.** Lavras: Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, 2010.
- AVANZI, Junior César et al. **Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and Atlantic Forest.** Ciência e Agrotecnologia, v. 37, p. 427-434, 2013.
- AVANZI, Junior César et al. **Modeling of the rainfall and R-Factor for Tocantins state, Brazil.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 43, p. e0190047, 2019.
- AYER, Joaquim Ernesto Bernardes et al. **Erosão hídrica em Latossolos Vermelhos distróficos.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 45, p. 180-191, 2015.

AZEVEDO, I. F. P. et al. **Preservação estratégica para recuperar o São Francisco**. Scientific American Brasil, v. 83, p. 74-79, 2009.

AZIM, Farooq et al. **Impact of climate change on sediment yield for Naran watershed, Pakistan**. International Journal of Sediment Research, v. 31, n. 3, p. 212-219, 2016.

BACK, Álvaro José; POLETO, Cristiano. **Avaliação do potencial erosivo das chuvas de Florianópolis-SC**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 21, 2017.

BAHIA, T. de O. et al. **Florística e fitossociologia de veredas em diferentes estágios de conservação na APA do Rio Pandeiros, norte de Minas Gerais. MG**. Biota, Belo Horizonte, v. 2, n. 3, 2009.

BAGHERZADEH, Ali. **Estimation of soil losses by USLE model using GIS at Mashhad plain, Northeast of Iran**. Arabian Journal of Geosciences, v. 7, p. 211-220, 2014.

BARBOSA, Amanda Fernandes et al. **The application of the universal soil loss equation by using free and available softwares**. Anuário do Instituto de Geociências, v. 38, n. 1, p. 170-179, 2015.

BATISTA, Pedro Velloso Gomes et al. **Modelling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin-Brazil**. Catena, v. 157, p. 139-150, 2017.

BERTOL, Ildegardis; MIQUELLUTI, David José. **Perdas de solo, água e nutrientes reduzidas pela cultura do milho**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 28, n. 10, p. 1205-1213, 1993.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O. **Razão de perdas de solo e fator C para milho e aveia em rotação com outras culturas em três tipos de preparo de solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, p. 545-552, 2002.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 6. ed. São Paulo: Ícone, 2008.

BESKOW, Samuel et al. **Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling**. Catena, v. 79, n. 1, p. 49-59, 2009.

BHATTACHARYA, Raj Kumar; CHATTERJEE, Nilanjana Das; DAS, Kousik. **Sub-basin prioritization for assessment of soil erosion susceptibility in Kangsabati, a plateau basin: a comparison between MCDM and SWAT models**. Science of the Total Environment, v. 734, p. 139474, 2020.

BISWAS, Sumantra Sarathi; PANI, Padmini. **Estimation of soil erosion using RUSLE and GIS techniques: a case study of Barakar River basin, Jharkhand, India**. Modeling Earth Systems and Environment, v. 1, p. 1-13, 2015.

BONILLA, Carlos A.; JOHNSON, Odette I. **Soil erodibility mapping and its correlation with soil properties in Central Chile**. Geoderma, v. 189, p. 116-123, 2012.

BONILLA, Carlos A.; REYES, J. L.; MAGRI, A. **Water erosion prediction using the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) in a GIS framework, central Chile**.

Chilean journal of agricultural research, v. 70, n. 1, p. 159-169, 2010.

BORGES, Kelly Maria Resende et al. **Vulnerabilidade natural: a perda de solo da bacia do rio Carinhonha (MG/BA) usando uma abordagem qualitativa da equação universal de perda de solos.** GEOgraphia, v. 14, n. 27, p. 101-125, 2012.

BORGES, Tatyana Keyty de Souza et al. **Influência de práticas conservacionistas na umidade do solo e no cultivo do milho (*Zea mays* L.) em semiárido nordestino.** Revista Brasileira de Ciência do solo, v. 38, p. 1862-1873, 2014.

BORRELLI, Pasquale et al. **An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion.** Nat. Commun. 8 (1), 1–13. 2017.

BORRELLI, Pasquale et al. **Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis.** Science of the total environment, v. 780, p. 146494, 2021.

BRADY, Nyle C.; WEIL, Ray R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos.** Bookman Editora, 2009.

BRIGHENTI, Tássia Mattos; BONUMÁ, Nadia Bernardi; CHAFFE, Pedro Luiz Borges. **Calibração hierárquica do modelo SWAT em uma bacia hidrográfica Catarinense.** RBRH, v. 21, p. 53-64, 2016.

CÂNDIDO, Bernardo Moreira et al. **Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, p. 1565-1575, 2014.

CERDAN, Olivier et al. **Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data.** Geomorphology, v. 122, n. 1-2, p. 167-177, 2010.

CHAVES, H. M. L. **Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do São Francisco.**In: **Relatório Final de Consultoria.** Brasília: CODEVASF – FAO, 1994.

CHEN, Tao et al. **Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: a case study in Miyun Watershed, North China.** Environmental Earth Sciences, v. 63, p. 533-541, 2011.

CHOU, Sin Chan et al. **Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models.** American Journal of Climate Change, v. 3, n. 05, p. 438, 2014a.

CHOU, Sin Chan et al. **Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios.** American Journal of Climate Change, v. 3, n. 05, p. 512, 2014b.

CHUENCHUM, Pavisorn; XU, Mengzhen; TANG, Wenzhe. **Predicted trends of soil erosion and sediment yield from future land use and climate change scenarios in the Lancang–Mekong River by using the modified RUSLE model.** International Soil and Water Conservation Research, v. 8, n. 3, p. 213-227, 2020.

CORFEE-MORLOT, Jan et al. **Cities, climate change and multilevel governance.** OECD

Environmental Working Papers. 2009.

COUTO JÚNIOR, Antonio Aparecido et al. **Land use changes associated with the expansion of sugar cane crops and their influences on soil removal in a tropical watershed in São Paulo State (Brazil)**. *Catena*, v. 172, p. 313-323, 2019.

DE FARIA GODOI, Raquel et al. **High-resolution soil erodibility map of Brazil**. *Science of The Total Environment*, v. 781, p. 146673, 2021.

DE MAGALHÃES BETHONICO, Maria Bárbara; DA CUNHA, Sandra Batista. **Gestão sustentável de unidades de conservação: o caso da APA estadual do Rio Pandeiros, Minas Gerais**. *GEOgraphia*, v. 11, n. 22, p. 104-127, 2009.

DE OLIVEIRA JUNIOR, R. C. **Índice de erosividade das chuvas na Região de Conceição do Araguaia, Pará**. EMBRAPA-CPATU, 1996.

DE OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches et al. **Erosion risk mapping applied to environmental zoning**. *Water Resources Management*, v. 25, p. 1021-1036, 2011.

DE SOUSA BARROS, Enicléia Nunes et al. **Modelagem da erosão hídrica nas bacias hidrográficas dos rios Lontra e Manoel Alves Pequeno, Tocantins**. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 13, n. 1, p. 5509, 2018.

DECHEN, Sonia Carmela Falci et al. **Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo**. *Bragantia*, v. 74, p. 224-233, 2015.

DENARDIN, Jose Eloir; FREIRE, Octavio. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1990.

DIAS, Erika Rodrigues; SILVA, Richarde Marques. **Estimativa do risco à erosão do solo no município de Lucena-Paraíba**. *Caminhos de Geografia*, v. 16, p. 192-204, 2015.

DICKINSON, A. et al. **Predicting erosion and sediment yield at the catchment scale**. CAB INTERNATIONAL, 1998.

DIDONÉ, Elizeu Jonas; MINELLA, Jean Paolo Gomes; MERTEN, Gustavo Henrique. **Quantifying soil erosion and sediment yield in a catchment in southern Brazil and implications for land conservation**. *Journal of Soils and Sediments*, v. 15, p. 2334-2346, 2015.

DIDONÉ, Elizeu Jonas; MINELLA, Jean Paolo Gomes; EVRARD, Olivier. **Measuring and modelling soil erosion and sediment yields in a large cultivated catchment under no-till of Southern Brazil**. *Soil and Tillage Research*, v. 174, p. 24-33, 2017.

DOS SANTOS, W. P. **Projections of climate and land use changes on water erosion in the Tocantins-Araguaia basin**. 2022. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2022.

DOS SANTOS, Wharley Pereira et al. **Projections of rainfall erosivity in climate change scenarios for the largest watershed within Brazilian territory**. *Catena*, v. 213, p. 106225,

2022.

DULEY, F. L. et al. **Surface factors affecting the rate of intake of water by soils.** Proceedings. Soil Science Society of America, v. 4, p. 60-64, 1940.

EDUARDO, Eliete Nazaré et al. **Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em argissolo vermelho-amarelo, sob condições de chuva natural.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, p. 796-803, 2013.

EFTHIMIOU, N. et al. **Assessment of soil susceptibility to erosion using the EPM and RUSLE Models: The case of Venetikos River Catchment.** Global NEST Journal, v. 18, n. 1, p. 164-179, 2016.

EFTHIMIOU, N.; LYKOUDI, E.; KARAVITIS, C. **Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models.** Hydrological Sciences Journal, v. 62, n. 16, p. 2674-2694, 2017.

ELLISON, W. D. **Soil erosion studies.** Agricultural Engineering, St. Joseph, 1947.

ESRI. ArcGIS Desktop Advanced One Year Timeout for Student Use License. 2023. Environmental Systems Research Institute, Inc. Disponível em: <https://www.esri.com>. Acesso em: 20 out. 2023.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, 2023. **ArcGIS Desktop Advanced One Year Timeout for Student Use License.**

FANG, G. et al. **Integrated study on soil erosion using RUSLE and GIS in Yangtze River Basin of Jiangsu Province (China).** Arabian Journal of Geosciences, v.12, n.5, 2019.

FARINASSO, Miguel et al. **Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI/MA.** Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 7, n. 2, p. 73-85, 2006.

FERREIRA, Rogério Resende Martins; TAVARES FILHO, João; FERREIRA, Vinicius Martins. **Efeitos de sistemas de manejo de pastagens nas propriedades físicas do solo.** Semina: Ciências Agrárias, v. 31, n. 4, p. 913-932, 2010.

FERREIRA, Vera; PANAGOPOULOS, Thomas. **Seasonality of soil erosion under Mediterranean conditions at the Alqueva dam watershed.** Environmental Management, v. 54, p. 67-83, 2014.

FONSECA, Diego de Sousa Ribeiro et al. **Diagnóstico do uso do solo e degradação ambiental na bacia hidrográfica do Pandeiros-MG como subsídio para estudos de impacto ambiental.** Revista Georaguaiá, v. 1, n. 1, p. 1-20, 2011.

FUJACO, Maria Augusta Gonçalves; LEITE, Mariangela Garcia Praça; NEVES, Antônio Henrique Caldeira Jorge. **A gis-based tool for estimating soil loss in agricultural riverbasins.** REM-International Engineering Journal, v. 69, p. 417-424, 2016.

GANASRI, B. P.; RAMESH, Honnasiddaiah. **Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin**. *GeoscienceFrontiers*, v. 7, n. 6, p. 953-961, 2016.

GARBRECHT, J. D. et al. **Impact of weather and climate scenarios on conservation assessment outcomes**. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 69, n. 5, p. 374-392, 2014.

GAVRILOVIC, S. **A method for estimating the average annual quantity of sediments according to the potency of erosion**. *Bulletin of the Faculty of Forestry*, v. 26, n. 1, p. 151-168, 1962.

GIANG, Pham Quy; GIANG, Le Thi; TOSHIKI, Kosuke. **Spatial and temporal responses of soil erosion to climate change impacts in a transnational watershed in Southeast Asia**. *Climate*, v. 5, n. 1, p. 22, 2017.

GRAVES, A. R. et al. **The total costs of soil degradation in England and Wales**. *Ecological Economics*, v. 119, p. 399-413, 2015.

GUERRA, Antonio Teixeira; DA SILVA, Antonio Soares; BOTELHO, Rosangela Garrido Machado. **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Bertrand Brasil, 2009.

GUPTA, Surya; KUMAR, Suresh. **Simulating climate change impact on soil erosion using RUSLE model - A case study in a watershed of mid-Himalayan landscape**. *Journal of Earth System Science*, v. 126, p. 1-20, 2017.

HAGHIZADEH, Ali; SHUI, L. T.; GODARZI, E. **Forecasting sediment with erosion potential method with emphasis on land use changes at basin**. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, v. 14, n. 1, p. 1-12, 2009.

HATFIELD, Jerry L. et al. **Indicators of climate change in agricultural systems**. *Climatic Change*, v. 163, p. 1719-1732, 2020.

HERNANI, Luís Carlos et al. **A erosão e seu impacto**. In: MANZATTO, Celso Vainer; FREITAS JUNIOR, Elias de; PERES, José Roberto Rodrigo. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002.

HICKMANN, Clério et al. **Erosividade das chuvas em Uruguaiana, RS, determinada pelo índice EI30, com base no período de 1963 a 1991**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 825-831, 2008.

HUDSON, N. W. **Soil conservation**. Ithaca, Cornell University Press, 1977.

IGWE, P. U. et al. **Soil erosion: A review of models and applications**. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, v. 4, n. 12, p. 237-341, 2017.

IMAMOGLU, Ali; DENGIZ, Orhan. **Determination of soil erosion risk using RUSLE model and soil organic carbon loss in Alaca catchment (Central Black Sea region, Turkey)**. *Rendiconti Lincei*, v. 28, p. 11-23, 2017.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil (1991-2020)**. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais#> (INMET, 2024).

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – **Manual Técnico de Uso da Terra** (IBGE, 2013).

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – **Mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil 2010** (2018).

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) – **Descrição de classe de vegetação conforme o arquivo de simbologia dos vetores disponibilizado por IBGE** (2023).

IPCC, Resumo para Decisores. In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribuição do Grupo de Trabalho I para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. Stocker, T. F. et al. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, EUA.

IPCC, Shukla PR et al. Summary for policymakers. **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable landmanagement, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Forthcoming, 2019.

JARDIM, Carlos Henrique; MOURA, Felipe Pereira. **Variações dos totais de chuvas e temperatura do ar na bacia do rio Pandeiros, norte do estado de Minas Gerais- Brasil: articulação com fatores de diferentes níveis escalares em área de transição climática de cerrado para semiárido**. Revista Brasileira de Climatologia, 2018.

JMP Statistical Discovery LLC 2022-2023. JMP® 17 Documentation Library. Cary, NC: JMP Statistical Discovery LLC.

JUNQUEIRA, R. et al. **Hydrological Response to Drought Occurrences in a Brazilian Savanna Basin**. Resources, v. 9, 2020.

JUNQUEIRA, R. et al. **Hydrological modeling using remote sensing precipitation data in a Brazilian savanna basin**. Journal of South American Earth Sciences, v. 115, 2022a.

JUNQUEIRA, Rubens et al. **Hydrological Retrospective and Historical Drought Analysis in a Brazilian Savanna Basin**. Water, v. 14, n. 14, p. 2178, 2022b.

KARABURUN, Ahmet et al. **Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed**. Ozean Journal of applied sciences, v. 3, n. 1, p. 77-85, 2010.

KAYET, Narayan et al. **Evaluation of soil loss estimation using the RUSLE model and SCS-CN method in hillslope mining areas**. International Soil and Water Conservation Research, v. 6, n. 1, p. 31-42, 2018.

KINNELL, Peter I. A. **Alternative approaches for determining the USLE-M slope length factor for grid cells**. Soil Science Society of America Journal, v. 69, n. 3, p. 674-680, 2005.

KOULOURI, M.; GIOURGA, Chr. **Land abandonment and slope gradient as key factors of soil erosion in Mediterranean terraced lands**. Catena, v. 69, n. 3, p. 274- 281, 2007.

LAFLEN, John M.; MOLDENHAUER, W. C. **Pioneering soil erosion prediction: theUSLE story**. World Association of Soil and Water Conservation, 2003.

LAURENCELLE, J.; LOGAN, T.; GENS, R. A. S. F. **Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products**. ASF-Alaska Satellite Facility, v. 1, p. 12, 2015. Disponível em <<https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/terrain-corrected-rtc/>>.

LIN, Chen; MA, Ronghua; HE, Bin. **Identifying watershed regions sensitive to soil erosion and contributing to lake eutrophication - a case study in the Taihu Lake Basin (China)**. International Journal of Environmental Research and Public Health, v. 13, n. 1, p. 77, 2016.

LI, X.; WEI, X. **Risk and surplus floodwater during flood season**. Journal of Hydrologic Engineering, v. 19, n. 7, p. 1294-1311, 2014.

LIMA, A. C. P. **Análise da distribuição espacial de voçorocas em domínio de rochas siliciclásticas: Bacia do Rio Pandeiros-MG**. 2019. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Conservação do solo**. Piracicaba, SP: Editora Livroceres, 1985.

LOPES, Fernando Bezerra et al. **Uso de geoprocessamento na estimativa da perda de solo em microbacia hidrográfica do semiárido brasileiro**. Revista Agro @mbiente on-line, v. 5, n. 2, p. 88-96, 2011.

LORANDI, Reinaldo et al. **Carta de potencial à erosão laminar da parte superior dabacia do Córrego do Monjolinho (São Carlos, SP)**. Revista Brasileira de Cartografia, v. 53, p. 111-117, 2001.

LOVRIĆ, Novica; TOŠIĆ, Radislav. **Assessment of soil erosion and sediment yield using erosion potential method: case study-Vrbas River basin (B&H)**. Glasnik Srpskog geografskog drustva, v. 98, n. 1, p. 1-14, 2018.

LU, Dengsheng et al. **Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS**. Land degradation & development, v. 15, n. 5, p. 499-512, 2004.

LYRA, Andre et al. **Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution**. Theoretical and applied climatology, v. 132, p. 663-682, 2017.

MAEDA, Eduardo Eiji et al. **Potential impacts of agricultural expansion and climatechange on soil erosion in the Eastern Arc Mountains of Kenya**. Geomorphology, v. 123, n. 3-4, p. 279-289, 2010.

MARCUZZO, F. F. N.; et al. **Detalhamento Hidromorfológico da Bacia do Rio Mundaú**. In XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió. 2011.

MARENGO, J. A. **O futuro clima do Brasil**. Rev USP, v. 103, p. 25-32, 2014.

MARKOSE, Vipin Joseph; JAYAPPA, K. S. **Soil loss estimation and prioritization of sub-watersheds of Kali River basin, Karnataka, India, using RUSLE and GIS**. Environmental monitoring and assessment, v. 188, p. 1-16, 2016.

MATA, Clarisse Lacerda et al. **Avaliação Multitemporal da Susceptibilidade Erosiva na Bacia do Rio Urucuia (Mg) Por Meio da Equação Universal de Perda de Solos**. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 8, n. 2, 2007.

MEDEIROS, Grasiela de Oliveira Rodrigues et al. **Estimates of annual soil loss rates in the state of São Paulo, Brazil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 40, 2016.

MELLO, Carlos Rogério de et al. **Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 42, p. 537-545, 2007.

MELLO, Carlos Rogério de et al. **Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil**. Geoderma, v. 202, p. 88-102, 2013.

MELLO, Carlos Rogério et al. **Assessing the climate change impacts on the rainfall erosivity throughout the twenty-first century in the Grande River Basin (GRB) headwaters, Southeastern Brazil**. Environmental Earth Sciences, v. 73, p. 8683-8698, 2015.

MERRITT, Wendy S.; LETCHER, Rebecca A.; JAKEMAN, Anthony J. **A review of erosion and sediment transport models**. Environmental modelling & software, v. 18, n. 8-9, p. 761-799, 2003.

MERTEN, Gustavo H.; MINELLA, Jean P. G. **The expansion of Brazilian agriculture: Soil erosion scenarios**. International Soil and Water Conservation Research, v. 1, n. 3, p.37-48, 2013.

MINGOTI, R. **Produção de sedimentos em microbacias hidrográficas em função do relevo e da cobertura florestal**. 2009. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

MINELLA, Jean Paolo Gomes et al. **Processos e modelagem da erosão: da parcela à bacia hidrográfica**. Manejo e conservação do solo e da água no contexto das mudanças ambientais. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 105-135, 2010.

Ministério do Meio Ambiente (Brasil). **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Global do Clima**. MCTI, Brasília, 2016.

MIQUELONI, Daniela Popim; BUENO, Célia Regina Paes; FERRAUDO, Antonio Sergio. **Análise espacial dos fatores da equação universal de perda de solo em área de nascentes**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 47, p. 1358-1367, 2012.

MODESTE, Meliho et al. **Impact of land use and vegetation cover on risks of erosion in the Ourika watershed (Morocco)**. American Journal of Engineering Research, v. 5, p. 75–82, 2016.

MONDAL, Arun et al. **Impact of climate change on future soil erosion in different slope, land use, and soil-type conditions in a part of the Narmada River Basin, India**. Journal of Hydrologic Engineering, v. 20, n. 6, p. C5014003, 2015.

MONDAL, Arun; KHARE, Deepak; KUNDU, Sananda. **A comparative study of soil erosion modelling by MMF, USLE and RUSLE**. Geocarto International, v. 33, n. 1, p. 89-103, 2018.

MOORE, Ian Donald; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. **Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications**. Hydrological processes, v. 5, n. 1, p. 3-30, 1991.

MOTA E SILVA, Jaíza Ribeiro et al. **Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG)**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. 1, p. 1-14, 2021.

NAPOLI, M. et al. **Simulation of field-measured soil loss in Mediterranean hilly areas (Chianti, Italy) with RUSLE**. Catena, v. 145, p. 246-256, 2016.

NASCIMENTO, A. T. P.; PEREIRA, B. S.; MEDEIROS, P. H. A. **Revisão dos valores do fator de cobertura vegetal da USLE para condições brasileiras**. Anais [...] XI ENES – Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2014.

NEARING, M. A.; PRUSKI, F. F.; O'NEAL, M. R. **Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review**. Journal of soil and water conservation, v. 59, n. 1, p. 43-50, 2004.

NEEDELMAN, B. A. **What Are Soils?** Nature Education Knowledge, v. 4, n. 3, 2013.

NEVES, Walter Viana. **Avaliação da vazão em bacias hidrográficas com veredas, em diferentes estádios de conservação, na APA do Rio Pandeiros – MG**. Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

NISAR AHAMED, T. R.; GOPAL RAO, K.; MURTHY, J. S. R. **Fuzzy class membership approach to soil erosion modelling**. Agricultural systems, v. 63, n. 2, p. 97-110, 2000.

NUNES, Yule Roberta Ferreira et al. **Pandeiros: o pantanal mineiro**. MG Biota, v. 2, n. 2, p. 4-17, 2009.

OLIVEIRA, A. M. M. et al. **Caracterização de indicadores da erosão do solo em bacias hidrográficas com o suporte de geotecnologias e modelo preditivo**. Estudos Geográficos, Rio Claro, n. 5, v. 1, p. 63-38, 2007.

OLIVEIRA, J. S. **Avaliação de modelos de elevação na estimativa de perda de solo em ambiente SIG**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências, Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.

OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches; WENDLAND, Edson; NEARING, Mark A. **Rainfall erosivity in Brazil: A review**. Catena, v. 100, p. 139-147, 2013.

OLIVEIRA, Fábio Magalhães. **Relações solo-vegetação em áreas desenvolvidas sobre o**

Arenito Urucuia na APA do rio Pandeiros. 2013. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

OLIVEIRA, Joanito de Andrade. **Extensão SIG para cálculo automático das perdas de solos a partir da EUPS.** 2014. Tese (Doutorado em Geologia) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

OLIVEIRA, Vinícius Augusto de et al. **Soil erosion vulnerability in the Verde river basin, southern Minas Gerais.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 38, p. 262-269, 2014.

OLIVEIRA, Francienne Gois; SERAPHIM, Odivaldo José; BORJA, Manuel Esteban Lucas. **Estimativa de perdas de solo e do potencial natural de erosão da bacia de contribuição da Microcentral Hidrelétrica do Lageado, Botucatu-SP.** *Energia na Agricultura*, v. 30, n. 3, p. 302-309, 2015.

OLIVEIRA, Joanito De Andrade et al. **A GIS-based procedure for automatically calculating soil loss from the universal soil loss equation: Gius-m.** *Applied Engineering in Agriculture*, v. 31, n. 6, p. 907, 2015.

OLIVETTI, Diogo et al. **Spatial and temporal modeling of water erosion in dystrophic red latosol (oxisol) used for farming and cattle raising activities in a sub-basin in the South of Minas Gerais.** *Ciência e Agrotecnologia*, v. 39, p. 58-67, 2015.

OZCAN, A. Ugur et al. **Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass—Cankırı, Turkey.** *Environmental Geology*, v. 53, p. 1731-1741, 2008.

PAL, Subodh Chandra; CHAKRABORTTY, Rabin. **Simulating the impact of climate change on soil erosion in sub-tropical monsoon dominated watershed based on RUSLE, SCS runoff and MIROC5 climatic model.** *Advances in Space Research*, v. 64, n. 2, p. 352-377, 2019.

PAL, Subodh Chandra et al. **Changing climate and land use of 21st century influence soil erosion in India.** *Gondwana Research*, v. 94, p. 164-185, 2021.

PANAGOS, Panos et al. **Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale.** *Land use policy*, v. 48, p. 38-50, 2015.

PANAGOS, Panos et al. **Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets.** *Journal of Hydrology*, v. 548, p. 251-262, 2017.

PANAGOS, Panos et al. **Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models.** *Land Degrad. Dev.*, 29, p. 471-484, 2018.

PANDEY, Ashish et al. **Physically based soil erosion and sediment yield models revisited.** *Catena*, v. 147, p. 595-620, 2016.

PASSOS, Jaqueline Sobral de Araújo et al. **Estimativas de perdas de solo na bacia do alto São Francisco utilizando precipitação estimada por satélite.** XI Encontro Nacional de

Engenharia de Sedimentos, 2014.

PEREIRA, Paulo et al. **Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management**. Current Opinion in Environmental Science & Health, v. 5, p. 7-13, 2018.

PHAM, T.; DEGENER, J.; KAPPAS, M. "**Integrated universal soil loss equation USLE and Geographical Information System SIG for soil erosion estimation in a SAP basin: Central Vietnam**". International Soil and Water Conservation Research, v. 6, p. 99-110, 2018.

PRASANNAKUMAR, V. et al. "**Estimation of soil erosion risk within a small mountainous sub-watershed in Kerala, India, using Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and geo-information technology**". Geoscience Frontiers, v. 3, p.209- 2015, 2012.

PRUSKI, F.; NEARING, M. **Climate-Induced Changes in Erosion during the 21st Century for Eight US Locations**. Water Resources Research, v. 38, 2002.

QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Versão 3.28. 2022. Disponível em: <http://qgis.org>. Acesso em: 25 jul. 2023.

RAMOS-SCHARRÓN, Carlos E.; FIGUEROA-SÁNCHEZ, Yasiel. **Plot-, farm-, and watershed-scale effects of coffee cultivation in runoff and sediment production in western Puerto Rico**. Journal of Environmental Management, v. 202, p. 126-136, 2017.

RENARD, K. G. et al. **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Agriculture Handbook. Washington, v. 703, p. 384, 1997.

RENSCHLER, Chris S.; HARBOR, Jon. **Soil erosion assessment tools from point to regional scales—the role of geomorphologists in land management research and implementation**. Geomorphology, v. 47, n. 2-4, p. 189-209, 2002.

RICKSON, R. J. **Management of sediment production and prevention in river catchments: a matter of scale?** In: Soil erosion and sediment redistribution in river catchments: measurement, modelling and management. Wallingford UK: CABI, 2006. p. 228-238, 2006.

RIGHETTO, Antonio Marozzi. **Hidrologia e recursos hídricos**. 2. ed. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2013.

RIQUETTI, N. B. et al. **Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives**. Science of the Total Environment, v. 724, p. 138-315, 2020.

RIQUETTI, N. B. et al. **Climate change projections of soil erosion in South America in the XXI century**. Geoderma Regional, 2023.

RODRIGUES, P. M. S. et al. **Riqueza florística da vegetação ciliar do rio Pandeiros, norte de Minas Gerais**. MG.BIOTA, Belo Horizonte, v. 2, n. 2, p. 18-35, 2009.

RODRIGUES, J. A. M. et al. **Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Cervo – MG**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 36, n. 3, p. 531-542, 2017.

RUHOFF, A. L.; SOUZA, B. S. P.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R. S. **Avaliação dos processos erosivos através da Equação Universal de Perda de Solos, inovador com algoritmos em LEGAL**. *Geomática*, p. 1–9, 2006.

SANTOS, G. G.; GRIEBELER N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. **Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica**. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 2, p. 115–123, 2010.

SARTORI, Martina et al. **A linkage between the biophysical and the economic: Assessing the global market impacts of soil erosion**. *Land use policy*, v. 86, p. 299-312, 2019.

SEGURA, C. et al. **Potential impacts of climate change on soil erosion vulnerability across the conterminous United States**. *Journal of Soil and Water Conservation*, Ankeny, v. 69, n. 2, p. 171-181, 2014.

SHAHABI, H. et al. **Soil erosion hazard mapping in central Zab Basin using EPM model in GIS environment**. *International Journal of Geography and Geology*, Karachi, v. 5, n. 11, p. 224-235, 2016.

SHEN, H. et. al. **Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope**. *Soil & Tillage Research*, p. 429-436, 2016.

SILVA, A. M. **Rainfall erosivity map for Brazil**. *Catena*, v. 57, p. 251- 259, 2004.

SILVA, C. G. **Caracterização física e ambiental da bacia hidrográfica do rio Pandeiros-MG em eventos de El Niño-Oscilação Sul**. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2018.

SILVA, C. R.; CHAVES, H. M. L.; CAMELO, A. P. **Calibração e validação da equação universal de perda de solos modificada (MUSLE) utilizando dados hidrossedimentológicos locais**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1431- 1439, 2011.

SILVA, F. D. G. et al. **Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim–SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D**. *Eng Sanit Ambient*, v. 15, n. 2, p. 141-148, 2010.

SILVA, M. L. N. et al. **Índices de erosividade das chuvas da região de Goiânia, GO**. *Pesq. Agropec. Bras.*, v. 32, p. 977-985, 1997.

SILVA, M. A. et al. **Water erosion risk prediction in eucalyptus plantations**. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 38, n. 2, p. 160–172, 2014.

SILVA, R. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, C. A. G. **Integration of GIS and remote sensing for estimation of soil loss and prioritization of critical sub- catchments: a case study of Tapacurá catchment**. *Natural Hazards*, v. 62, n. 3, p. 953-970, 2012.

SILVA, Marx Vinicius Maciel da et al. **Impacto dos cenários de mudanças climáticas e demandas consuntivas no desempenho dos reservatórios do rio São Francisco, Brasil**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

2021.

SILVA, V. D. **Análise de perda de solo, utilizando o modelo (RUSLE) Revised Universal Soil Loss Equation, aplicado com auxílio das técnicas de geoprocessamento na bacia do Ribeirão Reis, Maringá-PR.** 2008. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

SOUSA, T. T. C.; ARAÚJO, R. C.; VITAL, A. F. M. **Análise do Tema Solos nos Livros Didáticos: um estudo de caso.** Revista de Educação Ambiental GEA. v. 6, n. 1, p. 20- 42, 2016.

STEFANIDIS, S.; STATHIS, D. **Effect of climate change on soil erosion in a Mountainous Mediterranean Catchment (Central Pindus, Greece).** Water, Basel, v. 10, n. 10, 2018.

STEIN, D. P. et al. **Potencial de erosão laminar natural e antrópica na bacia do Peixe-Parapanema.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, 4, Marília, 1987. Anais, Marília, p. 105-135, 1987.

TANG, Q. et al. **Assessment of soil erosion using RUSLE and GIS: a case study of the Yangou watershed in the Loess Plateau.** China. Environmental Earth Sciences, v. 73, n. 4, p. 1715-1724, 2015.

TEH, S. H. **Soil erosion modeling using RUSLE and GIS on Cameron Highlands, Malasyahor hydropower development.** Dissertation of Master Degree. School of Renewable Energy Science, 2011.

TEIXEIRA, M. B.; DE CAMARGO, P. L. T.; JUNIOR, P. P. M. **Avaliação da perda universal de solos para o Município de São Francisco – Minas Gerais.** Rev. Geogr. Acadêmica v. 11, n. 2, p. 67-78, 2017.

TENG, H.; et al. **Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models.** Science of the Total Environment v. 635, p. 673–686, 2018.

TERRANOVA, O. et al. **Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (southern Italy).** Geomorphology, v. 112, p. 228– 245, 2009.

TRINDADE, A. L. F. et al. **Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil.** Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 51, n. 12, p. 1918-1928, 2016.

UDDIN, K. et al. **Estimation of Soil Erosion Dynamics in the Koshi Basin Using GIS and Remote Sensing to Assess Priority Areas for Conservation.** Journal Plos One, San Francisco, v. 11, n. 3, p. 1-19, 2016.

VAN REMORTEL, R. D.; MAICHLE, R. W.; HICKEY, R. J.; **Computing the LS factor for the revised universal soil loss equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable.** Computers & Geosciences, v. 30, p. 1043–1053, 2004.

VANMAERCKE, M. et al. **Sediment Yield in Europe: spatial patterns and scale**

dependency. *Geomorphology*, v. 130, p. 142-161, 2011.

VATANDASLAR, C.; YAVUZ, M. **Modeling cover management factor of RUSLE using very high-resolution satellite imagery in a semiarid watershed.** *Environmental Earth Sciences*, v. 76, n. 65, 2017.

VEMU, S.; PINNAMANENI, U. B. **Estimation of spatial patterns of soil erosion using remote sensing and GIS: a case study of Indravaticachment.** *Natural Hazards*, v. 59, n.3, p. 1299-1315, 2011.

WANG, Y. et al. **Remote Sensing of Mangrove Change Along the Tanzania Coast.** *Marine Geodesy*, v. 26, n. 1-2, p. 35-48, 2013.

WANG, X. et al. **Assessment of soil erosion change and its relationships with land use/cover change in China from the end of the 1980s to 2010.** *Catena*, v. 137, p. 256- 268, 2016.

WEILL, M. A. M.; SPAROVEK, G. **Estudo da erosão na Microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP). I- Estimativa das taxas de perda de solo e estudo de sensibilidade dos fatores do modelo EUPS.** *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 32, p. 801-814, 2008.

WISCHMEIER, Walter H.; SMITH, Dwight David. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.

XIAOYING, L. et al. **Predictive modeling in sediment transportation across multiplespatial scales in the Jialing River Basin of China.** *International Journal of Sediment Research*, v. 30, n. 3, 2015.

XU, L.; XU, X.; MENG, X. **Risk assessment of soil erosion in different rainfall scenarios by RUSLE model coupled with information diffusion model: a case study of Bohai Rim, China.** *Catena*, v. 100, p. 74–82, 2013.

YUSOF, K. W.; BABAN, S. M. **A Preliminary Attempt to Develop An Erosion Risk Map for Langkawi Island, Malaysia Using the USLE, Remote Sensing and Geographic Information System.** 1999.

YOUNG, R. A. et al. **AGNPS, Agricultural non-point source pollution model: A watershed analysis tool.** U.S. Dept. of Commerce, National Technical Information Service, Springfield, Va. 1987.

ZHANG, H. et al. **Extension of a GIS procedure for calculating the RUSLE equationLS factor.** *Computers and Geosciences*. p. 177 – 188, 2013.

ZINGG, A. W. **Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff.** *Agricultural Engineering*, p. 59-64, 1940.