

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS E ESTUDOS AMBIENTAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL

LUCAS OLEGÁRIO BUENO

**Simulação de cenários de variabilidade climática para estimativa da produção de
sedimentos em bacia hidrográfica do estado de São Paulo, Brasil**

São Carlos

2022

LUCAS OLEGÁRIO BUENO

Simulação de cenários de variabilidade climática para estimativa da produção de sedimentos em bacia hidrográfica do estado de São Paulo, Brasil

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências da Engenharia Ambiental da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, como requisito para obtenção do título de mestre em Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Fábio Mauad

São Carlos

2022

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

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

B898s Bueno, Lucas Olegário
 Simulação de cenários de variabilidade
 climática para estimativa da produção de sedimentos em
 bacia hidrográfica do estado de São Paulo, Brasil /
 Lucas Olegário Bueno; orientadora Frederico Fábio
 Mauad. São Carlos, 2022.

 Dissertação (Mestrado) - Programa de
 Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da
 Engenharia Ambiental -- Escola de Engenharia de São
 Carlos da Universidade de São Paulo, 2022.

 1. Erosão hídrica. 2. Método Gavrilovic. 3.
 Mudança climática. 4. Perda de solo. 5. Erosividade. I.
 Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUCAS OLEGÁRIO BUENO**

Título da dissertação: "Simulação de cenários de variabilidade climática para estimativa da produção de sedimentos em bacia hidrográfica do estado de São Paulo, Brasil".

Data da defesa: 21/02/2022

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Frederico Fábio Mauad** (Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Junior Cesar Avanzi**
(Universidade Federal de Lavras - UFLA)

Aprovado

Prof.^a Dr.^a **Luciana Peixoto Amaral**
(Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG)

Aprovado

Coordenado do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Titular **Marcelo Zaiat**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Aos meus pais, Cida e Donizete.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e saúde durante esse período difícil e atípico da pandemia da COVID-19 e ao universo por me permitir viver essa experiência tão desejada.

Pela educação pública, gratuita e de qualidade que recebi durante minha formação básica e profissionalizante e, principalmente, pelo privilégio de poder fazer ciência durante este período onde a pesquisa brasileira tem sido tão desacreditada.

Toda minha família pelo apoio e em especial aos meus pais, Cida e Donizete, por sempre me apoiarem em todas as minhas decisões.

Ao Prof.º Dr.º Frederico Fábio Mauad, por ter acreditado em minha capacidade e por ter me dado todo suporte necessário durante esse período.

Aos colegas do Núcleo de Hidrometria: Talyson, Cássia e Camila pelo apoio e parceria durante esse período.

Aos amigos de São Carlos: Gleyson e Carol pela amizade. Em especial ao Gley, por ter me recepcionado e dividido seus dias e o Marvin comigo nesse período.

Aos amigos da vida: Débora, Yara, Carol, Elisa, Julyane, Robson e Luan que, mesmo distantes fisicamente, deixam meus dias mais leves e me lembram de que sou capaz de ir mais longe.

À Universidade de São Paulo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte para a realização deste estudo.

“Procure ser uma pessoa de valor em vez de procurar ser uma pessoa de sucesso.

O sucesso é consequência”

Albert Einstein

RESUMO

BUENO, Lucas Olegário. Simulação de cenários de variabilidade climática para estimativa da produção de sedimentos em bacia hidrográfica do estado de São Paulo, Brasil. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Sistemas de modelagem integrada têm sido comumente utilizados para identificar os possíveis efeitos da variabilidade climática na produção de sedimentos futura, auxiliando no planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas. Neste estudo, um sistema de modelagem integrado composto por modelo de erosão e climatológicos foi utilizado para avaliar os efeitos da variabilidade climática na produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, estado de São Paulo (Brasil). Para isso, utilizados dados climáticos gerados pelos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para curto, médio e longo prazo sob RCPs 4.5 e 8.5 para estimativa futura da produção de sedimentos utilizando o modelo *Erosion Potential Method* (EPM). A bacia hidrográfica do rio Itaqueri apresentou produção média anual de sedimentos equivalente à $9,41 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$, que considerando a área total da bacia equivale a $208.467 \text{ Mg} \cdot \text{ano}^{-1}$. Considerando a taxa de retenção de sedimentos, a perda real de sedimentos no cenário atual (2019) foi de $22.306 \text{ Mg} \cdot \text{ano}^{-1}$. Com relação aos efeitos da variabilidade dos elementos climáticos, em médio prazo (2070) a produção média anual de sedimentos na bacia poderá sofrer incrementos de até 61,8% (RCP 4.5) e 30,5% (RCP 8.5). Neste mesmo período, a perda real de sedimentos poderá chegar à $36.076 \text{ Mg} \cdot \text{ano}^{-1}$ e contribuir para o assoreamento e redução da vida útil do reservatório do Lobo. O modelo EPM se mostrou eficaz para identificar as áreas com maior produção de sedimentos e, de forma integrada aos modelos climáticos, pode auxiliar de forma preliminar e preventiva na identificação dos efeitos da variabilidade climática desde que as incertezas relacionadas a adoção de elementos climáticos sejam incluídas regularmente como parte do risco na gestão de recursos hídricos.

Palavras-chave: erosão hídrica; método Gavrilovic; mudança climática; perda de solo

ABSTRACT

BUENO, Lucas Olegário. Simulation of climate variability scenarios to estimate sediment production in a hydrographic basin in the state of São Paulo, Brazil. 2022. Master Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, 2022.

Integrated modeling systems are used to identify the effects of climate variability on future sediment production, assisting in watershed management. In this study, an integrated modeling system composed of erosion and climatological models was used to evaluate the effects of climate variability on sediment production in the Itaqueri river basin, state of São Paulo (Brazil). For this, we used climate data generated by the ETA-MIROC5 and ETA-HadGEM2-ES models for short, medium and long term under RCPs 4.5 and 8.5 for future estimation of sediment production using the Erosion Potential Method (EPM) model. The Itaqueri river basin presented an average annual production of sediments equivalent to $9.41 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{year}^{-1}$, which considering the total area of the basin is equivalent to $208,467 \text{ Mg}\cdot\text{year}^{-1}$. Considering the sediment retention rate, the actual sediment loss in the current scenario (2019) was $22,306 \text{ Mg}\cdot\text{year}^{-1}$. Regarding the effects of the variability of climatic elements, in the medium term (2070) the average annual production of sediments in the basin may increase by up to 61.8% (RCP 4.5) and 30.5% (RCP 8.5). In this same period, the actual loss of sediments could reach $36,076 \text{ Mg}\cdot\text{year}^{-1}$ and contribute to the silting and reduction of the useful life of the Lobo reservoir. The EPM model proved to be effective in identifying areas with the highest production of sediments and, in an integrated manner with climate models, it can help in a preliminary and preventive way in identifying the effects of climate variability. However, uncertainties related to the adoption of climate elements are regularly included as part of the risk in water resources management.

Keywords: water erosion; Gavrilovic method; climate change; soil loss

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização da área de estudo.	29
Figura 2 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Itaqueri	31
Figura 3 – Mapa de unidades pedológicas da bacia hidrográfica do rio Itaqueri.....	32
Figura 4- Mapa de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Itaqueri	32
Figura 5 - Tipos de erosão na bacia hidrográfica do rio Itaqueri no cenário atual.....	40
Figura 6 – Perda média de solo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) na bacia do rio Itaqueri no cenário atual	40
Figura 7 – Desempenho do ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 para dados de precipitação ..	43
Figura 8 - Desempenho do ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 para dados de temperatura ...	44
Figura 9 - Distribuição mensal da precipitação no período de referência (1981-2005) para os dados observados, projetados e corrigidos dos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES.	45
Figura 10 - Perda média de solo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) estimada para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 4.5 com correção de viés	49
Figura 11- Perda média de solo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) estimada para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 4.5 sem correção de viés.....	50
Figura 12 - Diferença relativa entre a perda de solo estimada para o cenário atual e os períodos 2040, 2070 e 2099 sob o RCP 4.5 com correção de viés	51
Figura 13 - Diferença relativa entre a perda de solo estimada para o cenário atual e os períodos 2040, 2070 e 2099 sob o RCP 4.5 sem correção de viés.....	52
Figura 14 - Perda média de solo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) estimada para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 8.5 com correção de viés	55
Figura 15 - Perda média de solo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$) estimada para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 8.5 sem correção de viés.....	56
Figura 16 - Diferença relativa entre a perda de solo estimada para o cenário atual e os períodos 2040, 2070 e 2099 sob o RCP 8.5 com correção de viés	57
Figura 17- Diferença relativa entre a perda de solo estimada para o cenário atual e os períodos 2040, 2070 e 2099 sob o RCP 8.5 sem correção de viés.....	58
Figura 18 - Correlação entre precipitação média anual e produção média de sedimentos simulada pelos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES.	59
Figura 19 - Correlação entre coeficiente de temperatura e produção média de sedimentos simulada pelos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Informações dos postos pluviométricos utilizados no estudo.....	31
Tabela 2 - Valores para X_a em função do uso e manejo	33
Tabela 3 – Valores para Y em função dos tipos de solos	33
Tabela 4 - Valores para ϕ em função do tipo de erosão.....	34
Tabela 5 - Classificação da erosão em função do coeficiente de erosão.....	34
Tabela 6 – Valores adotados para o coeficiente Y e seus respectivos valores obtidos para o coeficiente Z , de acordo com os tipos de solos da bacia	38
Tabela 7 – Valores adotados para o coeficiente X_a e ϕ e os respectivos valores de coeficiente Z obtidos de acordo com os usos e manejo do solo na bacia.	39
Tabela 8 – Percentual de contribuição de cada fator na produção de sedimentos na bacia	41
Tabela 9 - Tolerância de Perda de Solo (TPS) e produção de sedimentos na bacia do rio Itaqueri	42
Tabela 10 - Valores de precipitação média anual, com e sem correção de viés, e coeficiente de temperatura sob RCPs 4.5 e 8.5 adotados para estimativa da perda de solo.....	46
Tabela 11 - Estatísticas básicas da perda de solo ($Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$) e percentual de diferença da produção de sedimentos para os períodos futuros, sob RCP 4.5, em relação ao cenário de 2019	47
Tabela 12 - Percentuais das classes de produção de sedimentos e respectivas diferenças entre a produção estimada em 2019 e projetadas para períodos futuros sob RCP 4.5.....	48
Tabela 13 - Estatísticas básicas da perda de solo ($Mg.ha^{-1}.ano^{-1}$) e percentual de diferença da produção de sedimentos para os períodos futuros, sob RCP 8.5, em relação ao cenário de 2019	54
Tabela 14 - Percentuais das classes de produção de sedimentos e respectivas diferenças entre a produção estimada em 2019 e projetadas para períodos futuros sob RCP 8.5.....	54

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Equação da erosão média anual.....	31
Equação 2 – Coeficiente de temperatura.....	31
Equação 3 – Coeficiente de erosão.....	31
Equação 4 – Coeficiente de retenção de sedimentos	35
Equação 5 – Equação da perda real de solos.....	35
Equação 6 – RMSE - <i>Root Mean Square Error</i>	36
Equação 7 – MBE - <i>Mean Bias Error</i>	36
Equação 8 – Equação de fator multiplicativo.....	37
Equação 7 – Equação de enviesamento corrigido da precipitação mensal.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. MUDANÇA CLIMÁTICA E SEUS EFEITOS NA EROÇÃO DO SOLO	18
2.2. MODELAGEM CLIMÁTICA	20
2.3. MODELAGEM DA EROÇÃO DE SOLO.....	22
2.3.1. Método EPM	24
3. OBJETIVOS.....	27
3.1. OBJETIVO GERAL.....	27
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
4. ÁREA DE ESTUDO.....	28
5. MATERIAL E MÉTODOS	30
5.1. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	30
5.2. TOLERÂNCIA À PERDA DE SOLO.....	35
5.3. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA PARA ESTIMATIVA FUTURA DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	35
5.3.1. Obtenção dos dados climáticos	35
5.3.2. Avaliação de desempenho dos modelos climáticos	35
5.3.3. Correção de tendências dos dados de precipitação	36
5.3.4. Integração dos dados climáticos futuro ao modelo de erosão	36
5.4. COMPARAÇÃO DA PERDA MÉDIA DE SOLO ENTRE CENÁRIOS E ANÁLISE DA CORRELAÇÃO COM OS FATORES CLIMÁTICOS.....	37
6. RESULTADOS.....	38
6.1. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NO CENÁRIO ATUAL	38
6.2. EFEITOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	42
6.2.1. Avaliação de desempenho e correção de viés	42
6.2.2. Estimativas da perda de solo sob RCP 4.5	46
6.2.3. Estimativas da perda de solo sob RCP 8.5.....	53
6.2.4. Comparação multicenários e análise de correlação.....	59

7. DISCUSSÃO.....	60
7.1. INTENSIDADE EROSIVA E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	60
7.2. EFEITOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS 63	
7.3. AVALIAÇÃO DO <i>EROSION POTENTIAL METHOD</i>	66
8. CONCLUSÃO	68
RECOMENDAÇÕES	69
REFERÊNCIAS	70
APÊNDICES	83

1. INTRODUÇÃO

As variações climáticas produzem efeitos na degradação do solo em decorrência das mudanças na frequência e intensidade das chuvas, teor de umidade do solo, o aumento do escoamento e produção de sedimentos (MULLAN et al., 2012; KHARE et al., 2017; RIQUETTI et al., 2020). Com isso, a degradação do solo tem se tornado uma das questões ambientais mais importantes em todo o mundo (MONDAL et al., 2015) devidos a perda de nutrientes, a redução do armazenamento de carbono, o declínio da biodiversidade, o assoreamento dos corpos d'água, a mudança na qualidade da água, a perda de produtividade em terras agrícolas e o comprometimento dos serviços ecossistêmicos (LI; FANG, 2016).

As alterações climáticas ocorrem tanto em termos de temperatura do ar quanto nos padrões de precipitação, mas em relação aos impactos na erosão do solo as alterações na quantidade, frequência, volume e a intensidade da precipitação são os fatores mais preocupantes por estarem diretamente ligadas à erosão hídrica (STEFANIDIS; STATHIS, 2018). A erosão hídrica é uma das principais causas da degradação do solo, onde as partículas desprendidas pelo impacto das gotas são transportadas para o ambiente aquático de acordo com a carga de sedimentos, volume e velocidade de escoamento (CARVALHO, 2008). De acordo com Lima et al. (2015), esse problema pode ser agravado pelo uso intensivo do solo, principalmente em áreas onde as práticas de manejo conservacionista são negligenciadas. Assim, estimar a produção e transporte de sedimentos, bem como identificar áreas com maior susceptibilidade à erosão pode auxiliar os tomadores de decisão na gestão de bacias hidrográficas e contribuir para a conservação do solo (CHEN et al., 2020).

A modelagem de erosão do solo é muito utilizada por descrever matematicamente a desagregação, transporte e deposição de partículas de solo (DE VENTE et al., 2013). Além disso, pode ser usada para prever o efeito de mudanças ambientais naturais ou induzidas pelo homem (KHARE, 2017). Os modelos de previsão de erosão auxiliam na adoção de medidas de mitigação e conservação do solo e da água (SANTOS et al., 2017). O método EPM, ou método de Gavrilovic, é um modelo empírico semi-quantitativo baseado em procedimentos descritivos e quantitativos, para qualificar a severidade da erosão laminar e estimar a produção anual total de sedimentos de uma área de captação (DE VENTE; POESEN, 2005; SOLAIMANI et al., 2009).

O método considera diversos fatores geométricos, topográficos, hidrológicos, meteorológicos e a intensidade erosiva (EFTHIMIOU et al., 2017) e ainda revela a intensidade dos processos erosivos atuantes na bacia (LENSE et al., 2019). O EPM tem sido amplamente utilizado em regiões de clima temperado nos últimos 30 anos para prever processos de erosão e implementar regulação de torrentes e outras iniciativas de controle de erosão (GLOBEVNIK et al., 2003). Nos últimos anos, o EPM começou a ser aplicado em bacias hidrográficas tropicais, a incluir o Brasil

(SILVA et al., 2014; TAVARES et al., 2019; LENSE et al., 2019; SAKUNO et al., 2020; PINTO et al., 2020; LENSE et al., 2021a; LENSE et al., 2021b; TAVARES et al., 2021).

Considerando as alterações climáticas, para estimar os efeitos na perda de solo alguns estudos também têm estabelecido um sistema de modelagem integrado acoplando os modelos hidrológicos e erosivos com modelos climáticos (MAEDA et al., 2010; PAROISSIEN et al., 2015). Os Modelos Climáticos Globais (*Global Circulation Models* - GCM) são utilizados como ferramentas de simulação da mudança climática futura e representam os processos físicos do sistema atmosfera-oceano. No entanto, devido as suas escalas espaciais de centenas de quilômetros, não reproduzem satisfatoriamente as variáveis hidrológicas em escala adequada para aplicações regionais (COOLEY; SAIN, 2010; KHARE, 2017).

Nestes casos os métodos *downscaling* são amplamente aplicados para fornecer informações adaptadas dos dados de GCMs para a realidade local por meio de Modelos Climáticos Regionais (*Regional Climate Models* - RCM) (TIMBAL; FERNANDEZ; LI, 2009; TIMM; GIAMBELLUCA; DIAZ, 2015). OS RCMs são aninhados para produzir dados de saída com resoluções mais finas com base nos limites laterais e condições dos GCMs sobre as grades das regiões de interesse (LI; FANG, 2016). O modelo ETA (ETA-CPTEC) é um RCM utilizado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e é aninhado aos GCMs MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate*, versão 5; WATANABE et al. 2010) e HadGEM2-ES (*Hadley Centre Global Environmental Model*, versão 2; COLLINS et al. 2011), sendo esses RCMs trabalhados, corrigido e testados por Chou et al. 2005; Chou et al. 2012; Mesinger et al. 2012, para previsões sinóticas.

Neste estudo, elementos climáticos projetados pelo ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES para três períodos futuros foram integrados ao modelo EPM para estimar os efeitos da variabilidade climática nos processos erosivos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, estado de São Paulo (Brasil) até o final do século. A bacia passou por intensas modificações nos usos e ocupação do solo, principalmente em decorrência do atrativo turístico e especulação imobiliária da região após a construção da barragem e represa da UHE do Lobo.

Até onde é sabido, este é o primeiro estudo com aplicação do método em uma bacia do estado de São Paulo e o primeiro com aplicação do método para prever efeitos da variabilidade climática no país. Assim, este estudo permite mensurar de forma preliminar os efeitos da variabilidade climática e auxiliar de forma preventiva na identificação das áreas que necessitam da adoção de práticas conservacionistas visando garantir resiliência da bacia hidrográfica até o final do século, além de vantagens substanciais para a vida útil do reservatório.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MUDANÇA CLIMÁTICA E SEUS EFEITOS NA EROÇÃO DO SOLO

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) é um órgão internacional criado em 1988, pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), para realizar avaliações da mudança climática contando com a colaboração de cientistas e especialistas do mundo todo. Segundo o IPCC (2014), as mudanças climáticas ocorrem desde o período pré-industrial, decorrentes de atividades humanas que emitem gases de efeito estufa (GEE) como a industrialização, desmatamento, mudanças no uso do solo e queima de combustíveis fósseis.

As avaliações do IPCC realizam projeções de cenários climáticos futuros por meio das Vias Representativas de Concentração (*Representative Concentration Pathways – RCPs*) e no 5º Relatório de Avaliação Climática (*Fifth Assessment Report – AR5*) os RCPs foram baseados em diferentes emissões de GEE e o impacto dessas emissões no balanço do sistema terrestre avaliando o forçamento radiativo ($\text{watts/m}^2/\text{período}$), ou seja, a quantidade de energia solar armazenada no planeta de acordo com a concentração de GEE (MOSS et al., 2010).

Desta forma, foram elaborados quatro cenários considerando o forçamento radiativo em conjunto com a emissão de GEE, sendo estes: RCP 2.6 – com forçamento radiativo de 3 W.m^2 , concentração de CO_2 equivalente atingirá 490 ppm antes do ano 2100 e aumento da temperatura entre $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ e $1,7 \text{ }^\circ\text{C}$; RCP 4.5 – com forçamento radiativo de $4,5 \text{ W.m}^2$, concentração de CO_2 equivalente 650 ppm e aumento da temperatura entre $1,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$; RCP 6.0 – com forçamento radiativo de $6,0 \text{ W.m}^2$, concentração de CO_2 equivalente 650 ppm e aumento da temperatura entre $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$ e $3,1 \text{ }^\circ\text{C}$; e RCP 8.5 – com forçamento radiativo de $8,5 \text{ W.m}^2$, concentração de CO_2 equivalente 1370 ppm e aumento da temperatura entre $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ e $4,8 \text{ }^\circ\text{C}$ (NEVES, 2015).

Conforme apresentado no Relatório Especial de Mudanças Climáticas e Solos (JIA et al., 2019), a temperatura do ar na superfície da terra (*Land Surface Air Temperature – LSAT*) aumentou $1,53 \text{ }^\circ\text{C}$ desde o período pré-industrial até os dias atuais, enquanto a temperatura média da superfície global (*Global Mean Surface Temperature – GMST*) aumentou $0,87 \text{ }^\circ\text{C}$ no mesmo período. A média global do LSAT aumentou mais rápido do que a GSMT, visto que a taxa de aquecimento da terra em comparação com o oceano é aproximadamente 60% maior no mesmo período, porque a superfície da Terra é $1/3$ de terra e $2/3$ de oceano.

Pesquisas sugerem que as mudanças na temperatura e nos padrões da precipitação impactam quase todos os outros processos hidrológicos e, conseqüentemente, influenciam no

processo de erosão do solo (SHI; WANG, 2015; TANG et al., 2015; WANG et al., 2015; YAO et al., 2015; AZARI, 2016). Os impactos relacionados à precipitação se referem em termos de alteração de quantidade, intensidade, frequência e distribuição espaço-temporal e suas respectivas relações com a umidade e impermeabilidade do solo, escoamento e suscetibilidade à erosão (NEARING et al., 2004; ZABALETA et al., 2014).

Segundo Li e Fang (2016), quanto maior a intensidade e volume da precipitação, maior será a erosividade de um único evento, mantendo-se a mesma quantidade precipitada. A relação entre alta intensidade de precipitação e erosão hídrica inicia-se na erosividade das gotas em tempestades convectivas causando o desprendimento de partículas do solo (MOHAMADI; KAVIAN, 2015). Com o aumento da intensidade da precipitação, o escoamento excessivo em decorrência da saturação da capacidade de infiltração do solo acarreta a remoção das camadas superficiais do solo e erosão de canais estreitos (POESEN et al., 2003).

O aumento da intensidade da precipitação também acarreta um aumento da carga de sedimentos (MUKUNDAN et al., 2013). Estudos da mudança na intensidade da precipitação e seus efeitos na dinâmica hidrossedimentológica apresentaram um aumento de 2% nas cargas de sedimentos e 1,3% na descarga de água a cada 1% de aumento na intensidade da precipitação (LU et al., 2013). Na Ucrânia, o aumento na carga de sedimentos no rio Dnestr, em decorrência de precipitações mais intensas desde a década de 1950, foi de cinco vezes (WALLING; WEBB, 1996 apud LI; FANG, 2016).

As chuvas com maior duração podem reduzir a radiação solar impactando negativamente no crescimento das plantas e propiciando o aumento da erosão devido a menor cobertura vegetal (WANG et al., 2015), assim como em períodos de inverno onde a cobertura vegetal é menor e o aumento da precipitação provoca a intensificação da erosão do solo (GARBRECHT; ZHANG, 2015; SERPA et al., 2015). De acordo com Li Fang (2016), estudos como o AR5 (IPCC, 2014) e outros regionais realizados em diversos países estimam um processo de erosão do solo mais severo de acordo com as previsões de ciclos hidrológicos mais vigorosos.

Em relação à temperatura, estudos relataram que as taxas de erosão do solo tiveram correlação significativa com a temperatura (LAWLER et al., 2003; ACHITE; OUIILLON, 2016). Estima-se que o aquecimento em terras secas seja o dobro da média global, fazendo com que terras classificadas como secas temperadas se tornem secas subtropicais, causando redução da umidade dos solos e indisponibilidade de cultivos (ENGELBRECHT et al., 2015; SCHLAEPFER et al., 2017; LICKLEY; SOLOMON, 2018). De acordo com Jia et al. (2019), o aquecimento resultará em aumentos espaciais de terras áridas e estas aquecerão mais rápido do que a taxa média de aquecimento global.

Em relação aos impactos de 1,5° C e 2° C do aquecimento global previsto no AR5, embora o número de estudos tenha aumentado globalmente desde 2000, poucos foram realizados em relação ao processo de erosão (IPCC, 2014; LI; FANG, 2016). No entanto, Cousino et al. (2015) e Shrestha et al. (2016) afirmam que estudos considerando os impactos de 1,5°C e 2°C do aquecimento na região dos Grandes Lagos, EUA, e Baixo Mekong no Sudeste Asiático apontaram poucas alterações nas médias das cargas anuais de sedimentos e que essas diferenças não são claras devido às complexas interações entre as mudanças climáticas, cobertura e manejo do solo. O grupo de trabalho do AR5 afirma que, embora a extensão das mudanças climáticas seja altamente incerta e dependente da sazonalidade, cobertura vegetal e práticas de manejo, os aumentos nas chuvas fortes e na temperatura são projetados para alterar a erosão do solo e a produção de sedimentos (JIMÉNEZ CISNEROS et al., 2014).

Com relação às atividades antrópicas e sua relação com os impactos no solo, a mudança climática força a rotação de safras e novos períodos de plantio e colheita, tipos de manejo e preparo do solo, rotações e cultivares (ROUTSCHEK et al., 2014), assim como nos preços das safras, afetando as questões socioeconômicas. Os efeitos da mudança climática podem impactar negativamente todos os aspectos da segurança alimentar (disponibilidade, acesso, utilização e estabilidade), levando a impactos complexos na segurança alimentar global. A fim de prevenir ou amenizar os impactos negativos das mudanças climáticas futuras sobre a erosão do solo medidas de mitigação devem ser tomadas (JIA et al., 2019).

2.2. MODELAGEM CLIMÁTICA

Considerando que o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos de elementos climáticos provavelmente acarretarão em alterações do ciclo hidrológico (NEARING et al., 2004; SENEVIRATNE et al., 2012; TABARI, 2020), a variabilidade climática é um fator importante a ser estudada para o planejamento e gestão de recursos hídricos. Os Modelos de Circulação Global (*Global Circulation Models* - GCM) são utilizados para simular as mudanças climáticas futuras em todo o globo terrestre considerando os vários processos físicos do sistema atmosfera-oceano (SCHLIEP et al., 2010; LI; FANG, 2016). Os GCMs trabalham com resoluções espaciais de centenas de quilômetros e, desta forma, características locais de topografia, bacias hidrográficas e litorais podem não ser capturadas suficientemente para as projeções (CHOU et al., 2014a) e, conseqüentemente, não reproduzir satisfatoriamente as variáveis hidrológicas em escala adequada para aplicações regionais (COOLEY; SAIN, 2010; KHARE, 2017).

Para solucionar este problema de escalas espaciais incompatíveis, técnicas de *downscaling* dos dados de GCMs para escalas regionais foram desenvolvidas possibilitando estudos de efeitos da mudança climática em escalas regionais (KHARE, 2017). Os métodos de redução de escala

podem acontecer em escala dinâmica, com modelos climáticos regionais (*Regional Climate Models* - RCMs), ou estatísticos, com modelos de área limitada (*Limited-area Models* - LAMs). OS RCMs são aninhados para produzir dados de saída com resoluções mais finas com base nos limites laterais e condições dos GCMs sobre as grades das regiões de interesse (LI; FANG, 2016), enquanto os LAMs estabelecem relação empírica entre as variáveis climáticas de grande e pequena escala, baseando-se no princípio básico de que existem relações lineares ou não lineares entre as variáveis climáticas de grande escala e escala regional (ZORITA et al., 1995).

Com relação ao uso de modelos climáticos para avaliação de efeitos da variabilidade climática em estudos regionais, segundo Schliep et al. (2010), os RCMs simulam melhor o clima local pois possui melhor precisão de eventos extremos por abrangerem escalas de dezenas de quilômetros. O modelo ETA (ou ETA-CPTEC) é um modelo climático regional que foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado, sendo utilizado e aprimorado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desde 1997 (CHOU et al., 2005; CHOU et al., 2012; MESINGER et al.; 2012) para previsões sinóticas.

Por se tratar de um modelo com grade regular de $0,2^\circ \times 0,2^\circ$ de latitude e longitude para América do Sul (BRITO et al., 2019), o modelo ETA passou a ser aninhado aos GCMs *Model for Interdisciplinary Research on Climate* versão 5 (MIROC5) e *Hadley Global Environmental Model* versão 2 com componente *Earth System* (HadGEM2-ES) para avaliação da variabilidade climática em áreas menores, por meio do processo de *downscaling* (CHOU et al., 2014a). O MIROC5 é um GCM desenvolvido pela Universidade de Tokyo, Agência de Ciência e Tecnologia Terro-Marítima do Japão e *Center of Climate System Research* (CCSR) (FONTOLAN, 2019), sendo um modelo atmosfera-oceano, com resolução espacial de 150 km horizontal e 40 níveis verticais (WATANABE et al., 2010). Segundo Chou et al. (2014a), o ETA-MIROC5 apresenta eficiência nas projeções de temperatura e previsão de eventos climáticos. O HadGEM2-ES é um GCM desenvolvido pelo *Met Office Hadley Center UK*, com acoplamento atmosfera-oceano e resolução de $1,875^\circ$ de longitude e $1,275^\circ$ de latitude com 38 níveis na atmosfera (COLLINS et al., 2011; MARTIN et al., 2011). De acordo com Martin et al. (2011), o ETA-HadGEM2-ES possui representação do ciclo de carbono, consegue diferenciar árvores, plantas, arbustos e gramas e identificar compostos químicos e poeira.

A avaliação de impactos baseada em cenários de redução de escala se tornou a principal prática em estudos de modelagem. Alguns estudos também têm estabelecido um sistema de modelagem integrado acoplando os modelos hidrológicos e erosivos com modelos climáticos (MAEDA et al., 2010; PAROISSIEN et al., 2015). Com isso, a estrutura de modelagem tem se

tornado mais integrada, considerando as mudanças no uso e cobertura do solo induzidas pelas alterações do clima corroborando para prever os impactos das mudanças climáticas de forma mais precisa.

2.3. MODELAGEM DA EROSÃO DE SOLO

Fisicamente, a medição do processo erosivo é difícil devido à complexidade dos fenômenos de erosão do solo e requer o reconhecimento abrangente de vários fatores e processos hidrológicos complexos em condições variadas de clima, solo, declive, vegetação e cultivo, sendo necessário que se obtenha uma série de dados consistidos e confiáveis para garantir que os resultados não sejam influenciados por eventos extremos (EISAZADEH et al., 2012; PANDEY et al., 2016). Para isso as pesquisas de erosão do solo utilizam atualmente os modelos de erosão e produção de sedimentos como ferramentas para prever o efeito de mudanças ambientais naturais ou induzidas pelo homem, podendo ser usados em diversas condições como, por exemplo, para investigar a resposta da taxa de erosão às alterações no clima, para avaliar o impacto da erosão na produtividade da cultura, sedimentação ou na seleção de métodos de conservação (DE VENTE et al., 2013; KHARE, 2017).

Os diversos modelos de erosão do solo e produção de sedimentos se diferem entre si em termos de complexidade, requisitos de dados e seu uso. Além disso, existem vários fatores que condicionam a escolha de um modelo específico, como as características de captação, variáveis de entrada e saída, disponibilidade de dados, objetivos, capacidade e eficiência do modelo e requisitos de *hardware* (PANDEY et al., 2016). Para garantir que um modelo seja válido, ele precisa ser calibrado e seus resultados de simulação precisam ser validados com as medições de campo (GOVERS, 2011). Para ser considerado um bom modelo, ele deve ainda apresentar facilidade de uso e manipulação de dados, ter aceitabilidade universal, diretrizes claras de aplicação, confiabilidade e capacidade de considerar mudanças no clima, usos do solo e práticas conservacionistas (PANDEY et al., 2016).

Os modelos podem ser categorizados em basicamente três classes: empírico, conceitual e de base física, e ainda classificados como qualitativo, quantitativo ou semiquantitativo. Podem também ser desenvolvidos em diversas escalas espaciais (campo ou bacia hidrográfica, concentrado, distribuído ou semi-distribuído) e temporais (eventual ou contínuo). Em relação à escala espacial os estudos conduzidos em escalas geográficas maiores enfocam os impactos externos, enquanto os estudos conduzidos em escalas geográficas menores enfocam os impactos da erosão local (DE VENTE; POESEN, 2005).

Os modelos concentrados não consideram a variabilidade espacial dos processos, condições de contorno, dados de entrada e características da bacia hidrográfica sendo capaz de produzir um único valor de erosão em uma única corrida, enquanto os modelos distribuídos já consideram a variabilidade espacial de processos e saídas, sendo capazes de produzir uma série de padrões de erosão em diferentes locais da bacia hidrográfica (KARYDAS et al., 2014). Entre estes, os modelos semi-distribuídos dividem a bacia hidrográfica em sub-bacias, com características hidrológicas razoavelmente homogêneas, usando Unidades de Resposta Hidrológica (HRUs), abordagens estatísticas ou combinação de ambos (SCHUMANN, 1993).

Os modelos de erosão com base física consistem em equações que descrevem os fluxos de sedimentos e correntes em uma bacia hidrográfica considerando características físicas como topografia, geologia, usos do solo, clima e características da drenagem. De acordo com Lane et al. (2001), quando comparado aos modelos empíricos/conceituais, os modelos de base física apresentam extrapolação mais precisa para diferentes usos do solo, representação mais correta dos processos de erosão e estimativa mais precisa da produção e deposição de sedimentos.

Nos modelos conceituais, as características da área são representadas por uma série de armazenamentos internos que tende a incluir uma descrição geral dos processos, porém não se considera as interações específicas entre eles, tendo interpretação física limitada (SOROOSHIAN, 1991). Os modelos conceituais desempenham papel intermediário entre modelos empíricos e de base física, pois requerem maior número de dados de entrada para produzir um melhor ajuste dos dados observados e aumentar o grau de liberdade. Porém, o maior número de parâmetros não garante que se obtenha melhores resultados do que os modelos empíricos e de base física (BECK, 1987; PERRIN et al., 2001).

Os modelos empíricos baseiam-se principalmente em observações e caracterização de resposta a dados (WHEATER et al., 1993) podendo ser classificados como estocásticos, determinísticos ou do tipo misto. Em comparação com os modelos conceituais e com base física, os requisitos computacionais e de dados para tais modelos são menores, porém são capazes de trabalhar com medições mais grosseiras e dados limitados (JAKEMAN et al., 1999). O desconhecimento da heterogeneidade das características da bacia hidrográfica e o envolvimento de suposições irrealistas sobre a física da área de abrangência são as principais críticas aos modelos empíricos (WHEATER et al., 1993).

Existem vários métodos de avaliação empírica relevantes e esses métodos envolvem várias etapas: aquisição de dados, especificação do modelo e estimativa (GAVRILOVIC, 1972). De acordo com Globevnik et al. (2003), os primeiros modelos empíricos de erosão do solo foram propostos por Cook (1936), Zingg (1940) e Smith (1941) e no final da década de 1940 e início da

década de 1950, outros métodos para analisar a gravidade da erosão foram desenvolvidos. Herheulidze (1947) propôs método para descrever o grau de erosão em bacias de drenagem com torrentes de detritos, Browning (1947) propôs um fator de erosão relativo como uma medida da perda de solo devido à erosão hídrica, Poljakov (1953) propôs uma expressão analítica para determinar o coeficiente de desenvolvimento da erosão e Silvestrov (1955) propôs uma equação analítica para a determinação de um coeficiente de erosão.

O primeiro modelo empírico usado para estimar a produção de sedimentos, desenvolvido inicialmente para a análise dos efeitos das práticas agrícolas, foi a Equação Universal de Perda de Solo (*Universal Soil Loss Equation* – USLE) proposta por Wischmeier e Smith (1965). Posteriormente, diversos outros modelos foram desenvolvidos, podendo ser citados: a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (*Revised Universal Soil Loss Equation* – RUSLE) (RENARD et al., 1997), *Water Erosion Preview Project* – WEPP (NEARING et al., 1989), *Pacific Southwest Inter-agency Committee* – PSIAC (PSIAC, 1968), *Soil and Water Assessment Tools* – SWAT (NEITSCH et al., 2011) e *Erosion Potential Method* – EPM (GRAVILOVIC, 1972).

Os modelos hidrológicos ou de erosão do solo são muito utilizados para estudos de impacto das mudanças climáticas na erosão do solo. Atualmente os modelos de erosão e produção de sedimentos variam significativamente no manuseio de dados, requisitos computacionais, sofisticação e são bastante diversificados e abrangentes (PANDEY et al., 2016). O uso do Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Sensoriamento Remoto (SR) em conjunto com modelos de erosão hídrica e produção de sedimentos tem facilitado a mistura de dados de várias fontes, a criação de um ambiente de computação para possível redimensionamento do modelo e aumento da complexidade nas relações de método de dados (KARYDAS et al., 2014).

As técnicas de SR auxiliam na avaliação dos processos de erosão e na geração de mapas de uso da terra, enquanto a integração de tais camadas de dados com a geração de mapas de severidade de erosão e produção de sedimentos pode ser prontamente realizada pelo uso de ferramentas analíticas de um SIG (TANGESTANI, 2006). O Modelo Digital de Elevação (MDE) também é uma ferramenta valiosa, pois extrai automaticamente variáveis topográficas, como declive, aspecto, rede de fluxo, direção do fluxo, geometria da bacia etc., que são dados de entrada fundamental para modelos espacialmente distribuídos (COVENEY; FOTHERINGHAM, 2011; HIMANSHU et al., 2013).

2.3.1. Método EPM

O Método de Erosão Potencial (*Erosion Potential Method* – EPM) também conhecido como método de Gavrilovic, é um modelo empírico para cálculo de erosão do solo e rendimento médio anual de sedimentos, desenvolvido por Slobodan Gavrilovic na década de 1960, com base

no estudo de erosão na bacia hidrográfica do Rio Morava, na Sérvia (GAVRILOVIC, 1972 apud DRAGIČEVIĆ et al., 2016). O EPM é classificado com um método semi-quantitativo que se baseia em procedimentos descritivos e quantitativos, indicado para qualificar a severidade da erosão e estimar a produção anual total de sedimentos de uma área de captação (DE VENTE; POESEN, 2005; SOLAIMANI et al., 2009).

O método tem sido amplamente utilizado em regiões de clima temperado nas últimas décadas para prever processos erosivos e programar regulação de torrentes e outros trabalhos de controle de erosão (GLOBEVNIK et al., 2003). O método considera para avaliação do potencial erosivo os fatores geométricos, topográficos, hidrológicos, meteorológicos e a intensidade erosiva (Z), que é o parâmetro que revela a intensidade dos processos erosivos atuantes na bacia. O método foi adaptado com relação às características de uso e manejo do solo e resistência do solo a processos erosivos em regiões de clima tropical, e começou a ser aplicado em diversos países.

Uma evolução importante do modelo foi sua aplicação com base em dados espacialmente distribuídos em ambiente SIG (FANETTI; VEZZOLI, 2007), que possibilitou fornecer ligações entre mapas e outras informações relacionadas à localização geográfica para fins de modelagem ambiental, especialmente para gestão de bacias hidrográficas (AMINI, 2010). A confiabilidade dos resultados aplicados em SIG refere-se à precisão e nível de detalhes de dados de entrada, dos dados de sensoriamento remoto de área e satélite que fornecem maiores detalhes e, conseqüentemente, simplificam o processo de avaliação de processos erosivos (VOGT et al., 2003; FANETTI; VEZZOLI, 2007).

Segundo Ristic (2011a), o EPM se distingue por seu alto grau de confiabilidade no cálculo da produção de sedimentos, bem como no transporte e sedimentação de reservatórios. Blinkov e Kostadinov (2010) avaliaram a aplicabilidade de vários métodos de erosão para fins de engenharia considerando fatores como a escala, tipos de tarefas e necessidades do setor e o EPM foi o mais adequado em nível de captação para as necessidades de gestão de bacias hidrográficas.

No Brasil, Tavares (2019) estimou as perdas potenciais de solo e a produção de sedimentos em diferentes tipos de usos da terra em uma sub-bacia hidrográfica em Alfenas, Minas Gerais, utilizando e comparando o EPM e a RUSLE. Os autores afirmam que o EPM foi eficiente para avaliar erosão hídrica em solos tropicais, com resultados consistentes e correspondentes à modelos amplamente empregados na estimativa de perda de solo como a RUSLE, sendo uma ferramenta útil para avaliar a sustentabilidade das atividades agrícolas no Brasil.

Lense et al. (2019) e Pinto et al. (2020) aplicaram o EPM em sub-bacias hidrográficas no município de Alfenas - MG, para calcular as taxas de perda de solo e comparar com os limites da tolerância de perda de solo na região. De acordo com os autores, o EPM estimou as perdas de solo

nas condições edafoclimáticas tropicais para apontar áreas com maior potencial erosivo de forma ágil, eficiente e com baixo custo, sendo uma alternativa eficaz para subsidiar nas ações de mitigação de impactos e práticas agronômicas conservacionistas. Sakuno et al. (2020), aplicaram o EPM na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Caçús, MG, visando adaptar e avaliar as potencialidades do modelo em solos tropicais. Os autores citam que o modelo EPM apresentou excelente desempenho, podendo ser aplicado para estimativas das taxas de produção de sedimentos por erosão hídrica em solos tropicais.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

Analisar os efeitos da variabilidade de elementos climáticos na produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri até o final do século XXI.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Prospectar os principais fatores relacionados a produção de sedimentos na bacia;
- II. Verificar potenciais diferenças significativas entre as estimativas de produção de sedimentos de acordo com os tipos de dados, modelos, períodos e RCPs adotados;
- III. Avaliar a aplicação do método EPM para estimativas de produção de sedimentos para cenários futuros.

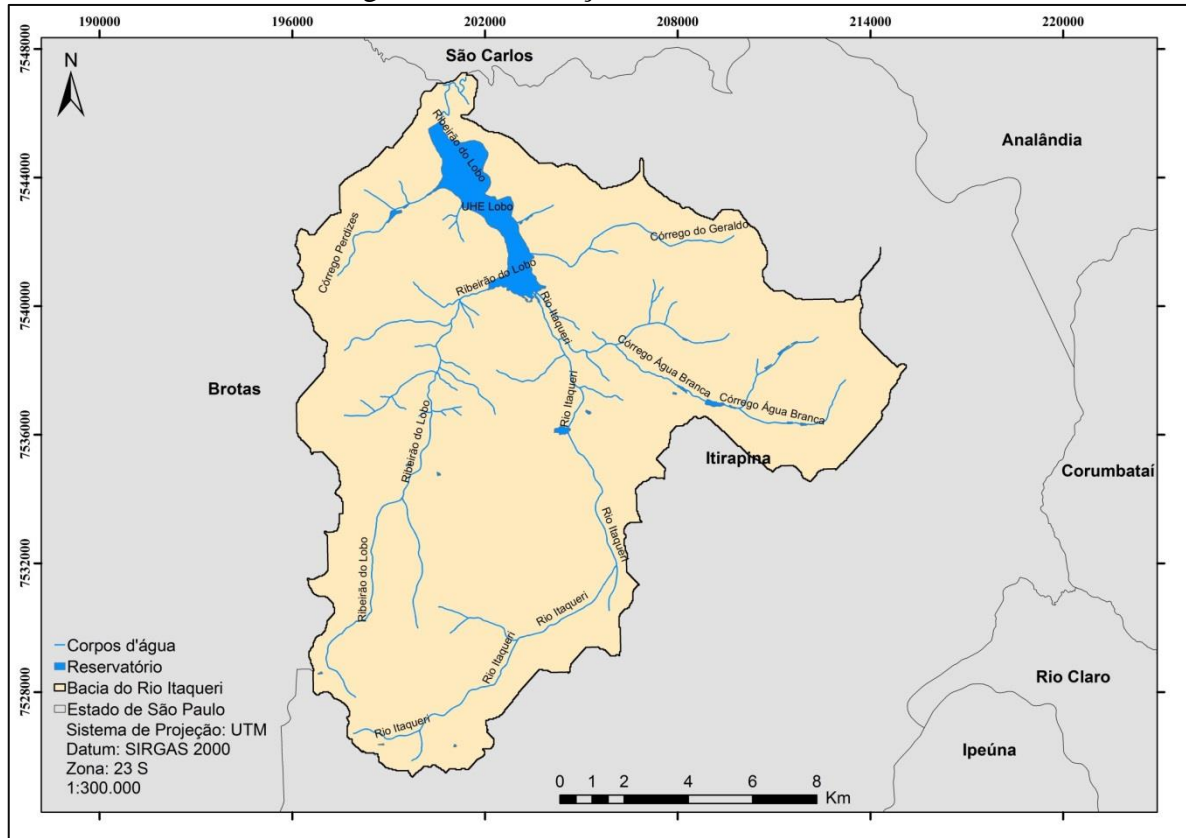
4. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Itaqueri está localizada na região centro-leste do estado de São Paulo (Figura 1), especificamente entre os municípios de Brotas, Itirapina e São Carlos. A bacia possui área de 221,5 km², com diferença altimétrica de 317 metros, formada pelos rios Itaqueri e Ribeirão do Lobo e seus principais afluentes: Água Branca, Limoeiro, Geraldo e Perdizes. Segundo a classificação de Köppen, o clima na bacia é subtropical úmido (Cwa). A precipitação média total anual varia de 1300 a 1500 mm, com maior frequência e volume de chuvas durante o verão (ALVARES et al., 2013). O relevo é formado por colinas largas e médias, planícies aluviais e afloramentos de unidades litoestratigráficas das bacias Serra Geral e Paraná, com sedimentos da Formação Itaqueri e depósitos aluviais (ARROIO JUNIOR, 2013). A maior parte da bacia apresenta valores de declividade abaixo de 2°, principalmente nas áreas inundáveis do Rio Itaqueri e Ribeirão do Lobo.

Na bacia está localizado o reservatório do Lobo (Broa), construído em 1936, para gerar eletricidade em pequena escala. O reservatório é abastecido pelo ribeirão do Lobo e rio Itaqueri, tem profundidade média de 5,8 m, comprimento de 6,2 km, área de superfície de 5,6 km² e volume de 24,3 hm³ (ESTIGONI et al. 2014). Atualmente, o reservatório é usado para recreação, turismo e pesca, sendo considerado uma alternativa de desenvolvimento regional, com grande especulação imobiliária e os primeiros loteamentos as margens da represa já na década de 1970 (QUEIROZ, 2000; ARGENTON, 2004).

No entanto, com criação de condomínios as construções seguiram avançando sobre os ecossistemas naturais, áreas de mananciais e de preservação permanente passando por uma rápida alteração de uso e ocupação do solo, propiciando o desequilíbrio ecológico e a perda da biodiversidade (AZEVEDO, 2010). De acordo com a Lei Estadual nº 7.438, de 16 de julho de 1991, a região está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) do Corumbataí, Botucatu e Tejuapá, instituída pelo fato da região conter diversos recursos naturais e importantes patrimônios arqueológicos e históricos, além de duas Estações Ecológica e Experimental de Itirapina que objetivam a preservação, realização de pesquisas, desenvolvimento de atividades silviculturais e turísticas (ARROIO JUNIOR, 2013).

Figura 1 - Localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia foi basicamente dividida em duas etapas. Na primeira etapa o modelo de erosão (método EPM) foi utilizado para estimar a produção média anual de sedimentos e mapear as áreas com maior produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri em um cenário atual. Na segunda etapa, um sistema de modelagem integrado foi utilizado para estimar a produção média anual de sedimentos em períodos futuros. Para isso, dados obtidos de modelos climáticos (ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES) sob RCPs 4.5 e 8.5, foram integrados ao modelo de erosão (método EPM) para estimar a produção média de sedimentos nos anos 2040, 2070 e 2099.

5.1. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

A estimativa de perda de solo na bacia hidrográfica do rio Itaqueri foi calculada usando o modelo *Erosion Potential Method* (EPM), conforme Equação 1 (GAVRILOVIC, 1988), por meio do software ArcGIS 10.3.1. (ESRI, 2015). Os coeficientes de temperatura e erosão foram calculados de acordo com as Equações 2 e 3, respectivamente.

$$W_{yr} = T \cdot H_{yr} \cdot \pi \sqrt{Z^3} \cdot F \quad (1)$$

onde: W_{yr} – erosão média anual do solo ($m^3 \cdot ano^{-1}$); T – coeficiente de temperatura; H_{yr} – precipitação média anual ($mm \cdot ano^{-1}$); Z – coeficiente de erosão; F – área de captação (km^2).

$$T = \sqrt{\left(\frac{t}{10} + 0.1\right)} \quad (2)$$

onde: T – coeficiente de temperatura e t – temperatura média anual ($^{\circ}C$).

$$Z = Xa \cdot Y \cdot (\varphi + \sqrt{I_{sr}}) \quad (3)$$

onde: Z – coeficiente de erosão; Xa – coeficiente de uso e manejo do solo; Y – coeficiente de resistência do solo à erosão hídrica; φ = coeficiente do grau das feições erosivas e I_{sr} – inclinação média da área (%).

Para cálculo do coeficiente de temperatura (T) e obtenção da precipitação média anual (H_{yr}), foram obtidos dados de temperatura do ar da estação climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais da Universidade de São Paulo (CRHEA/USP) e do portal *Climate Data* (2021) (<https://pt.climate-data.org/>); e dados de precipitação diária da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE) e do CRHEA, conforme apresentado na Tabela 1. Para a constituição do cenário atual, foram utilizadas as séries de temperatura do ar e precipitação do ano de 2019, que foram espacializadas em ambiente SIG.

Tabela 1 - Informações dos postos pluviométricos utilizados no estudo

Ponto	Cód.	Nome	Responsável	Lat.	Long.
1	2247184	Itaqueri da Serra	ANA	22,34	47,92
2	2247198	Faz. Pequena Holanda	ANA	22,18	47,78
3	2247180	Itirapina	ANA	22,25	47,83
4	2247006	Visconde do Rio Claro	DAEE	22,15	47,8
5	2247196	CRHEA-USP	USP	22,17	47,9
6	2247015	Graúna	DAEE	22,3	47,75

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cálculo do coeficiente de erosão (Z), foram considerados os valores dos coeficientes de uso e manejo do solo, resistência do solo à erosão hídrica e feições erosivas conforme proposto por Sakuno et al. (2020) (Tabelas 2, 3 e 4). Os valores dos coeficientes foram espacializados em ambiente SIG conforme os mapas de declividade, pedologia e uso e ocupação do solo. O mapa de declividade (Figura 2) foi elaborado com base no Modelo Digital de Elevação (DEM) do estado de São Paulo, com escala 1: 50.000 e resolução horizontal de 30 metros (SÃO PAULO, 2013). O mapa de pedologia (Figura 3) foi extraído do Mapa das Unidades Pedológicas do Estado de São Paulo (ROSSI, 2017). O mapa de uso e cobertura do solo (Figura 4) foi produzido de acordo com dados da 5ª Coleção dos Biomas Cerrado e Mata Atlântica da MapBiomas (2019). A declividade média da área foi obtida a partir do mapa de declividade. Por fim, as características físicas da bacia (área, perímetro, comprimento do corpo d'água principal e diferença de elevação) também foram obtidas em ambiente SIG.

Figura 2 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica do rio Itaqueri

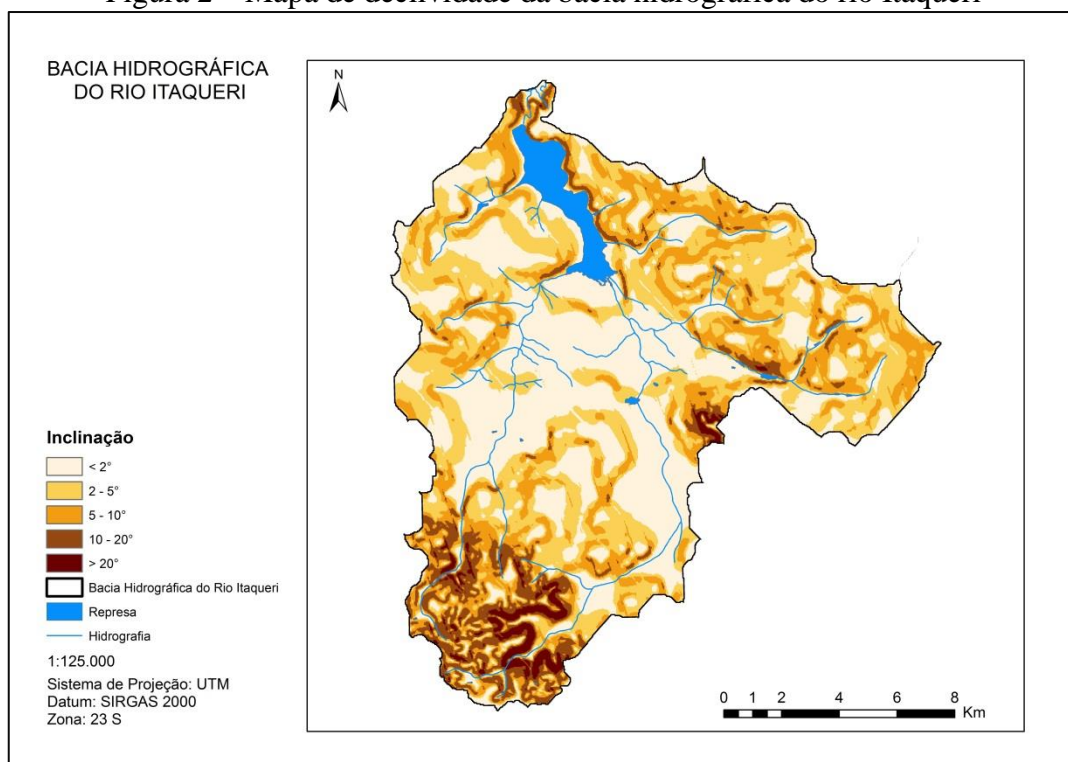


Figura 3 – Mapa de unidades pedológicas da bacia hidrográfica do rio Itaqueri

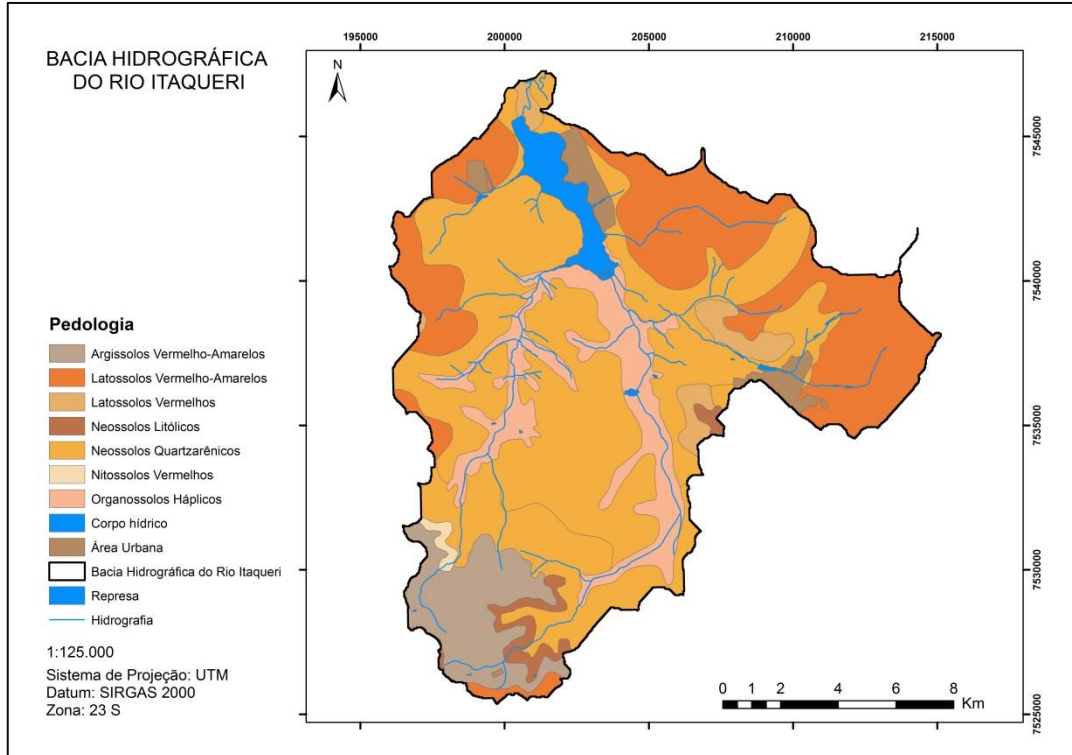


Figura 4- Mapa de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do rio Itaqueri

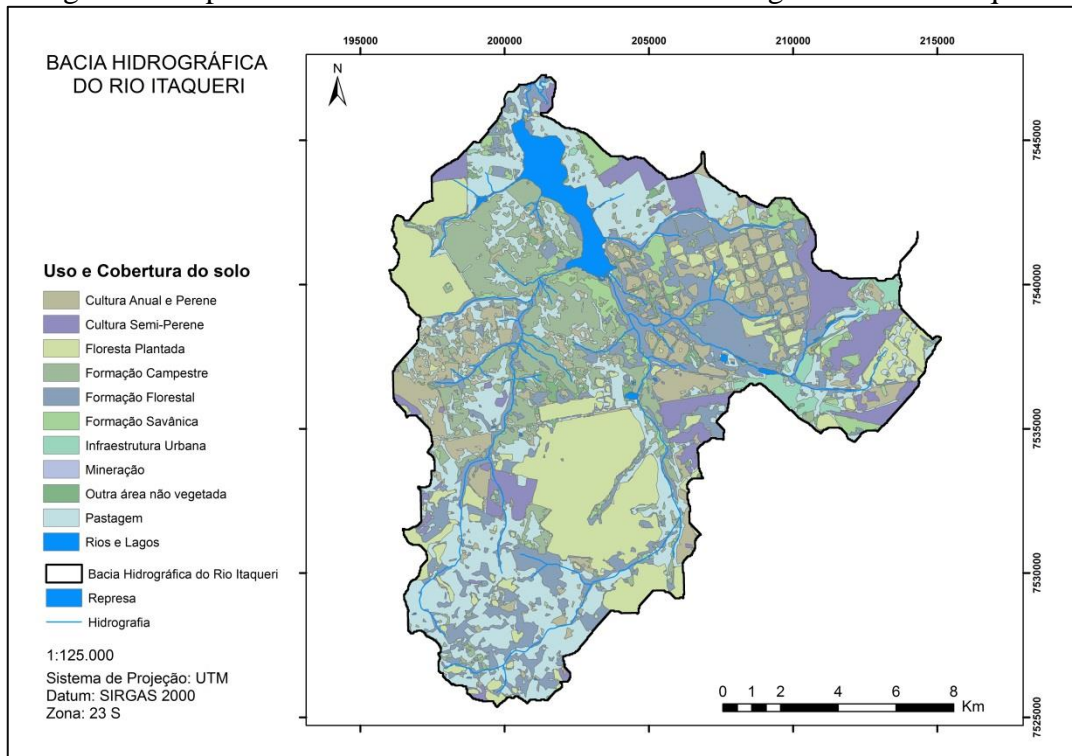


Tabela 2 - Valores para Xa em função do uso e manejo

Uso e manejo	Xa
Floreta nativa	0,05
Floresta ligeiramente degradada	0,05-0,20
Floresta degradada	0,20-0,30
Campo	0,30-0,40
Pastagem	0,40-0,50
Culturas permanentes com bom manejo	0,50-0,60
Culturas permanentes sem bom manejo	0,60-0,70
Cultura temporária/anual com bom manejo	0,70-0,80
Cultura temporária/anual sem bom manejo	0,80-0,90
Solo nu	0,90-1,00

Fonte: Sakuno et al. (2020). Adaptado.

Tabela 3 – Valores para Y em função dos tipos de solos

Rocha de origem	SiBCS(2012)	Y
Afloramentos rochosos	-	0,25
Sedimentos de rios	Neossolos flúvicos	0,50
	Gleissolos	
	Organossolos	
	Planossolos	
Rochas básicas e ultrabásicas, anfíbolitos, argilitos e xisto	Latossolos	0,60
	Chernossolos	
	Argissolos	0,70
	Nitossolos	
	Plintossolos	
Granitos, gnaisses e migmatitos	Latossolos*	0,80
	Argissolos*	
	Planossolos*	
	Nitossolos	
	Luvissolos	0,90
	Cambissolos húmicos	
	Plintossolos*	
	Luvissolos*	
Calcários, mármore e evaporitos	Espodossolos	1,20
	Vertissolos	
	Espodossolos	1,50
	Neossolos regolíticos	
	Cambissolos	
	Neossolos litolíticos*	2,00
	Luvissolos*	
Cambissolos*		

* presença de quartzo. Fonte: Sakuno et al. (2020). Adaptado.

Tabela 4 - Valores para ϕ em função do tipo de erosão

Tipo de erosão	ϕ
Área com erosão severa (voçoroca, erosão em sulcos pesado)	1
Erosão em sulcos intensa	0,9
Erosão em sulcos média	0,8
Erosão laminar intensa	0,7
Erosão laminar moderada	0,6
Erosão laminar média	0,5
Erosão laminar leve	0,3
Áreas com erosão nas margens dos cursos d'água	0,2
Áreas agrícolas sob erosão não aparente	0,15
Áreas cobertas por vegetação nativa	0,1

Fonte: Sakuno et al. (2020). Adaptado.

Posteriormente, após obtenção da produção média anual de sedimentos na bacia ($\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$), os valores obtidos foram transformados para $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ utilizando dados da densidade do solo (D_s) ($\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$) da região, conforme apresentado no estudo de Nicodemo et al., (2018). A classificação final da erosão na bacia foi realizada de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação da erosão em função do coeficiente de erosão

Classe	Tipo de Erosão	Coeficiente de Erosão (Z)
I	Erosão muito severa	$Z > 1,0$
II	Erosão severa	$0,71 < Z < 1,0$
III	Erosão moderada	$0,41 < Z < 0,7$
IV	Erosão fraca	$0,20 < Z < 0,4$
V	Erosão muito fraca	$Z < 0,19$

Fonte: Gavrilovic (1988) e Yousefi et al. (2014).

O coeficiente de retenção de sedimentos (R_u), que corresponde a taxa de sedimentos retidos nas camadas superiores da bacia, foi calculado de acordo com a Equação 4 (GAVRILOVIC, 1988). Conhecendo os valores da erosão média anual e da retenção de sedimentos na bacia, a perda real de solos foi calculada de acordo com a Equação 5.

$$R_u = \frac{(O \cdot D)^{0,5}}{[0,25 (L_v * 10)} \quad (4)$$

onde: R_u – coeficiente de retenção de sedimentos; O – perímetro da bacia hidrográfica (km); D – diferença altimétrica bacia hidrográfica (km) e L_v – comprimento do curso d'água principal (km).

$$G_{yr} = W_{yr} \cdot R_u \quad (5)$$

onde: G_{yr} – perda real de solo ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$); W_{yr} – erosão média anual ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$); e R_u – coeficiente de retenção de sedimentos.

5.2. TOLERÂNCIA À PERDA DE SOLO

A Tolerância à Perda de Solo (TPS) para erosão laminar indica a quantidade máxima de perda de solo tolerada para garantir a produção agrícola sustentável na bacia (PINTO et al., 2020). Para verificar se a perda de solo na bacia do rio Itaqueri está dentro das faixas de tolerância, os valores TPS propostos por Michette (2015) para a mesma bacia foram considerados como parâmetro de avaliação.

5.3. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS DE VARIABILIDADE CLIMÁTICA PARA ESTIMATIVA FUTURA DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

5.3.1. Obtenção dos dados climáticos

Para confecção dos cenários de variabilidade climática, foram utilizados dados de precipitação diária (PREC) e temperatura do ar a dois metros da superfície (TP2M) gerados pelos GCMs HadGEM2-ES e MIROC5 sob RCPs 4.5 e 8.5, reduzidos pelo RCM ETA e disponibilizados pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) por meio da Plataforma PROJETA (<https://projeta.cptec.inpe.br>) (CHOU et al., 2014a; CHOU et al., 2014b; LYRA et al., 2017). Os dados foram projetados para os anos de 2040 (curto prazo), 2070 (médio prazo) e 2099 (longo prazo).

5.3.2. Avaliação de desempenho dos modelos climáticos

Para avaliar o desempenho dos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, os dados de precipitação diária e de temperatura do ar projetados foram comparados com os observados durante o período de referência (1981-2005). O *Root Mean Square Error* (RMSE) que fornece as variações ponderadas (resíduos) nos erros entre os valores simulados e observados e o *Mean Bias Error* (MBE) que mede a magnitude média ponderada dos erros foram utilizados como índices de avaliação dos modelos. O RMSE e MBE foram calculados de acordo com as Equações 6 e 7 (WILLMOTT; MATSUURA, 2005; 2006).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (6)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad (7)$$

Onde: n – número de observações; x_i – valores observados e y_i – valores simulados.

O MBE é a medida mais natural e inequívoca da magnitude do erro médio, enquanto o RMSE é uma das medidas de erro mais amplamente utilizadas. A combinação desses critérios tem sido amplamente utilizada para a avaliação de modelos de redução de escala (STEFANIDIS; STATHIS, 2018).

5.3.3. Correção de tendências dos dados de precipitação

Segundo Berg et al. (2012), os modelos hidrológicos são geralmente calibrados para dados observacionais e costumam ser sensíveis ao viés do forçamento de dados climáticos, o que pode acarretar em tendências problemáticas como, por exemplo, o viés de precipitação úmida que força cenários úmidos constantemente. Para solucionar esse problema, diversos métodos de correção de tendências podem ser adotados. No entanto, neste caso, os eventos extremos projetados podem ser mais afetados do que os eventos de baixa intensidade. Desta forma, neste estudo optou-se por trabalhar com dados corrigidos e não corrigidos, onde as correções foram realizadas apenas em dados de PREC, considerando que os dados de TP2M são utilizados como coeficiente na estimativa de perda de solo.

Assim, para a correção das tendências de precipitações projetadas, a abordagem multiplicativa para correção de viés (CV) foi aplicada. O método consiste no cálculo da razão entre a precipitação média mensal observada e projetada para o período de referência (1981-2005), conforme Equação 8. Posteriormente, os dados mensais projetados para os demais períodos são multiplicados pelo fator multiplicativo de cada mês para dimensionar os valores (Equação 9).

$$f(i) = \frac{\overline{P_{i\text{observado}}}}{P_{i\text{modelo}}} \quad (8)$$

$$P_i BC^{(t)} = P_{i\text{modelo}}^{(t)} * f^{(i)} \quad (9)$$

Onde: f - fator multiplicativo para cada mês i ; $\overline{P_{i\text{modelo}}}$ - precipitação média mensal projetada no período de referência, em mm; $\overline{P_{i\text{observado}}}$ - precipitação média mensal observada no período de referência, em mm; $P_{i\text{modelo}}$ - precipitação média mensal projetada para os demais períodos, em mm; $P_i BC^{(t)}$ - enviesamento corrigido da precipitação mensal, em mm.

5.3.4. Integração dos dados climáticos futuro ao modelo de erosão

Após a obtenção, avaliação e correção dos dados climáticos para os anos 2040, 2070 e 2099 sob RCPs 4.5 e 8.5, os respectivos coeficientes de temperatura e precipitação média anual foram obtidos e aplicados no modelo EPM para estimativa da produção média anual de sedimentos futura. As variações futuras dos fatores de uso e cobertura do solo foram omitidas nesta etapa do estudo.

5.4. COMPARAÇÃO DA PERDA MÉDIA DE SOLO ENTRE CENÁRIOS E ANÁLISE DA CORRELAÇÃO COM OS FATORES CLIMÁTICOS

Para analisar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre os resultados da produção média anual de sedimentos para os diversos cenários e modelos climáticos, foram aplicados os testes não paramétricos Mann Whitney e Kruskal-Wallis. Para análise das correlações entre os dados de precipitação média anual e coeficientes de temperatura com a produção média anual de sedimentos estimada, foi utilizado o teste de Correlação de Pearson. Ambos foram realizados no *software* STATÍSTICA 13.0 considerando o intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

6. RESULTADOS

6.1. PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NO CENÁRIO ATUAL

A bacia do rio Itaqueri possui 221,5 km² de área (F), perímetro de 108,45 km (O), desnível (D) de 317m e comprimento do rio principal de 21,85 km (Lv). A precipitação média anual (H_{yr}) foi de 1237,65 mm e coeficiente de temperatura (T) foi de 1,48 em 2019. Os maiores eventos de precipitação ocorrem em janeiro e menor em julho, enquanto a temperatura apresenta maiores médias em fevereiro e menor em junho. As maiores altitudes foram observadas na região sul da bacia, onde se encontram as nascentes dos rios Itaqueri e Lobo e os divisores das Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê/Jacaré-Piracicaba/Capivari/Jundiaí (UGRHs 13 e 5). A região central da bacia e as áreas próximas ao reservatório apresentam declives abaixo de 10°, enquanto na região sul são observados declives acima de 20°. As unidades predominantes na bacia são os Neossolos Quartzarênicos (10.392,9 ha) e os Latossolos Vermelho-Amarelos (5.340,5 ha). Os principais tipos de uso do solo na bacia são a pastagem (5.288,9 hectares), floresta plantada (4.069,8 ha), formação florestal (3.913,1 ha), formação campestre (2.922,7 ha), cultura perene (2.368,2 ha) e cultura semi-perene (1.580,9 ha).

A Tabela 6 apresenta os valores adotados para o coeficiente Y e os respectivos valores do coeficiente Z obtidos de acordo com cada tipo de solo da bacia. O coeficiente Y variou de 0,5 a 2,0, sendo os maiores valores atribuídos aos Neossolos Quartzarênicos e Litólicos ($Y = 2,0$) devido à sua baixa resistência à erosão hídrica.

Tabela 6 – Valores adotados para o coeficiente Y e seus respectivos valores obtidos para o coeficiente Z , de acordo com os tipos de solos da bacia

Coeficiente de resistência do solo à erosão hídrica	Área (ha)	Área (%)	Y	Z
Argissolo Vermelho-Amarelo	1679,0	8,0	0,7	0,13
Latossolo Vermelho-Amarelo	5340,5	25,5	0,6	0,1
Latossolo Vermelho	621,2	3,0	0,6	0,09
Neossolo Litólicos	403,1	1,9	2,0	0,32
Neossolo Quartzarênicos	10392,9	49,6	2,0	0,28
Nitossolo Vermelho	94,1	0,4	0,7	0,13
Organossolo Háplicos	2421,7	11,6	0,5	0,04

Legenda: Y – coeficiente de resistência do solo à erosão hídrica; Z – coeficiente de erosão. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 7 apresenta os valores adotados para os coeficientes X_a e ϕ , bem como os respectivos valores do coeficiente Z obtidos de acordo com os tipos de uso e manejo do solo na bacia. As áreas não vegetadas apresentaram os maiores valores de coeficiente X_a (1,0), seguidas por semiperenes (0,8) e perenes (0,6). Estas, por serem comumente encontradas com solo

descoberto, também apresentaram os maiores valores para o coeficiente ϕ (0,6). O coeficiente Z médio na bacia hidrográfica do rio Itaqueri foi de 0,18 (erosão muito fraca) e variou de 0,04 a 1,1.

Tabela 7 – Valores adotados para o coeficiente X_a e ϕ e os respectivos valores de coeficiente Z obtidos de acordo com os usos e manejo do solo na bacia.

Coeficiente de uso e manejo do solo	Área (ha)	Área (%)	X_a	ϕ	Z
Cultura anual e perene	2368,2	11,0	0,6	0,3	0,42
Cultura semi-perene	1580,9	7,3	0,8	0,3	0,4
Floresta Plantada	4069,8	18,9	0,1	0,1	0,04
Formação campestre	2922,7	13,6	0,4	0,1	0,14
Formação florestal	3913,1	18,2	0,05	0,1	0,02
Formação savânica	803,0	3,7	0,05	0,1	0,01
Infraestrutura urbana	325,9	1,5	0,18	0,1	0,01
Áreas não vegetadas	270,2	1,3	1	0,6	1,1
Pastagem	5288,9	24,6	0,45	0,3	0,27

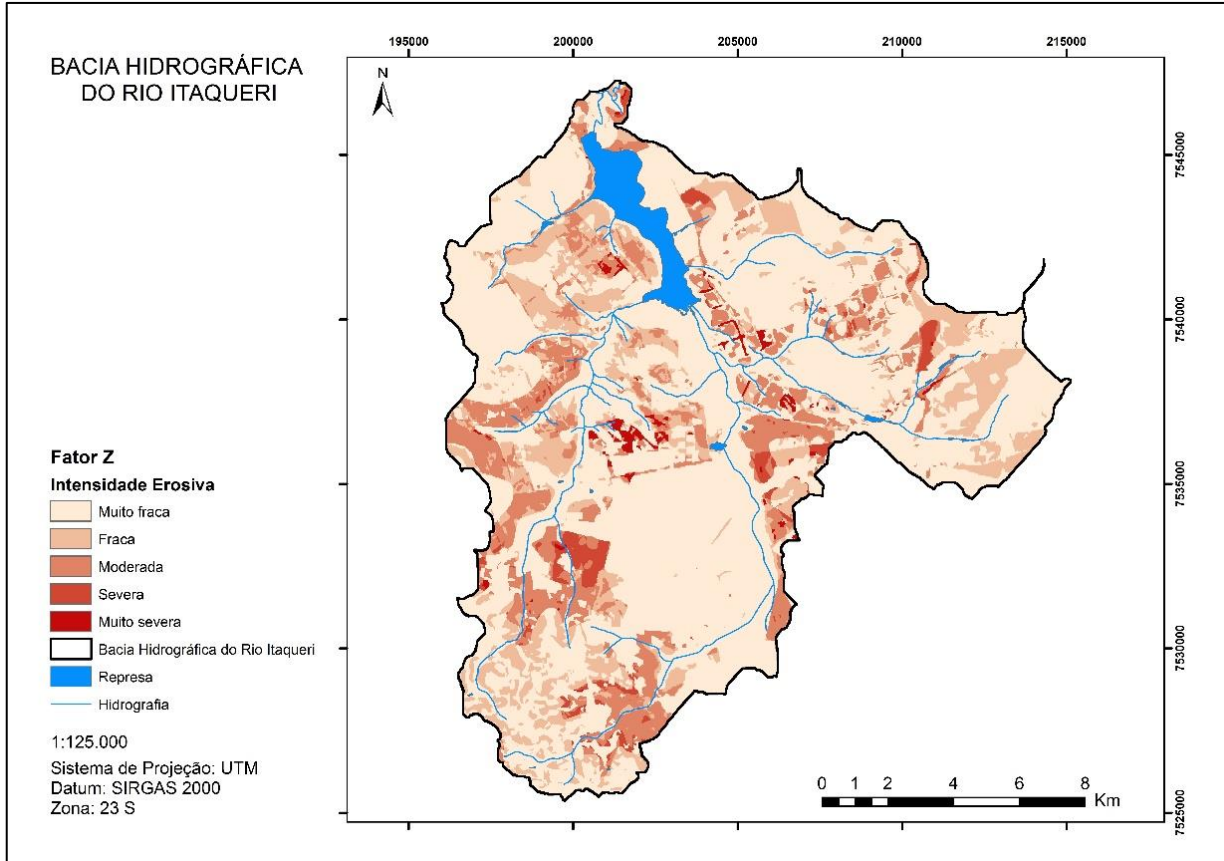
Legenda: X_a – coeficiente de uso e manejo do solo; ϕ – coeficiente de grau de feições erosivas; Z – coeficiente de erosão. Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 10 apresenta a espacialização dos tipos de erosão na bacia hidrográfica do rio Itaqueri. A erosão muito fraca foi a mais expressiva na bacia (68,7%), seguida da erosão fraca (17,2%), moderada (10,3%), severa (0,6%) e muito severa (0,3%). As regiões da bacia com erosão classificada como muito severa, severa e moderada correspondem às áreas sem vegetação que, embora representem apenas 1,22% da área bacia, estão localizadas na região central onde se encontra a nascente dos afluentes do Ribeirão do Lobo.

A espacialização da perda média anual de solo na bacia do rio Itaqueri é apresentada na Figura 11. A maior parte da bacia apresentou valores de perda de solo de até 1 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (41,38%). Ademais, 18,84% da bacia apresentaram perda de solo entre 1 e 5 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, 14,17% apresentaram perda entre 5,01 e 10 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, 8,12% apresentaram perda entre 10,01 e 20 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, 14,26% apresentaram perda entre 20,01 e 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e 3,23% apresentaram perda acima de 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹.

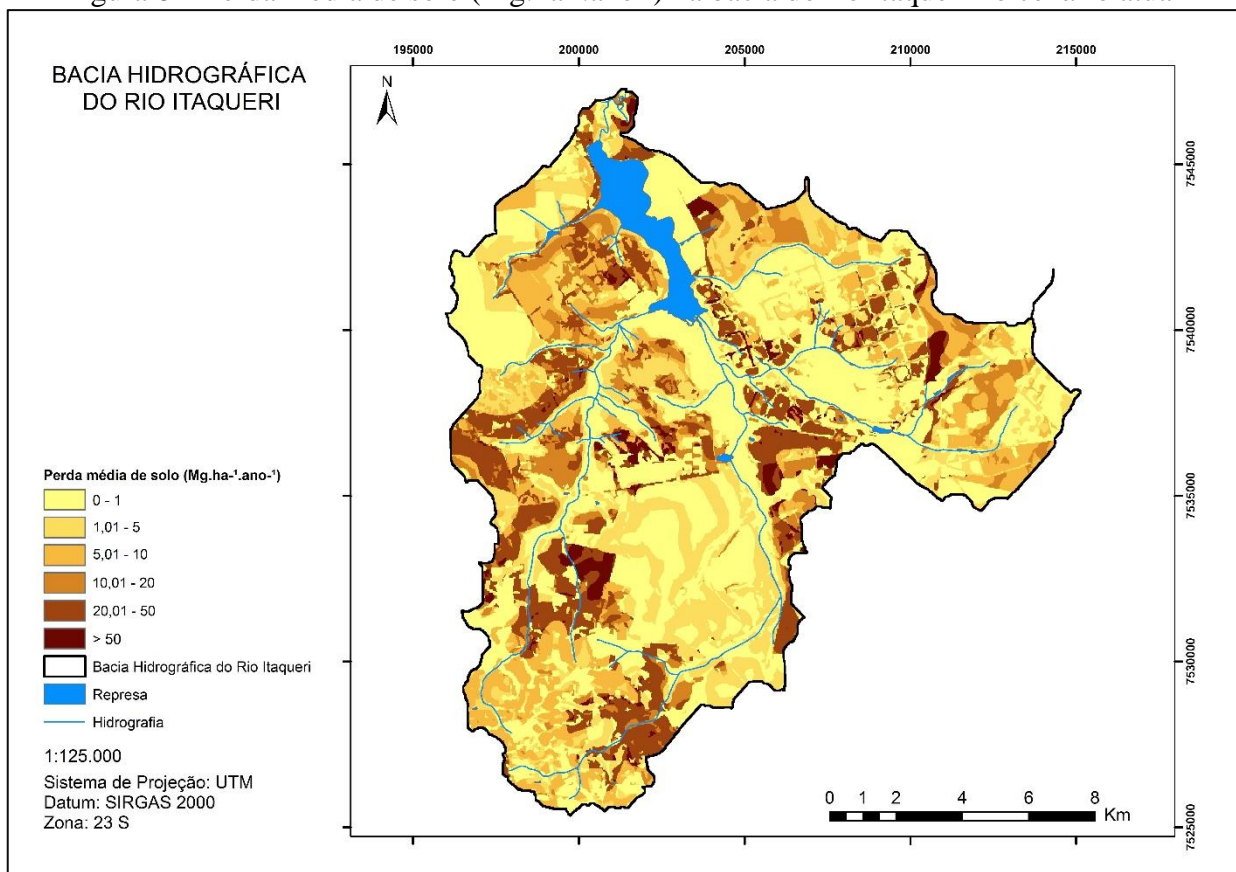
A produção média de sedimentos na bacia do rio Itaqueri em 2019 foi de 9,41 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, que corresponde a produção total de 208.467 Mg.ano⁻¹ considerando toda a área da bacia. O coeficiente R_u apresentou valor equivalente a 0,107 (10,7%). Desta forma, do total de sedimentos produzidos na bacia, 22.306 Mg.ano⁻¹ correspondem a perda real de solos que, conseqüentemente, atingirão as regiões mais baixas da bacia e contribuirão para o assoreamento do reservatório do Lobo.

Figura 5 - Tipos de erosão na bacia hidrográfica do rio Itaqueri no cenário atual



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6 – Perda média de solo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$) na bacia do rio Itaqueri no cenário atual



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 apresenta os percentuais que os fatores “uso e ocupação” e “tipos de solo” contribuíram na produção total de sedimentos na bacia do rio Itaqueri em 2019. Com relação aos usos e ocupação do solo, as áreas não vegetadas apresentaram a maior perda média de solo (103,93 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹), seguida das culturas perenes e semi-perenes (23,8 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ ambas). No entanto, considerando que as áreas de pastagem ocupam maior percentual de área na bacia (23,9%) estas apresentaram maior contribuição na produção de sedimentos da bacia (32,5%). Com relação aos tipos de solo, os Neossolos Litólicos e Quartzarênicos apresentaram os maiores valores de produção de sedimentos (18,74 e 16,26 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, respectivamente), no entanto, o Neossolo Quartzarênico apresentou mais de 81% de contribuição na produção de sedimentos na bacia devido aos 47,2% de área.

Tabela 8 – Percentual de contribuição de cada fator na produção de sedimentos na bacia

Fator	Área		Perda Média de Solo		Contribuição na	
	(ha)	(%)	(Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	(Mg.ano ⁻¹)	Perda de Solo (%)	
Uso e Ocupação	Cultura Anual e Perene	2368,2	10,7	23,86	56504	27,1
	Cultura Semi-Perene	1580,9	7,14	23,89	37768	18,1
	Floresta Plantada	4069,8	18,4	0,71	2889,6	1,4
	Formação Campestre	2922,7	13,2	4,92	14379	6,9
	Formação Florestal	3913,1	17,7	0,25	978,27	0,5
	Formação Savânica	803,0	3,63	0,15	120,45	0,1
	Infraestrutura Urbana	325,9	1,47	0,25	81,485	0,0
	Áreas não vegetadas	270,2	1,22	103,93	28079	13,5
	Pastagem	5288,9	23,9	12,8	67698	32,5
	Tipos de Solo	Argissolos vermelho-amarelos	1679,0	7,62	4,34	7287
Latosolos vermelho-amarelos		5340,5	24,2	3,7	19760	9,5
Latosolos vermelhos		621,2	2,82	3,29	2043,7	1,0
Neossolos Litólicos		403,1	1,83	18,74	7554,1	3,6
Neossolos Quartzarênicos		10392,9	47,2	16,26	168989	81,1
Nitossolos vermelhos		94,1	0,43	4,58	430,79	0,2
Organossolos háplicos		2421,7	10,5	0,94	2276,4	1,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 9 os valores de Tolerância de Perda de Solo e a produção de sedimentos de acordo com os tipos de solo na bacia do rio Itaqueri são apresentados. Considerando que os valores de TPS na bacia variaram entre 4,2 e 15 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹, a produção de sedimentos nas regiões com Neossolos Litólico e Quartzarênico apresentaram valores de acima dos limites de tolerância, sendo estes 18,7 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (TPS de 4,2 a 6,6 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹) e 16,3 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (TPS de 11,2 a 13,4 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹), respectivamente.

Tabela 9 - Tolerância de Perda de Solo (TPS) e produção de sedimentos na bacia do rio Itaqueri

Tipo de solo	Tolerância (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Perda de Solo em 2019 (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
Argissolo Vermelho-Amarelo	4,2 a 6,6	4,3
Latossolo Vermelho-Amarelo	13,4 a 14,2	3,7
Latossolo Vermelho	14,2 a 15	3,3
Neossolo Litólico	4,2 a 6,6	18,7
Neossolo Quartzarênico	11,2 a 13,4	16,3
Nitossolo Vermelho	11,2 a 13,4	4,6
Organossolo Háplico	6,6 a 11,2	0,9

Fonte: Elaborado pelo autor.

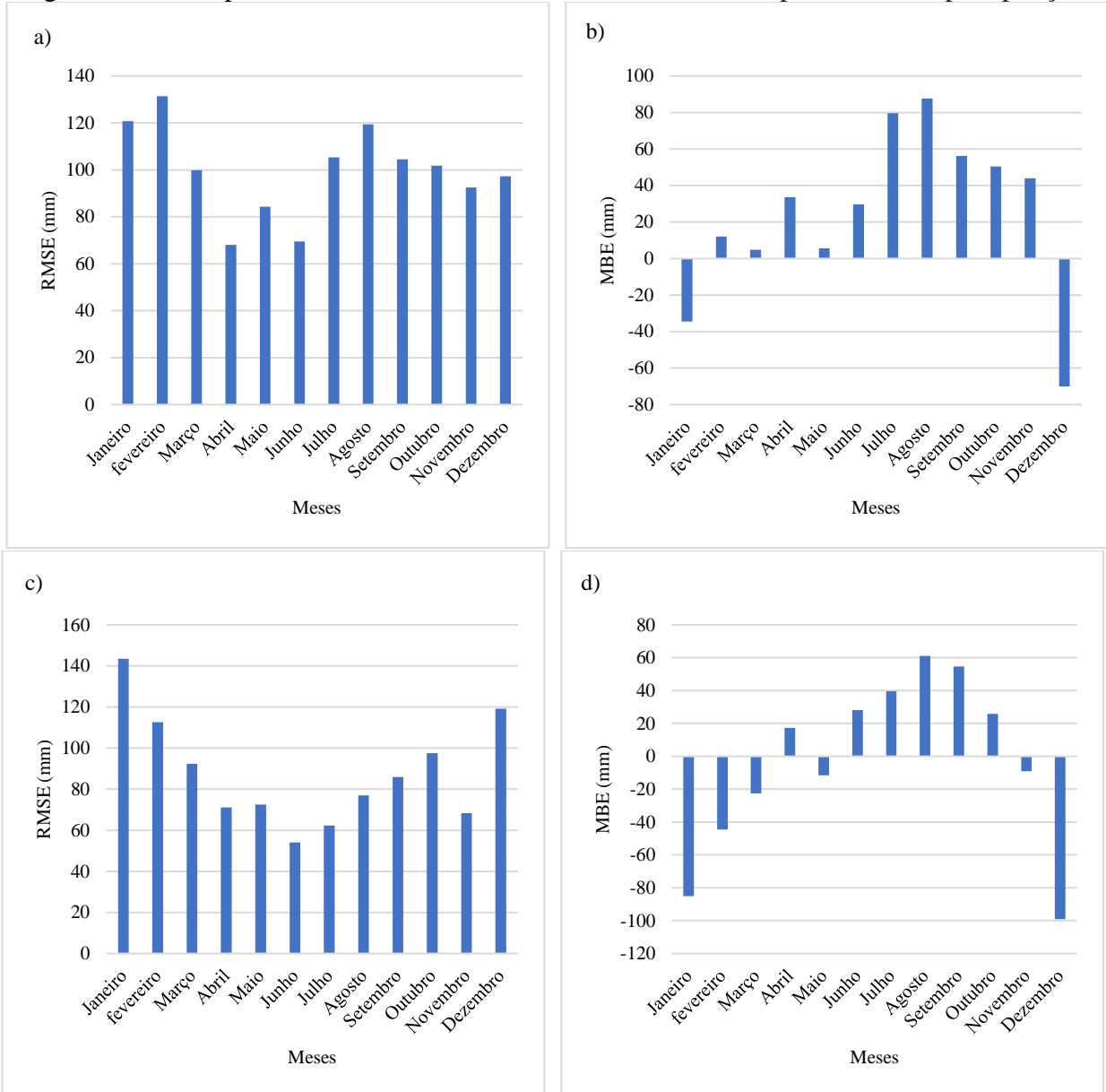
6.2. EFEITOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

6.2.1. Avaliação de desempenho e correção de viés

Os resultados dos índices de desempenho aplicados aos modelos ETA-MIROC e ETA-HadGEM2-ES são apresentados nas Figuras 7 e 8, para dados de precipitação e temperatura respectivamente. Comparados aos dados de precipitação observadas no período de referência, ambos os modelos climáticos apresentaram tendências a superestimar os dados de precipitação no período de seca (junho a outubro) e subestimar os dados de precipitação nos meses de dezembro e janeiro, meses chuvosos na bacia. Com relação aos dados projetados para temperatura do ar, as projeções do ETA-MIROC5 subestimaram todos os meses, ao contrário do ETA-HadGEM2-ES que superestimou todos os meses (com exceção dos meses de fevereiro e março).

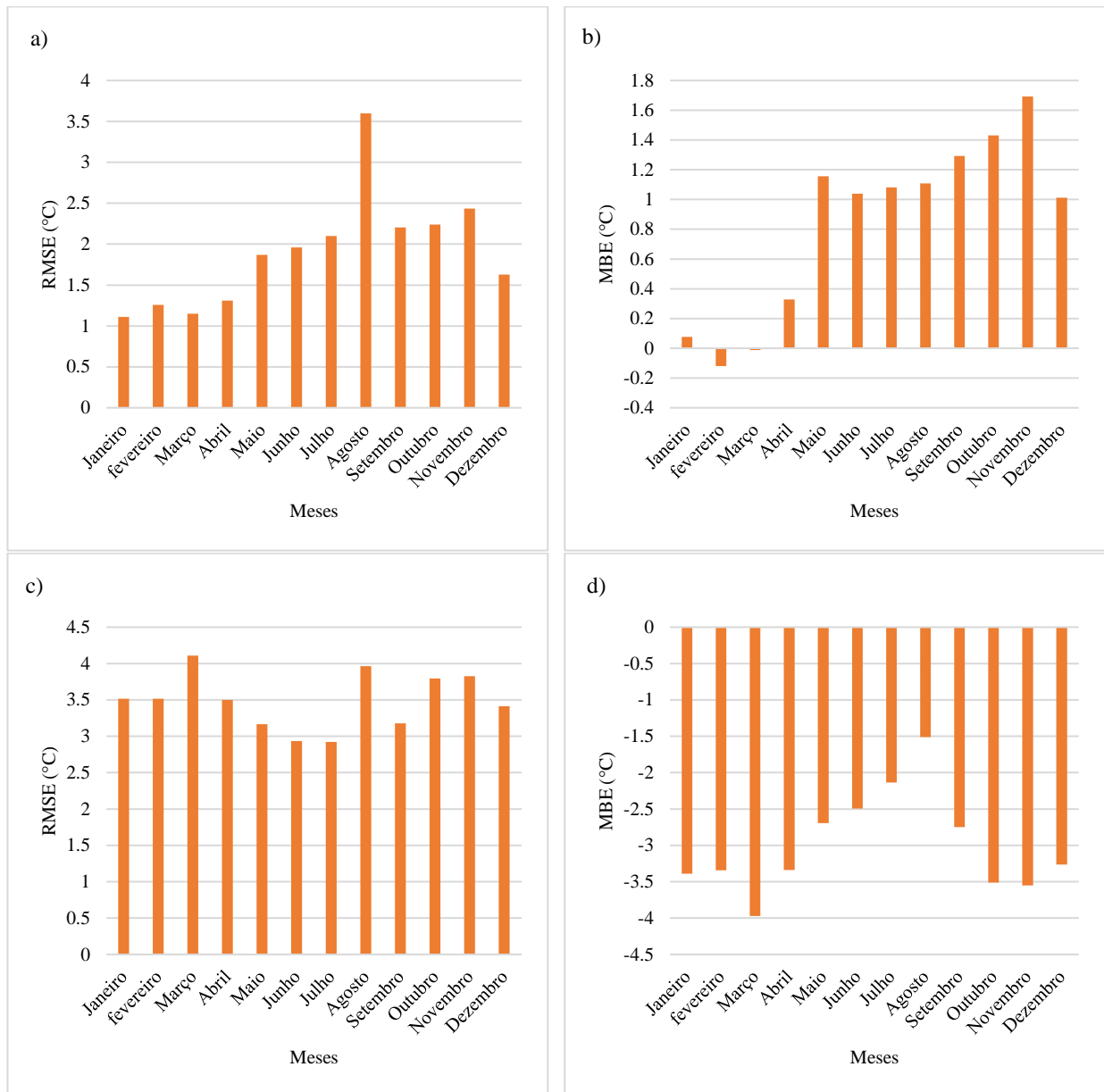
Na Figura 9 é apresentada a distribuição da precipitação média mensal observada, projetada pelos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES e corrigidas para o período de referência. No gráfico fica evidente a superestimação dos dados de precipitação no mês de julho, por exemplo, onde o valor observado foi de 24,3 mm enquanto os projetados foram 94,5 mm (ETA-MIROC5) e 101,2 mm (ETA-HadGEM2-ES). Após a obtenção dos fatores multiplicativos mensais para correção de viés (APÊNDICE A), os valores projetados foram corrigidos e apresentaram para o mês de julho valores equivalentes a 36,9 mm (ETA-MIROC5) e 24,3 mm (ETA-HadGEM-2). Os valores da precipitação média mensal corrigida para os anos de 2040, 2070 e 2099 para os modelos ETA-MIROC e ETA-HadGEM2-ES, bem como os dados projetados de temperatura média mensal do ar, são apresentados nos APÊNDICES B a M.

Figura 7 – Desempenho do ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 para dados de precipitação



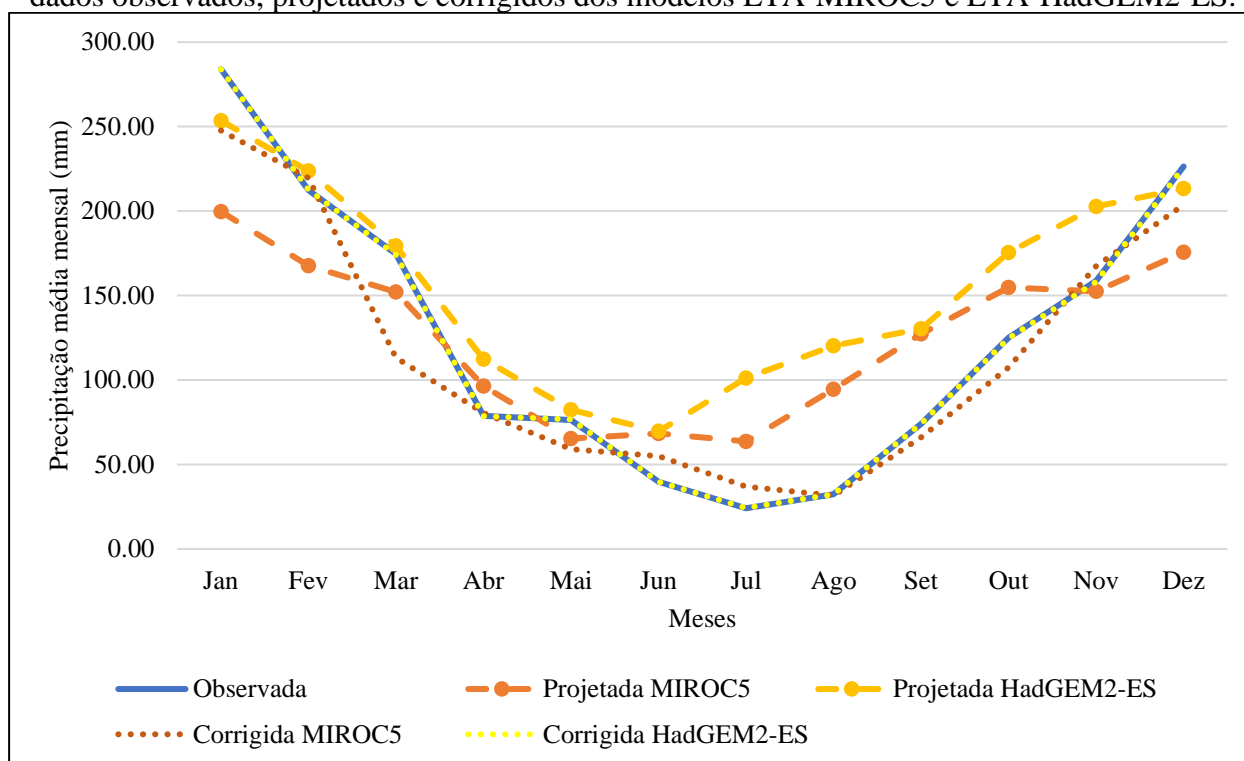
Legenda: a) RMSE para ETA-HadGEM2-ES; b) MBE para ETA-HadGEM2-ES; c) RMSE para ETA-MIROC5; d) MBE para ETA-MIROC5. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 - Desempenho do ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 para dados de temperatura



Legenda: a) RMSE para ETA-HadGEM2-ES; b) MBE para ETA-HadGEM2-ES; c) RMSE para ETA-MIROC5; d) MBE para ETA-MIROC5. Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 - Distribuição mensal da precipitação no período de referência (1981-2005) para os dados observados, projetados e corrigidos dos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 10 são apresentados os valores de precipitação média anual com correção ($H_{yr\ CV}$) e sem correção (H_{yr}) de viés, e os coeficientes de temperatura (T) usados para a estimativa da perda de solo nos períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 4.5 e 8.5. Sob RCP 4.5, para o período de 2070, as projeções de ambos os modelos sugerem anomalias positivas da precipitação média anual, sendo essas +51% ($H_{yr\ CV} = 1868,9$ mm) e +53,9% ($H_{yr} = 1904,2$ mm) para o ETA-MIROC e +5,7% ($H_{yr\ CV} = 1308,2$ mm) e +29,5 ($H_{yr} = 1602,6$ mm) para o ETA-HadGEM2-ES.

Sob RCP 8.5, as projeções de precipitação do ETA-MIROC5 (com e sem correção de viés) apresentaram anomalias positivas em todos os períodos futuros, ao contrário das projeções de precipitação do ETA-HadGEM2-ES que apresentaram anomalias negativas em todos os períodos futuros. Com relação ao coeficiente de temperatura, os dados projetados pelo ETA-MIROC5 apresentaram anomalias negativas para 2040 e 2070 (sob RCP 4.5) e 2040 e 2099 (RCP 8.5). Já os dados projetados pelo ETA-HadGEM2-ES apresentaram anomalias positivas em todos os períodos futuros para ambos os RCPs.

Tabela 10 - Valores de precipitação média anual, com e sem correção de viés, e coeficiente de temperatura sob RCPs 4.5 e 8.5 adotados para estimativa da perda de solo

		Período	H_{yr} (mm)	$H_{yr CV}$ (mm)	T
Modelo	RCP	2019	1237,65	-	1,48
ETA-MIROC5	4.5	2040	1173,64	1270,43	1,39
		2070	1868,91	1904,24	1,45
		2099	1121,81	1159,55	1,48
	8.5	2040	1502,91	1463,81	1,41
		2070	1373,35	1501,73	1,49
		2099	1339,19	1305,25	1,48
ETA-MIROC5	4.5	2040	794,01	1017,2	1,57
		2070	1308,18	1602,6	1,62
		2099	976,85	1180,61	1,66
	8.5	2040	653,05	877,02	1,63
		2070	855,31	1201,11	1,69
		2099	948,73	1186,95	1,78

Legenda: H_{yr} – Precipitação média anual (mm); $H_{yr CV}$ – Precipitação média anual com correção de viés (mm); T – coeficiente de temperatura. Fonte: Elaborado pelo autor.

6.2.2. Estimativas da perda de solo sob RCP 4.5

Na Tabela 11 as estatísticas básicas da perda de solo e as tendências da produção de sedimentos para os períodos projetados sob RCP 4.5 são apresentadas. Na Tabela 12 são apresentados os percentuais de classes de produção de sedimentos e a diferença de produção entre o cenário observado (2019) e os projetados para o RCP 4.5. A espacialização da produção média anual de sedimentos para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 4.5 com e sem correção de viés são apresentadas nas Figuras 10 e 11, respectivamente. Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as diferenças relativas entre a produção média anual de sedimentos do cenário atual e os períodos futuros com e sem correção de viés, respectivamente, sob RCP 4.5.

Considerando as projeções com correção de viés, os resultados do ETA-MIROC5 sugerem produção média de solo em toda a bacia equivalente a $330.921 \text{ Mg.ano}^{-1}$ (+58,7%) em 2070. Com esse acréscimo são esperados aumentos de 5,5% das áreas com produção entre $10,01$ e $20 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ e 6% com produção acima de $50 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. Para o mesmo período, os resultados do ETA-HadGEM2-ES sugerem um incremento de 23,9% na produção média anual de solo com relação ao cenário atual, ou seja, a produção média em toda bacia corresponderá a $258.269 \text{ Mg.ano}^{-1}$, com possíveis aumentos de 1,6% das áreas com produção acima de $50 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$. A diferença relativa entre a produção de sedimentos projetada para 2070 em comparação com o cenário atual apresentou tendências crescentes de até 143 e $64 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, de acordo com as projeções do ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, respectivamente.

Com relação às projeções sem correção de viés, os resultados do ETA-MIROC5 sugerem incremento na produção média anual de sedimentos em todos os períodos futuros, porém com maior expressividade no período de 2070 aonde a produção de sedimentos em toda a bacia chegará a 337.123 Mg.ano⁻¹ (+61,8%). Tal aumento será atribuído a 5,7% das áreas com produção de sedimentos entre 10,01 e 20 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ e 6,3% das áreas com produção acima de 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹. Os resultados do ETA-HadGEM2-ES sugerem um acréscimo de 51,8% da produção média anual de sedimentos em 2070, com produção total na bacia equivalente a 316.524 Mg.ano⁻¹. O aumento também ocorrerá principalmente em áreas com produção de sedimentos entre 10,01 e 20 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (+4,8%) e com produção acima de 50 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ (+5,2%). As projeções com dados sem correção apresentaram diferenças relativas de até 149,8 e 127,3 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹ para ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES, respectivamente, em 2070.

Tabela 11 - Estatísticas básicas da perda de solo (Mg.ha⁻¹.ano⁻¹) e percentual de diferença da produção de sedimentos para os períodos futuros, sob RCP 4.5, em relação ao cenário de 2019

RCP 4.5	Modelo	Período	Mín.	Méd.	Máx.	D.P.	Produção total (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	Diferença de 2019 (%)
		2019	1,74E-15	9,41	230,58	18,18	208.431,5	
Com correção	ETA-MIROC5	2040	1,50E-15	8,95	215,83	17,31	198.242,5	-4,9
		2070	2,51E-15	14,94	360,19	28,88	330.921,5	58,7
		2099	1,53E-15	9,13	220,16	17,65	202.229,5	-3
	ETA-HadGEM2-ES	2040	1,15E-15	6,87	165,59	13,28	152.170,5	-27
		2070	1,96E-15	11,66	281,2	22,55	258.269,0	23,9
		2099	1,50E-15	8,92	215,03	17,24	197.578,0	-5,2
Sem correção	ETA-MIROC5	2040	1,63E-15	9,69	233,63	18,73	214.633,5	3
		2070	2,55E-15	15,22	366,99	29,43	337.123,0	61,8
		2099	1,58E-15	9,44	227,57	18,25	209.096,0	0,3
	ETA-HadGEM2-ES	2040	1,48E-15	8,8	212,14	17,01	194.920,0	-6,5
		2070	2,40E-15	14,29	344,48	27,62	316.523,5	51,8
		2099	1,81E-15	10,78	259,89	20,84	238.777,0	14,6

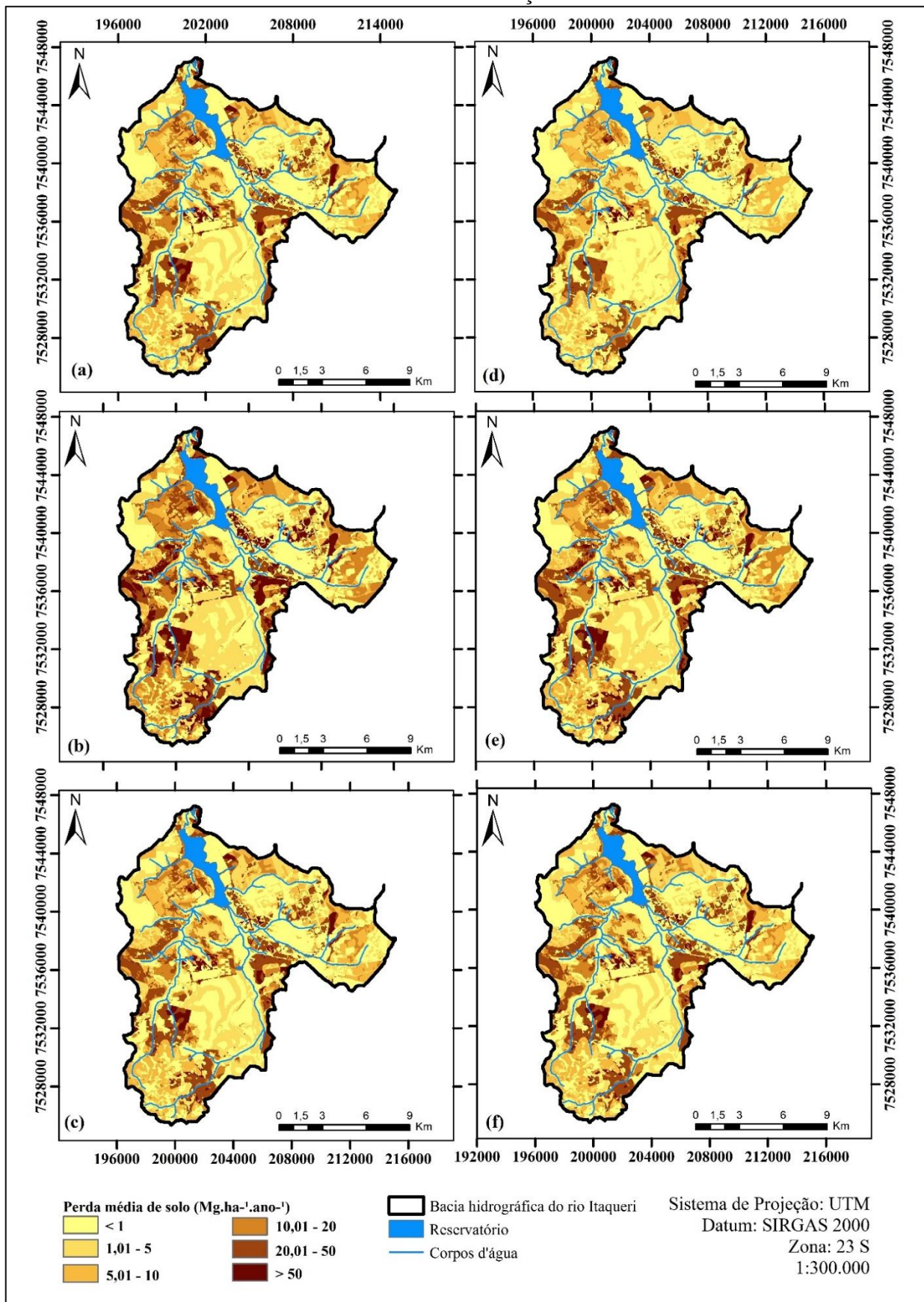
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12 - Percentuais das classes de produção de sedimentos e respectivas diferenças entre a produção estimada em 2019 e projetadas para períodos futuros sob RCP 4.5

Período	RCP 4.5	Com correção de viés				Sem correção de viés			
	Perda de solo (Mg.ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	ETA-MIROC5		ETA-HadGEM2-ES		ETA-MIROC5		ETA-HadGEM2-ES	
		%	% dif.	%	% dif.	%	% dif.	%	% dif.
2040	< 1	43,0	1,6	47,3	5,9	41,9	0,6	43,2	1,8
	1,01 a 5	19,2	0,4	20,4	1,6	19,0	0,2	19,3	0,4
	5,01 a 10	14,4	0,3	12,2	-1,9	14,1	0,0	14,5	0,3
	10,01 a 20	7,7	-0,4	8,5	0,4	7,9	-0,2	7,7	-0,4
	20,01 a 50	13,3	-1,0	10,3	-3,9	14,1	-0,1	13,1	-1,2
	> 50	2,4	-0,9	1,2	-2,1	2,9	-0,4	2,3	-1,0
2070	< 1	36,6	-4,8	39,5	-1,9	36,4	-5,0	37,1	-4,3
	1,01 a 5	17,9	-0,9	18,3	-0,6	18,0	-0,9	17,9	-0,9
	5,01 a 10	11,1	-3,0	14,0	-0,2	10,9	-3,3	11,8	-2,4
	10,01 a 20	13,6	5,5	9,7	1,5	13,9	5,7	12,9	4,8
	20,01 a 50	11,5	-2,7	13,8	-0,4	11,4	-2,9	12,0	-2,3
	> 50	9,2	6,0	4,8	1,6	9,5	6,3	8,4	5,2
2099	< 1	42,7	1,3	43,0	1,7	42,3	0,9	40,5	-0,9
	1,01 a 5	19,2	0,3	19,2	0,4	19,0	0,2	18,5	-0,3
	5,01 a 10	14,3	0,2	14,4	0,3	14,3	0,1	14,3	0,1
	10,01 a 20	7,7	-0,4	7,7	-0,4	7,8	-0,3	8,6	0,5
	20,01 a 50	13,6	-0,7	13,2	-1,0	14,0	-0,3	14,2	0,0
	> 50	2,5	-0,7	2,4	-0,9	2,7	-0,6	3,8	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

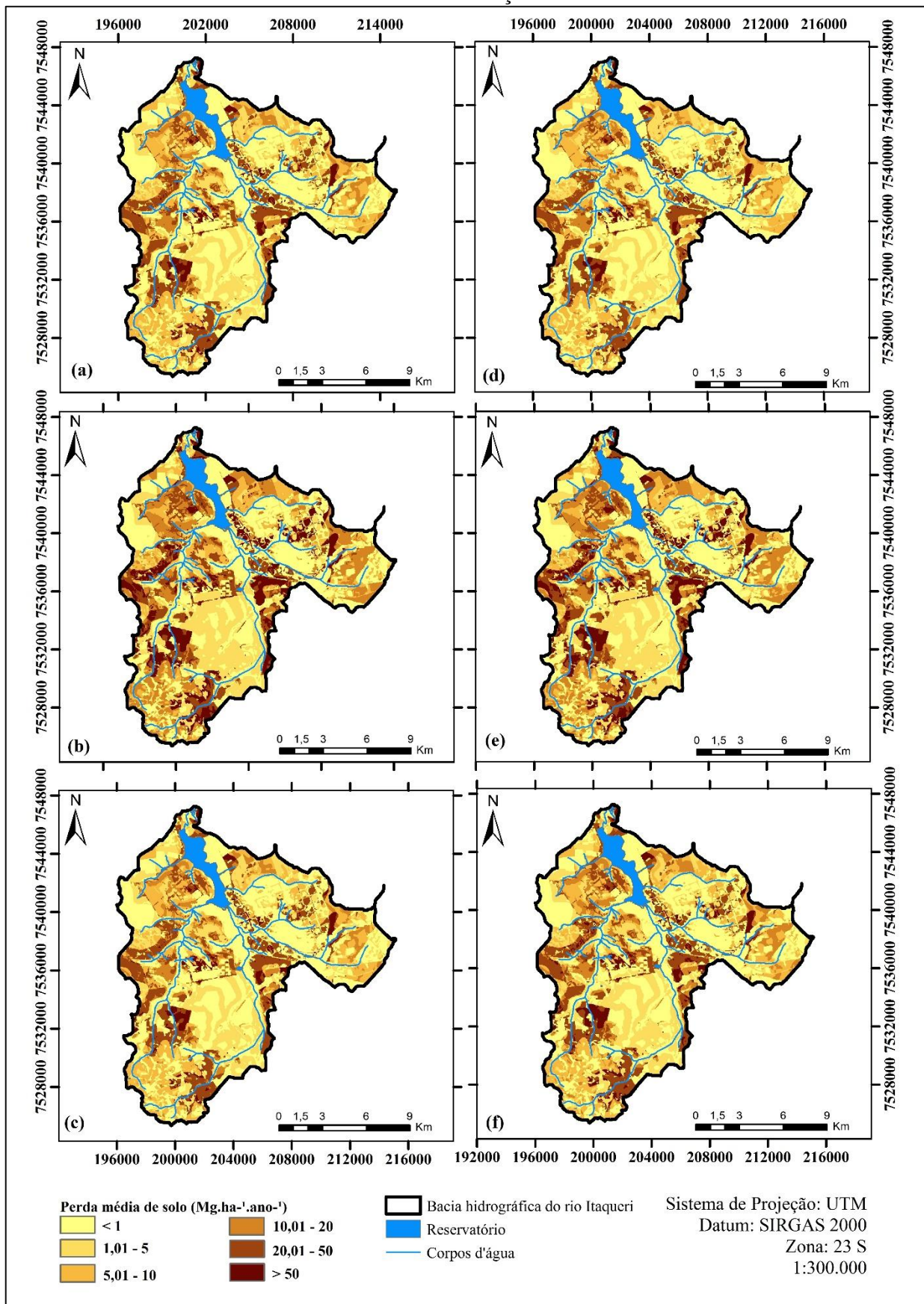
Figura 10 - Perda média de solo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$) estimada para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 4.5 com correção de viés



Nota: ETA-MIROC5 (a) 2040; (b) 2070; (c) 2099; ETA-HadGEM2-ES (d) 2040; (e) 2070; (f) 2099.

Fonte: Elaborado pelo autor

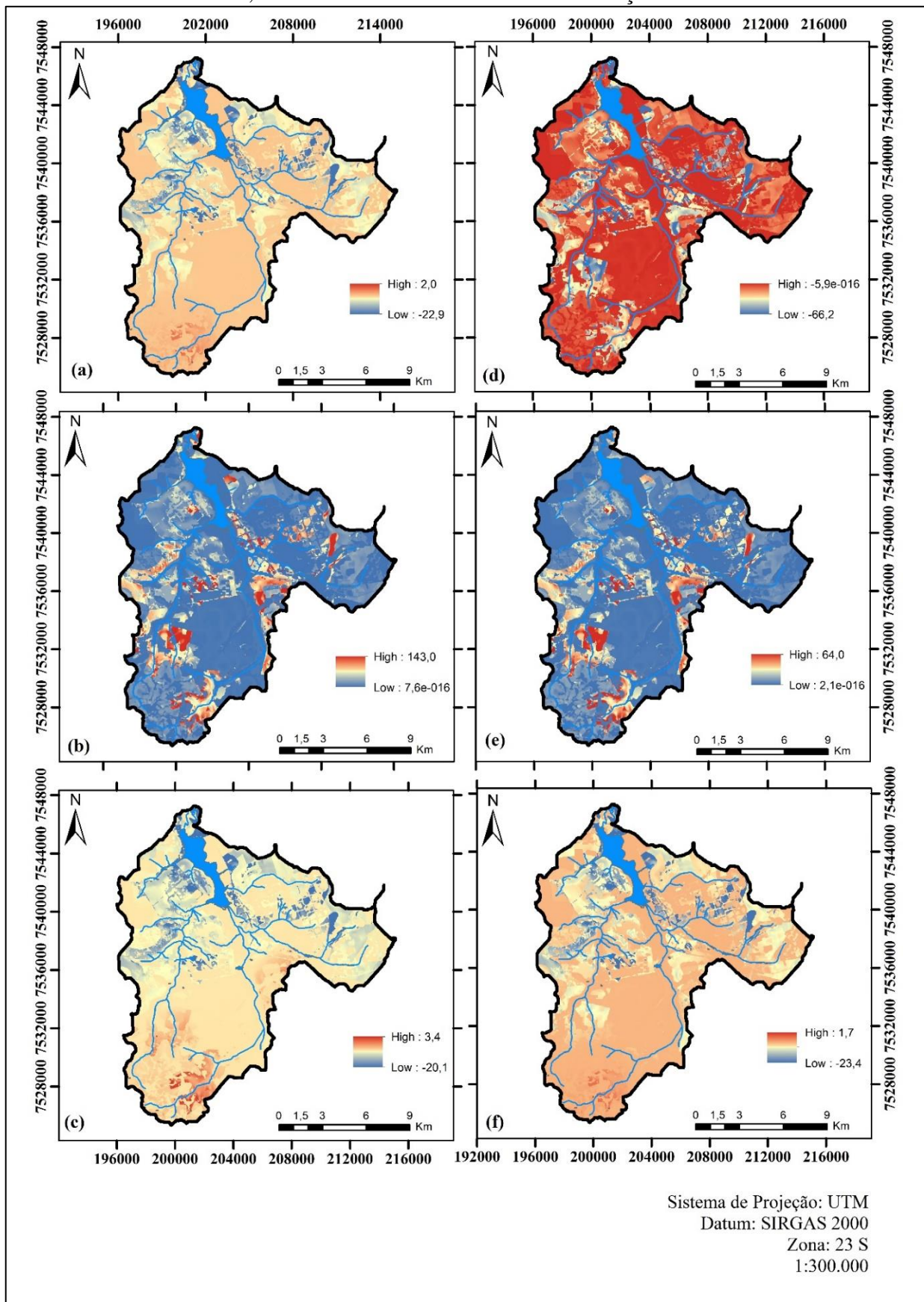
Figura 11- Perda média de solo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$) estimada para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 4.5 sem correção de viés



Nota: ETA-MIROC5 (a) 2040; (b) 2070; (c) 2099; ETA-HadGEM2-ES (d) 2040; (e) 2070; (f) 2099.

Fonte: Elaborado pelo autor

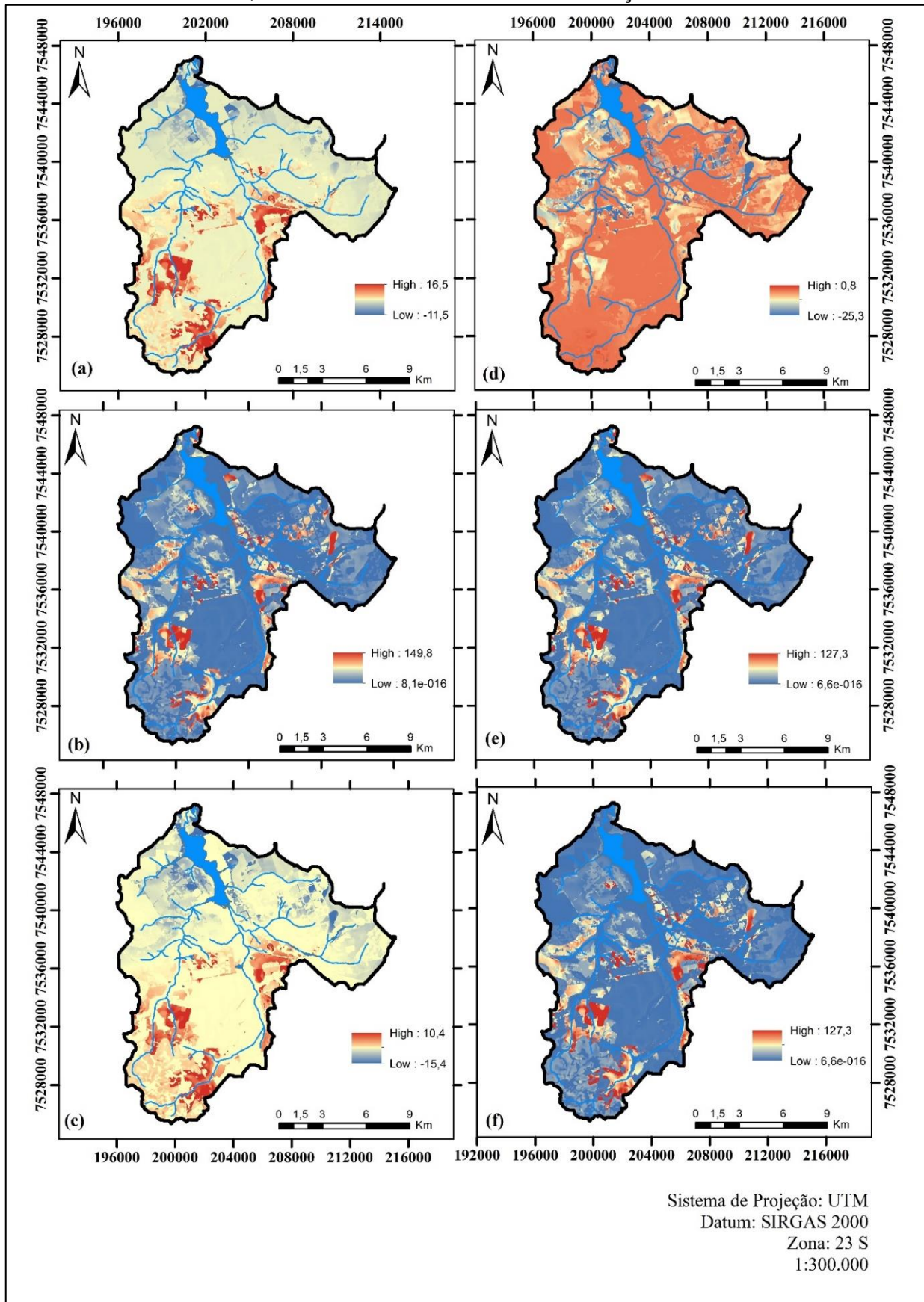
Figura 12 - Diferença relativa entre a perda de solo estimada para o cenário atual e os períodos 2040, 2070 e 2099 sob o RCP 4.5 com correção de viés



Nota: ETA-MIROC5 (a) 2040; (b) 2070; (c) 2099; ETA-HadGEM2-ES (d) 2040; (e) 2070; (f) 2099.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 - Diferença relativa entre a perda de solo estimada para o cenário atual e os períodos 2040, 2070 e 2099 sob o RCP 4.5 sem correção de viés



Nota: ETA-MIROC5 (a) 2040; (b) 2070; (c) 2099; ETA-HadGEM2-ES (d) 2040; (e) 2070; (f) 2099.

Fonte: Elaborado pelo autor

6.2.3. Estimativas da perda de solo sob RCP 8.5

Na Tabela 13 as estatísticas básicas da perda de solo e as tendências da produção de sedimentos para os períodos projetados sob RCP 8.5 são apresentadas. Na Tabela 14 são apresentados os percentuais de classes de produção de sedimentos e a diferença de produção entre o cenário observado (2019) e os projetados para o RCP 8.5. A espacialização da produção média anual de sedimentos para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 8.5 com e sem correção de viés são apresentadas nas Figuras 14 e 15, respectivamente. Nas Figuras 16 e 17 são apresentadas as diferenças relativas entre a produção média anual de sedimentos do cenário atual e os períodos futuros com e sem correção de viés, respectivamente, sob RCP 8.5.

Considerando as projeções com correção de viés, o modelo ETA-MIROC5 sugere aumento da produção de sedimentos em todos os períodos. Especificamente em 2040, a produção média de sedimentos estimada foi de $11,64 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (+23,7% com relação a produção média anual de 2019), ou seja, produção total de $257.826 \text{ Mg.ano}^{-1}$ em toda a bacia. Os aumentos são sugeridos nas áreas com produção entre $10,01$ e $20 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (+1,5%) e acima de $50 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (+1,5%). A diferença relativa entre a produção de sedimentos desse período em relação ao estimado para o cenário atual apresentou tendências crescentes de até $63,4 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$, principalmente nas cabeceiras dos afluentes.

Ao contrário destes, os resultados das projeções do ETA-HadGEM2-ES com correção de viés apresentaram estimativas da produção de sedimentos para os períodos inferiores ao valor médio anual estimado em 2019, chegando a decréscimo de 37,7% em 2040 ($5,87 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ ou $130.021 \text{ Mg.ano}^{-1}$). No entanto, mesmo havendo estimativas de redução da produção média anual de sedimentos, há tendências de aumento das áreas com produção de sedimentos de $10,01$ a $20 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (+1,7%). A diferença relativa entre a produção de sedimentos nos períodos futuros projetados pelo ETA-HadGEM2-ES e o cenário atual apresentou tendência crescente baixa ($7,2 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$) para 2099 e decrescentes para todos os demais períodos.

Considerando as projeções sem correção de viés, as estimativas de ambos os modelos apresentaram aumento da produção média anual de sedimentos em todos os períodos, comparados ao cenário de 2019, com exceção do período 2040 do ETA-HadGEM2-ES. O modelo ETA-MIROC5 sugere incremento nas áreas com produção de sedimentos acima de $50 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ em 1,2% (2040), 2,3% (2070) e 1,5% (2099). Da mesma forma, no ETA-HadGEM2-ES, as áreas com produção acima de $50 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ sofrerão aumentos de 1,0% e 1,5% nos períodos 2070 e 2099, respectivamente. As projeções do ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES apresentam tendências crescentes que chegam a $78,9 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (em 2070) e $63,5 \text{ Mg.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ (em 2099), respectivamente.

Tabela 13 - Estatísticas básicas da perda de solo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$) e percentual de diferença da produção de sedimentos para os períodos futuros, sob RCP 8.5, em relação ao cenário de 2019

RCP 8.5	Modelo	Período	Mín.	Méd.	Máx.	D.P.	Produção total ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$)	Diferença de 2019 (%)
		2019	1,74E-15	9,41	230,6	18,2	208.431,5	(%)
Com correção	ETA-MIROC5	2040	1,95E-15	11,64	280,59	22,5	257.826,0	23,7
		2070	1,88E-15	11,23	270,75	21,71	248.744,5	19,3
		2099	1,83E-15	10,88	262,34	21,04	240.992,0	15,6
	ETA-HadGEM2-ES	2040	9,84E-15	5,87	141,41	11,34	130.020,5	-37,7
		2070	1,33E-15	7,95	191,77	15,38	176.092,5	-15,5
		2099	1,56E-15	9,31	224,34	17,99	206.216,5	-1,1
Sem correção	ETA-MIROC5	2040	1,90E-15	11,34	273,29	21,91	251.181,0	20,5
		2070	2,06E-15	12,28	296,06	23,74	272.002,0	30,5
		2099	1,78E-15	10,61	255,69	20,5	235.011,5	12,7
	ETA-HadGEM2-ES	2040	1,32E-15	7,88	189,91	15,23	174.542,0	-16,3
		2070	1,87E-15	11,17	269,3	21,59	247.415,5	18,7
		2099	1,95E-15	11,64	280,68	22,51	257.826,0	23,7

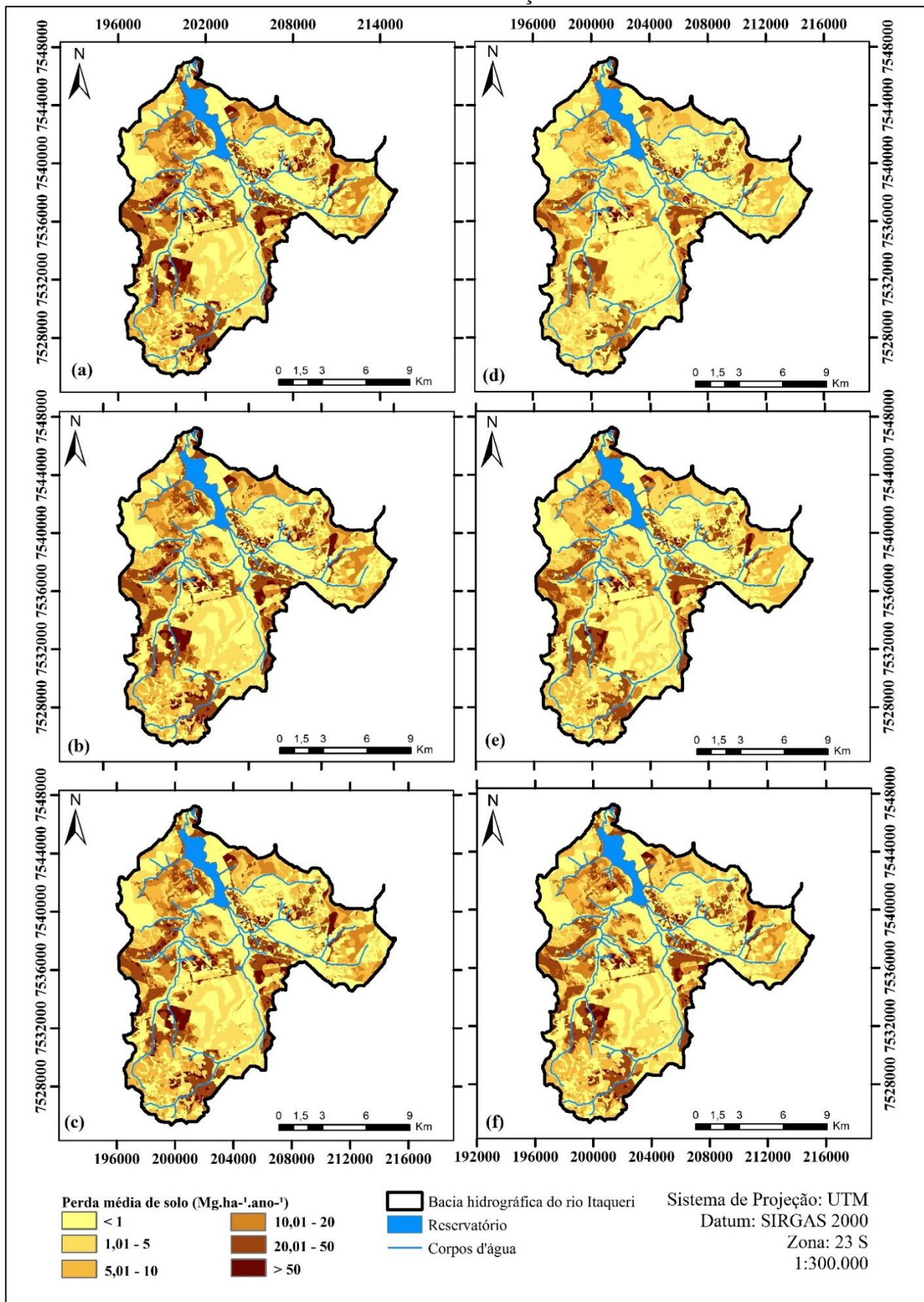
Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 - Percentuais das classes de produção de sedimentos e respectivas diferenças entre a produção estimada em 2019 e projetadas para períodos futuros sob RCP 8.5

Período	RCP 8.5	Com correção de viés				Sem correção de viés			
	Perda de solo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$)	ETA-MIROC5 %	% dif.	ETA-HadGEM2-ES %	% dif.	ETA-MIROC5 %	% dif.	ETA-HadGEM2-ES %	% dif.
2040	< 1	39,5	-1,9	49,5	8,1	39,9	-1,5	45,0	3,6
	1,01 a 5	18,3	-0,6	22,1	3,3	18,3	-0,6	19,5	0,7
	5,01 a 10	14,0	-0,2	9,7	-4,4	14,2	0,0	14,1	-0,1
	10,01 a 20	9,6	1,5	9,8	1,7	9,3	1,1	7,9	-0,2
	20,01 a 50	13,8	-0,4	8,0	-6,3	14,0	-0,2	11,8	-2,5
	> 50	4,8	1,5	0,9	-2,3	4,4	1,2	1,8	-1,5
2070	< 1	40,0	-1,4	44,8	3,4	38,9	-2,5	40,0	-1,4
	1,01 a 5	18,3	-0,5	19,5	0,7	18,1	-0,7	18,4	-0,5
	5,01 a 10	14,2	0,1	14,1	0,0	13,6	-0,6	14,3	0,1
	10,01 a 20	9,1	1,0	7,9	-0,2	10,5	2,4	9,0	0,9
	20,01 a 50	14,1	-0,2	11,9	-2,4	13,4	-0,9	14,1	-0,2
	> 50	4,3	1,1	1,8	-1,4	5,6	2,3	4,2	1,0
2099	< 1	40,3	-1,0	42,5	1,1	39,5	-1,9	39,5	-1,9
	1,01 a 5	18,5	-0,4	19,1	0,2	18,3	-0,6	18,3	-0,6
	5,01 a 10	14,3	0,2	14,3	0,1	14,0	-0,2	14,0	-0,2
	10,01 a 20	8,7	0,6	7,8	-0,4	9,6	1,5	9,6	1,5
	20,01 a 50	14,2	-0,1	13,8	-0,5	13,9	-0,4	13,9	-0,4
	> 50	3,9	0,7	2,6	-0,6	4,8	1,5	4,8	1,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

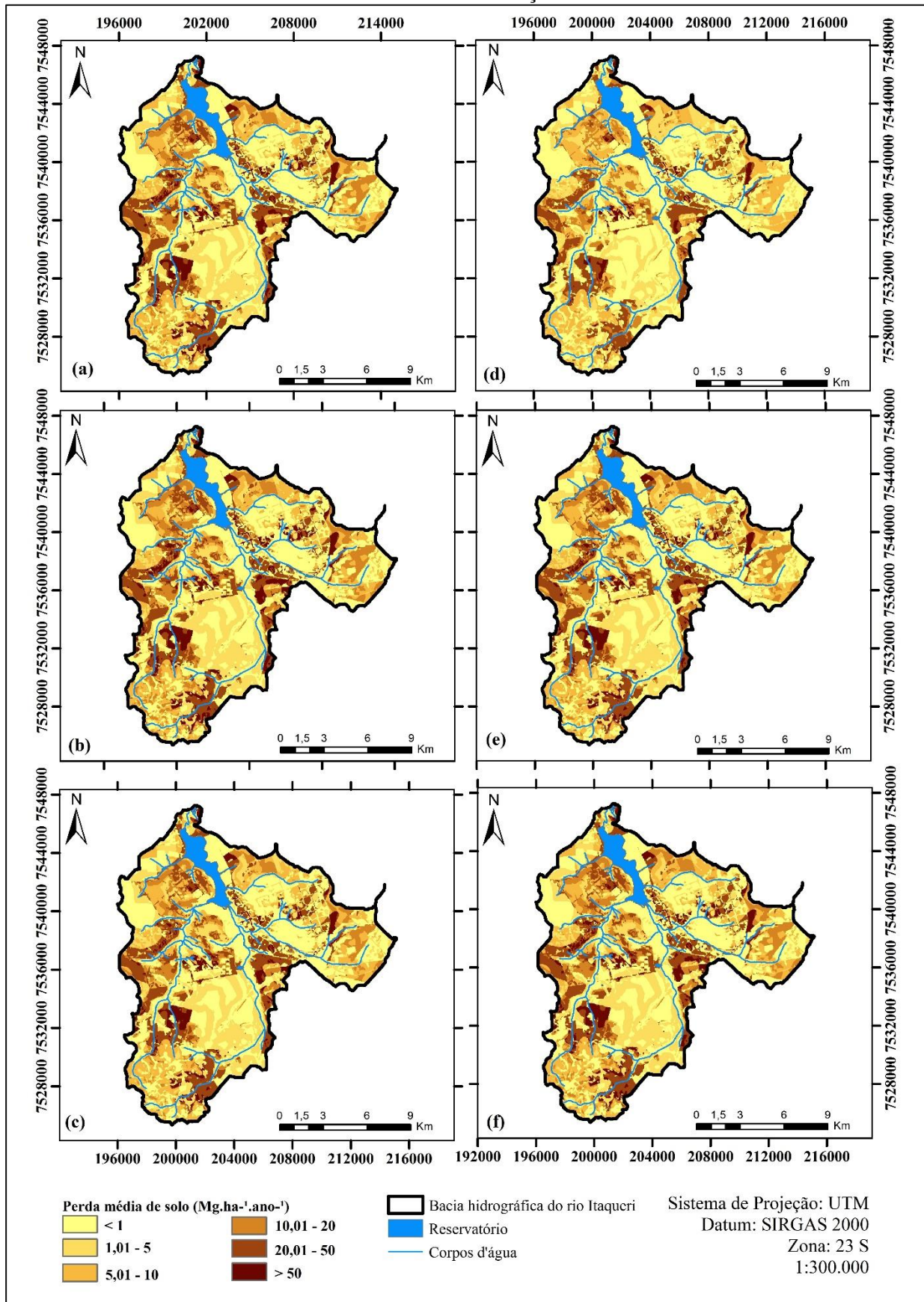
Figura 14 - Perda média de solo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$) estimada para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 8.5 com correção de viés



Nota: ETA-MIROC5 (a) 2040; (b) 2070; (c) 2099; ETA-HadGEM2-ES (d) 2040; (e) 2070; (f) 2099.

Fonte: Elaborado pelo autor

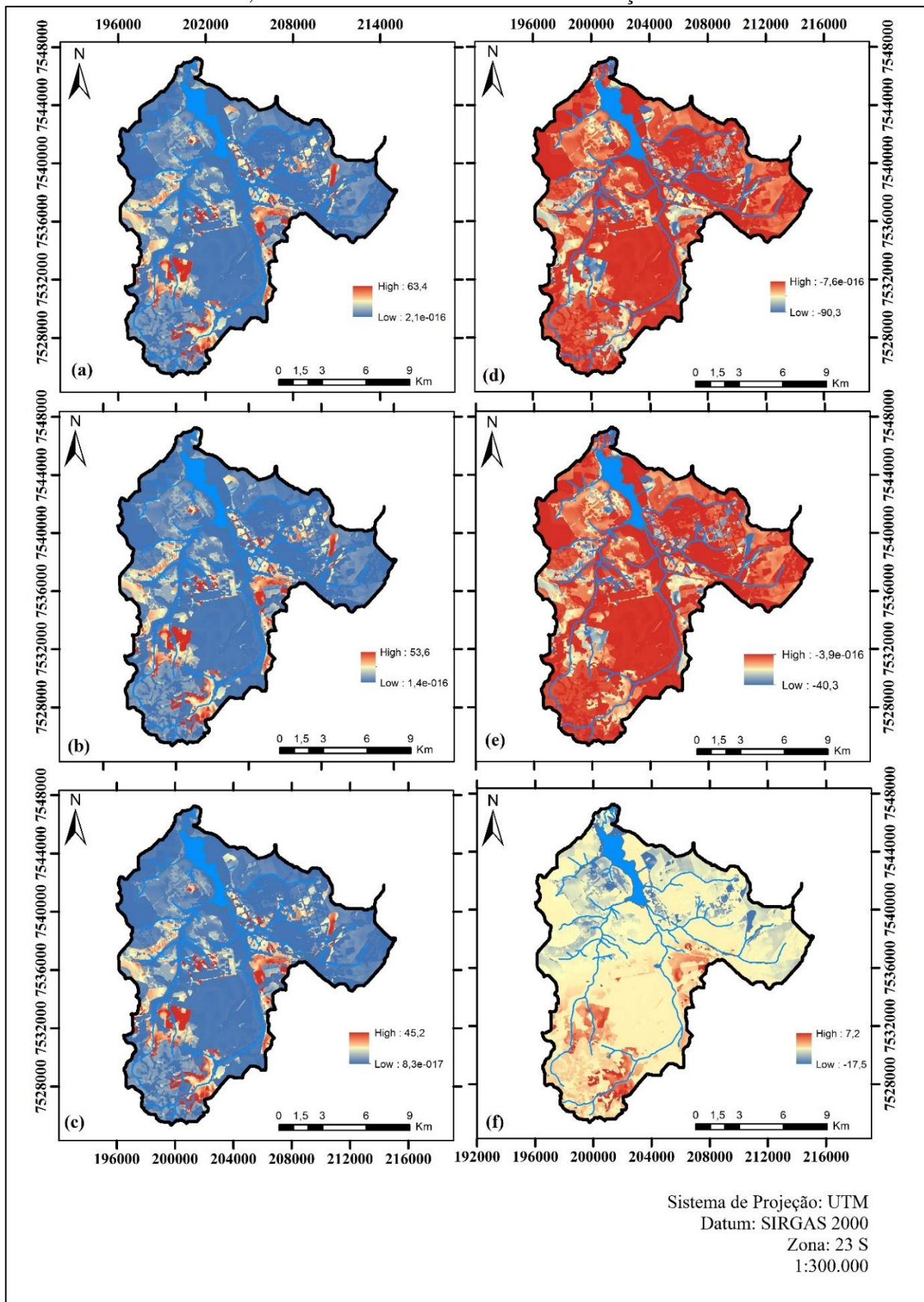
Figura 15 - Perda média de solo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$) estimada para os períodos 2040, 2070 e 2099 sob RCP 8.5 sem correção de viés



Nota: ETA-MIROC5 (a) 2040; (b) 2070; (c) 2099; ETA-HadGEM2-ES (d) 2040; (e) 2070; (f) 2099.

Fonte: Elaborado pelo autor

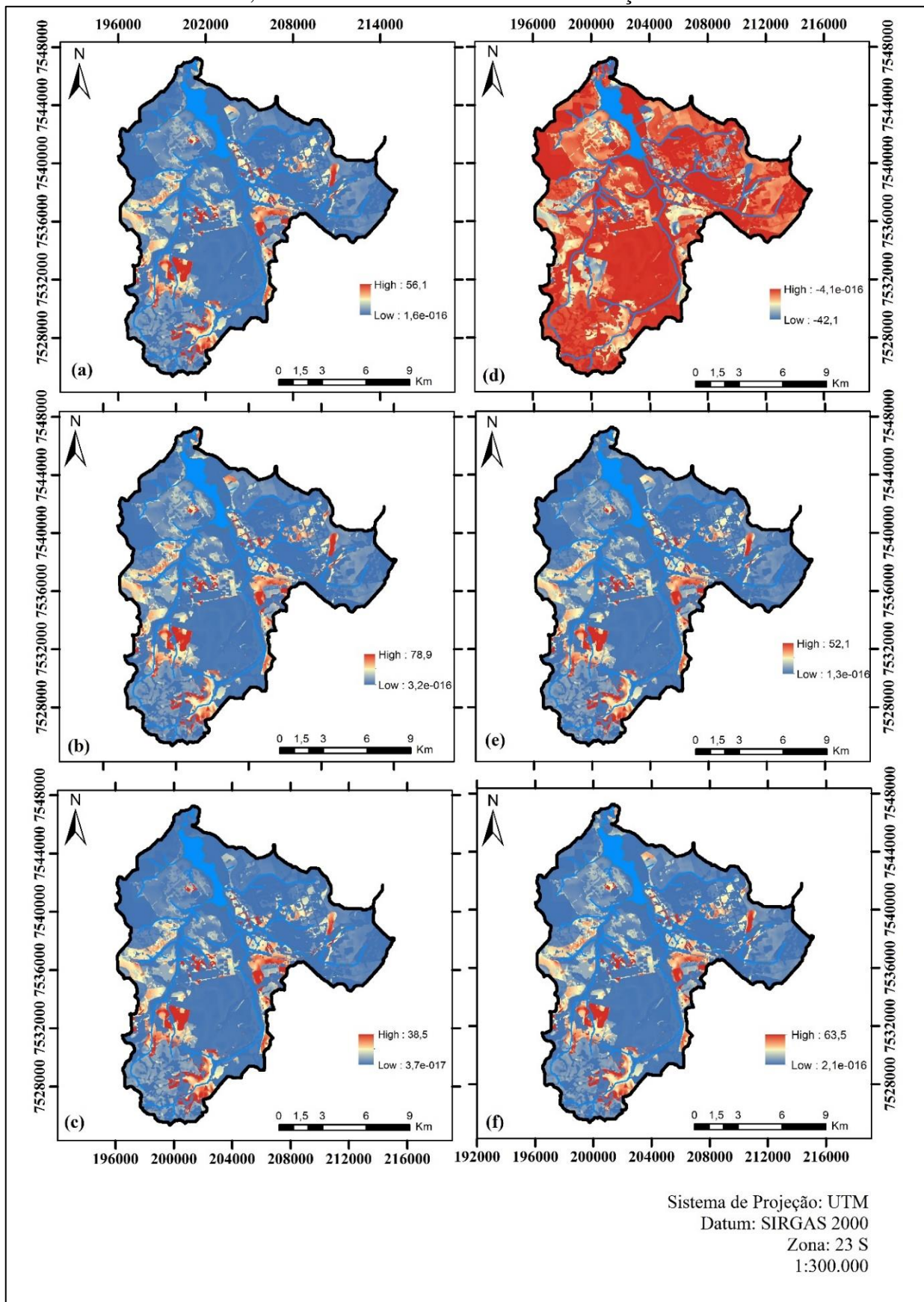
Figura 16 - Diferença relativa entre a perda de solo estimada para o cenário atual e os períodos 2040, 2070 e 2099 sob o RCP 8.5 com correção de viés



Nota: ETA-MIROC5 (a) 2040; (b) 2070; (c) 2099; ETA-HadGEM2-ES (d) 2040; (e) 2070; (f) 2099.

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 17- Diferença relativa entre a perda de solo estimada para o cenário atual e os períodos 2040, 2070 e 2099 sob o RCP 8.5 sem correção de viés



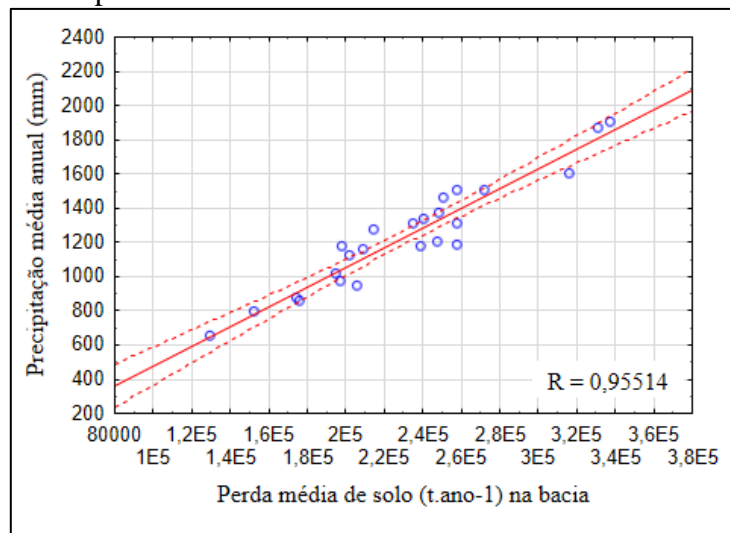
Nota: ETA-MIROC5 (a) 2040; (b) 2070; (c) 2099; ETA-HadGEM2-ES (d) 2040; (e) 2070; (f) 2099.

Fonte: Elaborado pelo autor

6.2.4. Comparação multicenários e análise de correlação

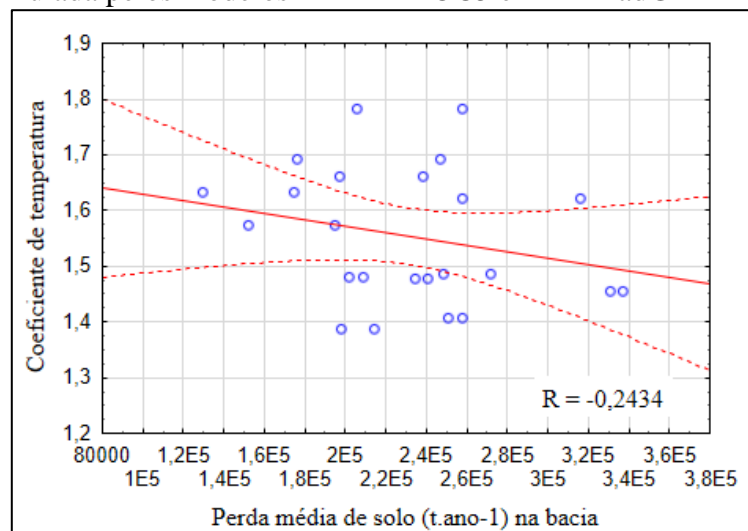
De acordo com os resultados dos testes não paramétricos de Mann Whitney e Kruskal-Wallis, os resultados da produção média anual de sedimentos não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os tipos de dados (corrigidos e não corrigidos), períodos (2019, 2040, 2070, 2099) e modelos (ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES). Na Figura 18 é apresentada a correlação entre precipitação média anual e produção média anual de sedimentos. Da mesma forma, na Figura 19 é apresentada a correlação entre o coeficiente de temperatura e produção média anual de sedimentos. Os gráficos apresentam que a precipitação média anual apresentou forte correlação positiva com a produção de sedimentos ($R=0,96$), enquanto o coeficiente de temperatura apresentou fraca correlação negativa ($R=0,24$).

Figura 18 - Correlação entre precipitação média anual e produção média de sedimentos simulada pelos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 - Correlação entre coeficiente de temperatura e produção média de sedimentos simulada pelos modelos ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES.



Fonte: Elaborado pelo autor

7. DISCUSSÃO

7.1. INTENSIDADE EROSIVA E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Por meio do estudo de modelagem de erosão é possível definir áreas prioritárias para conter as perdas de solo (PINTO et al., 2020), balanço hidrossedimentológico, manutenção de serviços ambientais e ecossistêmicos, qualidade da água e do solo (SERVIDONI et al., 2016) e sustentabilidade agrícola (SERVIDONI et al., 2019). Na bacia hidrográfica do rio Itaqueri a erosão média foi de 0,18 (coeficiente Z), classificada como erosão muito fraca. A produção média anual de sedimentos na bacia foi de 9,41 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹. Considerando que mais de 49% da área da bacia do rio Itaqueri é formada por Neossolos Quartzarênicos – responsáveis por 81,1% da contribuição total de perdas dentre os tipos de solo – e que estes apresentaram valores de produção de sedimentos acima dos limites do TPS, o valor da produção média anual de solo carece de atenção.

Os Neossolos Quartzarênicos são solos pouco desenvolvidos, com alteração incompleta dos minerais que compõem o substrato pedogenético (ARROIO JUNIOR, 2013). Possuem alta fração areia (cerca de 90%), características de alta porosidade e, de acordo com Bunemann et al. (2018), apresentam grande susceptibilidade à erosão por serem mais frágeis que os solos com alto teor de argila. Na bacia do rio Itaqueri, mais de 71% do território (com exceção do extremo sul) pertence a grupos hidrológicos com características de solos porosos, de textura arenosa ou média, profundos (100 a 200 cm), como as regiões de Neossolos Quartzarênicos (SARTORI et al., 2008), porém em áreas com baixa declividade.

De acordo com Pinto et al. (2020), para preservar a capacidade produtiva e garantir a sustentabilidade do solo a longo prazo, as práticas de conservação do solo que reduzem a erosão hídrica e a perda de nutrientes devem ser implementadas ou intensificadas. As práticas de conservação do solo são essenciais para manter as perdas de solo abaixo do limite TPS, especialmente em regiões de Neossolo Quartzarênico (AYER et al. 2015). Manter a cobertura do solo com vegetação espontânea ou aumentar os resíduos de culturas pode ajudar a aumentar a infiltração e reduzir o escoamento e a produção de sedimentos (SÁNCHEZ et al., 2015).

Com relação ao relevo e suas encostas, responsáveis pelo controle da velocidade e do volume do escoamento superficial (SILVA et al., 2011), é sabido que áreas com declives divergentes ou convexos apresentam grande instabilidade do solo (ANJINHO et al., 2021). Na bacia do rio Itaqueri, as áreas com maior declividade estão localizadas no extremo sul da bacia devido à formação de morros médio com altitudes elevadas, onde se afloram as formações Itaqueri e Serra Geral, com perfis convexos a retos e interflúvios que podem atingir áreas de 4 km² (ARROIO JUNIOR, 2013). Em geral, o relevo na bacia é considerado plano com baixo declive e

baixa suscetibilidade à erosão. No entanto, considerando que pequenas perdas de solo também são prejudiciais em longo prazo, práticas de conservação do solo devem ser expandidas para minimizar a erosão a níveis próximos às condições da vegetação natural (ANACHE et al., 2017).

A bacia é pouco urbanizada (325,9 ha), porém, nas últimas décadas, observou-se um pequeno crescimento (1,20%) na região do Balneário Santo Antônio (localizada na região sudeste do reservatório do Lobo). O crescimento urbano está relacionado à expansão da cidade de Itirapina e ao atrativo turístico da barragem. Segundo Fornazieiro e Pancher (2017), o turismo tem incentivado a construção de condomínios residenciais e, conseqüentemente, a redução das áreas de vegetação ao redor do reservatório.

A cana-de-açúcar é a cultura mais expressiva da região. Nos últimos 12 anos, a área de cultivo de cana-de-açúcar cresceu cerca de 33% na área de estudo (LIMA; FERRAZ-ALMEIDA, 2021), principalmente próximo aos afluentes do Ribeirão do Lobo e do rio Itaqueri. De acordo com Pereira et al. (2011), a bacia perdeu cerca de 60 km² de vegetação natural e 50 km² de pastagens para áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Esse aumento está associado à grande produção de biocombustíveis derivados da cana-de-açúcar no Brasil (GUILARDI et al., 2015), atividade que tem se tornado alvo de diversos estudos no estado de São Paulo, visando avaliar os impactos ambientais da expansão da cultura no estado (RUDORFF et al., 2010; ADAMI et al., 2012; MORAES et al., 2017).

A cultura semi-perene (cana-de-açúcar) na bacia do rio Itaqueri apresentou produção de sedimentos equivalente a 23,89 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹. Em estudo realizado por Scarpinella et al. (2019) na bacia do Ribeirão do Feijão, a jusante da bacia do rio Itaqueri, as perdas de solo estimadas para áreas de cultivo da cana-de-açúcar apresentaram valores de até 90,1 Mg.ha⁻¹.ano⁻¹. As menores taxas de produção de sedimentos na bacia do rio Itaqueri podem estar relacionadas a cobertura vegetal e palhas da cana que contribuem para a redução do potencial de erosão dos solos. Em áreas de cultivo de cana-de-açúcar na bacia do córrego Cachoeirinha (SP), Couto Júnior et al. (2019) estimaram um baixo potencial de perdas de solo em cerca de 81,5% da bacia em decorrência da presença de cobertura vegetal. Da mesma forma, na bacia do rio Colorado (Minas Gerais), os valores de perda de solo em áreas de cultivo de cana-de-açúcar com cobertura vegetal foram menores do que os estimados para uma região canavieira sem cobertura de solo (LENSE et al., 2019; MARTINS FILHO et al., 2009).

As práticas de manejo agrícola interferem diretamente produção de sedimentos (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011). Os usos agrícolas sazonais com rotação de culturas podem aumentar a exposição do solo e a suscetibilidade à erosão em períodos pós-colheita, quando o manejo do solo, correção ou pousio são realizados (FORNAZIEIRO; PANCHER, 2017). O plantio

mecanizado pode potencializar o processo de erosão devido à desagregação dos agregados do solo, deixando-o temporariamente livres para o transporte pelo escoamento (LENSE et al., 2019), ao contrário do plantio direto, que é considerado uma excelente alternativa no combate à erosão hídrica. Restos de plantas de safras anteriores ajudam a proteger o solo aumentando a matéria orgânica, especificamente durante as estações chuvosas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012) evitando a perda de solo devido à diminuição da velocidade de escoamento e aumento da infiltração de água em áreas de relevos suaves (SÁNCHEZ et al., 2015).

A cultura perene (citros e silvicultura) corresponde ao segundo maior percentual da contribuição total para a perda de solo na bacia do rio Itaqueri (27,10%). A silvicultura (*Pinus ssp.* e *Eucalyptus ssp.*) avançou em áreas de mata nativa (Cerrado) e regiões ao redor da barragem do Lobo (MACHADO, 1997). De acordo com Candido et al. (2014), na bacia do rio Paraná (estado de Mato Grosso do Sul), elevados índices de perda de solo em regiões de plantações de *Eucalyptus ssp.* foram observados em períodos de chuva intensa sem serapilheira e restos de culturas. A falta de cobertura vegetal associada ao alto volume de precipitação e regiões com grandes declividades, facilitam o transporte de partículas pelo escoamento superficial.

No entanto, em regiões com *Eucalyptus ssp.* e na presença de serapilheira e restos de cultura, a produção de sedimentos foi semelhante às áreas de vegetação nativa (CANDIDO et al., 2014). Na bacia do rio Itaqueri, a silvicultura apresentou melhores características físicas do solo do que a pastagem (NICODEMO et al., 2018), indicando que a produção agrícola está associada a práticas de conservação ambiental. Segundo Michette (2015), as regiões da bacia do rio Itaqueri com *Pinus ssp.* e *Eucalyptus ssp.* estão associados às atividades de reflorestamento, que tiveram aumento de 10,34% na região entre 1985 e 2017 (ANJINHO et al., 2018).

De acordo com Kateb et al. (2013) e Oliveira et al. (2013), em regiões de vegetação nativa, ocorrem baixos índices de perda de solo devido à interceptação de gotas de chuva pela copa das árvores e serapilheira. As taxas de erosão em regiões com cobertura vegetal são até dez vezes menores do que em regiões sem cobertura vegetal, pois além de interceptar as gotas de chuva, a cobertura vegetal também proporciona uma maior macroporosidade e melhor condutividade hidráulica (XU et al., 2013). Além disso, a cobertura vegetal formada por pastagem ou reflorestamento pode potencialmente reduzir até 73% da perda média de solo e melhorar os serviços ecossistêmicos, infiltração, redução do escoamento superficial e produção de sedimentos (FALCÃO et al., 2020).

Segundo Fornazieiro e Panher (2017), as regiões de vegetação natural e pastagem na bacia do rio Itaqueri foram reduzidas em cerca de 6% entre 1989 e 2009, devido à expansão agrícola e florestal. Atualmente, as áreas de vegetação natural e pastagem correspondem a aproximadamente

58,4% da área da bacia que, conseqüentemente, corroboraram para que as áreas de pastagem apresentassem a maior porcentagem da contribuição na produção de sedimentos na bacia do rio Itaqueri (32,47%), com relação aos demais usos. De acordo com Nicodemo et al. (2018), as áreas de pastagem em Latossolo Vermelho, na região de São Carlos apresentaram redução da porosidade em diferentes profundidades nos últimos anos. Segundo esses autores, a degradação da estrutura do solo, a modificação do arranjo das partículas e a redução do tamanho dos poros comprometeram a qualidade física da camada superficial do solo, reduzindo as taxas de infiltração e armazenamento de água no solo, aumentando a susceptibilidade ao escoamento e à erosão hídrica.

A preservação das áreas de vegetação natural e as atividades de reflorestamento já são realizadas na bacia do rio Itaqueri pelas Estações Ecológicas e Experimentais de Itirapina, que são unidades de conservação da biodiversidade do bioma Cerrado do Estado de São Paulo que desenvolvem pesquisas com foco na silvicultura. Por fim, avaliando as áreas sem vegetação, foi observado que a perda de solo se concentrou principalmente nas estradas de acesso sem pavimentação e nas cabeceiras de um dos afluentes do Ribeirão do Lobo. Nessas áreas a geração de sedimentos foi significativamente maior. Assim, em períodos chuvosos – como os verões na bacia do rio Itaqueri – a produção de sedimentos nessas áreas pode ser intensificada. Segundo Pinto et al. (2020), a adição de cascalho, a construção de bacias de contenção, a implantação de forragens e o manejo da vegetação espontânea são alternativas de redução do escoamento e de perda de solo nessas áreas.

7.2.EFEITOS DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

O estudo buscou fornecer uma investigação preliminar sobre os efeitos da variabilidade de elementos climáticos sobre a perda de solo por erosão na bacia hidrográfica do rio Itaqueri. Sabendo que os RCPs descrevem um conjunto consistente de projeções para os componentes da forçante radiativa com cenários disponíveis na literatura científica (VAN VUUREN et al., 2011), sendo adotados para auxiliar na identificação da gama de impactos associados aos diferentes níveis de forçamento e corroborar para o processo de tomada de decisões.

Segundo o AR5 do IPCC (2014), no período entre 2081 e 2100 sob RCP 8.5, a temperatura da superfície apresentará anomalias positivas e que eventos extremos de precipitação se tornarão mais intensos e frequentes em muitas regiões do planeta. Para a bacia do rio Itaqueri, o referido relatório sugere que a temperatura média apresente anomalias positivas entre 4 °C e 5 °C e a precipitação aumente até 10%, com variações não uniformes e ocorrências de eventos extremos mais intensos e frequentes.

Com relação aos dados projetados neste estudo pelo ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES sob RCP 8.5, a temperatura média anual em 2099 apresentará anomalias positivas com relação ao período de 1986 a 2005, sendo estas +0,2 °C (ETA-MIROC5) e +10 °C (ETA-HadGEM2-ES). Segundo Fontolan (2019), o ETA-HadGEM2-ES tende a apresentar temperaturas máximas extremas mais elevadas do que as geradas pelo modelo ETA-MIROC5 no estado de São Paulo. Além disso, aumentos significativos da temperatura média do ar foram verificados por Neves et al. (2020) para a bacia do rio Itaqueri. Com relação à precipitação, as anomalias serão negativas para ETA-MIROC5 (-13% e -11%) e ETA-HadGEM2-ES (-21% e -37%) considerando dados sem e com correção de viés, respectivamente. Tendências negativas significativas de precipitação (-10 mm.ano⁻¹) foram observadas por Neves et al. (2020) para estação pluviométrica localizada na bacia do rio Itaqueri (Estação Ribeirão do Feijão).

Considerando as anomalias dos elementos climáticos, outros elementos também poderão sofrer variações (DAVIE, 2008; HAN, 2010) como, por exemplo, o escoamento superficial (STEHR et al., 2010; JIN; SRIDHAR, 2012; CHIEN et al., 2013; AWOTWI et al., 2015); a evapotranspiração – que representa o processo de maior perda de água em bacias hidrográficas (FETTER, 2000; FITTS, 2012; AWOTWI et al., 2015; PANDEY et al., 2016b) e as taxas de perdas de solo, uma vez que a quantidade e intensidade das chuvas contribuem para o fator de erosividade e produção de sedimentos (NEARING et al. 2004; MOHAMADI; KAVIAN, 2015; SIMMONEAUX et al., 2015; THERON et al., 2021).

Com base na variabilidade da precipitação e temperatura, os resultados da modelagem da perda de solo na bacia hidrográfica do rio Itaqueri sugerem que a erosão hídrica será um fenômeno comum em todos os cenários projetados. Sob RCP 4.5, em médio prazo (2070) a produção média anual de sedimentos aumentará em relação ao cenário atual. Segundo o modelo ETA-MIROC5 a produção de sedimentos poderá chegar a 330.921 Mg.ano⁻¹ e 337.161 Mg.ano⁻¹ enquanto o modelo ETA-HadGEM2-ES sugere produções de até 258.269 Mg.ano⁻¹ e 316.479 Mg.ano⁻¹, considerando e desconsiderando a correção de viés, respectivamente.

Sob RCP 8.5, a produção média anual de sedimentos também será maior do que a do ano de 2019, segundo as projeções do modelo ETA-MIROC5. O modelo sugere produção de sedimentos de até 257.826 Mg.ano⁻¹ em curto prazo (em 2040) e 248.745 Mg.ano⁻¹ em médio prazo (2070) considerando a correção de viés. Ao contrário deste, o modelo ETA-HadGEM2-ES indicou decréscimo da produção média anual de sedimentos para todos os períodos do RCP 8.5 com correções, comparados ao cenário atual. Ademais, desconsiderando as correções de viés, as maiores taxas de perda de solo foram estimadas para os períodos 2070 (271.995 Mg.ano⁻¹) com dados do ETA-MIROC5 e 2099 (257.859 Mg.ano⁻¹) com dados do ETA-HadGEM2-ES.

Esses cenários e períodos indicam a intensificação da produção de sedimentos em locais com potencial de erosão moderada e severa na bacia, como já esperado. Desta forma, as áreas de pastagem, cultivo de cana-de-açúcar e solo exposto localizadas nas regiões sul, sudeste e sudoeste da bacia, especificamente nas regiões de nascente do rio Itaqueri, ribeirão do Lobo e afluentes carecem de mais atenção e planejamento, principalmente, em médio prazo (2070).

Os resultados dos testes de correlação mostraram que há forte correlação positiva ($R=0,96$) entre a precipitação média anual e a produção média anual de sedimentos na bacia e fraca relação linear negativa ($R=-0,24$) entre o coeficiente de temperatura e a produção média anual de sedimentos na bacia. Resultados semelhantes para a correlação entre precipitação e produção de sedimentos foram observados por Kazimierski et al. (2013). No entanto, segundo Dragicevic et al. (2017), quando a temperatura média anual é transformada em coeficiente de temperatura a sensibilidade deste parâmetro no modelo EPM é aumentada e o torna o parâmetro de maior interferência nos resultados de volume de produção líquida de sedimentos.

A forte correlação positiva entre a precipitação média anual e produção média anual de sedimentos justifica o incremento na produção de sedimentos em todos os períodos do ETA-MIROC5, sob RCP 8.5, que apresentaram anomalias positivas nas precipitações médias anuais, e os decréscimos sugeridos pelo modelo ETA-HadGEM2-ES para todos os mesmos períodos do RCP 8.5, que apresentaram anomalias negativas para as médias anuais de precipitação. A redução da produção de sedimentos também foi observada por Almagro et al. (2017) para as projeções do ETA-HadGEM2-ES (RCP 8.5) para a região sudeste do Brasil no final do século.

O uso dos dois modelos neste estudo apresenta a vantagem de resultar em uma gama de estimativas possíveis e quantificar as possíveis incertezas das projeções (CROSBIE et al., 2012; THERON et al., 2021) para a produção de sedimentos na bacia do rio Itaqueri. Apesar de ambos serem considerados ferramentas promissoras para a análise da influência da variabilidade climática, o modelo ETA-MIROC5 apresentou resultados mais coerentes que o ETA-HadGEM2-ES para identificação de extremos diários de temperatura e precipitação no estado de São Paulo (FONTOLAN, 2019).

No entanto, diversos estudos mostram que os eventos extremos de precipitação aumentam o escoamento superficial, produção de sedimentos e sedimentação de reservatórios (MSADALA et al., 2010; MULLAN, 2013; PRETORIUS, 2017), desta forma é válido ressaltar que avanços no monitoramento e modelagem da erosão do solo em relação à variabilidade do clima incluem a melhor representação desses eventos e a integração e distinção dos diversos tipos de erosão (THERON et al., 2021).

7.3. AVALIAÇÃO DO *EROSION POTENTIAL METHOD*

A estimativa da perda de solo impõe grandes limitações para modelos hidrológicos mais robustos devido à inconsistência e indisponibilidade de dados (EFHITIMIOU et al., 2017) e à complexa interação entre eles (DE VENTE; POESEN, 2005). O método EPM tem a vantagem de estimar de forma rápida, fácil e precisa a perda de solo em bacias de acordo com o conhecimento do pesquisador (NYSSSEN et al., 2014; DRAGICEVIC et al., 2016). Segundo Ristic et al. (2011b), essa facilidade distingue o modelo EPM de outros métodos sem colocar em risco seu alto nível de confiabilidade.

Neste presente estudo, não foi realizada a validação dos resultados em parcelas experimentais. No entanto, os valores estimados de perda de solo foram semelhantes aos apresentados por outros estudos na bacia, que utilizaram *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (ARROIO JUNIOR, 2013) e *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (MICHETTE, 2015) – sendo este último o modelo mais utilizado e adaptado às condições geográficas e climáticas tropicais (MENDES et al., 2018; TAVARES et al., 2019).

Estudos que avaliaram diferentes modelos de erosão para verificar sua aplicabilidade sobre escalas, tipos de tarefas e necessidades do setor, sugerem que o modelo EPM é o mais adequado para a gestão de bacias hidrográficas (BLINKOV; KOSTADINOV, 2010; EFHITIMIOU et al., 2017). Segundo esses autores, o método EPM atende às necessidades de diferentes áreas e setores científicos, como agricultura, silvicultura, recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas.

Além da aplicabilidade do modelo EPM para diferentes tipos de uso e baixa necessidade de dados de entrada (GAVRILOVIC, 1994) e integração com um ambiente GIS (DE VENTE; POESEN, 2005), o método inova ao incluir o coeficiente de retenção de sedimentos para bacias (GAVRILOVIC, 1988; ZEMLJIC, 1971), que possibilita estimar a produção líquida de sedimentos (EFHITIMIOU et al., 2017), e o coeficiente de feições erosivas (parâmetro pouco usado em métodos similares de avaliação da produção de sedimentos) que apresenta grande efeito sobre a estimativa da perda média do solo (DRAGICEV et al., 2017).

O método tem sido amplamente utilizado em regiões de clima temperado há décadas (GLOBEVNIK et al., 2003) e nos últimos anos começou a ser utilizado em regiões de condições edafoclimáticas tropicais como o Brasil (SILVA et al., 2014; TAVARES et al., 2019; LENSE et al., 2019; SAKUNO et al., 2020; PINTO et al., 2020; LENSE et al., 2021a; LENSE et al., 2021b; TAVARES et al., 2021). Ademais, o modelo EPM se destaca pela capacidade de apontar áreas de maior potencial erosivo mesmo utilizando dados limitados (SAKUNO et al., 2020) e, assim, subsidiar a tomada de decisão no manejo de bacias para a adoção de práticas agronômicas conservacionistas e ações mitigadoras para a conservação dos recursos naturais.

No entanto, com relação ao uso do modelo EPM para estimar a perda de solo sob efeitos da variabilidade climática – além da questão da omissão das variações de fatores estáticos (coeficiente de resistência à erosão) e dinâmicos (coeficiente de uso e manejo de solo) já mencionada, que trariam mais incertezas devido à necessidade de criar novas suposições (THERON et al., 2021) – é importante ressaltar que ao considerar apenas os dados de precipitação anual para os cálculos, os efeitos da sazonalidade e dos eventos extremos de precipitação poderão ser omitidos. Segundo Ferreira (2021), quatro eventos extremos contabilizados na sub-bacia do Córrego do Gigante, em Minas Gerais, foram responsáveis por mais de 47% da erosividade anual obtida.

Como os valores de precipitação são adotados e distribuídos proporcionalmente dentro do intervalo de um ano no modelo EPM (DRAGICEVIC et al., 2017) os impactos dos eventos extremos na produção de sedimentos podem se apresentar divergentes com a realidade. Considerando a variação sazonal da precipitação e temperatura no modelo EPM, os valores da produção de sedimentos apresentaram resultados até 13% menores que os estimados com dados de precipitação e temperatura média anual (DRAGICEVIC et al., 2018).

Desta forma, o uso de médias para elementos climáticos, como temperatura e precipitação, pode não retratar a dinâmica do tempo, pois impossibilita a representação de seus intervalos, repetições, extremos e interações tornando estática a realidade dinâmica do clima (BORSATO, 2000). Segundo Back (2001), utilizar apenas as médias dos elementos climáticos pode levar a distorções grosseiras e equivocadas, principalmente quando consideradas de forma isolada ou em análises unidimensionais da climatologia tradicional, que podem induzir a formulações generalistas e grandes abstrações (CARACRISTI, 2002).

Além disso, no que se refere à escala, no mesoclima a intervenção de fatores dinâmicos e geográficos (processos atmosféricos, configuração do terreno, tipos e usos de solo e cobertura vegetal) determinam o clima local (SANT'ANNA NETO, 2010), tornando mais complexas as concepções de discursos científicos (JESUS, 2008). Desta forma, é altamente recomendável que as incertezas das projeções climáticas e seus efeitos na produção de sedimentos sejam incluídos regularmente como parte do risco na tomada de decisões quando se trata da gestão de recursos hídricos (KUSANGAYA et al., 2014).

Por fim, os resultados do modelo EPM auxiliam de forma preventiva na identificação das áreas que necessitam da adoção de práticas conservacionistas (MULLAN et al., 2012; ROUTSCHEK et al., 2014; SIMONNEAUX et al., 2015) para garantir vantagens substanciais para a vida útil do reservatório, bem como para a resiliência da bacia a longo prazo (PLAMIERI et al.; 2001).

8. CONCLUSÃO

O estudo destacou as áreas com maior suscetibilidade ao processo erosivo, a perda média anual de solos e os efeitos potenciais da variabilidade climática na produção de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Itaqueri, estado de São Paulo, Brasil. A bacia hidrográfica do rio Itaqueri apresentou produção média anual de sedimentos equivalente à $9,41 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, que considerando a área total da bacia equivale a $208.467 \text{ Mg}\cdot\text{ano}^{-1}$. Considerando a taxa de retenção de sedimentos, a perda real de sedimentos no cenário atual (2019) foi de $22.306 \text{ Mg}\cdot\text{ano}^{-1}$. As áreas localizadas à montante do reservatório do Lobo, na região de nascentes, apresentaram propensão à perdas de solo severa e muito severa, mesmo com baixa declividade, em decorrência de solos expostos, pastagens e cultivos de culturas semi-perenes em Neossolos Quartzarênicos.

A variabilidade dos elementos climáticos (temperatura e precipitação) apresentaram efeitos consideráveis em médio prazo (2070) com incrementos de até 61,8% (RCP 4.5) e 30,5% (RCP 8.5) da produção média anual de sedimentos, acarretando em produções líquidas de $36.076 \text{ Mg}\cdot\text{ano}^{-1}$ e $29.104 \text{ Mg}\cdot\text{ano}^{-1}$, respectivamente, que poderão contribuir para o assoreamento e redução da vida útil do reservatório do Lobo.

O método EPM apresentou resultados semelhantes a outros modelos bem consolidados e adaptados para solos tropicais, como a Equação Universal de Perdas de Solo, sendo capaz de estimar a produção de sedimentos e a intensidade do processo erosivo na bacia, possibilitando mapear as áreas com maior fragilidade. No entanto, para avaliação dos efeitos da variabilidade climática, devido às limitações em simular taxas absolutas da perda de solo utilizando médias anuais dos elementos climáticos, é recomendável que as incertezas sejam incluídas regularmente como parte do risco na tomada de decisões na gestão de recursos hídricos.

Ademais, os resultados do modelo EPM são capazes de identificar de forma preliminar os efeitos da variabilidade climática e auxiliar de forma preventiva na identificação das áreas que necessitam da adoção de práticas conservacionistas e, desta forma, garantir vantagens substanciais para a vida útil do reservatório e benefícios socioeconômicos e ambientais que, conseqüentemente, garantirão a resiliência da bacia hidrográfica até o final do século.

RECOMENDAÇÕES

Para dar continuidade ao estudo aqui desenvolvido e aprimorar seus resultados, as seguintes recomendações são apresentadas para trabalhos futuros:

- a) Considerar eventos extremos de temperatura e precipitação utilizando métodos como a “Teoria Geral de Valores Extremos (GEV)”, por exemplo;
- b) Considerar projeções futuras de alterações do uso e ocupação do solo utilizando o modelo de previsão de uso e cobertura do solo “*Cellular Automata Markov (CA_Markov)*”, por exemplo;
- c) Considerar, entender e discutir melhor os elementos que constituem o fluxo como: evapotranspiração, temperatura, área foliar, radiação etc.;
- d) Considerar as estimativas de escoamento superficial e suas alterações.

REFERÊNCIAS

- ACHITE, M.; OUIILLON, S. Recent changes in climate, hydrology and sediment load in the Wadi Abd, Algeria (1970–2010). **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 20 (4), 1355–1372. 2016.
- ADAMI, M.; RUDORFF, B.F.T.; FREITAS, R.M.; AGUIAR, D.A.; SUGAWARA, L.M.; MELLO, M.P. Remote sensing time series to evaluate direct land-use change of recent expanded sugarcane crop in Brazil. **Sustainability**, 4, pp. 574-585, 2012. 10.3390/su4040574
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P.T.S.; NEARING, M.A. et al. Impactos projetados das mudanças climáticas na erosividade das chuvas no Brasil. **Representante Científico** 7, 8130. 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08298-y>
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; DE MORAES GONÇALVES, J.L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22, 711–728. 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- AMINI, S.; RAFIEI, B.; KHODABAKHSH, S.; HEYDARI, M. Estimation of erosion and sediment yield of Ekbatan Dam drainage basin with EPM, using GIS. **Iranian Journal of Earth Sciences**, 2, pp. 173-180. 2010.
- ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E.; OLIVEIRA, P.T.S.; FLANAGAN, D.C.; NEARING, M. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. **Catena**, 152(1):29-39. 2017.
- ANJINHO, P. S.; BARBOSA, M. A. G. A.; COSTA, C.W.; MAUAD, F.F. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: A Brazilian basin case study, **Land Use Policy**, V. 100. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104946>.
- ANJINHO, P. S.; BARBOSA, M. A. G. A.; SANTOS, A. R.; MAUAD, F. F. Spatialization of the curve number (CN) parameter in the ribeirão do Lobo hydrographic basin for the period 1985 and 2017. **Anais of the XVI Symposium of the Graduate Program in Environmental Engineering Sciences**. 2018.
- ARROIO JUNIOR, P.P. **Avaliação da produção e transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do Rio Itaqueri, municípios de Itirapina e Brotas – SP**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental. Universidade de São Paulo. 2013.
- AWOTWI, A.; KUMI, M.; JANSSON, P.; YEBOAH, F.; NTI, I. Predicting hydrological response to climate change in the White Volta catchment, West Africa. **Journal of Earth Science & Climatic Change**, 6 (1), 1. 2015.
- AYER, J. E. B.; OLIVETTI, D.; MINCATO, R. L.; SILVA, M. L. N. Water erosion in Dystrophic Red Latosols. **Tropical Agricultural Research**, Goiânia, v. 45, no. 2, p. 180-191. 2015.
- AZARI, M.; MORADI, H.R.; SAGHAFIAN, B.; FARAMARZI, M. Climate change impacts on streamflow and sediment yield in the north of Iran. **Hydrol. Sci. J.** 61 (1), 123–133. 2016.
- BACK, A.J. Aplicação de análise estatística para identificação de tendências climáticas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 36: 717-726. 2001.
- BECK, M.B. Water quality modelling: a review of uncertainty. **Water Resour. Res.** 23 (8), 1393–1442. 1987.
- BERG, P.; FELDMANN, H.; PANITZ, H.-J. Bias correction of high resolution regional climate model data. **J. Hydrol.** 448–449, 80–92. 2012.

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 8.ed. São Paulo: **Ícone**, 2012, p. 355.
- BLACK, T. L. The new NMC mesoscale ETA model: Description and forecast examples. **Weather and forecasting**, 9 (2), 265-278. 1994.
- BLINKOV, I.; KOSTADINOV, S. Applicability of various erosion risk assessment methods for engineering purposes. 2010. In: **BALWOIS 2010 Conference**, 25–29 May, Ohrid Republic of Macedonia.
- BORSATO, V.A. A climatologia dinâmica e o ensino da geografia no segundo grau: uma aproximação ao problema. Departamento de Geografia da UEM (Universidade Estadual de Maringá). **Revista GeoNotas**, volume 4, nº 1. ISSN 1415-0646. 2000.
- BOURONCLE, C.; IMBACH, P.; RODRÍGUEZ-SÁNCHEZ, B.; MEDELLÍN, C.; MARTINEZ-VALLE, A.; LÄDERACH, P. Mapping climate change adaptive capacity and vulnerability of smallholder agricultural livelihoods in Central America: Ranking and descriptive approaches to support adaptation strategies. **Climatic Change**, 1 - 15. DOI:10.1007/s10584 – 016 – 1792 – 0. 2016.
- BRITO, A.D.; VEIGA, J.A.P.; CORREIA, F.W.C.; Capistrano, V.B.C. Avaliação do Desempenho dos Modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de Indicadores de Extremos Climáticos de Precipitação para a Bacia Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, 165-177, 2019 DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863340003>
- BÜNEMANN, E.K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R.E.; DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T.W.; MÄDER, P.; PULLEMAN, M.; SUKSEL, W.; VAN GROENIGEN, J.W.; BRUSSAARD, L. Soil quality – a critical review. *Soil Biol. Biochem.*, 120, pp. 105-125, 2018. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.01.030
- CÂNDIDO, B. M.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; BATISTA, P.V.G. Water erosion post-planting in eucalyptus forests in the Paraná River basin, eastern Mato Grosso do Sul, Brazil. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**. 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500022>
- CARACRISTI, I. Geografia e representações gráficas: uma breve abordagem crítica e os novos desafios técnico-metodológicos perpassando pela climatologia. **Revista Brasileira de Cartografia** 55/02. 2002.
- CARVALHO, N.O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.
- CHEN, C.N.; TFWALA, S.C.; TSAI, C.H. Climate Change Impacts on Soil Erosion and Sediment Yield in a Watershed. **Water**, 12, 2247. 2020. doi:10.3390/w12082247
- CHIEN, H.; YEH, P. J.F.; KNOUFT, J. H. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. **Journal of Hydrology**, 491, 73 - 88. 2013.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P. MARENGO, J. Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454. 2014a. doi:10.4236/ajcc.2014.35039.
- CHOU, S.C, LYRA, A. , MOURÃO, C. , DEREZYNSKI, C. , PILOTTO, I. , GOMES, J. , BUSTAMANTE, J. , TAVARES, P. , SILVA, A. , RODRIGUES, D. , CAMPOS, D. , CHAGAS, D. , SUEIRO, G. , SIQUEIRA, G. AND MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**,3, 512-527. doi: 10.4236/ajcc.2014.35043. 2014b.

- CHOU, S.C.; BUSTAMANTE, J.F.; GOMES, J.L. Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, p. 537-555, 2005.
- CHOU, S.C.; MARENGO, J.A.; LYRA, A.A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J.F. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, p. 635-653, 2012.
- CLIMATE-DATA. **Weather Data for Cities**. 2021. Available at: < <https://pt.climate-data.org/>> Accessed at: 21/04/2021.
- COLLINS, W.J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T., et al. Development and Evaluation of an Earth-System Model-HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, n. 4, p. 1051-1075, 2011.
- COOLEY, D.; SAIN S. R. Spatial Hierarchical Modeling of Precipitation Extremes From a Regional Climate Model. **Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics**, v.15, n. 3, p. 381-402, 2010.
- COUSINO, L.K.; BECKER, R.H.; ZMIJEWSKI, K.A. Modeling the effects of climate change on water, sediment, and nutrient yields from the Maumee River watershed. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, 4, 762-775, 2015. doi:10.1016/j.ejrh.2015.06.017.
- COUTO JÚNIOR, A. A.; CONCEIÇÃO, F.T.; FERNANDES, A.M.; SPATI JUNIOR, E.P.; LUPINACCI, C.M.; MORUZZI, R.B. 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**, 172(1):313-323. 2019.
- COVENEY, S.; FOTHERINGHAM, A.S. The impact of DEM data source on prediction of flooding and erosion risk due to sea-level rise. **Int. J. Geogr. Inf. Sci.** 25 (7), 1191-1211. 2011.
- CROSBIE, R. S.; POLLOCK, D. W.; MPELASOKA, F. S.; BARRON, O. V.; CHARLES, S. P.; AND DONN, M. J. Changes in Köppen-Geiger climate types under a future climate for Australia: hydrological implications, **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 16, 3341-3349, 2012. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3341-2012>.
- DAVIE, T. *Fundamentals of hydrology*. Abingdon, UK: **Taylor & Francis**. 2008.
- DE VENETE, J.; POESEN, J. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models. **Earth-Science Reviews** ,71, 1-2, pp. 95-125, 2005. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.1305>
- DE VENETE, J.; POESEN, J.; VERSTRAETEN, G.; GOVERS, G.; VANMAERCCKE, M.; VAN ROMPAEY, A.; ARABKHEDRI, M.; BOIX-FAYOS, C. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand? **Earth Sci. Rev.** 127, 16-29. 2013.
- DRAGIČEVIĆ, N.; KARLEUŠA, B.; OŽANIĆ, N. Erosion Potential Method (Gavrilović method) sensitivity analysis. **Soil & Water Res.**, 12: 51-59. 2017.
- DRAGIČEVIĆ, N.; KARLEUŠA, B.; OŽANIĆ, N. Modification of erosion potential method using climate and land cover parameters, Geomatics, **Natural Hazards and Risk**, 9:1, 1085-1105, 2018. DOI: 10.1080/19475705.2018.1496483
- EFTHIMIOU, N.; LYKOU, E.; KARAVITIS, C. Comparative analysis of sediment yield estimations using different empirical soil erosion models. **Hydrological Sciences Journal**, 62:16, 2674-2694, DOI: 10.1080/02626667.2017.1404068. 2017.
- ENGELBRECHT, F.; ADEGOKE, J., BOPAPE, M., NAIDOO, M., GARLAND, R., THATCHER, M., MCGREGOR, J., KATZFEY, J., WERNER, M., ICHOKU, CH. Projections

of rapidly rising surface temperatures over Africa under low mitigation. **Environ. Res. Lett.**, 10, 85004, 2015. doi:10.1088/1748-9326/10/8/085004.

ESRI, Environmental Systems Research Institute - Inc. **ARCGIS Professional GIS for the desktop version 10.3**. Redlands, California, EUA, Software, 2015.

ESTIGONI, M. V.; MATOS, A. J. S.; MAUAD, F. F. Assessment of the accuracy of different standard methods for determining reservoir capacity and sedimentation. **Journal of Soils and Sediments**, 14(7), 1224–1234. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11368-013-0816-x>.

FALCÃO, S.; PANACHUKI, E.; MONTEIRO, F.N.; MENEZES, R.S.; RODRIGUES, D.B.B.; SONE, J.S.; OLIVEIRA, P.T.S. Surface runoff and soil erosion in a natural regeneration area of the Brazilian Cerrado. **International Soil and Water Conservation Research**, 8 (2), pp. 124-130, 2020. 10.1016/j.iswcr.2020.04.004

FANETTI, D., VEZZOLI, L.: Sediment input and evolution of lacustrine deltas: the Breggia and Greggio rivers case study (lake Como, Italy). **Quaternary International**, 173–174, pp. 113-124, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2007.02.008>

FERREIRA, A.M.; SILVA, A.M.; PASSOS, C.A.; VALENTINO, C.H.; GONÇALVES, F.A.; BRETANHA, P.H., MENEZES, J. Estimated water soil erosion by the Water Erosion Prediction Project model in the Gigante Stream Basin, Minas Gerais, Brazil. **Eng Sanit Ambient.** v.26 n.3 471-483, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190216>

FETTER, C. W. Applied hydrogeology. New Jersey, USA: **Prentice-Hall**. 2000.

FITTS, C. R. (2012). Groundwater science (2 nd ed.). Maine, USA: **Elsevier**

FONTOLAN, M.R. **Modelo climáticos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 no estudo de eventos extremos no Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônômico. Campinas, 2019.

FORNAZIEIRO, M.P.A.; PANCHER, A.M. Dynamics of land use and land cover in the Itaqueri/SP river basin, using digital image classification methods. **Anais of the XVII Brazilian Symposium on Applied Physical Geography**. 2017. DOI - 10.20396/sbfga.v1i2017.1888 - ISBN 978-85-85369-16-3

GARBRECHT, J.D.; ZHANG, X.C. Soil erosion from winter wheat cropland under climate change in Central Oklahoma. **Appl. Eng. Agric.** 31 (3), 439–454. 2015.

GAVRILOVIĆ, S. **Inženjering o bujičnim tokovima i eroziji. Izgradnja, special issue**, pp 1-292, 1972.

GAVRILOVIC, Z. The importance of the laboratory tests during the experimental research of soil erosion. In: **irrigation and drainage in Serbia: proceedings of conferences**. Svilajnac 327-331. 1994.

GAVRILOVIC, Z. The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams. **International Conference River Regime** published by John Wiley and Sons. p. 411-422. 1988.

GLOBEVNIK, I.; HOLJEVIC, D.; PETKOVSEK, G.; RUBINIC, J. Applicability of the Gavrilovic method in erosion calculation using spatial data manipulation techniques. In: **Erosion Prediction in Ungauged Basins: Integrating Methods and Techniques** (Proceedings of symposium HS01 held during IUGO), v. 279, Sapporo. 2003.

GOVERS, G., Misapplications and Misconceptions of Erosion Models. In: Morgan R.P.C., Nearing, M.A. (Eds.), **Handbook of Erosion Modelling**. Blackwell Publishing. 117-134. 2011.

GUILARDI, V.; RONQUIM, C.R.; GONÇALVES, J.M.C. Dynamics of sugarcane and pasture areas in the municipalities of Barretos and São Carlos between 1988 and 2015. **Anais** of the IX Workshop Agroenergia, Ribeirão Preto. 2015.

HAN, D. **Concise hydrology**. Copenhagen, Denmark: Dawei Han & Ventus Publishing ApS. 2010.

HIMANSHU, S.K.; GARG, N.; RAUTELA, S.; ANUJA, K.M.; TIWARI, M. Remote sensing and GIS applications in determination of geomorphological parameters and design flood for a Himalayan River Basin, India. **Int. Res. J. Earth Sci.** 1 (3), 11–15. 2013. <http://dx.doi.org/10.1175/2010JCLI3679.1>

IPCC. Mudanças Climáticas 2014: **Relatório de Síntese. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas** [Equipe de Redação Central, RK Pachauri e LA Meyer (eds.)]. IPCC, Genebra, Suíça, 151 pp. 2014.

JAKEMAN, A.J.; GREEN, T.R.; BEAVIS, S.G.; ZHANG, L.; DIETRICH, C.R.; CRAPPER, P.F. Modelling upland and in-stream erosion, sediment and phosphorus transport in a large catchment. **Hydrol. Process.** 13 (5), 745–752. 1999.

JESUS, E.F.R. Algumas reflexões teórico-conceituais na climatologia geográfica em mesoescala: uma proposta de investigação. **GeoTextos**, vol. 4, n. 1 e 2. 165-187. 2008.

JIA, G.E.; SHEVLIKOVA, P.; ARTAXO, N.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, R.; HOUGHTON, J.; HOUSE, K.; KITAJIMA, C.; LENNARD, A.; POPP, A.; SIRIN, R.; SUKUMAR, L.; VERCHOT, L. and–climate interactions. In: **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. In press. 2019.

JIMENEZ CISNEROS, B.E. et al. Freshwater Resources. In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229–269. 2014.

JIN, X.; SRIDHAR, V. Impacts of climate change on hydrology and water resources in the Boise and Spokane river basins. **Civil Engineering Faculty Publications and Presentations**, 4 (1), 1 – 31. 2012.

KARYDAS, C. G.; PANAGOS, P.; GITAS, I. Z. A classification of water erosion models according to their geospatial characteristics. **International Journal of Digital Earth**, 7(3), 229–250. 2014.

KATEB, H.E.; ZHANG, H.; ZHANG, P.; MOSANDL, R. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China. **Catena**, 105:1-10. 2013.

KAZIMIERSKI, L.D.; IRIGOYEN, M.; RE, M.; MENENDEZ, A.N.; SPALLETTI, P.; BREA, J.D. Impact of Climate Change on sediment yield from the Upper Plata Basin, **International Journal of River Basin Management**, 11:4, 411-421, 2013. DOI: 10.1080/15715124.2013.828066

KHARE, D.; MONDAL, A.; KUNDU, S.; MISHRA, P. K. Climate change impact on soil erosion in the Mandakini River Basin, North India. **Water Science** (7); 2373–2383. 2017. DOI 10.1007/s13201-016-0419-y

- KUSANGAYA, S.; WARBURTON, M.L.; VAN GARDEREN, E.A.; JEWITT, G.P. Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review. **Phys. Chem. Earth A/B/C**.67 47–54. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.09.014>.
- LANE, L.J.; NICHOLS, M.H.; LEVICK, L.R.; KIDWELL, M.R. A Simulation Model for Erosion and Sediment Yield at the Hillslope Scale. *Landscape Erosion and Evolution Modeling*. Springer, US, pp. 201–237. 2001.
- LAWLER, D.M.; MCGREGOR, G.R.; PHILLIPS, I.D. Influence of atmospheric circulation changes and regional climate variability on river flow and suspended sediment fluxes in southern Iceland. **Hydrol. Process**. 17 (16), 3195–3223. 2003.
- LEHMANN, J.; COUMOU, D.; FRIELER, K. Increased record-breaking precipitation events under global warming. **Clim. Change**, 132, 501–515. 2015. doi:10.1007/s10584-015-1434-y.
- LENSE, G. H. E.; MOREIRA, R. S.; PARREIRAS, T. C.; AVANZI, J.C.; MINCATO, R. L. Modeling of soil organic carbon loss by water erosion on a tropical watershed. **Revista Ciência Agronômica**. 2021b.
- LENSE, G. H. E.; PARREIRAS, T. C.; MOREIRA, R. S.; AVANZI, J.C.; MINCATO, R. L. Effect of spatial-temporal variation of land use and land cover on soil erosion. **Revista Caatinga**. 2021a. <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252021v34n110rc90>
- LENSE, G. H. E.; PARREIRAS, T. C.; MOREIRA, R. S.; AVANZI, J.C.; MINCATO, R. L. Estimates of soil losses by the erosion potential method in tropical latosols. **Ciência e Agrotecnologia**, 43:e012719, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054201943012719>
- LI, Z.; FANG, H. Impacts of climate change on water erosion: A review. **Earth-Science Reviews**. 163, 94–117. 2016.
- LICKLEY, M.; SOLOMON, S. Drivers, timing and some impacts of global aridity change. **Environ. Res. Lett.**, 13, 104010, 2018. doi:10.1088/1748-9326/aae013.
- LIMA, B.S.; FERRAZ-ALMEIDA, R. Profile of agricultural production in the region of São Carlos, SP: an overview of the last 12 years. **Acta Ambiental Catarinense**, vol.18, n. 1. 2021. DOI: 10.24021/raac.v18i1.5218
- LIMA, C. A.; MONTENEGRO, A.A.A.; SANTOS, T.E.M.; ANDRADE, E.M; MONTEIRO, A.L.N. Agricultural practices in the cultivation of cassava and the relation to runoff, and soil and water loss. **Agricultural Science Magazine**, v. 46, n. 4, p. 697-706. 2015. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150056>
- LU, X.X.; RAN, L.S.; LIU, S.; JIANG, T.; ZHANG, S.R.; WANG, J.J. Sediment loads response to climate change: a preliminary study of eight large Chinese rivers. **Int. J. Sediment Res.** 28 (1), 1–14. 2013.
- LYRA, A., TAVARES, P., CHOU, S.C., SUEIRO, G., DEREZYNSKI, C.P., SONDERMANN, M., SILVA, A., MARENGO, J., GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution *Theor Appl Climatol*. 2017. doi:10.1007/s00704-017-2067-z. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>
- MACHADO, L. M. C. P. The Lobo Dam in the user's perception: contribution to the environmental zoning of the Corumbataí APA. Rio Claro: **Institute of Geosciences and Exact Sciences**, 62 p. 1997.

- MAEDA, E.E.; PELLIKKA, P.K.E.; SILJANDER, M.; CLARK, B.J.F. Potential impacts of agricultural expansion and climate change on soil erosion in the Eastern Arc Mountains of Kenya. **Geomorphology** 123 (3-4), 279–289. 2010.
- MANOLA, I.; VAN DEN HURK, B.; DE MOEL, H.; AERTS, J.C.J.H. Future extreme precipitation intensities based on a historic event. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 22, 3777–3788, 2018. doi:10.5194/hess-22-3777-2018.
- MAPBIOMAS. **Coleção da série anual de mapas de cobertura e uso do solo no Brasil**. 2019. Disponível em: <<http://mapbiomas.org.br>> Acesso em: 24/04/2021.
- MARENGO, J.A.; CHOU, S.C.; KAY, G.; ALVES, L.M.; PESQUERO, J.F.; SOARES, W.R.; CHAGAS, D.J. Development of regional future climate change scenarios in South America using the ETA CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, 38(9-10), 1829-1848. 2012.
- MARTIN, G.M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W.J.; CULVERWELL, I.D.; HALLORAN, P.R.; HARDIMAN, S.C., et al. The Had-GEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. **Geoscientific Model Development**, n. 4, p. 723-757, 2011.
- MARTINS FILHO, M. V.; LICCIOTI, T. T.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JÚNIOR, J.; SANCHEZ, R. B. Soil and nutrients losses of an Alfisol with sugarcane crop residue. **Engenharia Agrícola**, 29(1):8-18. 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000100002>
- MENDES JÚNIOR, H.; TAVARES, A.S.; SANTOS JÚNIOR, W.R.; SILVA, M.L.N.; SANTOS, B.R.; MINCATO, R.L. Water Erosion in Oxisols under Coffee Cultivation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 42, p. 1-14. 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170093>
- MESINGER, F.; CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; BASTOS, P. et al. “An upgraded version of the Eta Model”. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, p. 63-79, 2012.
- MESINGER, F.; JANJIC, Z.I.; NICKOVIC, S.; GRAVILOV, D.; DEAVEN, D.G. The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of an Appalachian redevelopment. **Monthly Weather Review**, 116 (7), 1493-1518. 1988.
- MICHETTE, J. F. **Modelos de previsão de erosão pluvial utilizando SIG: estudo na bacia hidrográfica da Represa do Lobo (Broa), SP**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos. 275 p. 2015.
- MOHAMADI, M.A.; KAVIAN, A. Effects of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots. **Int. Soil Water Conserv. Res.** 3 (4), 273–281. 2015.
- MONDAL, A.; KHARE, D.; KUNDU, S.; MEENA, P.K.; MISHRA, P.K.; SHUKLA, R. 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. **J. Hydrol. Eng.** 20 (6). 2015.
- MORAES, M.C.P.; MELLO, K.; TOPPA, R.H. Protected areas and agricultural expansion: biodiversity conservation versus economic growth in the Southeast of Brazil. **J. Environ. Manag.**, 188, pp. 73-84, 2017. 10.1016/j.jenvman.2016.11.075
- MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747-756. 2010.

- MSADALA, V.; GIBSON, L.; LE ROUX, J.; ROOSEBOOM, A.; BASSON, G.R. Sediment yield prediction for South Africa: 2010 Edition. WRC Report No. 1765/1/10. **Water Research Commission**, Pretoria. 2010.
- MUKUNDAN, R.; PRADHANANG, S.M.; SCHNEIDERMAN, E.M.; PIERSON, D.C.; ANANDHI, A.; ZION, M.S.; MATONSE, A.H.; LOUNSBURY, D.G.; STEENHUIS, T.S. Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA. **Geomorphology** 183, 110–119. 2013.
- MULLAN, D., 2013. Soil erosion under the impacts of future climate change: assessing the statistical significance of future changes and the potential on-site and off-site problems. **Catena** 109, 234–246.
- MULLAN, D.; FAVIS-MORTLOCK, D.; FEALYM, R. Addressing key limitations associated with modelling soil erosion under the impacts of future climate change. **Agric. For. Meteorol.** 18-30. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.12.004>
- NEARING, M.A.; PRUSKI, F.F.; O'NEAL, M.R. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *J. Soil Water Conserv.* 59 (1), 43–50. 2004.
- NEVES, G. L. **Impacto das mudanças climáticas globais na disponibilidade hídrica do solo no estado de Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa. 2015.
- NEVES, G. L.; BERUSKI, G. C.; VIRGENS FILHO, J. S.; MAUAD, F. F. Variability and trend of air temperature and rainfall at Ribeirão do Lobo Hydrographic Basin, Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.13, n.01. 035-048. 2020.
- NICODEMO, M. L. F.; BORGES, W. L. B; SOUZA, I. M. D. Soil physical attributes in four land-use systems in São Carlos, SP. **Brazilian Journal of Agrarian Sciences**. ISSN (online) 1981-0997. v.13, n.2. 2018. DOI: 10.5039/agraria.v13i2a5524
- NYSSSEN, J.; BRANDEN, J.V.; SPALEVIC, V.; FRANKL, A.; DE VELDE, L.V.; CUROVIC, M.; BILLI, P. Twentieth-century land resilience in Montenegro and consequent hydrological response. **Land Degradation and Development**, v. 35, n. 4, p. 336-349. 2014.
- OLIVEIRA, A.H.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; AVANZI, J.C.; KLINKE NETO, G.; ARAÚJO, E.F. Water erosion in soils under eucalyptus forest as affected by development stages and management systems. **Ci. Agrotec.**, 37:159-169. 2013.
- OLIVEIRA, F.P.; SILVA, M.L.N.; AVANZI, J.C.; CURI, N.; LEITE, F.P. Assessment of soil losses on unpaved forest roads in Vale do Rio Doce, Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, p. 331-339. 2010.
- PANDEY, A.; HIMANSHU, S.K; MISHRA, S.K.; SINGH, V. P. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. **Catena**, v. 147, p.595-620. 2016.
- PANDEY, B. K.; GOSAIN, A.; PAUL, G.; KHARE, D. Climate change impact assessment on hydrology of a small watershed using semi - distributed model. **Applied Water Science**, 7(4), 2029 - 2041. 2016. DOI:10.1007/s13201-016-0383-6
- PAROISSIEN, J.B.; DARBOUX, F.; COUTURIER, A.; DEVILLERS, B.; MOUILLOT, F.; RACLOT, D.; LE BISSONNAIS, Y. A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). **J. Environ. Manag.** 150, 57–68. 2015.

- PEREIRA, J. P. F. A.; KUWAJIMA, J. I.; CAMARGO, A. A. B.; MAUAD, F. F. Analysis of changes in the mosaic of use and occupation of the area surrounding the Represa do Lobo (Itirapina/SP) between 2004 and 2009 and the siltation of the dam. **Anais IWRA World Water Congress**. 2011.
- PERIOTTO, N. A.; TUNDISI, J. G. Ecosystem services of UHE Carlos Botelho (Lobo/Broa): a new approach for management and planning of dams multiple-uses. **Brazilian Journal of Biology**, 73(3), 471–482. 2013. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842013000300003>.
- PERRIN, C.; MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, V. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. **J. Hydrol.** 242, 275–301. 2001.
- PINTO, G.S.; SERVIDONI, L.E.; LENSE, G.E.H.; MOREIRA, R.S.; MINCATO, R. L. Estimation of soil losses by water erosion using the Erosion Potential Method. **Revista do Departamento de Geografia**, 39. 2020. DOI: 10.11606/rdg.v39i0.160233
- PLAMIERI, A.; SHAH, F.; DINAR, A. Economic of reservoir sedimentation and sustainable management of dams. **J. Environ. Manage.** 61 149–163. 2001. <https://doi.org/10.1006/jema.2000.0392>
- POESEN, J.; NACHTERGAELE, J.; VERSTRAETEN, G.; VALENTIN, C. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. **Catena** 50 (2), 91–133. 2003.
- PREIN, A.F.; RASMUSSEN, R.M.; IKEDA, K.; LIU, C.; CLARK, M.P.; HOLLAND, G.J. The future intensification of hourly precipitation extremes. **Nat. Clim. Chang.**, 7, 48–52, 2017. doi:10.1038/nclimate3168
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K.; YODER, D.C. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Agric. Handb. Number 703. 1997.
- RIQUETTI, N.B.; MELLO, C.R.; BESKOW, S.; VIOLA, M.R. Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives. **Sci. Total Environ.** 724, 138315. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138315>
- RISTIC, R., RADIC, B., NIKIC, Z., TRIVAN, G., VASILJEVIĆ, N., DRAGIĆEVIĆ, S., ŽIVKOVIĆ, N., RADOSAVLJEVIĆ, Z.: Erosion control and protection from torrential floods in Serbia-spatial aspects. **Spatium International Review**, 25. pp. 1-6, 2011a. <http://dx.doi.org/10.2298/SPAT1125001R>
- RISTIC, R.; RADIC, B.; VASILJEVIC, N.; NIKIC, Z. Land use change for flood protection - a prospective study for the restoration of the river Jelasnica watershed. **Bulletin of the Faculty of Forestry**. 103: 115-130. 2011b.
- ROUTSCHEK, A.; SCHMIDT, J.; KREIENKAMP, F. Impact of climate change on soil erosion - a high-resolution projection on catchment scale until 2100 in Saxony/Germany. **Catena** 121, 99 - 109. 2014.
- RUDORFF, B.F.T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W.F.; SUGAWARA, L.M.; ADAMI, M.; MOREIRA, M.A. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in the State of São Paulo (Brazil) using Landsat data. **Remote Sens**, pp. 1057 – 1076. 2010.
- SAKUNO, N. R. R.; GUIÇARDI, A.C.F.; SPALEVIC, V.; AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.S.; MINCATO, R. L. Adaptation and application of the erosion potential method for tropical soils. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 51, n. 1, e20186545, 2020.

SÁNCHEZ, M. V.; BISSONNAIS, Y.L.; MOUSSA, R.; RAPIDEL, B. Temporal dynamics of runoff and soil loss on a plot scale under a coffee plantation on steep soil (Ultisol), Costa Rica. **Journal of Hydrology**, 523(1):409-426. 2015. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.058

SANT'ANNA NETO, J. L. A climatologia dos geógrafos: a construção de uma abordagem geográfica do clima. In: Uma geografia em movimento. 1ed. São Paulo: **Expressão Popular**, v.1, p. 295-318. 2010.

SANTOS, J. C. N.; ANDRADE, E.M.; MEDEIROS, P.H.A.; PALÁCIO, H.A.Q; ARAÚJO NETO, J.R. Sediment delivery ratio in a small semiarid watershed under conditions of low connectivity. **Agricultural Science Magazine**, v. 48, n. 1, p. 49-58. 2017. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170006>

SÃO PAULO. **Modelo Digital De Elevação (MDE) do Estado de São Paulo obtido a partir da base do Gisat (Cartas Topográficas Na Escala 1:50.000)**. Coordenadoria de Planejamento Ambiental, Secretaria do Meio Ambiente do estado de São Paulo, 2013. Disponível em: <<https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/cpla/modelo-digital-de-elevacao-mde-do-estado-de-sao-paulo/>> Acesso em: 25/04/2021.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVÊS, A. M Hydrological classification of Brazilian soils for the estimation of excess rainfall using the method of the US Soil Conservation Service Part 1: Classification. **Brazilian Journal of Water Resources**, vol. 10, no. 4, p. 05-18. 2008.

SCARPINELLA, G. A.; MIRANDA, R. B.; MAUAD, F. F. Estimation of erosion in earth roads of sugarcane using Universal Soil Loss Equation. **Eng Sanit Ambiental**. v.24 n.5. p.959-963. 2019.DOI: 10.1590/S1413-41522019134567

SCHLAEPFER, D.R.; BRADFORD, J.B.; LAUENROTH, W.K.; MUNSON, S.M.; TIETJEN, B.; HALL, S.A.; WILSON, S.D.; DUNIWAY, M.C.; JIA, G.; PYKE, D.A.; LKHAGVA, A.; JAMIYANSHARAV, K. Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils. **Nat. Commun.**, 8, 14196, 2017. doi:10.1038/ncomms14196.

SCHLEUSSNER, C.F.; P. PFLEIDERER; E.M. FISCHER. In the observational record half a degree matters. **Nat. Clim. Chang.**, 7, 460–462, 2017. doi:10.1038/nclimate3320.

SCHLIEP, E. M.; COOLEY, D.; SAIN, S. R.; HOETING, J. A. A comparison study of extreme precipitation from six different regional climate models via spatial hierarchical modeling. **Extremes**, v. 13, i. 2, p. 219-239, 2010.

SCHUMANN, A.H. Development of conceptual semi-distributed hydrological models and estimation of their parameters with the aid of GIS. **Hydrol. Sci. J.** 38 (6), 519–528. 1993.

SENEVIRATNE, S.I.; NICHOLLS, N.; EASTERLING, D.; GOODESS, C.M.; KANAE, S.; KOSSIN, J.; LUO, Y.; MARENGO, J.; MCINNES, K.; RAHIMI, M.; et al. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge and New York. 109–230. 2012.

SERPA, D.; NUNES, J.P.; SANTOS, J.; SAMPAIO, E.; JACINTO, R.; VEIGA, S.; LIMA, J.C.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; KEIZER, J.J.; ABRANTES, N. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. **Sci. Total Environ.** 538, 64–77. 2015.

- SERVIDONI, L.E.; AYER, J.E.B.; SILVA, M.L.N.; SPALEVIC, V.; MINCATO, R.L. Land use capacity and environment services. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 09, p. 1712-1724. 2016. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.6.p1712-1724>
- SERVIDONI, L.E.; OLIVEIRA JÚNIOR, B.M.; BISSOLI, M.C.; MINCATO, R.L. Land use capacity, soil conservation and agricultural production: a case study of the Ribeirão Caçús sub-basin, Alfenas – MG. Interspace: **Journal of Geography and Interdisciplinarity**, Grajaú, v. 05, p. 01-20. 2019. <https://doi.org/10.18764/2446-6549.2019.12119>
- SHI, H.Y.; WANG, G.Q. Impacts of climate change and hydraulic structures on runoff and sediment discharge in the middle Yellow River. **Hydrol. Process.** 29 (14), 3236–3246. 2015.
- SHRESTHA, B.; COCHRANE, T.A.; CARUSO, B.S.; ARIAS, M.E.; PIMAN, T. Uncertainty in flow and sediment projections due to future climate scenarios for the 3S Rivers in the Mekong Basin. **Journal of Hydrology**, 540, 1088–1104, 2016. doi:10.1016/j.jhydrol.2016.07.019.
- SILVA, M.A.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; AVANZI, J.C.; LEITE, F.P. Management systems in eucalyptus forest plantations and soil and water losses in the region of Vale do Rio Doce, MG. **Forest Science**, Santa Maria, v. 21, p. 765-776. 2011. <https://doi.org/10.5902/198050984520>
- SILVA, R.M.; SANTOS, C.A.G; SILVA, A.M. Predicting soil erosion and sediment yield in the tapacurá catchment, Brazil. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v.8, n.1 p. 75-82. 2014. DOI: 10.4090/juee.2014.v8n1.075082
- SIMONNEAUX, V.; CHEGGOUR, A.; DESCHAMPS, C.; MOUILLOT, F.; CERDAN, O.; LE BISSONNAIS, Y. Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco). **J. Arid Environ.** 122, 64–75. 2015.
- SOLAIMANI, K.; MODALLALDOUST, S.; LOTFI, S. Soil erosion prediction based on land use changes (A case in Neka watershed). **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, 4, 2, pp. 97- 104. 2009.
- SOROOSHIAN, S. Parameter Estimation, Model Identification, and Model Validation: Conceptual-Type Models. Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems. **Springer**, Netherlands, pp. 443–467. 1991
- STEFANIDIS, S.; STATHIS, D. Effect of climate change on soil erosion in a mountainous Mediterranean catchment (Central Pindus, Greece). **Water**, 10. 2018. doi:10.3390/w10101469
- STEHR, A.; DEBELS, P.; ARUMI, J. L., ALCAYAGA, H.; ROMERO, F. Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro sur de Chile. **Tecnología y ciencias del agua**, 1 (4), 37 – 58. 2010.
- TABARI, H. Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. **Sci. Rep.** 10-13768. 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- TANG, J.L.; CHENG, X.Q.; ZHU, B.; GAO, M.R.; WANG, T.; ZHANG, X.F.; ZHAO, P.; YOU, X. Rainfall and tillage impacts on soil erosion of sloping cropland with subtropical monsoon climate — a case study in hilly purple soil area, China. **J. Mt. Sci.** 12 (1), 134–144. 2015.
- TANGESTANI, M. H. Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran. **Journal of Asian Earth Sciences**, 27, p. 585-597. 2006.
- TAVARES, A.S.; SPALEVIC; V.; AVANZI, J.C.; NOGUEIRA, D.N.; SILVA, M. L. N.; MINCATO, R. L. Modeling of water erosion by the erosion potential method in a pilot subbasin

in southern Minas Gerais. Semina: **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 40, n. 2, p. 555-572, 2019. DOI: 10.5433/1679-0359.2019v40n2p555

TAVARES, A.S.; UAGODA, R.E.S.; SPALEVIC, V.; MINCATO, R.L. Analysis of the erosion potential and sediment yield using the IntErO model in an experimental watershed dominated by karst in Brazil. **Agriculture and Forestry**, 67 (2): 153-162. 2021.

TAYLOR, C.M.; BELUŠIĆ, D.; GUICHARD, F.; PARKER, D.J.; VISCHEL, T.; BOCK, O.; HARRIS, P.P.; JANICOT, S.; KLEIN, C.; PANTHOU, G. Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. **Nature**, 544, 475–478. 2017. doi:10.1038/nature22069.

THERON, S.N.; WEEPENER, H.L.; LE ROUX, J.J.; ENGELBRECHT, C.J. Modelling potential climate change impacts on sediment yield in the Tsitsa River catchment, South Africa. **Water SA**, 47. 2021. <https://doi.org/10.17159/wsa/2021.v47.i1.9446>

THOMPSON, V.; DUNSTONE, N.J.; SCAIFE, A.A.; SMITH, D.M.; SLINGO, J.M.; BROWN, S.; BELCHER, S.E. High risk of unprecedented UK rainfall in the current climate. **Nat. Commun.**, 8, 107, 2017. doi:10.1038/s41467-017-00275-3.

TIMBAL, B.; FERNANDEZ, E.; LI, Z. Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. **Environ. Model. Softw.** 2009, 24, 341–358.

TIMM, O.E.; GIAMBELLUCA, T.W.; DIAZ, H.F. Statistical downscaling of rainfall changes in Hawai'i based on the CMIP5 global model projections. **J. Geophys. Res. Atmos.** 2015, 120, 92–112

TYAGI, J. V.; MISHRA, S.; SINGH, R.; SINGH, V.P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal of hydrology**, v. 352, n. 3-4, p. 388-403. 2008.

VAN VUUREN, D.P., EDMONDS, J., KAINUMA, M. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change** 109, 5. 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Aggregation and carbon stock in an Argisol subjected to different agricultural management practices. **Brazilian Journal of Soil Science**, v.35, n.1, p.213-223. 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100020>.

VOGT, J.V., COLOMBO, R., BERTOLO, F.: Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. **Geomorphology**, 53. 3-4, pp. 281-298, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00319-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00319-7)

WALLING, D.; WEBB, B. Erosion and sediment yield: a global overview. **IAHS Publ.** 236, 3–20. 1996

WANG, J.; WANG, K.L.; ZHANG, M.Y.; ZHANG, C.H. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly southern China. **Ecol. Eng.** 81, 451–461. 2015.

WATANABE, M., et al. (2010) Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. **Journal of Climate**, 23, 6312-6335.

WHEATER, H.S; JAKEMAN, A.J.; BEVEN, K.J. Progress and Directions in Rainfall-Runoff Modelling. In: Jakeman, A.K., Beck, M.B., McAleer, M.J. (Eds.), Chapter 5, Modelling Change in Environmental Systems. John Wiley and Sons, **Chichester**, pp. 101–132. 1993.

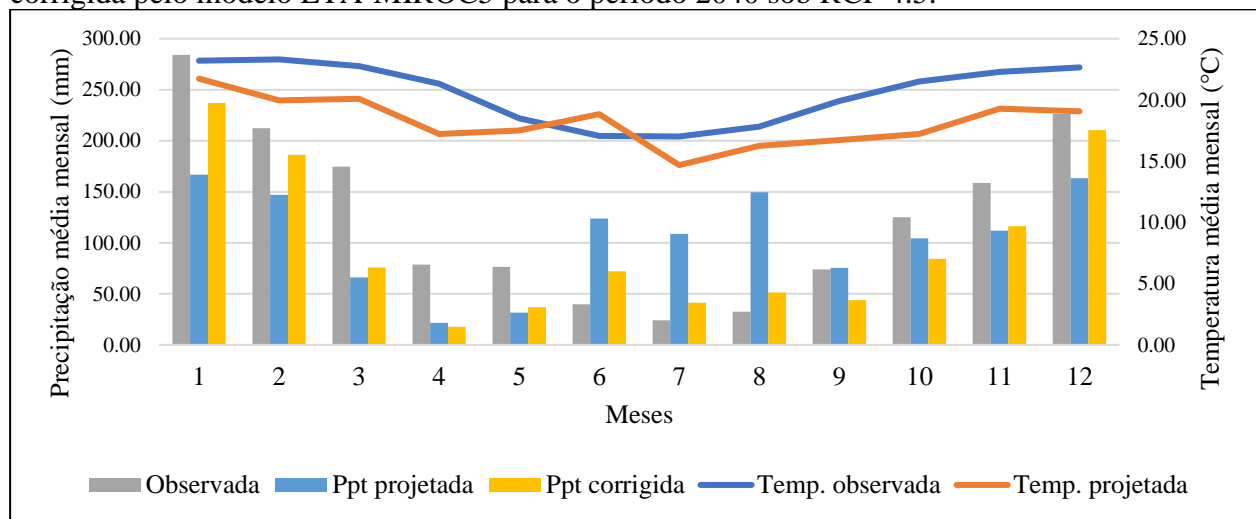
- WILLMOTT, C.J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Clim. Res.** 2005, 30, 79–82.
- WILLMOTT, C.J.; MATSUURA, K. On the use of dimensioned measures of error to evaluate the performance of spatial interpolators. **Int. J. Geogr. Inf. Sci.** 2006, 20, 89–102.
- WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. **United States Department of Agriculture**, 1978. 58p.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion from crop land east of the Rocky Mountain: Guide for selection of practices for soil and water conservation. **U. S. Department of Agriculture Handbook**. 282p. 1965.
- XU, Q.X.; WANG, T.W.; CAI, C.F.; LI, Z.X.; SHI, Z.H.; FANG, R.J. Responses of runoff and soil erosion to vegetation removal and tillage on steep lands. **Pedosphere**, 23:532-541. 2013.
- YAO, H.; SHI, C.; SHAO, W.; BAI, J.; YANG, H. Impacts of climate change and human activities on runoff and sediment load of the Xiliugou Basin in the Upper Yellow River. **Adv. Meteorol.** 2015, 12. 2015.
- YOUSEFI, S.; KIVARZ, N.; RAMEZANI, B.; RASOOLZADEH, N.; NADERI, N.; MIRZAEI, S. An Estimation of Sediment by Using Erosion Potential Method and Geographic Information Systems in Chamgardalan Watershed: A Case Study of Ilam Province, Iran. **Geodynamics Research International Bulletin**. 2, v.2. 2014.
- ZABALETA, A.; MEAURIO, M.; RUIZ, E.; ANTIGÜEDAD, I. Simulation climate change impact on runoff and sediment yield in a small watershed in the Basque Country, northern Spain. **J. Environ. Qual.** 43 (1), 235–245. 2014.
- ZEMPLJIC, M. Calculation of sediment load. Evaluation of vegetation as an anti-erosive factor. In: **Proceedings of the international symposium Interpraevent**, 379-391. 1971.
- ZORITA, E.; HUGHES, J.P.; LETTEMAIER, D.P.; VON STORCH, H. Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation. **J. Clim.** 8 (5), 1023–1042. 1995.

APÊNDICES

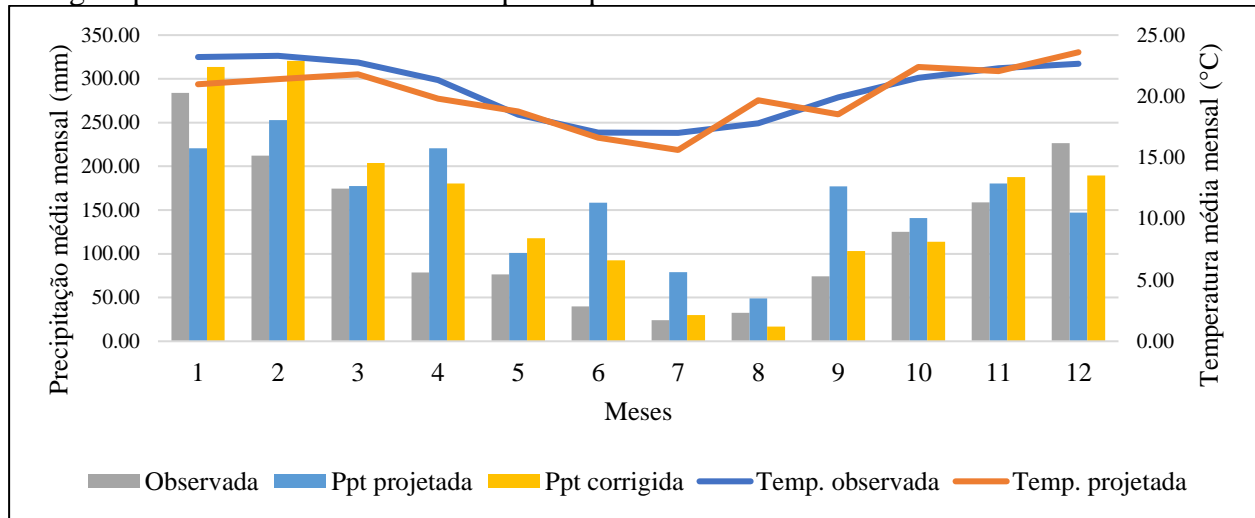
APÊNDICE A - Fator multiplicativo (f) obtido para ETA-MIROC5 e ETA-HadGEM2-ES

Mês	(f) ETA-MIROC5	(f) ETA-HadGEM2-ES
Janeiro	1,42	1,12
Fevereiro	1,27	0,95
Março	1,15	0,97
Abril	0,82	0,70
Maio	1,17	0,93
Junho	0,58	0,57
Julho	0,38	0,24
Agosto	0,34	0,27
Setembro	0,58	0,57
Outubro	0,81	0,71
Novembro	1,04	0,78
Dezembro	1,29	1,06

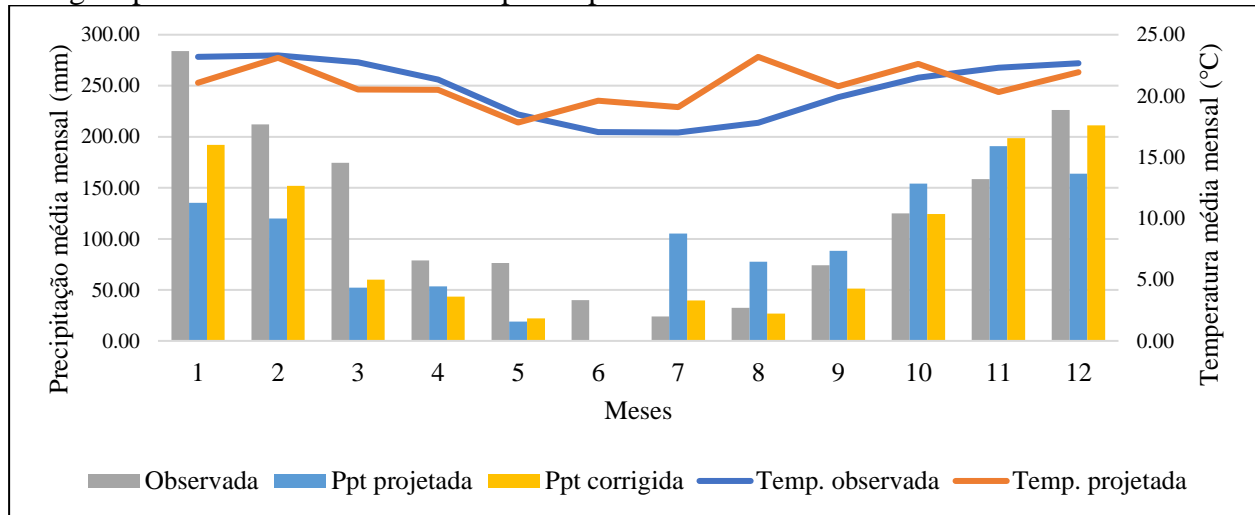
APÊNDICE B - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-MIROC5 para o período 2040 sob RCP 4.5.



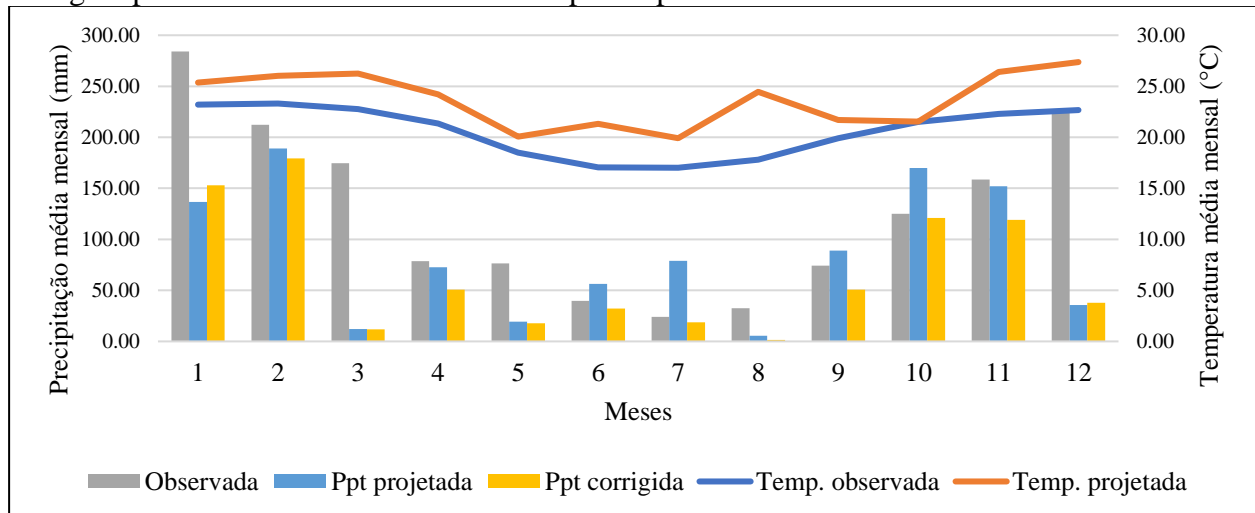
APÊNDICE C - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-MIROC5 para o período 2070 sob RCP 4.5.



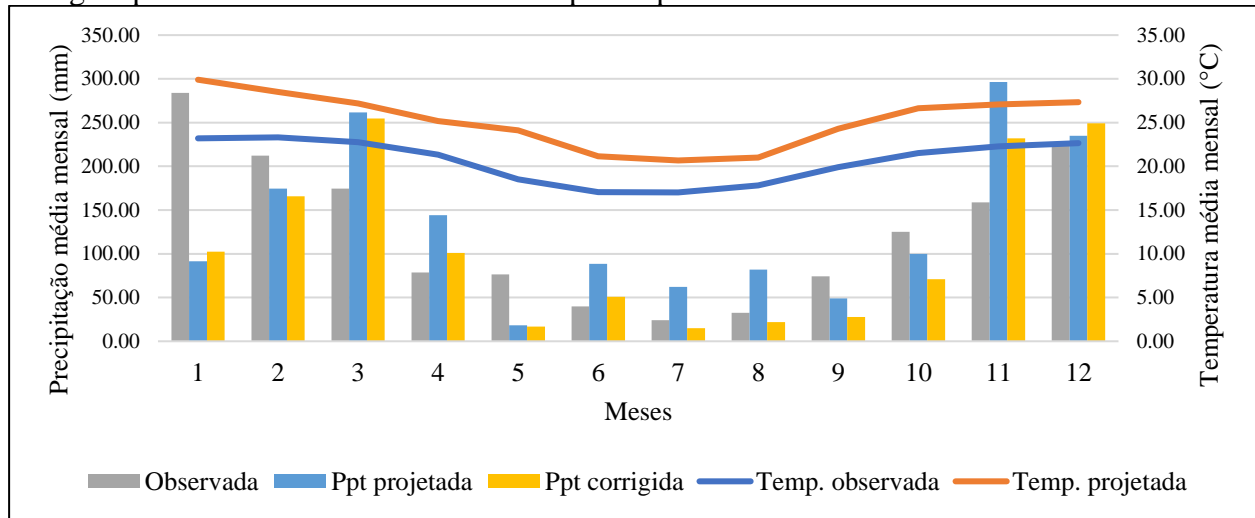
APÊNDICE D - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-MIROC5 para o período 2099 sob RCP 4.5.



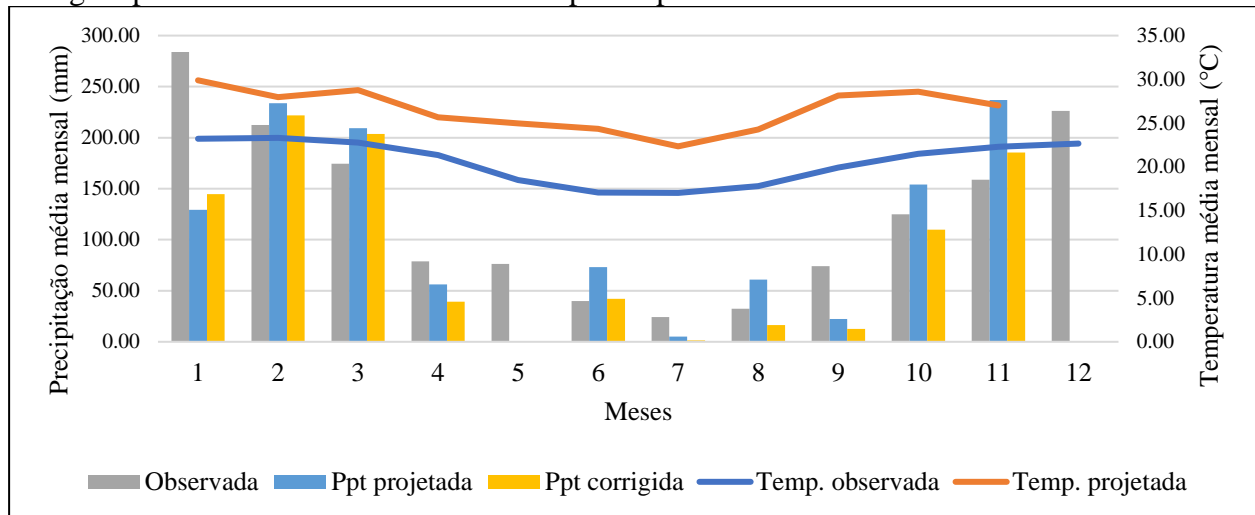
APÊNDICE E - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-HadGEM2-ES para o período 2040 sob RCP 4.5.



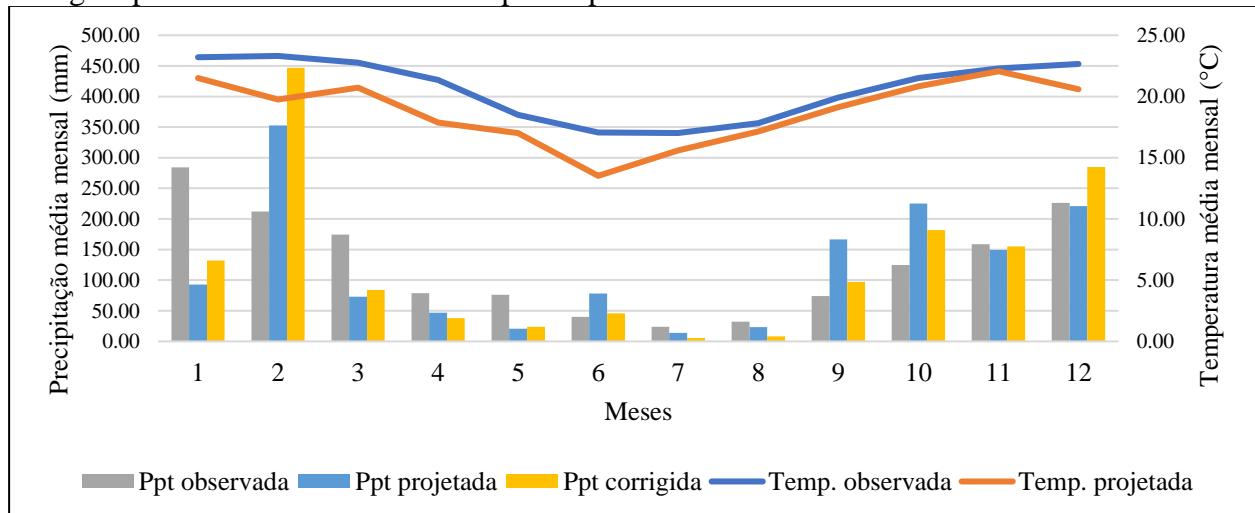
APÊNDICE F - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-HadGEM2-ES para o período 2070 sob RCP 4.5.



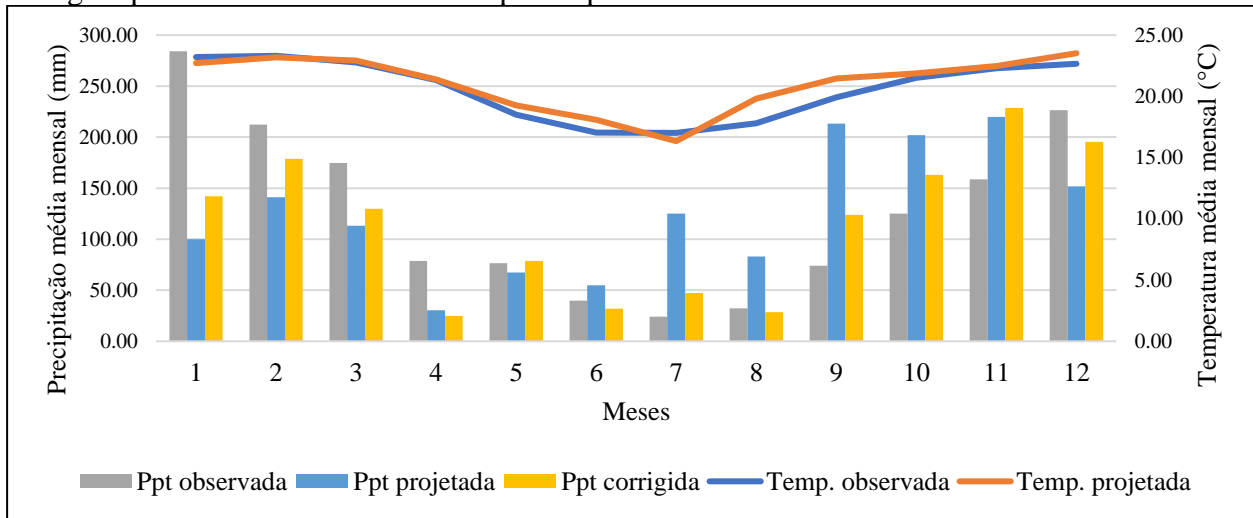
APÊNDICE G - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-HadGEM2-ES para o período 2099 sob RCP 4.5.



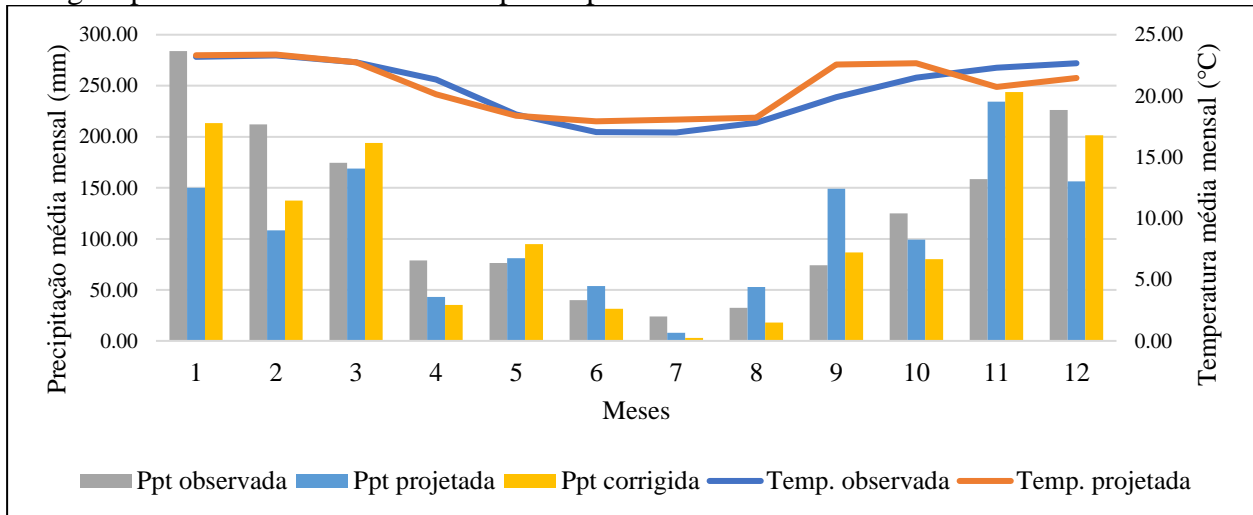
APÊNDICE H - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-MIROC5 para o período 2040 sob RCP 8.5.



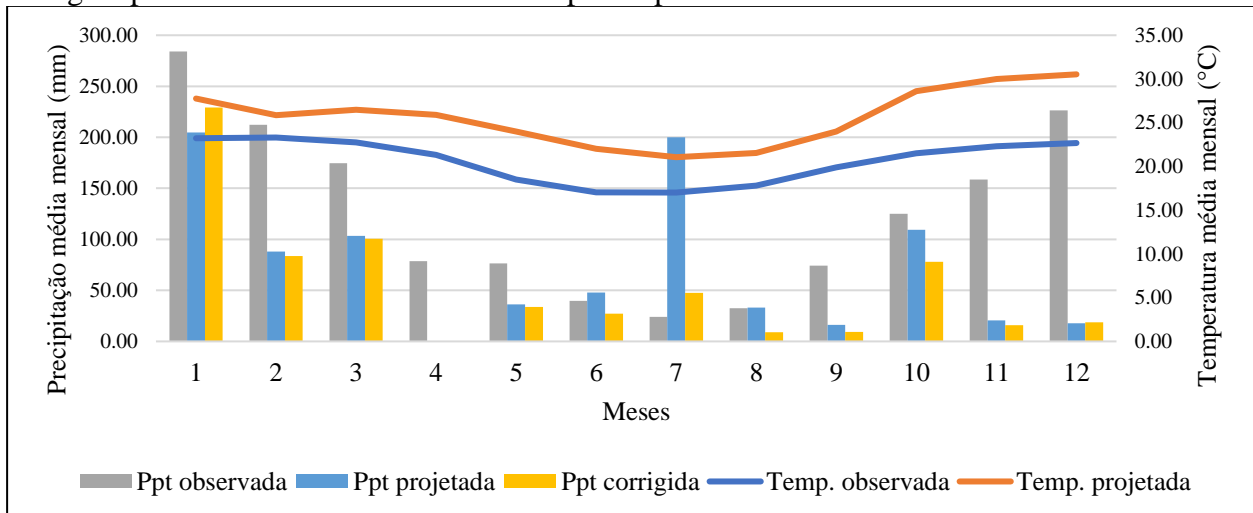
APÊNDICE I - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-MIROC5 para o período 2070 sob RCP 8.5.



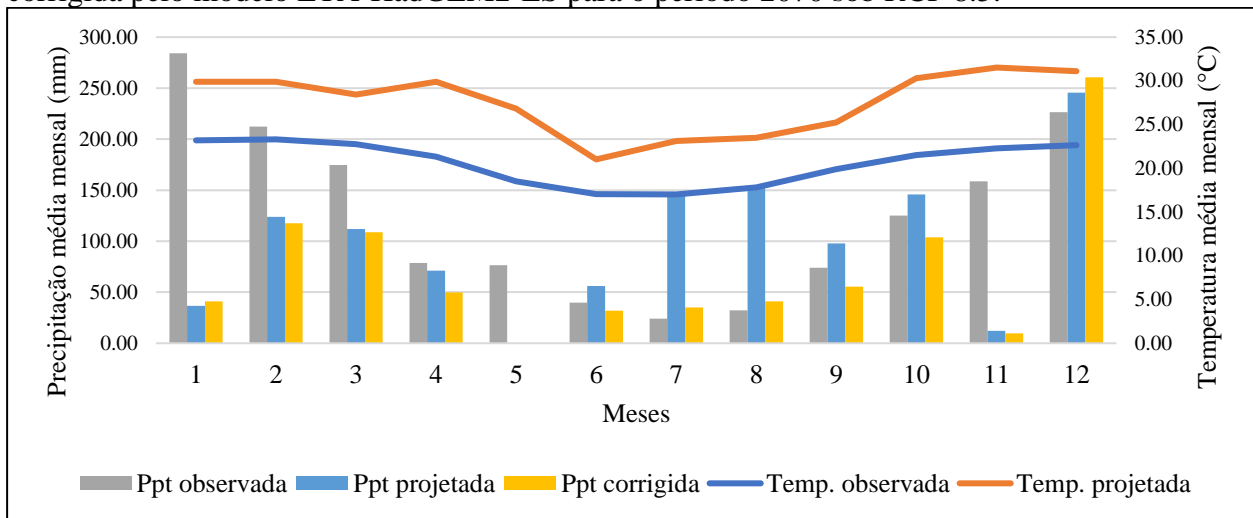
APÊNDICE J - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-MIROC5 para o período 2099 sob RCP 8.5.



APÊNDICE K - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-HadGEM2-ES para o período 2040 sob RCP 8.5.



APÊNDICE L - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-HadGEM2-ES para o período 2070 sob RCP 8.5.



APÊNDICE M - Precipitação e temperatura média mensal observada (1981-2005), projetada e corrigida pelo modelo ETA-HadGEM2-ES para o período 2099 sob RCP 8.5.

