

LARA LIMA REIS

**EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO USO E COBERTURA DO SOLO E
MODELAGEM HIDROLÓGICA EM REGIÃO MONTANHOSA NO SUDESTE DO
BRASIL**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho

Coorientadores: Márcio Rocha Francelino
Lucas de Carvalho Gomes

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R375e
2021

Reis, Lara Lima, 1997-

Evolução espaço-temporal do uso e cobertura do solo e modelagem hidrológica em região montanhosa no sudeste do Brasil / Lara Lima Reis. – Viçosa, MG, 2021.

1 dissertação eletrônica (96 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexos.

Inclui apêndices.

Orientador: Elpídio Inácio Fernandes Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2021.061>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solo - Uso. 2. Bacias hidrográficas - Modelos matemáticos. 3. Mapeamento florestal. 4. Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura da Terra no Brasil. 5. Áreas protegidas. 6. Hidrografia. 7. Modelos hidrológicos.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas.
II. Título.

CDD 22. ed. 631.478151

LARA LIMA REIS

**EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DO USO E COBERTURA DO SOLO E
MODELAGEM HIDROLÓGICA EM REGIÃO MONTANHOSA NO SUDESTE DO
BRASIL**

Dissertação apresentada a Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 27 de julho de 2021

Assentimento:

3,



Lara Lima Reis
Autora



Elpídio Inácio Fernandes Filho
Orientador

Aos meus pais, Eliane e Edinho. Essa vitória é por eles, e principalmente dedicada a eles!

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proteger, e guiar durante todo o caminho. Pela benção de conhecer pessoas tão incríveis, e por permitir que elas permanecessem pertinho de mim, realizando este sonho!

A minha família, meus pais Eliane e Edinho, por serem meus pilares, minha fonte diária de resiliência, fé e amor. Vocês são a maior razão da minha perseverança! A Diná por continuar adoçando minha vida, com seu carinho, fé e proteção!

Ao Gustavo, por ser meu companheiro de sonhar, e principalmente realizar sonhos! Por tornar a minha vida mais leve, e os dias mais felizes com seu amor, lealdade, encorajamento e força. Aos meus sogros, Dailde e Mauricio, e minha cunhada Debora, pelo cuidado e carinho!

As minhas amigas, “irmãs de alma”, por continuarem comigo sob quaisquer distância e situação! Aos amigos de Angra, minha família de coração, pelos momentos especiais e todo apoio!

Aos que cruzaram meu caminho e não estão mais fisicamente presentes, mas deixaram comigo aprendizado e lembranças incríveis. Sigo com vocês eternamente em meu coração!

A todos os professores que tive a sorte de conhecer, por ensinamentos inesquecíveis, pelo exemplo de dedicação e paixão pela ciência. Ao meu orientador Elpidio, por me ensinar sobre força, determinação e coragem. Ao Lucas, meu coorientador, pela parceria, incentivo e confiança. As meninas do Curso de SWAT, pela reciprocidade e apoio. Aos colegas de Departamento, em especial a família do Labgeo, pelo companheirismo, e por me ajudarem a tornar possível a conclusão desse trabalho!

A UFV, e ao Departamento de Solos, toda a minha admiração, respeito e orgulho, por terem me ensinado muito além das salas de aulas e laboratórios. Por me proporcionarem novos desafios, sentimentos, e mudanças profundas, que ficarão marcadas eternamente na minha história!

Ao conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

*“Com passos pequeninos todos os dias alcançamos
sonhos enormes!”*

RESUMO

REIS, Lara Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2021. **Evolução espaço-temporal do uso e cobertura do solo e modelagem hidrológica em região montanhosa no sudeste do Brasil.** Orientador: Elpidio Inácio Fernandes Filho. Coorientadores: Lucas de Carvalho Gomes e Márcio Rocha Francelino.

As mudanças de uso e cobertura do solo no Brasil desde o início da colonização ocorreram na maioria das vezes sem um planejamento prévio, tanto nas áreas rurais como nas áreas urbanas, o que pode ter influenciado a biodiversidade e serviços ecossistêmicos como a disponibilidade hídrica. A perda de solo associada ao uso e ocupação de áreas inadequadas afeta tanto a fauna e flora nativas, quanto a vazão dos cursos d'água, e conseqüentemente prejudica a qualidade de vida das pessoas. Problemas socioambientais como inundações e a falta d'água afetam milhares de pessoas todos os anos. Assim, o presente trabalho tem como objetivo geral fazer análise espaço temporal e modelagem hidrológica da bacia do Turvo Sujo a fim de fornecer subsídios para proteção e recuperação das áreas mais impactadas, e preservação do curso d'água. A bacia do rio Turvo Sujo é uma sub bacia do Rio Doce, e está localizada na Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. A proposta desse trabalho surgiu da preocupação com questões importantes como a falta de água vivenciada nos últimos anos em Viçosa, o grau de degradação dos leitos do rio Turvo Sujo e da constatação de mudanças no uso e cobertura do solo na bacia. Por essas razões, analisar o histórico e futuro pode fornecer informações para um melhor planejamento ambiental, com subsídios para a recuperação das áreas mais impactadas e preservação dos cursos d'água, garantido assim, melhores condições de vida para sociedade dos municípios pertencentes a bacia. Conciliando informações históricas de uso e cobertura do solo, e da hidrografia foi possível entender a dinâmica ambiental e hidrologia da bacia, principalmente em áreas protegidas como as Áreas de Preservação Ambiental (APP) e Reserva Legal (RL) registradas nas propriedades rurais pelos próprios proprietários no Cadastro Ambiental Rural (CAR). Na primeira parte do trabalho, a análise do histórico de mudanças ambientais na bacia foi realizada através da análise dos mapas de uso e cobertura do solo disponíveis na plataforma do MapBiomas, e também informações do CAR sobre as áreas de APPS, RL e nascentes da bacia hidrográfica. Buscando entender a relação das mudanças ambientais com o a sociedade, este trabalho também analisou dados socioeconômicos da região obtidas do IBGE. Na segunda parte do trabalho, foi realizada a análise histórica da vazão da estação fluviométrica presente na bacia e do clima da região, e com o objetivo de avaliar o efeito do uso e cobertura do solo e

do clima na vazão da bacia foi utilizado o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). De forma geral, os resultados com base nos mapas do MapBiomias demonstraram que existe uma tendência de aumento da floresta nativa e diminuição das pastagens entre 1985 e 2019. Essa informação se repete nos resultados das outras análises, como nas APPs, RL, e terço superiores de morros, que tem tido cada vez mais a presença de cobertura florestal. Além disso, as pastagens plantadas estão em crescimento, o que indica aumento do cuidado e manejo na bacia. O modelo SWAT obteve desempenho satisfatório no estudo, e a projeção de cenários foi eficaz para entender o comportamento hidrológico sob diferentes tipos de uso e cobertura do solo. Além disso, demonstrou que os cenários com maiores áreas de floresta nativa, principalmente nas APPS, RL e terços superiores de morros, podem trazer benefícios para a hidrologia da bacia, com maior infiltração de água no solo e conseqüente abastecimento de aquíferos rasos e profundos.

Palavras-chave: Bacia Hidrográfica. Floresta Nativa. MapBiomias. APPs. Hidrografia. SWAT.

ABSTRACT

REIS, Lara Lima, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2021. **Spatiotemporal evolution of land use and land cover and hydrological modeling in a mountainous region in southeastern Brazil.** Adviser: Elpidio Inácio Fernandes Filho. Co-advisers: Lucas de Carvalho Gomes and Márcio Rocha Francelino.

Since the beginning of Brazil's colonization, changes in land use and coverage occurred mostly without any prior planning, either in rural and urban areas, which may have influenced biodiversity and ecosystem services such as water availability. Water loss due to the use and occupation of inappropriate land areas affects native fauna and flora, and streamflow of watercourses, jeopardizing people's life quality. Socio-environmental problems such as flooding and water shortage affect thousands of people every year. Therefore, this work aims to apply a spatial-temporal analysis and hydrological modelling of the Turvo Sujo river basin, in order to subsidize the protection and recovery of the most affected areas and the preservation of the watercourse. The Turvo Sujo river basin is a sub-basin of the Doce river and it is located in the Zona da Mata, Minas Gerais, Brazil. This work proposal came from recent concerns about water shortage observed for Viçosa in the last few years, the degree of degradation noticed in Turvo Sujo River beds, and the observation of changes in land use and coverage in the basin. For these reasons, analyzing the past and future prospects may provide us information for better environmental planning, recovery of highly degraded areas, and preservation of the watercourse, ensuring better living conditions for the population in which the Turvo Sujo basin is located in. By gathering historical informations about the land use and cover of the basin's surroundings as well as its hydrography, it was possible to understand its environmental dynamics and hydrology, especially in protected areas such as Permanent Protected Areas (PPAs) and Legal Reserves (LRs) registered in the Rural Environmental Register system (RER) by the landowners. In the first part of this work, an analysis of the basin's environmental changes history was performed through maps of land use and coverage available at the MapBiomas platform, together with information provided from the RER about the PPAs, LRs, and springs belonging to the Turvo Sujo water basin. In order to understand the relationship between environmental changes and society, this work also analyzed regional socioeconomic data obtained from the IBGE website. In the second part of this work, a historical analysis of the water flow in a streamflow station located in the basin and the region's climate was performed. To assess the effect of land use and cover and the climate on the basin's streamflow,

the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used. SWAT results combined with the different scenarios of land use provided relevant information for the protection and preservation of the Turvo Sujo's basin. Overall, the results based on the maps of the Mapbiomas that there is a tendency of increase in native forest area and decrease in pasture land between 1985 and 2019. These results repeat on the other analyses, such as in the PPAs, LRs, and top-third of hills analyses, that are even more covered by forest vegetation today. Moreover, the pasture planted is at its full growth, indicating increased care about the basin's surroundings. The SWAT model presented a satisfactory performance in this study and the scenarios projection was effective to understand the hydrological behavior under different land uses and covers. Besides, it demonstrated that the scenarios that presented more native forest area, mainly in the APPS, RL and the top third of the hills, can benefit the basins hydrology, providing better water infiltration in soil and, consequently, the supply of shallow and deep aquifers.

Keywords: Water Basin. Native Forest. MapBiomias. PPAs. Hydrography. SWAT.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	12
CAPITULO 1: ANÁLISE DE USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TURVO SUJO – MG	15
INTRODUÇÃO.....	15
MATERIAS E METODOS	16
1.1 Caracterização da área de estudo.....	16
1.2 Processamento dos dados do MapBiomas.....	19
2.3 Processamento dos dados do CAR	20
2.4 Processamento dos Dados do Censo Agropecuário do IBGE	21
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
3.1 Histórico de mudanças de uso e cobertura da terra	22
3.2 Áreas de Proteção Ambiental (APP)	27
3.3 Reserva Legal	31
3.4 Índice de Nascentes	32
3.5 Relação do Histórico dos dados socioeconômicos com as mudanças de uso e cobertura do solo.....	33
CONCLUSÕES	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	39
APÊNDICES	43
CAPÍTULO 2: ANÁLISE HISTÓRICA DA HIDROGRAFIA E PROJEÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TURVO SUJO - MG.....	47
1. INTRODUÇÃO.....	47
MATERIAS E MÉTODOS.....	49
2.1 Caracterização da Área de Estudo:	49
2.2 Dados Meteorológicos	50
2.3 Dados históricos de Vazão:	51
2.4 SWAT (Soil and Water Assessment Tool).....	51
2.4.1 BANCO DE DADOS PARA PROCESSAMENTO DO SWAT:	52
Modelo Digital de Elevação.....	53
Dados de solos	54
Dados de Uso e Cobertura do solo.....	56
2.4.2 PROCESSAMENTO NO SWAT:	58

2.4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	58
2.4.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	59
2.4.5 PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT	61
2.4.6 EFEITOS DAS MUDANÇAS DE USO E CLIMA NA HIDROLOGIA	62
RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.1 Analise dos Dados Históricos Meteorológicos e da Vazão	64
3.2 Analise do Modelagem Hidrológica com SWAT	68
3.2.1 ANÁLISE DA PRÉ CALIBRAÇÃO	68
3.2.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO	69
3.2.4 EFEITOS DAS MUDANÇAS DE USO E CLIMA NA HIDROLOGIA	73
CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICES	87
CONSIDERAÇÕES GERAIS	96

INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento da população global, as mudanças no uso e cobertura do solo e no clima, juntamente da gestão sustentável dos recursos hídricos são grandes desafios para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e bem-estar humano. Os padrões climáticos e as mudanças de uso e cobertura do solo são os fatores mais importantes da dinâmica da água, um dos principais serviços ecossistêmicos (Costa et al., 2003). Mudanças no uso e cobertura do solo foram reconhecidas como o principal fator de degradação da qualidade da água, no entanto, diferentes tipos e intensidades de mudanças de uso e cobertura afetam a qualidade da água de maneiras e escalas (espaciais e temporais) diferentes (MELLO,2020). Como um dos principais efeitos dessas mudanças, os processos erosivos representam um problema, não somente pela perda de solo e áreas agricultáveis, mas também por trazerem consequências negativas relacionadas ao assoreamento e contaminação dos cursos de água, lagos e represas em nível local ou até mesmo em grandes áreas (LELIS, 2011). A erosão dos solos causa uma gama de efeitos negativos, desde a sua própria degradação, passando por problemas ambientais de uma forma geral, em que se verificam sérios impactos no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas (TUCCI, 1997).

A bacia hidrográfica é o palco unitário de interação das águas com o meio físico, meio biótico, meio social, econômico e cultural (YASSUDA, 1993). O estudo em bacias hidrográficas possibilita retorno rápido de respostas sobre o seu estado de conservação, ou degradação, por serem consideradas, como a menor unidade geomorfológica natural da paisagem capaz de integrar todos os componentes relacionados com a qualidade e disponibilidade de água, sendo uma área experimental adequada para a quantificação de impactos (LOPES, 2008; Machado, 2002). O conhecimento prévio de localização das áreas mais degradadas, é uma importante ferramenta de tomada de decisão em relação ao gerenciamento de bacias hidrográficas. (PIMENTEL, 2017). Dessa forma, o desenvolvimento socioeconômico e as políticas públicas que favorecem a conservação e a expansão da floresta podem contribuir para bacias hidrográficas sejam mais resilientes a extremos climáticos, os quais tendem a ocorrer com mais frequência no futuro (GOMES et al.2021; IPCC, 2018).

O impacto das mudanças no uso do solo nas características hidrossedimentológicas das bacias hidrográficas pode ser avaliado em termos qualitativos e quantitativos através da construção de cenários utilizando modelos matemáticos associados a Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que facilitam a manipulação e interpretação dos dados (LELIS, 2011). Neste sentido, surgiram os modelos hidrológicos que são capazes de representar os processos do ciclo

hidrológico, simular e compreender o comportamento de uma bacia hidrográfica e suas variáveis. Seus objetivos podem ser analisar o efeito gerado por mudanças climáticas, pelo uso e manejo do solo e pela precipitação no regime de variação de vazões e na quantidade de sedimentos desprendidos e transportados para os corpos d'água (TUCCI, 1998; ARNOLD et al., 2000; FUKUNAGA et al., 2015). O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), é um simulador hidrológico, que foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service of the United States Department of Agricultural* (ARS - USDA), na década de 90, e atualmente é um dos principais modelos hidrológicos mais utilizados em todo o mundo, em estudos ecológicos, hidrológicos e ambientais (ARNOLD, et al. 2012). Tem sido aplicado para um amplo conjunto de questões de recursos hídricos em diversas escalas de bacias e condições ambientais, conforme evidenciado por aproximadamente 4.000 publicações documentadas (CARD, 2019; TAN et al. 2019). Além disso, o modelo tem sido amplamente usado para projetar os impactos de futuras mudanças hidroclimáticas. A maioria dos estudos com o SWAT ainda ocorrem em bacias de médio e grande porte, demonstrando a necessidade de entender os efeitos de potenciais mudanças extremas na hidrologia em bacias de menor escala no futuro (TAN et al. 2020).

Diante do exposto, este trabalho tem como área de estudo a Bacia do Rio Turvo Sujo, uma Sub-bacia do Rio Doce, que está localizada nos municípios de Cajuri, Coimbra, Teixeira e Viçosa, em Minas Gerais, e contém uma extensão de aproximadamente 40.000 hectares. O Rio Turvo Sujo é muito importante para a região em termos de abastecimento de água para a população, diluição de efluentes domésticos e industriais, pecuária e agricultura, (NUNES, et al. 2011). Foram contatadas irregularidades ambientais com grau de degradação dos leitos dos rios, falta de água vivenciada nos últimos anos, e aumento do período de seca durante o ano. Além disso, a bacia está situada na região serrana do sudeste do bioma Mata Atlântica, que experimentou um aumento na cobertura florestal principalmente devido a medidas governamentais contra desmatamento e intensificação da agricultura (Gomes et al., 2020). Por essas razões, a Bacia do Turvo Sujo foi escolhida como área de estudo, e o objetivo da análise espaço temporal é fornecer subsídios para recuperação das áreas mais impactadas e preservação dos cursos d'água, proporcionando melhores condições de vida para sociedade atual e futura dos municípios pertencentes a bacia.

O primeiro capítulo abordará as mudanças de uso e cobertura do solo na bacia do Rio Turvo Sujo, durante os anos de 1985 e 2019, com base na série histórica de mapas do Projeto de Mapeamento Anual do Uso e Cobertura do solo no Brasil (Mapbiomas), uma iniciativa que

envolve uma rede colaborativa com especialistas nos biomas, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação utilizando processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine, com resolução espacial de 30 metros (<https://mapbiomas.org/o-projeto>). Esta análise espaço temporal através dos mapas também será realizada de forma mais específica nas Áreas de Preservação Permanente (APP), Reservas Legais (RL) e nascentes registradas pelos proprietários rurais no Cadastro Ambiental Rural (CAR), e que no futuro com a implementação do Programa de Regularização Ambiental (PRA), receberão apoio governamental para manutenção e continuidade da conservação. Os dados históricos do IBGE serão analisados visando entender a relação entre as mudanças de uso e cobertura com os dados socioeconômicos da região.

O segundo capítulo tem como objetivo avaliar o efeito das mudanças do uso do solo e clima na vazão da bacia do Turvo Sujo. Para isto, será implementada a modelagem hidrográfica através do SWAT, com uso de dados climáticos da estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), e medições de vazões da Estação Pluviométrica da Agência Nacional das Águas (ANA) localizadas na bacia. Além disso, serão realizadas projeções de possíveis cenários futuros, considerando o reflorestamento nas APPs e RLs das propriedades rurais, conforme determina o novo código florestal, lei 12.651 de 2012 (BRASIL, 2012); simulações de cenários, com base em mapas de uso e cobertura de diferentes anos; e, por fim, um cenário considerando a importância hidrológica da cobertura vegetal nos terços superiores dos morros em uma bacia hidrográfica.

CAPITULO 1: ANÁLISE DE USO E COBERTURA DO SOLO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TURVO SUJO – MG

INTRODUÇÃO

A intensidade das atividades antrópicas nas últimas décadas, especialmente as mudanças de uso e cobertura do solo, levaram a degradação de vários ambientes (Foley et al., 2005), e é uma das principais responsáveis pela presente crise ambiental em várias escalas. A degradação e perda do solo são alguns dos grandes problemas ambientais associados ao uso e ocupação de novas áreas, sejam elas urbanas ou rurais (MELLO, 2009). Esses efeitos sobre o recurso natural solo podem comprometer seriamente a vazão dos cursos d'água, além de afetar a flora e fauna nativas, desta forma, podendo ocasionar consequências diretas e indiretas sobre a qualidade de vida das pessoas (MELLO, 2009). Portanto, é fundamental identificar as históricas as mudanças de uso e cobertura do solo a nível local e entender como estas mudanças afetaram a qualidade dos ecossistemas (COSTA et al., 2018). Entender o histórico de mudanças em determinada região é um fator chave no planejamento ambiental e pode ajudar em projetos futuros para conservação de florestas e o manejo de bacias hidrográficas.

O mapeamento utilizando sensoriamento remoto e técnicas de machine learning é uma ferramenta rápida e permite compreender a dinâmica da distribuição espacial e temporal das mudanças de uso e cobertura do solo (GOMES et al., 2017). No Brasil, o projeto MapBiomas desenvolveu uma plataforma online (<https://mapbiomas.org/o-projeto>) onde disponibiliza de forma gratuita mapas de uso e cobertura da terra de 1985 até o presente com resolução de trinta por trinta metros para todo o território nacional. Estes mapas são gerados a partir de imagens de satélite e técnicas de modelagem, e já foram utilizados para diversos estudos como o monitoramento de desmatamento, acompanhamento de florestas plantadas, análise de fragmentos, queimadas, regeneração natural nos biomas brasileiros (GONÇALVES, et al 2021; SOUZA, et al 2020; FORTUNATO, et al 2017). Portanto, através destes mapas anuais, é possível fazer uma análise detalhada das mudanças ocorridas nos últimos anos, entender a dinâmica e promover melhorias para biodiversidade, e conservação dos recursos naturais.

Dentre as áreas importantes para conservação estão as Áreas de Preservação Permanente (APPs) são determinadas por lei, visando preservar e proteger o solo, reduzir a erosão, preservar os recursos hídricos, abrigar espécies da fauna e flora, preservar a paisagem e a biodiversidade, mas o estado de preservação destas áreas ainda é desconhecido em várias regiões. O Novo Código Florestal (Lei n. 12.651/2012) define as APPs como áreas protegidas, cobertas ou não

por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. Além disso, estas áreas servem como componente florestal consorciada com áreas economicamente produtivas visando à preservação ambiental de áreas importantes para o ecossistema, (OLIVEIRA, et al 2004). Sendo assim, conhecer as condições destas áreas é importante diante de sua relevância para a preservação do ecossistema, uma vez que ainda não existem dados concretos sobre tal condição.

A Bacia Hidrográfica do Rio Turvo Sujo, localizada na bacia do Rio Doce, abrange os municípios de Viçosa, Coimbra, Cajuri e Teixeiras, e é uma bacia importante para a região em termos de abastecimento de água para a população. Nos últimos anos, o aumento populacional associado às mudanças nos regimes pluviométricos a partir de 2012 ocasionou sérios problemas para a captação e abastecimento de água (MARIA, 2019). Contudo, existem na bacia diversas áreas registradas como APPs nas propriedades rurais, e Unidades de Conservação como as Áreas de Preservação Ambiental Municipais: de Teixeiras, a Nó da Silva, e a do São do Bartolomeu, que promovem a conservação e proteção de recursos naturais podendo influenciar em melhorias das condições ambientais, e conseqüentemente na vida de toda população residente na bacia.

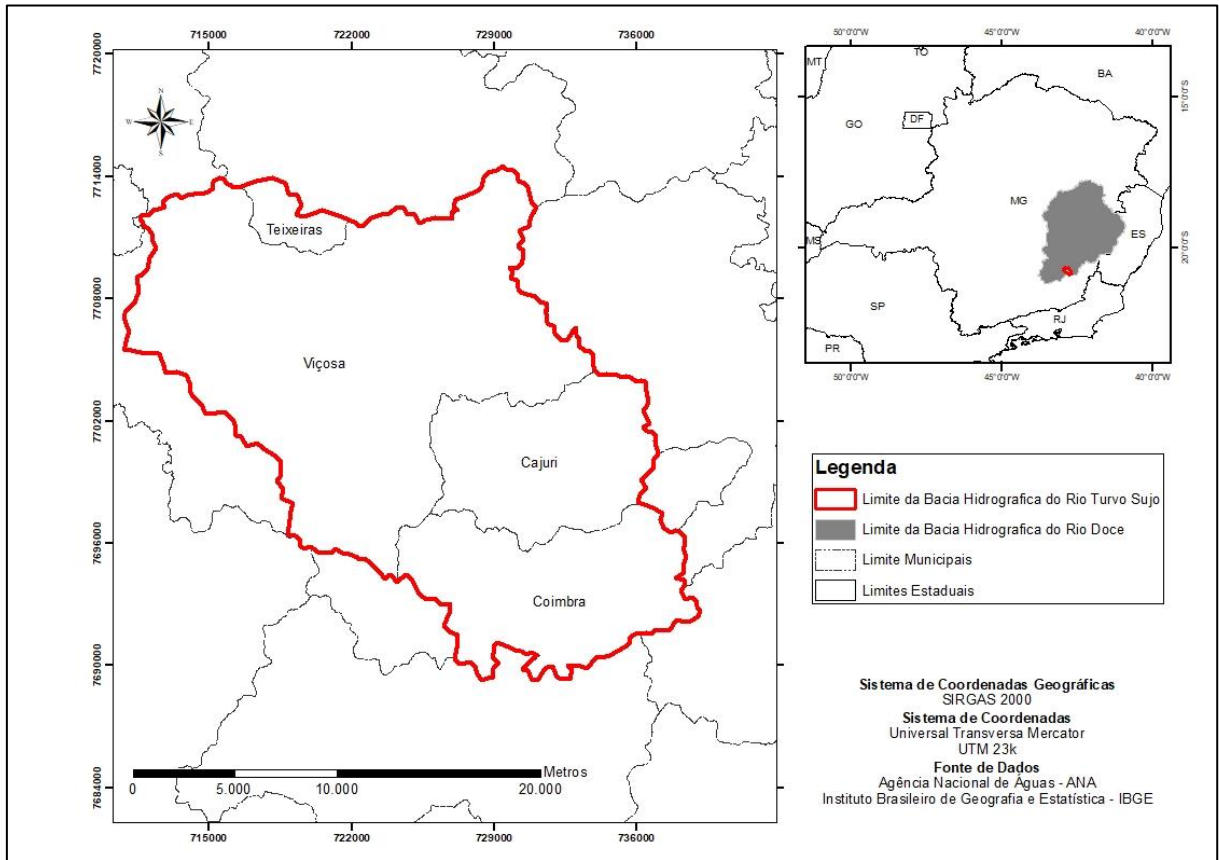
Portanto, o objetivo principal deste estudo foi analisar o histórico e a atual situação do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Turvo Sujo, a fim de fornecer subsídios para proteção e recuperação das áreas mais impactadas e preservação dos cursos d'água. Especificamente, objetiva-se (i) analisar a história de uso e cobertura da terra na bacia entre 1985 e 2019; (ii) analisar o histórico de uso e a situação atual das APPS localizadas nesta bacia, e (iii) associar o histórico de uso da bacia com dados socioeconômicos da região.

MATERIAS E METODOS

1.1 Caracterização da área de estudo

A bacia do Turvo Sujo está localizada na Zona da Mata de Minas Gerais e abrange os municípios de Cajuri, Coimbra, Teixeiras e Viçosa (Figura 1). Ela é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Doce e cobre uma área de aproximadamente 40.000 hectares (400km²).

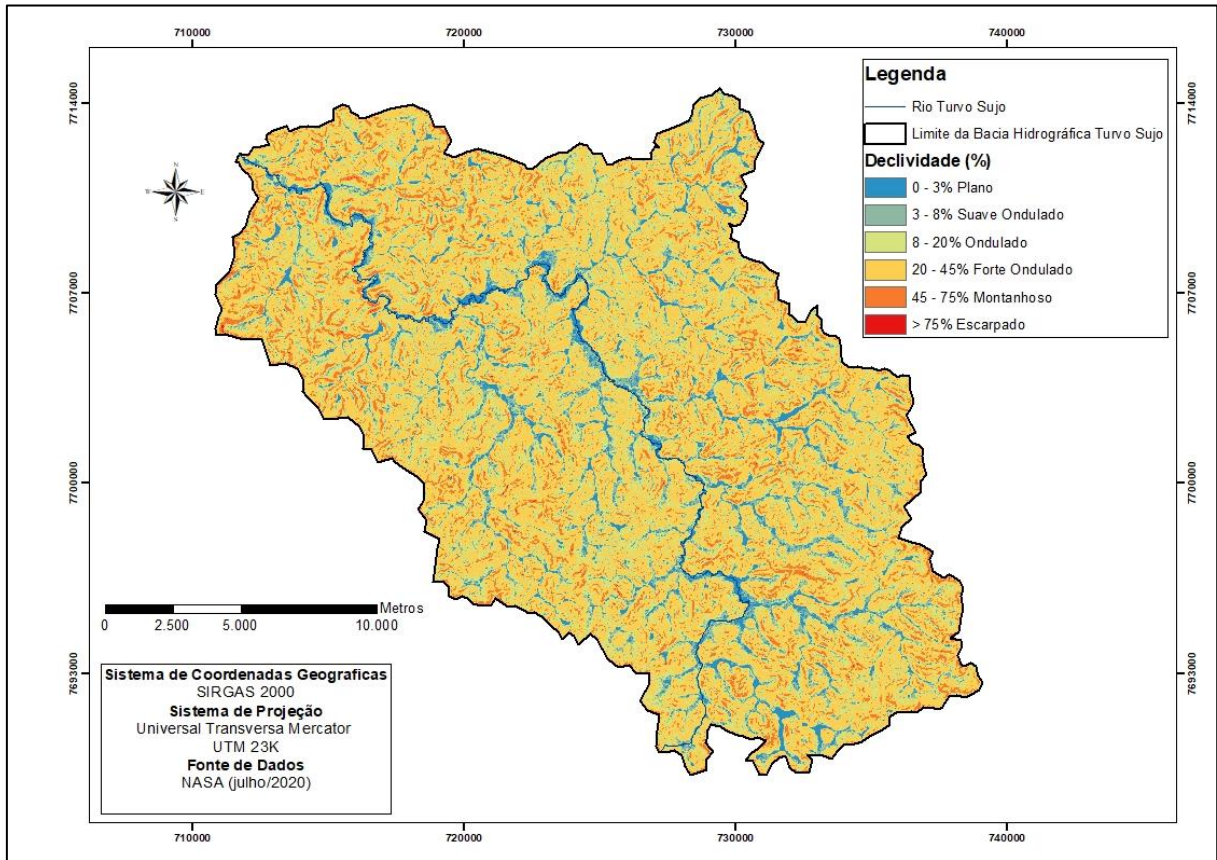
Figura 1: Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.



Fonte: A autora.

A altitude na bacia varia de 586 a 996 metros e a paisagem é caracterizada pelo domínio morfoclimático dos mares de morros, e o relevo é predominantemente forte ondulado (Figura 2), com encostas de perfil convexo côncavo de vales colmatados por sedimentos caracterizando assim terraços e leito maiores (CORRÊA, 1984).

Figura 2: Mapa de Declividade em porcentagem da Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.



Fonte: A autora.

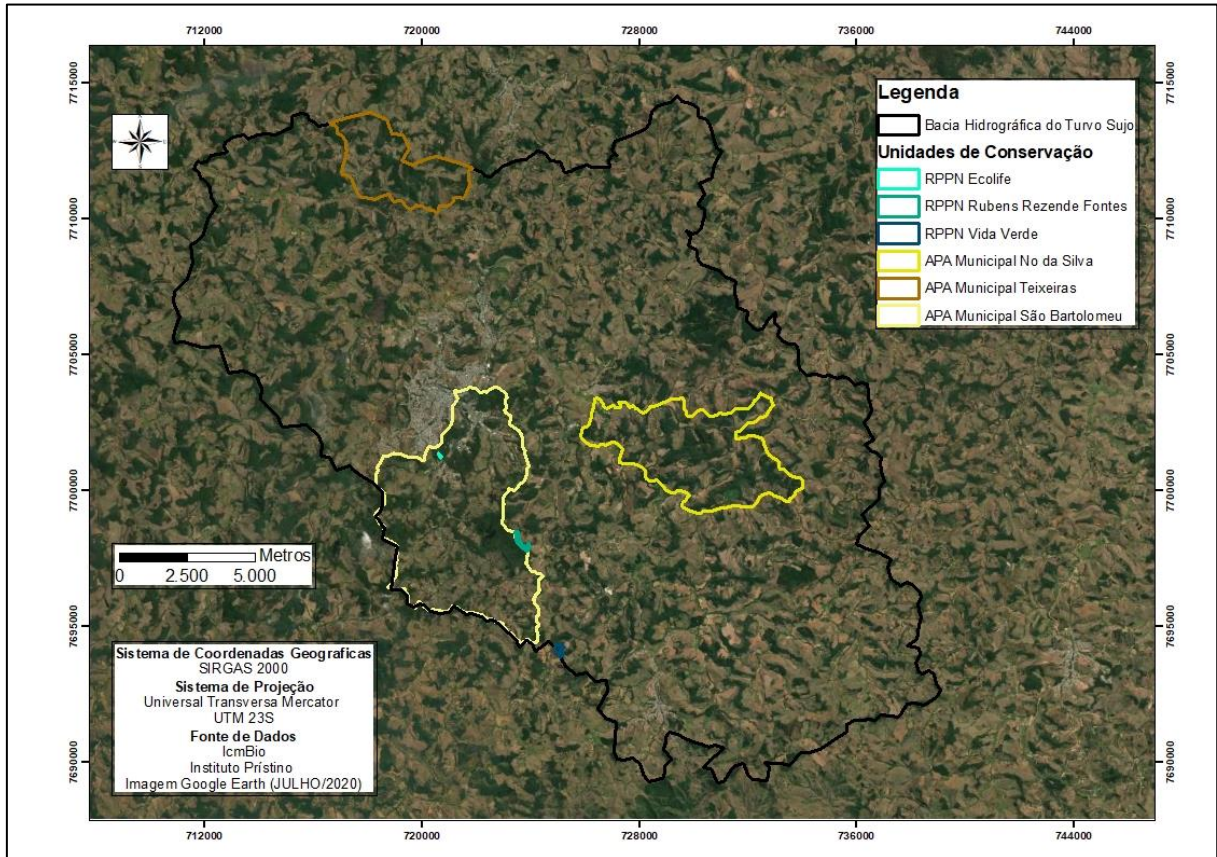
O clima da região é do tipo Cwa na classificação de Köppen, (ALVAREZ, et al. 2013), temperado quente, com estação seca de abril a setembro e chuvosa de outubro a março, com média de 1200 mm aproximadamente, registrados na estação meteorológica do INMET localizada na bacia do Turvo Sujo.

Segundo Vasconcelos (2016) a geologia regional é constituída basicamente de Ortognaisses do Complexo Piedade, datado do Paleoproterozóico, com presença frequente de rochas máficas oriundas de diques. Pedologicamente trata-se de um domínio de Latossolos, sendo os Vermelho-Amarelos os mais comuns. Ocorrem também Cambissolos Háplicos, geralmente associados a encostas côncavas-côncavas. Os terraços são frequentemente ocupados por Argissolos Vermelho-Amarelos, podendo também ocorrer Cambissolos Flúvicos, e nas porções mais baixas da paisagem predominam os Gleissolos Háplicos, juntamente com Neossolos Flúvicos mais presentes na calha do rio Turvo Sujo.

A bacia do Turvo Sujo tem cobertura vegetal nativa característica da Mata Atlântica e possui vários fragmentos florestais, diversas áreas registradas como APPs nas propriedades rurais, e Unidades de Conservação como a Área de Preservação Ambiental – APA São

Bartolomeu, APA Municipal de Teixeira e a APA No da Silva (Figura 3).

Figura 3: Mapa de Unidades de Conservação localizadas na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, Minas Gerais.



Fonte: A autora.

A vegetação original da bacia do Turvo Sujo era a floresta tropical subperenifolia, a qual após intenso desmatamento foi substituída pela lavoura cafeeira, responsável pela colonização inicial da região. O ciclo do café proporcionou o empobrecimento dos solos, deixando marcas nos aspectos físicos da paisagem atual e na socioeconômica regional. Mais tarde, o café foi substituído por pastagem de capim gordura (MELO, 2009). Devido a esta intensa influência antrópica, grande parte da bacia é formada por pastagens e os fragmentos florestais são constituídos por vegetação florestal secundária (VILELA, 2009).

1.2 Processamento dos dados do MapBiomias

O Projeto de mapeamento anual do uso e Cobertura do solo no Brasil (MapBiomias) é uma iniciativa que tem como principal objetivo o desenvolvimento e implementação de uma metodologia rápida, e de baixo custo para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo do

Brasil a partir de 1985, com a classificação pixel a pixel de imagens dos satélites Landsat MApBiomias (<https://mapbiomas.org/>). Este mapeamento envolve uma rede colaborativa com especialistas nos diferentes biomas brasileiros, usos da terra, sensoriamento remoto, SIG e ciência da computação. Todo o processamento é realizado em nuvem, com a utilização de imagens de satélite (Landsat) e classificadores automatizados, desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra na forma digital e de livre acesso.

Para este estudo, utilizou-se a coleção 5.0 com os mapas de uso e cobertura do solo dos anos 1985 a 2019 da bacia do Turvo Sujo. Inicialmente, realizando a quantificação em hectares das diferentes classes de uso/cobertura em cada ano e em seguida determinou-se as mudanças que ocorreram na área em intervalos de 5 anos. Esse processo foi feito a partir da ferramenta Raster Calculator no Arcgis, usando a fórmula de análise pixel a pixel.

2.3 Processamento dos dados do CAR

A Lei Federal 12.561 de 25 de maio de 2012, também conhecida como Novo Código Florestal, estabelece normas gerais sobre a proteção da Vegetação Nativa, incluindo Reserva Legal (RL), e as Áreas de Preservação Permanente (APP). Conforme definição da lei, a APP é uma área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. A lei dispõe sobre delimitação das APPs tanto em zonas rurais, quanto urbanas no Brasil.

No mesmo ano também foi criado o Cadastro Ambiental Rural (CAR), pela Lei nº 12.651/2012, no âmbito do Sistema Nacional de Informação sobre Meio Ambiente - SINIMA, e regulamentado pela Instrução Normativa MMA nº 2, de 5 de maio de 2014. O CAR é um registro público eletrônico de âmbito nacional, obrigatório para todos os imóveis rurais, com a finalidade de integrar as informações ambientais das propriedades e posses rurais referentes às Áreas de Preservação Permanente - APP, de uso restrito, de Reserva Legal, de remanescentes de florestas e demais formas de vegetação nativa, e das áreas consolidadas, compondo base de dados para controle, monitoramento, planejamento ambiental e econômico e combate ao desmatamento (SICAR).

O Sistema Nacional de Cadastro Ambiental Rural (SICAR) foi criado por meio do Decreto nº 7.830/2012 e definido como sistema eletrônico de âmbito nacional destinado à integração e ao gerenciamento de informações ambientais dos imóveis rurais de todo o País.

Essas informações destinam-se a subsidiar políticas, programas, projetos e atividades de controle, monitoramento, planejamento ambiental e econômico e combate ao desmatamento ilegal. A partir desse sistema digital, foi possível adquirir os dados de APP registrados das propriedades localizadas na área da Bacia do Turvo Sujo, que foram delimitadas usando imagem RapidEye, com resolução espacial de 5 metros. Com isso é possível constatar se as áreas que realmente devem ser destinadas a APP estão com cobertura vegetal de floresta, como determina a Lei nº 12.651/2012, ou se encontram com algum outro uso.

Os mapas de APPs dos municípios foram processados e recortadas para área de estudo no Arcgis 10.8, e com ferramenta Tabulate Intersection, foi realizada a relação entre a APP registradas pelo CAR, com os diferentes uso e cobertura do solo mapeados pelo MapBiomias. Dessa forma, foi possível constatar o histórico de uso das APPS, assim como o atual uso e cobertura dentro da bacia hidrográfica do Turvo Sujo. Identificar os usos em áreas de preservação permanente é uma importante análise no planejamento ambiental, pois estas áreas podem estar degradadas, sob algum outro uso antrópico, em processo de regeneração ou toda florestada (SOARES et al., 2011). Esta análise também permite avaliar se a lei está sendo cumprida, na região estudada.

Seguindo a mesma metodologia anterior, foi realizada uma análise nas áreas de Reserva Legal (RL), afim de entender e quantificar quais usos e coberturas do solo predominaram nestas áreas. Este tópico é importante, porque as RLs podem exercer grande influência na expansão da floresta nativa na Bacia Hidrográfica no futuro, já que são áreas declaradas pelos proprietários rurais destinadas a conservação da mata, possibilitando assim, o processo de regeneração natural.

Foi criado também com estes dados do CAR, um tópico especial, denominado de Índice de Nascentes. Neste tópico, se averiguou a relação entre a quantidade de nascentes (pontos), e quantidade de APPs de nascentes (polígonos) registradas na Bacia pela base do CAR. Além disso, foi realizado um estudo histórico com os mapas do MapBiomias nestes locais para verificar qual a condição de uso/cobertura do solo nestas áreas. Com essas relações foi possível averiguar, qual a proporção de nascentes protegidas e quais usos predominaram durante os anos nas APPs de nascentes dentro da Bacia do Turvo Sujo.

2.4 Processamento dos Dados do Censo Agropecuário do IBGE

Buscando entender melhor o histórico de uso e cobertura do solo nesta bacia, pesquisou se também informações técnicas sobre as atividades agropecuárias desenvolvidas na área de

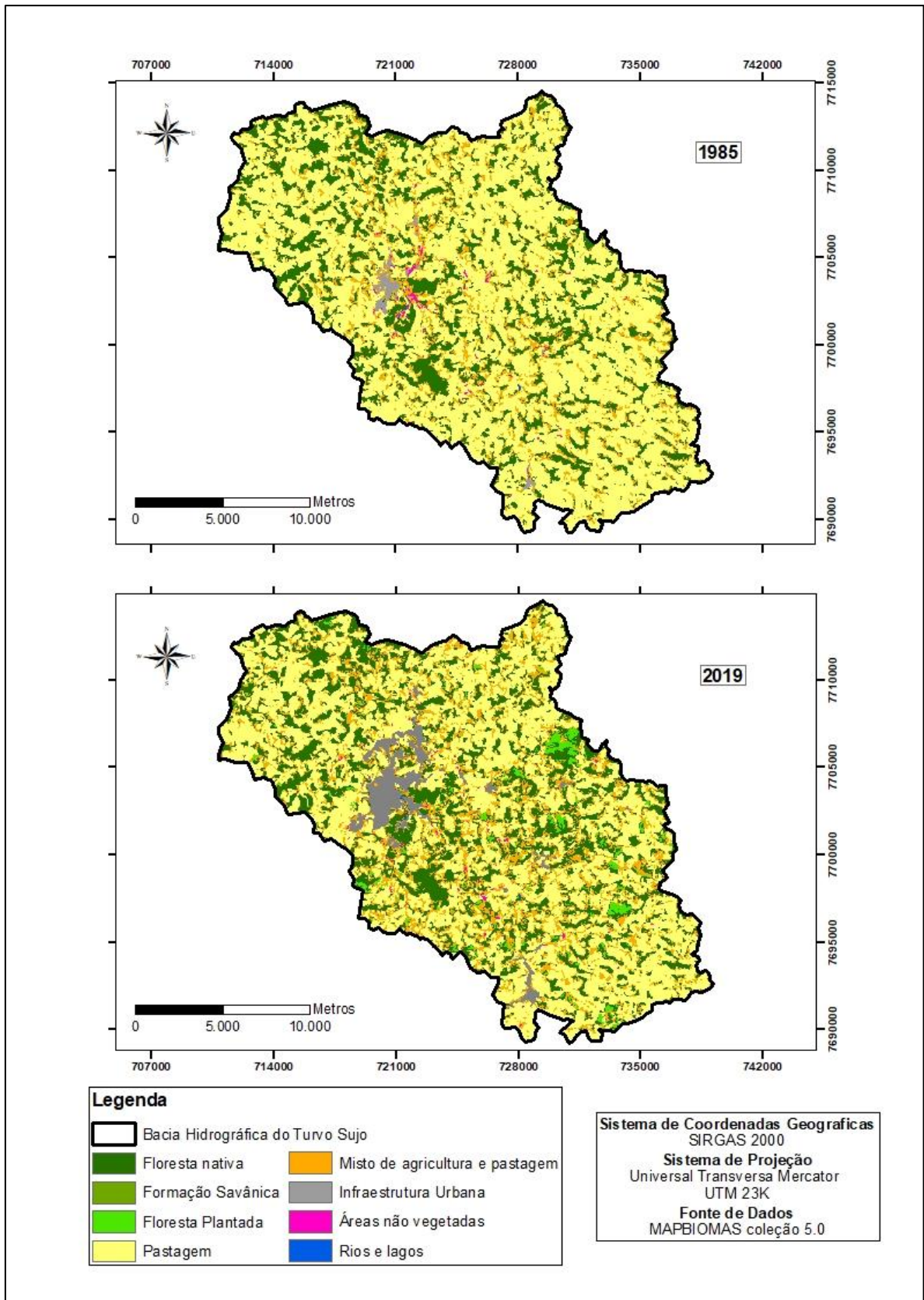
estudo. A aquisição dos dados referente as atividades agrícolas, principalmente relacionados ao número de animais, quantidade, tamanho e distribuição interna das áreas nas propriedades agrícolas, foram coletados dos Censos Agropecuários (1995/1996, 2006 e 2017), realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). A alteração do limite das áreas dedicadas a uso de culturas e do número de animais, por exemplo, afetam diretamente as características do uso da terra. Estes dados permitem ver a dinâmica da produção agrícola e pecuária na bacia, para que seja possível entender a dinâmica do uso da terra do ponto de vista espacial e socioeconômico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Histórico de mudanças de uso e cobertura da terra

A partir da análise dos mapas de uso e cobertura do solo do MapBiomass, foi possível verificar e quantificar quais mudanças ocorreram na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo de 1985 até o ano de 2019 (Figura 4). Neste período ocorreram o aumento de 3% (cerca de 1.100 hectares) da área urbana; crescimento da área de floresta plantada de quase 2% (766 hectares); aumento gradual de floresta em quase 5% (1.300 hectares); diminuição de 14% da área pastagem (menos 5.700 hectares); diminuição de 10% da área sem vegetação (aproximadamente 40 hectares); um aumento de 0,02 %, (7 hectares) na área de rios e lagos; e por fim, a área de agricultura aumentou 6 % (2.300 hectares) de 1985 a 2019.

Figura 4: Mapas de Uso e Cobertura da Terra em diferentes anos (1985 e 2019) na Bacia Hidrográfica Turvo Sujo.



Fonte: A autora.

Analisando estas informações por outro método (pixel/pixel), a fim de tentar entender a proporção (%) do que se manteve em estabilidade ou sofreu alterações, entre os dois anos extremos (1985 e 2019) de análise na Bacia (tabela 1), obteve como resultado que 17% dos pixels que eram floresta nativa se mantiveram, e poucos pixels tiveram mudança para pastagem e agricultura. Já a classe de pastagem teve maiores mudanças em seus pixels, tanto para a agricultura, quanto para floresta nativa, plantada e infraestrutura urbana. A classe mista de pastagens e agricultura sofreu as mesmas alterações, e o restante das outras classes não tiveram valores em percentagem significativos de estabilidade ou alteração.

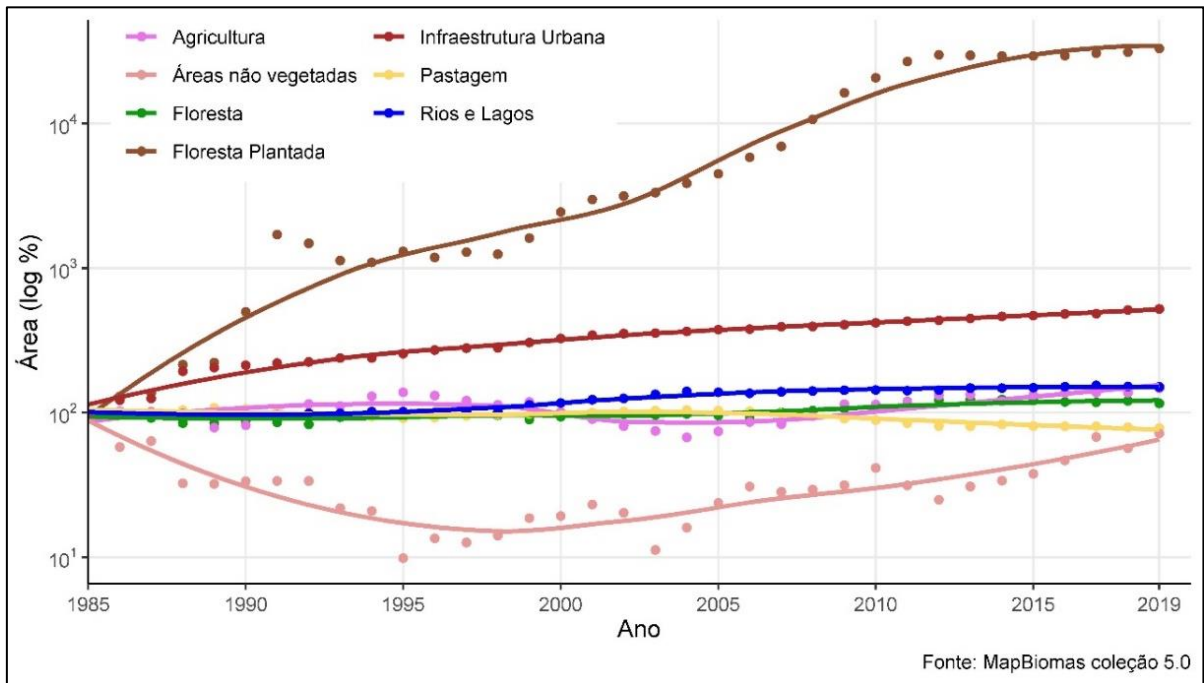
Tabela 1: Diferença nas classes de uso e cobertura do solo do MAPBIOMAS (%) na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo: (1985-2019).

Classes de Uso e Cobertura do Solo	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Infraestrutura Urbana	Área não vegetada	Rios e Lagos
Floresta Nativa	17		5	2			
Floresta Plantada		0	1				
Pastagem	2		45	4			
Mosaico de Agricultura e Pastagem	2		12	6			
Infraestrutura Urbana			2	1	1		
Área não vegetada						0	
Rios e Lagos							0

Fonte: MAPBIOMAS, CAR. Adaptado pela autora.

Os resultados mostram que a partir de 2007 até 2019 existe uma tendência das florestas naturais aumentarem e das pastagens diminuírem (Figura 5). Dentre os usos da terra analisados, a floresta plantada foi a que obteve maior crescimento com relação a sua área em 1985. Por outro lado, a classe de áreas não vegetadas foi a que mais diminuiu até o ano 2000, e após isso obteve um pequeno crescimento.

Figura 5: Percentual de mudança de cada classe de uso e cobertura do solo na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo MG, com referência ao ano 1985.

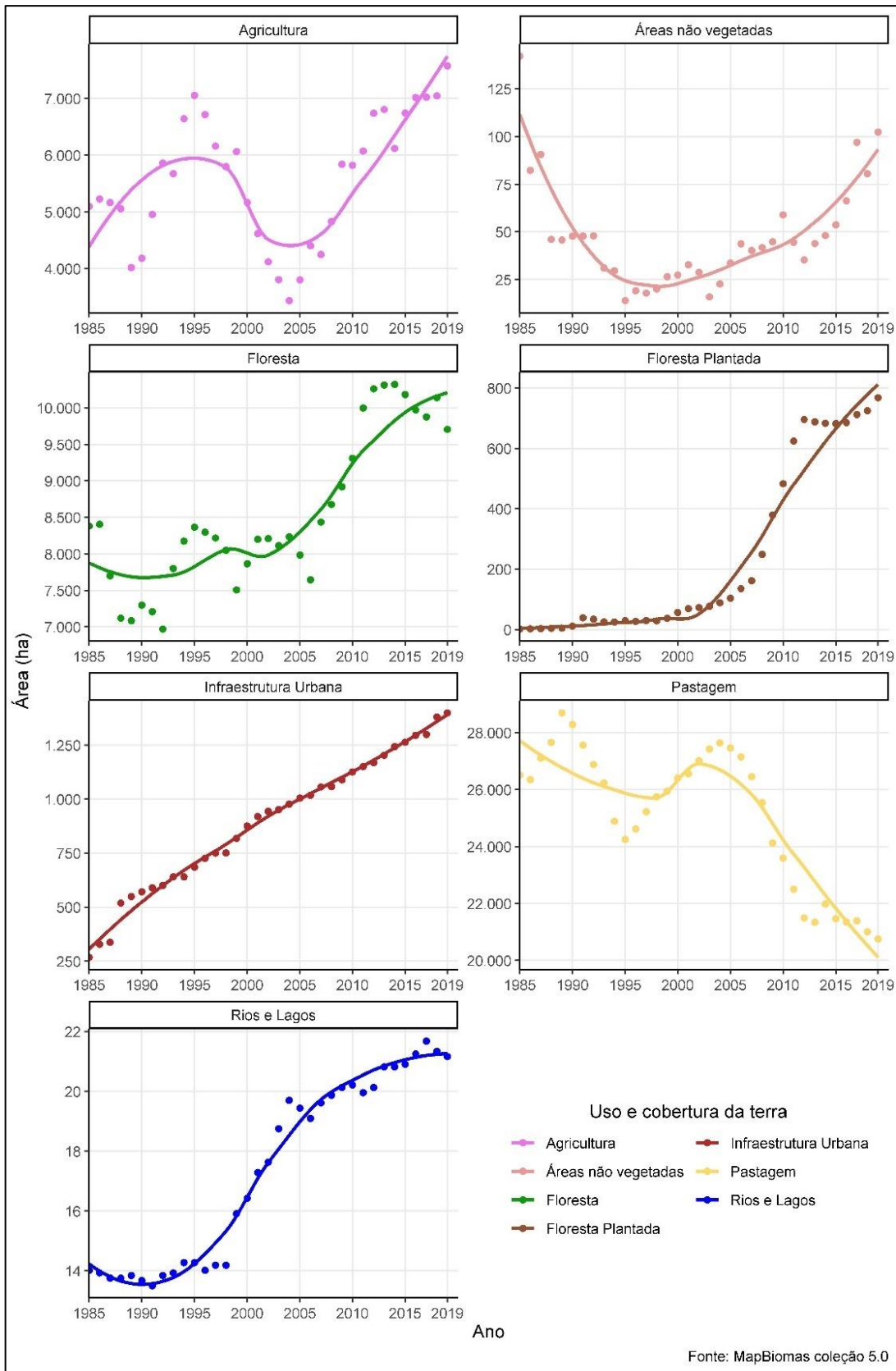


Fonte: MAPBIOMAS. Adaptado pela autora.

Analisando a variação anual interna de cada classe durante o período estudado (Figura 6), observa-se uma oscilação na classe mosaico agricultura/pastagem e na classe pastagem, resultando em menor área em ambas em 2018; e o aumento lento da classe floresta nativa, se comparada a floresta plantada.

Os resultados de Vilela (2009), mostraram que a taxa do desmatamento nesta bacia foi reduzida e a área com cobertura vegetal aumentou de 21% para 24% de 1984 a 1989, mas diminuiu de 29.56% em 2000 para 25.96% em 2008. Estes dados indicaram aumento da regeneração natural durante o período de 1984 a 2000 e uma tendência de desaceleração após 2000, mas os resultados deste trabalho indicam que este aumento lento de área florestada ainda continua. Apesar deste lento crescimento, os dados atuais da bacia indicam que a bacia do Turvo Sujo possui um maior aumento na área de floresta, e uma tendência de diminuição das pastagens (Figura 6).

Figura 6: Gráfico da dimensão espacial, em hectares, de cada classe de uso e Cobertura da Terra na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo MG, entre 1985 e 2019.



Fonte: MAPBIOMAS. Adaptado pela autora.

Analisando as mudanças de uso em intervalos de 5 anos (APENDICE I), identificou-se que entre 1985 e 1990 houve maior transformação da classe de floresta nativa para pastagem (1,7%), e agricultura (2,1%). Neste período também ocorreu a menor estabilidade da floresta nativa (16,8%), se comparado aos outros anos.

Entre os anos de 1990 e 1995 houve um aumento (16,9%) da conservação da classe de floresta nativa, enquanto diminuiu a transformação desta classe tanto para pastagem, quanto agricultura. O que ocorre inversamente de forma considerável, cerca 1,5% de pastagem e 2,2% na agricultura para floresta nativa. As outras classes (floresta plantada, infraestrutura e área sem vegetação) também obtiveram um pequeno aumento nesta mudança. Durante este período há um aumento considerável na transformação da classe de pastagem para agricultura (9,6%).

Já entre 1995 e 2000, ocorreu o crescimento considerável das áreas de floresta plantada. A tendência da transformação entre floresta nativa e pastagem, se mantém, este é o período que se registra menor transformação de pastagem para floresta nativa. As classes de infraestrutura e agricultura continuam a aumentar.

Nos anos de 2000 até 2005 ocorreram transformações contrárias as verificadas até então, onde a área de pastagem se manteve em maior valor percentual (+5%), enquanto a de floresta nativa diminuiu (-1%). Já o mosaico de pastagem e agricultura também sofreu diminuição (-3%), tendo um crescimento na transformação para floresta nativa, considerando o ciclo anterior.

Os anos que tiveram menor transformação de floresta nativa em pastagem são de 2005 a 2010, sendo que ocorreram maiores conversões de pastagem para floresta. Já entre 2010 e 2015 se tem a maior transformação de agricultura para floresta nativa, coincidentemente a isso, se tem a criação da Lei 12.651 de 2012, considerada como o Novo Código Florestal.

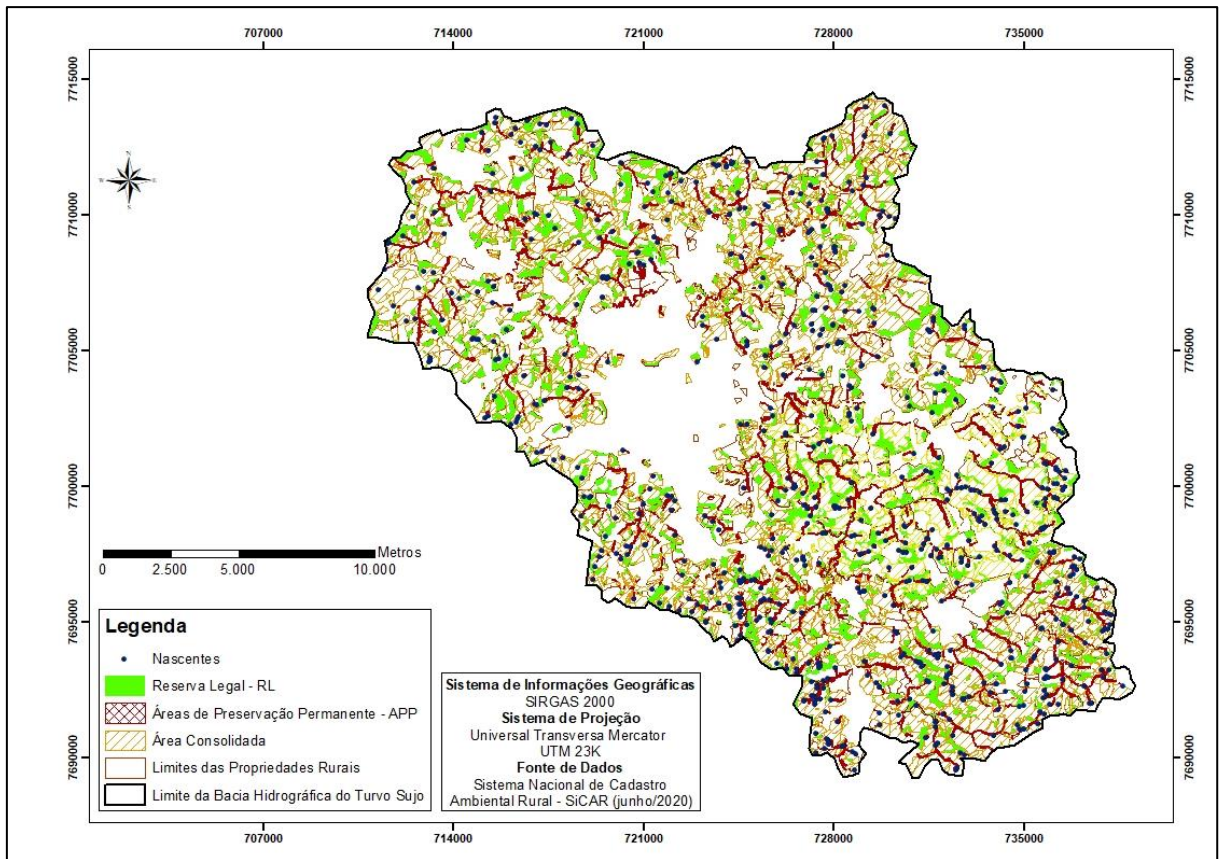
Divergente do registrado anteriormente, a maior conversão de floresta nativa para as classes de agricultura aconteceu nos últimos anos de análise, 2015 a 2019 (cerca de 2,22 %). Apesar disso, este é o período com o maior índice de conservação da floresta nativa, e o menor da pastagem. É também catalogado o maior índice de estabilidade nas classes de infraestrutura urbana, áreas sem vegetação e rios e lagos.

3.2 Áreas de Proteção Ambiental (APP)

A partir da análise dos dados do CAR, identificou-se que a bacia do Turvo Sujo possui 2.100 propriedades rurais registradas, cerca de 84% do total de propriedades rurais registradas no último censo agropecuário do IBGE. Com 17.893 hectares de Área Consolidada, 3.320

hectares de Áreas de Preservação Ambiental (APP), 4.369 hectares de áreas registradas como Reserva Legal (RL) e 734 nascentes. (Figura 7).

Figura 7: Área das propriedades rurais registradas no Cadastro Ambiental Rural (CAR) na bacia do Turvo Sujo. Fonte: SiCAR.

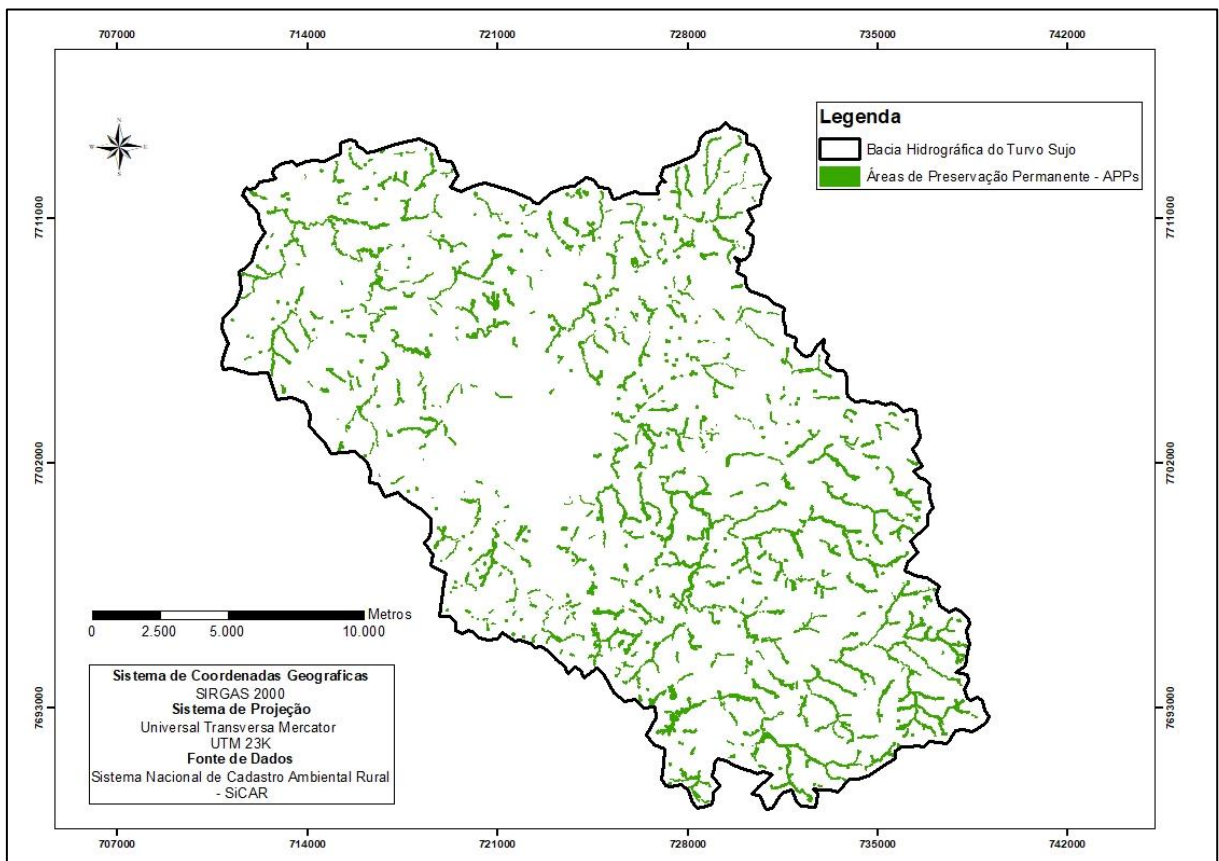


Fonte:SiCAR. Adaptado pela autora.

É importante ponderar que há uma incompatibilidade de escalas, pois o MapBiomias utiliza Landsat com 30 metros de resolução e o CAR com imagens Rapieye com cerca de 6 m, contudo, essa questão não interferiu diretamente nos resultados encontrados. Outra questão importante de se ressaltar é sobre a mudança no código florestal, que permite a continuidade das atividades agrossilvipastoris, ecoturismo e turismo rural em APPs que já tinham uso consolidado nas propriedades rurais até 22 de julho de 2008. A continuidade das atividades é dependente da adoção de boas práticas de conservação de solo e água, uma vez que se trata de áreas com diversas fragilidades ambientais, demandando manejos diferenciados aos reservados às áreas produtivas fora das APPs. Para efeito de recomposição de algumas categorias de APP em áreas consideradas consolidadas, a Lei 12.651/2012 estabelece regras transitórias, indicando

as dimensões mínimas a serem recompostas com vistas a garantir a oferta de serviços ecossistêmicos a elas associados. A aplicação de tais regras leva em consideração o tamanho da propriedade em módulos fiscais e às características associadas às APPs como por exemplo, a largura do curso d'água e área da superfície do espelho d'água. Contudo, para a análise espaço temporal neste trabalho todas as APPs foram analisadas de forma iguais, ou seja, não considerando a questão do uso consolidado, e observando se o percentual de florestas nestas áreas registradas até 2020 no CAR aumentaram ou não nos anos de 2008 e 2012 (anos de aplicação e efetivação do novo código florestal). A figura 8 mostra todas as APPs localizadas na bacia, e a tabela 2 a área de cada tema de APP na Bacia do Turvo Sujo, que totaliza mais de 3 mil hectares de APP.

Figura 8: Mapa das Áreas de Preservação Permanente registradas no CAR localizadas na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG



Fonte: SiCAR. Adaptado pela autora.

Tabela 2: Tabela das áreas de Áreas de Preservação Permanente registradas no CAR localizadas na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.

APPs registradas pelo CAR localizadas na bacia Hidrográfica do Turvo Sujo - MG		
Tipologia das APPs	Área total(ha)	Área a ser recomposta (ha) (ano base 2019)
APP a Recompôr de Nascentes ou Olhos D'água Perenes	31	29
APP a Recompôr de Rios até 10 metros	334	298
APP a Recompôr de Rios de 10 até 50 metros	0	0
APP de Banhado	10	10
APP de Lagos e Lagoas Naturais	71	61
APP de Nascentes ou Olhos D'água Perenes	332	287
APP de Reservatório artificial decorrente de barramento	56	49
APP de Rios até 10 metros	1442	1243
APP de Rios de 10 até 50 metros	5	4
APP de Topos de Morro	7	4
APP de Veredas	42	38
APP em Área antropizada não declarada como área	373	317
APP em Área de Vegetação Nativa	214	135
APP segundo art. 61-A da Lei 12.651 de 2012	383	344
TOTAL	3300	2819

Fonte:SiCAR. Adaptado pela autora.

A tabela 3 apresenta a relação Áreas de Preservação Permanente (APP/CAR) e Uso e Cobertura do solo (MAPBIOMAS), com a variação em percentagem das classes nas APPs em alguns anos do período estudado.

Tabela 3: Relação das Áreas de Preservação Permanente (APP/CAR) e Uso e Cobertura do solo (MAPBIOMAS) em 1985 em percentagem.

Classes	Anos				
	1985	2000	2008	2012	2019
Floresta	8,5	7,6	10,4	14,5	14,6
Floresta Plantada	-	-	0,7	0,7	0,8
Pastagem	76,1	74,4	73,5	59,7	46,4
Mosaico de agricultura e pastagem	15,4	18,0	15,4	25,0	38,2
Infraestrutura Urbana	-	-	-	-	-
Área sem vegetação	-	-	-	-	-
Rios e Lagos	-	-	-	-	-

Fontes: MAPBIOMAS, SiCAR. Adaptado pela autora.

Os resultados indicam que entre 1985 até 2000, a maioria das áreas de APPs possuíam pastagem como principal uso, conforme classificação do MapBiomias. As APP de Topo de Morro registradas no CAR tiveram algumas variações de usos ao longo dos anos (pastagem, agricultura), mas a maior parte destas áreas sempre esteve coberta com floresta nativa, principalmente após 2001. No entanto, a partir de 2004, começaram a aparecer alguns fragmentos de floresta plantada nessas áreas, e estes aumentaram consideravelmente nos anos seguintes.

Já as APPs de Vegetação Nativa registradas no CAR começaram a ter a maior cobertura de floresta nativa em 2013, coincidentemente um ano após a implantação do novo código florestal. Antes deste ano, a maior parte de suas áreas eram cobertas por pastagens. E atualmente, (desde 2015) sua segunda maior área é destinada ao uso de agricultura, como também era nos primeiros anos (1985-1988), e em alguns outros anos.

3.3 Reserva Legal

Juntamente com os dados de APPs, as informações de Reserva Legal (RL) são importantes para o estudo, porque ambas são áreas destinadas a conservação dos recursos naturais dentro das propriedades rurais, e dentro da bacia hidrográfica podem exercer influência na preservação de áreas importantes para o ecossistema (OLIVEIRA et al., 2014). A tabela 4 demonstra o total de RLs registradas no CAR em hectares, juntamente com a relação das áreas com cobertura vegetal, segundo o mapa do MapBiomias de 2019, e o total das áreas a serem recompostas, ou seja, com déficit de floresta nativa nos municípios da bacia hidrográfica do Turvo Sujo.

Tabela 4: Relação das Áreas de Reserva Legal por município na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.

Municípios	Área total(ha)	Área com cobertura vegetal (ha) (ano base 2019)	Área a ser recomposta (ha) (ano base 2019)
Cajuri	807	523	284
Coimbra	900	576	324
Teixeiras	247	188	59
Viçosa	2415	1745	670
TOTAL	4.369	3032	1337

Fontes: MAPBIOMAS, SiCAR. Adaptado pela autora.

Os resultados da tabela 4 demonstram que a maior parte das áreas de RLs (70%) já estão cobertas por florestas nativas na bacia, restando apenas 30% que estão divididos nas outras classes de uso e cobertura do solo, como apresenta a tabela 5 a seguir, que apresenta a análise espaço temporal nas Reservas Legais (RL) registradas pelos proprietários rurais no CAR, em percentagem, por meio dos mapas do MapBiomias.

Tabela 5: Relação das Áreas de Reserva Legal (RL/CAR) e Uso e Cobertura da Terra (MAPBIOMAS) na série temporal.

CLASSES	ANOS							
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Floresta	62	58	64	63	64	69	71	70
Floresta Plantada						1	1	1
Pastagem	25	29	20	22	24	15	13	12
Mosaico de agricultura e pastagem	13	13	16	15	12	15	15	17
Infraestrutura Urbana								
Área sem vegetação								
Rios e Lagos								

Fonte: Mapbiomas, CAR. Adaptado pela autora.

Os resultados indicaram um aumento das áreas de floresta e a diminuição nas áreas de pastagens, um padrão já visualizado na bacia como um todo. Nas RLs estas tendências somam 8% (+ 315 hectares) a vegetação nativa, e reduzem 13% (- 570 hectares) das áreas de pastagens, entre os anos limites de análise (1985 e 2019).

Durante o período analisado é possível ver uma oscilação entre as classes, principalmente nos primeiros cinco anos, mas de forma geral, pode se afirmar que desde 1990 existiu uma tendência de aumento da floresta nativa, diminuição da pastagem e aumento do mosaico de agricultura e pastagens dentro das RLs na bacia Hidrográfica do Turvo Sujo.

3.4 Índice de Nascentes

Por meio dos dados do CAR e dos mapas do MapBiomias também foi possível criar o índice de nascentes, para verificar e quantificar a cobertura vegetal nestes pontos indicados pelos proprietários rurais no registro do Cadastro Rural (tabela 6).

Tabela 6: Relação do Número e das APPs de nascentes por município na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG

Municípios	Nº de Nascentes	Nº de APP de Nascentes	Área existente de APP declarada(ha)
Cajuri	150	130	75
Coimbra	240	230	106
Teixeiras	16	15	6
Viçosa	328	298	145
TOTAL	734	673	332

Fontes: MapBIOMAS, SiCAR. Adaptado pela autora.

Por meio da relação destes dados é possível verificar que nem todas as nascentes contam com APPs registradas ao seu redor, como forma de proteção, um déficit de 61 nascentes sem APPs. Os dados também permitiram analisar o estado de conservação dessas nascentes, ou seja, qual o maior uso e cobertura do solo em suas APPs, e o resultado demonstrou que a pastagens predomina nestas áreas. Porém, ao longo dos anos esse valor foi diminuindo, enquanto a área de floresta nativa foi aumentando nas APPs de nascente, (tabela 7).

Tabela 7: Tabela das áreas de Áreas de Preservação Permanente (APPs) de Nascentes em percentagem (%) localizadas na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.

Classes	Anos							
	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019
Floresta Nativa	8	6	7	7	7	10	13	13
Floresta Plantada	-	-	-	-	-	-	-	0
Pastagem	79	87	71	81	86	76	66	62
Mosaico de agricultura e pastagem	13	7	21	13	8	15	21	25
Infraestrutura Urbana	-	-	-	-	-	-	-	-
Área sem vegetação	-	-	-	-	-	-	-	-
Rios e Lagos	-	-	-	-	-	-	-	-

Fontes: MAPBIOMAS, SiCAR. Adaptado pela autora.

3.5 Relação do Histórico dos dados socioeconômicos com as mudanças de uso e cobertura do solo

Os municípios pertencentes a Bacia do Turvo Sujo possuem no total 101.884 habitantes, segundo o Atlas de Desenvolvimento Humano de 2017 (IBGE, 2017), sendo a maior população

registrada no município de Viçosa (78.381 habitantes); seguida por Teixeira (11.836 habitantes), Coimbra (7.559 habitantes), e Cajuri (4.108 habitantes). As três primeiras cidades citadas anteriormente tiveram aumento no número de habitantes, entre os censos de 2000 e 2010, e apenas Cajuri teve diminuição da população.

O total de domicílios registrados no Censo Demográfico do IBGE em 2010 é de 26.182 na zona urbana e 3.739 domicílios na zona rural da Bacia do Turvo Sujo. De acordo com este censo, a economia de Cajuri e Viçosa se dá principalmente pelo setor de serviços, indústria e agropecuária consecutivamente. Já nos municípios de Coimbra e Teixeira, o setor agropecuário ocupa o segundo lugar com maior participação na economia local.

Com relação ao número de estabelecimentos agropecuários, os municípios da Bacia do Turvo Sujo apresentaram diferentes tendências. Enquanto o número de estabelecimentos aumentou em 2006 e diminuiu em 2017 nos municípios de Coimbra, Teixeira e Viçosa, em Cajuri só houve aumento no período estudado (Tabela 8). Já as áreas dos estabelecimentos agropecuários aumentaram e diminuíram consecutivamente em Coimbra e Teixeira, enquanto em Viçosa apenas aumentou.

Tabela 8: Número de estabelecimentos agropecuários e suas respectivas áreas nos municípios da Bacia Hidrográfica Turvo Sujo.

Municípios	Anos					
	1996		2006		2017	
	n° de estabelecimentos	Área (ha) dos estabelecimentos	n° de estabelecimentos	Área (ha) dos estabelecimentos	n° de estabelecimentos	Área (ha) dos estabelecimentos
Cajuri	242	5.533	260	5.034	434	5.302
Coimbra	539	7.031	710	7.453	431	6.294
Teixeiras	594	13.529	870	13.973	722	10.568
Viçosa	454	11.21	1.099	13.21	909	14.901

Fonte: IBGE. Adaptado pela autora.

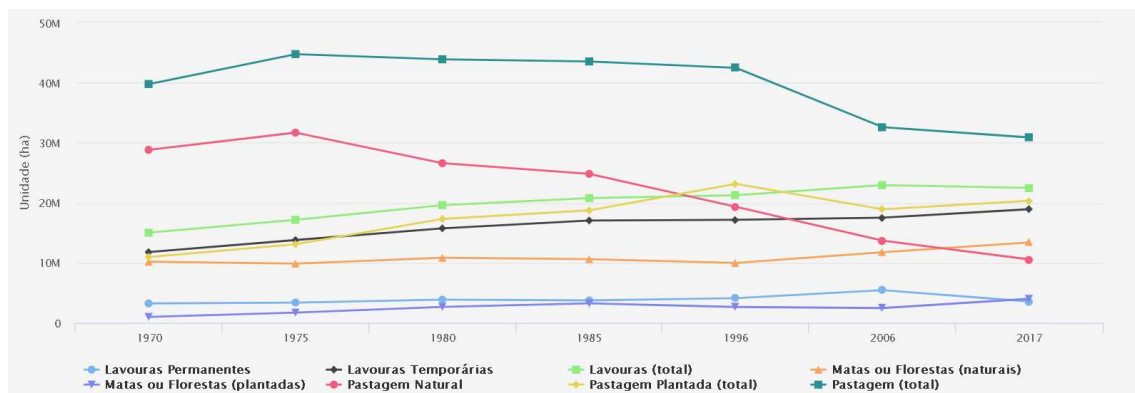
A variação no número de estabelecimentos agrícolas de Cajuri foi igual a apresentada em Minas Gerais, que entre 1970 até o último censo de 2017, aumentou em torno de 34%. Inversamente a este dado, a área total destinada a estes estabelecimentos rurais diminuiu, 10 %

no mesmo período de anos, em todo o estado de Minas Gerais. O que pode ser consequência principalmente da repartição fundiária, com subdivisão das propriedades entre os herdeiros, que foi maior evidenciada em Cajuri, mas é possível verificar nos outros municípios da Bacia entre 1996 e 2006.

No Bioma da Mata Atlântica os dados do IBGE demonstram que houve um pequeno aumento no número de estabelecimentos, cerca de 3%. Já a área dos estabelecimentos foi inversamente proporcional, ocorrendo uma leve diminuição (cerca de 2 % de 1970 para 2017). O interessante destes dados é que até o ano de 1985 a área dos estabelecimentos tendia apenas a um crescimento, (chegando ao máximo de 87.641.655 hectares) e após isso começaram a diminuir gradativamente. Enquanto a unidade de estabelecimentos rurais oscilou, tendo um pico em 1985 também, teve uma forte queda em 1995, voltando a aumentar até 2006, e finalizando com um número um pouco menor.

De acordo com os dados do IBGE, em todo o Bioma Mata Atlântica houve uma diminuição das pastagens naturais e plantadas (cerca de 22% de 1970 para 2017), com o maior decréscimo entre 1996 e 2006 (Figura 9). A classe de florestas naturais aumentou aproximadamente 31 % no Bioma, e as áreas de lavouras teve um aumento de quase 49 % do ano 1970 a 2017. Já a classe de florestas plantadas teve um aumento de 3.000.000 hectares (cerca de 300%) entre 1970 e 2017. As mudanças de usos em Minas Gerais (Figura 10) seguiram a mesma tendência do Bioma Mata Atlântica, com decréscimo das áreas de pastagem (36%), aumento de florestas naturais (121%) e florestas plantadas (550%), e alteração das áreas de lavouras permanente e temporária (61%).

Figura 9: Gráfico de Dados de uso do solo no bioma Mata Atlântica.



Fonte: IBGE, Atlas Agropecuário. Adaptado pela autora.

Figura 10: Gráfico de Dados de uso do solo no estado de Minas Gerais

Fonte: IBGE, Atlas Agropecuário. Adaptado pela autora.

De acordo os dados do IBGE, a utilização das terras nos estabelecimentos agrícolas dos municípios pertencentes a bacia do Turvo Sujo variou de duas diferentes formas. Cajuri seguiu o mesmo padrão do Bioma Mata Atlântica, e do Estado de Minas Gerais, com suas áreas de floresta nativa e plantada aumentando, e as áreas de pastagem diminuindo. Em Cajuri a área de lavoura também diminui cerca de 50 %.

No município de Coimbra, as classes de floresta (natural e plantada) aumentaram, 106% e 187 % respectivamente, com a relação à sua área original. A pastagem natural diminuiu aproximadamente 57%; e a pastagem plantada aumentou 830 hectares (430 %). Já a classe de lavouras teve diminuição de quase 11%.

Em Teixeira, ocorreu a mesma tendência de Coimbra, em todas as classes. Houve aumento da área de floresta nativa (13%) e floresta plantada (164%). A pastagem natural diminuiu quase 34 % e lavoura 55%, enquanto a de pastagem plantada aumentou quase 6%.

Viçosa também seguiu a tendência de Coimbra e Teixeira, com aumento da área de floresta nativa (92 %) e floresta plantada (71%). A área de pastagem natural diminuiu quase 27 % e as de pastagem plantada aumentou cerca de 92 %. Como nos outros municípios da bacia, a área de lavouras diminuiu 8 %, (tabela 9).

Tabela 9: Utilização das terras nos estabelecimentos agropecuários dos municípios da Bacia Hidrográfica Turvo Sujo.

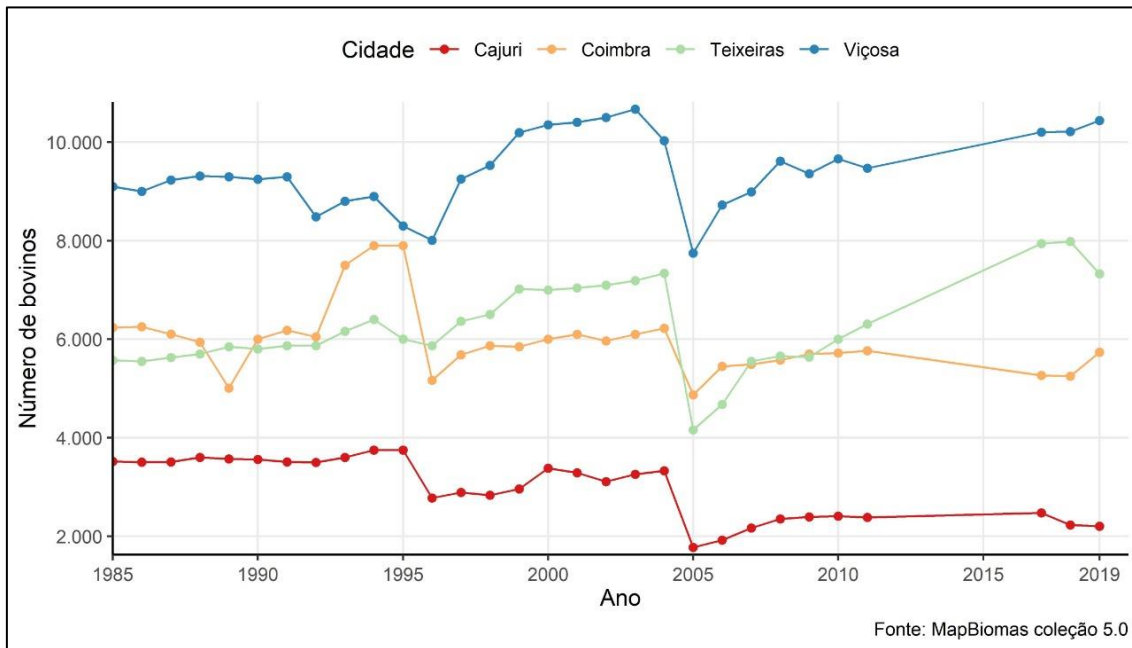
Municípios	Classes de uso e cobertura	Anos		
		1996	2006	2017
Cajuri	Floresta nativa	668	637	975
	Floresta plantada	89	331	443
	Pastagem	2.854	1.898	2.183
	Lavouras	3.012	1.898	1.586
Coimbra	Floresta nativa	435	442	900
	Floresta plantada	124	475	356
	Pastagem	4.766	4.316	2.979
	Lavouras	1.942	1.726	1.754
Teixeiras	Floresta nativa	2.059	3.66	2.327
	Floresta plantada	168	311	445
	Pastagem	6.919	6.260	5.038
	Lavouras	3.778	3.153	2.102
Viçosa	Floresta nativa	1.577	2.305	3.034
	Floresta plantada	461	191	792
	Pastagem	5.958	6.134	7.338
	Lavouras	2.814	3.404	2.608

Fonte: IBGE. Atlas Agropecuário. Adaptado pela autora.

É importante ressaltar que o IBGE obtém esses dados através de um censo e que o produtor declara as áreas de cada uso que tem na sua propriedade. Mas de forma geral a floresta nativa aumentou nas propriedades rurais de todos os municípios da Bacia Hidrográfica, e as pastagens naturais diminuíram, tal informação é correspondente aos resultados da análise dos mapas do MapBiomass, que afirmam uma diminuição de 14% (5.700 hectares) na área de pastagem, e 5 % (1.300 hectares) de aumento na área de floresta nativa na bacia hidrográfica como um todo, entre 1985 e 2019.

Foram analisados também os dados municipais do IBGE sobre número de bovinos nos últimos 34 anos (Figura 11). As quatro cidades quem compõem a bacia do Turvo Sujo tiveram a mesma tendência ao longo dos anos. Estes dados do IBGE demonstram que, no ano de 2005 houve uma forte queda no número de bovinos, em todos os municípios, que se deve principalmente à migração da pecuária para outras atividades agrícolas (IBGE, 2006), e após isso os valores começaram a aumentar gradativamente até o ano de 2019.

Figura 11: Número de bovinos nos estabelecimentos agropecuários dos municípios da Bacia Hidrográfica Turvo Sujo.



Fonte: IBGE. Adaptado pela autora.

Enquanto o número de bovinos aumenta gradativamente, a proporção de área de pastagens diminui, conforme demonstram os dados do MapBiomas e do IBGE. Contudo também existe um aumento considerável nas pastagens plantadas dentro das propriedades, registrada em 2017 em três dos quatro municípios da Bacia.

CONCLUSÕES

A análise das mudanças de uso e cobertura do solo na bacia do Turvo Sujo entre 1985 e 2019 identifica que ocorreu um aumento de quase 4 % no total de floresta nativa e uma diminuição de 14% na classe de pastagem. Apesar disso, as áreas de pastagem continuam ocupando a maior parte da bacia, com cerca de 51% em 2019.

A conversão de floresta nativa em pastagem, diminuiu ao longo dos anos de estudo, com a maior taxa de conversão (1,7%) entre os anos de 1985 e 1990. De outro lado, os resultados indicam o aumento da conversão de pastagem para floresta nativa, com os maiores valores (2,5%) entre os anos de 2005 e 2010. A maior transformação de floresta nativa para as classes de agricultura/pastagem aconteceu entre 2015 a 2019. Juntamente a isso, a maior transformação dessa classe em floresta foi entre os anos 2010-2015, bem próxima também do ano de aprovação da Lei 12.651 de 2012, denominada como o Novo Código Florestal. Assim, pode se dizer que talvez tenha ocorrido uma influência da lei, pois este processo também foi observado nas APPs, RLs e nascentes registradas nas propriedades rurais.

Outra informação importante de se ressaltar, é que mesmo com aumento do número e da área das propriedades rurais na Bacia, a classe de floresta nativa continuou aumentando, juntamente com a floresta plantada. O que demonstra a conscientização, e o cumprimento da legislação pelos proprietários rurais. O estudo também indicou uma diminuição expressiva na área de pastagem nativa da região, e um aumento da pastagem plantada, que pode ser relacionado ao aumento no número de bovinos nos quatro municípios, demonstrando uma mudança no manejo na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo.

Após todas estas análises, é possível concluir, que existe mudanças positivas na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, com maior manejo de pastagens e aumento na conservação ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ALVARES, CA, Stape, JL, Sentelhas, PC, Gonçalves, JLM, & Sparovek, G. 2013. “Köppen’s climate classification map for Brazil”. *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 22, n. 6, p 711–728.
- CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu. Introdução. **Introdução à Ciência da Geoinformação**, [S. l.], p. 1–5, 2004. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>. Acesso em: jun.2020.
- CARD, 2019. SWAT Literature Database for Peer-Reviewed Journal Articles. Center for Agricultural and Rural Development: Iowa State University, Ames, IA, USA (2019)
- CORRÊA, G.F. Modelo de evolução e mineralogia da fração argila de solos do planalto de Viçosa, MG. Dissertação. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa.

Viçosa-MG, 1984, 86.

- COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large -scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins river, southeastern Amazonia. **Journal of Hydrology**, v. 283, p. 206-217, 2003.
- FARIA, Raiza Moniz. CLASSIFICAÇÃO TEMPORAL DE IMAGENS LANDSAT 8 PARA O MONITORAMENTO DAS MUDANÇAS DO USO DA TERRA. [S. l.], n. December, p. 2–4, 2015.
- FLORENZANO, Teresa Gallotti. Geotecnologias na Geografia aplicada: difusão e acesso. **Geography Department, University of Sao Paulo**, [S. l.], v. 17, p. 24–29, 2005. DOI: 10.7154/rdg.2005.0017.0002.
- FRANÇA, Michelle Milanez; FERNANDES FILHO, Elpídio Inácio; XAVIER, Bruno Toríbio De Lima; OLIVEIRA, Fábio Soares De. Utilização De Classificador Estatístico Maxver Para Análise Do Uso E Cobertura Da Terra No Município De Viçosa – Mg*. **XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, [S. l.], 2009.
- GONÇALVES, V.; RIBEIRO, E. Obtenção de série histórica da evolução da classe Floresta Plantada a partir dos dados de uso e cobertura do solo da Coleção 5 do projeto MapBiomias. Metodologias e Aprendizado , [S. l.], v. 4, p. 99–105, 2021. DOI: 10.21166/metapre.v4i.1491. Disponível em: <https://publicacoes.ifc.edu.br/index.php/metapre/article/view/1491>. Acesso em: 26 maio. 2021
- GONÇALVES, V.; RIBEIRO, E. Obtenção de série histórica da evolução da classe Floresta Plantada a partir dos dados de uso e cobertura do solo da Coleção 5 do projeto MapBiomias. Metodologias e Aprendizado, [S. l.], v. 4, p. 99–105, 2021. DOI: 10.21166/metapre.v4i.1491. Disponível em: <https://publicacoes.ifc.edu.br/index.php/metapre/article/view/1491>. Acesso em: 26 maio. 2021
- IBGE, 2006. Agência IBGE – Notícias. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/13216-asi-rebanho-bovino-cresceu-13-em-2005>. Acesso em: mar,2021.
- IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. P'ortner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. P'ean, R. Pidcock, S.

Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

LINHARES; C. A. ET. UTILIZAÇÃO DE CLASSIFICADOR ESTATÍSTICO MAXVER PARA ANÁLISE DO USO E COBERTURA DA TERRA NO MUNICÍPIO DE VIÇOSA – MG. **anais do XII simpósio de sensoriamento remoto, Goiânia, brasil, [S. l.], v. 1, p. 3097–3105, 2005. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.004.**

LOPES, N. H. Y. Análise da produção de água e sedimentos em microbacias experimentais com o modelo SWAT. 2008. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. 2002. 154 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

M.L. Tan, P.W. Gassman, R. Srinivasan, J.G. Arnold, X. Yang. A review of SWAT studies in Southeast Asia: applications, challenges and future directions *Water*, 11 (2019), p. 914.

MAPBIOMAS. O Projeto. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://mapbiomas.org/o-projeto>. Acesso em: 4 nov. 2020.

MARIA, Ana Cristina de Souza. ANÁLISE DA EXPANSÃO URBANA E CONFLITOS DE USO DA TERRA NAS ÁREAS RURAIS DA ZONA SUL DE VIÇOSA-MG. **SIMPOSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA URBANA: XVI SIMPURB**, Teatro da Ufes e CCHN, p. 3686-3701, 17 nov. 2019.

MARTINS; Fabrina Bolzan. et al. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA DE KÖPPEN E DE THORNTHWAITE PARA MINAS GERAIS: CENÁRIO ATUAL E PROJEÇÕES FUTURAS. *Revista Brasileira de Climatologia*. Ano 14 –Edição Especial Dossiê Climatologia de Minas Gerais. Novembro de 2018. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/60896/36669>> Acesso em: jan 2021.

OLIVEIRA, Guilherme De Castro; MARTINS, Vitor Souza; FILLHO, Elpídio Inácio Fernandes; XAVIER, Flávia Vieira. Classificação supervisionada como ferramenta para avaliação da dinâmica do uso e cobertura do solo. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, centro científico**

conhecer, [S. l.], v. 10, n. 18, p. 924–935, 2014.

SILVA, Greicelene Jesus da et al. Estudo da capacidade de regularização de vazão na bacia do Ribeirão São Bartolomeu visando abastecimento público. **Nativa Pesquisas Agrárias e Ambientais**, [S. l.], v. 8, n. 1, 5 fev. 2020. ISSN:2318-7670, p. 102-111.

SOARES, Vicente Paulo; MOREIRA, Adelson de Azevedo; RIBEIRO, Carlos Antônio Alvares Soares; GLERIANI, José Marinaldo; JUNIOR, Joel Gripp. Mapeamento de áreas de preservação permanentes e identificação dos conflitos legais de uso da terra na bacia hidrográfica do Ribeirão São Bartolomeu - MG. **Revista Arvore**, [S. l.], v. 35, n. 3, p. 555–563, 2011. DOI: 10.1590/S0100-67622011000300018.

SOUZA, Carlos M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, [S. l.], v. 12, n. 17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/RS12172735>. Acesso em: maio 2021

TAN, Mou Leong et al. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes, *Advances in Water Resources*. *Advances in Water Resources*, [S. l.], ano 2020, v. 143, n. 103662, p. n tem, 7 set. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030917082030110X>. Acesso em: jul. 2021

TUCCI, C. E. M. e CLARKE, R. T. (1997). Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, N. 1, p135-152

VASCOCELOS, Bruno Nery Fernandes. MAPEAMENTO DIGITAL DE SOLOS EM DIFERENTES ESCALAS: ABORDAGEM METODOLÓGICA Tese. **tese de doutorado**, [S. l.], 2016. DOI: 10.5151/cidi2017-060. Disponível em: <https://www.infodesign.org.br/infodesign/article/view/355%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/731%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/269%0Ahttp://www.abergo.org.br/revista/index.php/ae/article/view/106>.

VILELA, Tatiane Assis. Avaliação Do Desmatamento E Seus Possíveis Impactos Nas Mudanças Climáticas Da Bacia Do Rio Turvo Sujo - Mg Impactos Nas Mudanças Climáticas Da Bacia Do Rio Turvo Sujo - Mg. [S. l.], 2009.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. *Rev. Adm. Púb.*, v.27, n.2, p.5-18, 1993.

APÊNDICES

APÊNDICE A: Diferença de 5 em 5 anos nas classes de uso e cobertura do solo do MapBiomias (%) na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo.

1985-1990							
	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Infraestrutura Urbana	Área não vegetada	Rios e Lagos
Floresta Nativa	16.8		0.4	0.8			
Floresta Plantada							
Pastagem	1.7		62.8	5.4		0.1	
Mosaico Agricultura e Pastagem	2.2		2.1	6.0			
Infraestrutura Urbana			0.2	0.3	0.7	0.2	
Área não vegetada						0.1	
Rios e Lagos							0.0

1990-1995							
	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Infraestrutura Urbana	Área não vegetada	Rios e Lagos
Floresta Nativa	16.9		1.5	2.2			
Floresta Plantada		0.0					
Pastagem	0.3		58.6	1.0			
Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.8		9.6	7.0			
Infraestrutura Urbana			0.2	0.1	1.4		
Área não vegetada						0.0	
Rios e Lagos							0.0

1995-2000							
	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Infraestrutura Urbana	Área não vegetada	Rios e Lagos
Floresta Nativa	18.2	0.0	0.3	1.0			
Floresta Plantada		0.1	0.1				
Pastagem	0.9		57.6	6.8			
Mosaico de Agricultura e Pastagem	1.6		1.8	9.4			
Infraestrutura Urbana			0.2	0.2	1.7		
Área não vegetada						0.0	
Rios e Lagos							0.0

2000-2005							
	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Infraestrutura Urbana	Área não vegetada	Rios e Lagos
Floresta Nativa	17.9		0.6	1.3			
Floresta Plantada		0.1	0.1				
Pastagem	0.7		62.2	5.1			
Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.9		2.2	6.3			
Infraestrutura Urbana			0.2	0.1	2.2		
Área não vegetada						0.0	
Rios e Lagos							0.0

2005-2010							
	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Infraestrutura Urbana	Área não vegetada	Rios e Lagos
Floresta Nativa	18.6		2.5	1.8			
Floresta Plantada	0.1	0.2	0.7	0.2			
Pastagem	0.2		57.2	1.0			
Mosaico de Agricultura e Pastagem	0.8		7.3	6.3			
Infraestrutura Urbana			0.2	0.1	2.5		
Área não vegetada			0.1			0.0	
Rios e Lagos							0.0

2010-2015							
	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Infraestrutura Urbana	Área não vegetada	Rios e Lagos
Floresta Nativa	21.4	0.1	1.3	2.4			
Floresta Plantada	0.2	1.1	0.2	0.2			
Pastagem	0.4		50.5	2.2			
Mosaico de Agricultura e Pastagem	1.0		6.2	9.4			
Infraestrutura Urbana			0.2	0.1	2.8		
Área não vegetada						0.1	
Rios e Lagos							0.0

2015-2019							
	Floresta Nativa	Floresta Plantada	Pastagem	Mosaico de Agricultura e Pastagem	Infraestrutura Urbana	Área não vegetada	Rios e Lagos
Floresta Nativa	22.4		0.3	1.3			
Floresta Plantada	0.2	1.6					
Pastagem	0.3		48.6	2.4			
Mosaico de Agricultura e Pastagem	2.2		3.9	12.8			
Infraestrutura Urbana			0.2	0.1	3.1		
Área não vegetada			0.1	0.1		0.1	
Rios e Lagos							0.0

Fonte: MAPBIOMAS. Adaptado pela autora.

CAPÍTULO 2: ANÁLISE HISTÓRICA DA HIDROGRAFIA E PROJEÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TURVO SUJO - MG

1. INTRODUÇÃO

As mudanças da cobertura florestal geram diversas alterações no ambiente, no ciclo hidrológico, e são apontados como responsáveis pelas mudanças climáticas, como a elevação da temperatura global e as modificações no regime de chuvas (LINHARES *et. al.*, 2005). De acordo com mesmo autor, a vegetação exerce influência direta no processo de erosão, na qualidade da água, na dinâmica de nutrientes, na proteção de mananciais e na produção de água. Yassuda (1993) afirma que a bacia hidrográfica é o palco unitário de interação das águas com o meio físico, o meio biótico, e o meio social, econômico e cultural. Ou seja, as mudanças geradas em um ambiente, têm efeito direto sobre a resposta hidrológica de uma determinada bacia, e por essa delimitação de estudo é possível entender as mudanças ambientais, e quantificar os efeitos gerados. Portanto, entender como o clima e mudanças de uso afetam o comportamento hidrológico de uma bacia se torna fundamental para averiguar a situação de degradação ambiental, a quantidade e qualidade dos recursos naturais, que são usados na agricultura, pecuária, na diluição de efluentes domésticos, e no abastecimento da população residente.

Como forma de entender tais mudanças ambientais, e quantificar os efeitos gerados, surgiram na década de 80 os modelos hidrológicos, com o objetivo de produzir resultados mais exatos sobre o sistema hídrico, e de subsidiar tomadas decisões relacionadas aos recursos naturais. Por essas razões, a modelagem hidrológica é ferramenta útil, que possibilita entender a dinâmica hídrica em uma bacia e também os efeitos das mudanças de uso do solo (ARNOLD *et al.*, 2012). O SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) é uma ferramenta de avaliação de Solo e Água e foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos e Texas A&M University (SWAT, 2009), sendo capaz de operar em um passo de tempo diário, requerendo uma grande quantidade de dados espaciais e não espaciais, que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais (PEREIRA, 2013). O uso do SWAT possibilita entender a dinâmica da bacia hidrográfica, o impacto das alterações do uso, tipo e manejo do solo no escoamento, efeitos do rápido crescimento populacional, desenvolvimento industrial, mudanças climáticas (KANNAN *et al.*, 2007; LELIS, *et al* 2011; CORREIA, 2016; PIMENTEL, 2017; GOMES, *et al.* 2020; CATEIN, 2020). Além disso, o entendimento dessas questões, juntamente

com as respostas bem embasadas são fundamentais para um bom planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, para assegurar uma forma de uso dos recursos naturais que seja sustentável para futuras gerações (ZANETTI et al., 2009).

A aplicação da modelagem hidrológica é muito importante para apoiar os tomadores de decisão, fornecendo embasamento técnico para melhor gestão dos recursos hídricos, uso correto do solo e introdução de políticas e programas setoriais, identificando áreas potenciais para sua implementação (LOPES, 2020). O aumento do desmatamento, expansão agrícola, e a expansão urbana no Brasil destaca a necessidade de proteção da qualidade da água para garantir as necessidades humanas imediatas e manter a qualidade do abastecimento de água a longo prazo (MELLO, 2020). Garantir a disponibilidade de água, em padrões de qualidade e quantidade adequado para a atual e futuras gerações é um dos objetivos da Política Nacional dos Recursos Hídricos, instituída pela lei federal nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997). Por essa razão a simulação do comportamento hidrológico por meio da modelagem consiste em uma das principais ferramentas na gestão dos recursos hídricos, devido à possibilidade de predição das vazões, e do grande potencial para estimar quantitativamente a variação de vazão provocada por alterações no uso do solo, permitindo prever o impacto de modificações na bacia em futuro próximo (OLIVEIRA, 2014).

A Bacia Hidrográfica do Rio Turvo Sujo abrange os municípios de Viçosa, Teixeiras, Cajuri e Coimbra, e pode ser considerada importante para a região em termos de abastecimento de água para a população, diluição de efluentes domésticos e industriais, pecuária e agricultura (NUNES, et al. 2011). melhor entendimento da dinâmica hídrica nesta bacia pode servir de subsídio para tomada de decisões relacionadas a proteção e recuperação das áreas mais degradadas, e preservação dos cursos d'água, para uma melhor qualidade de vida das populações futuras.

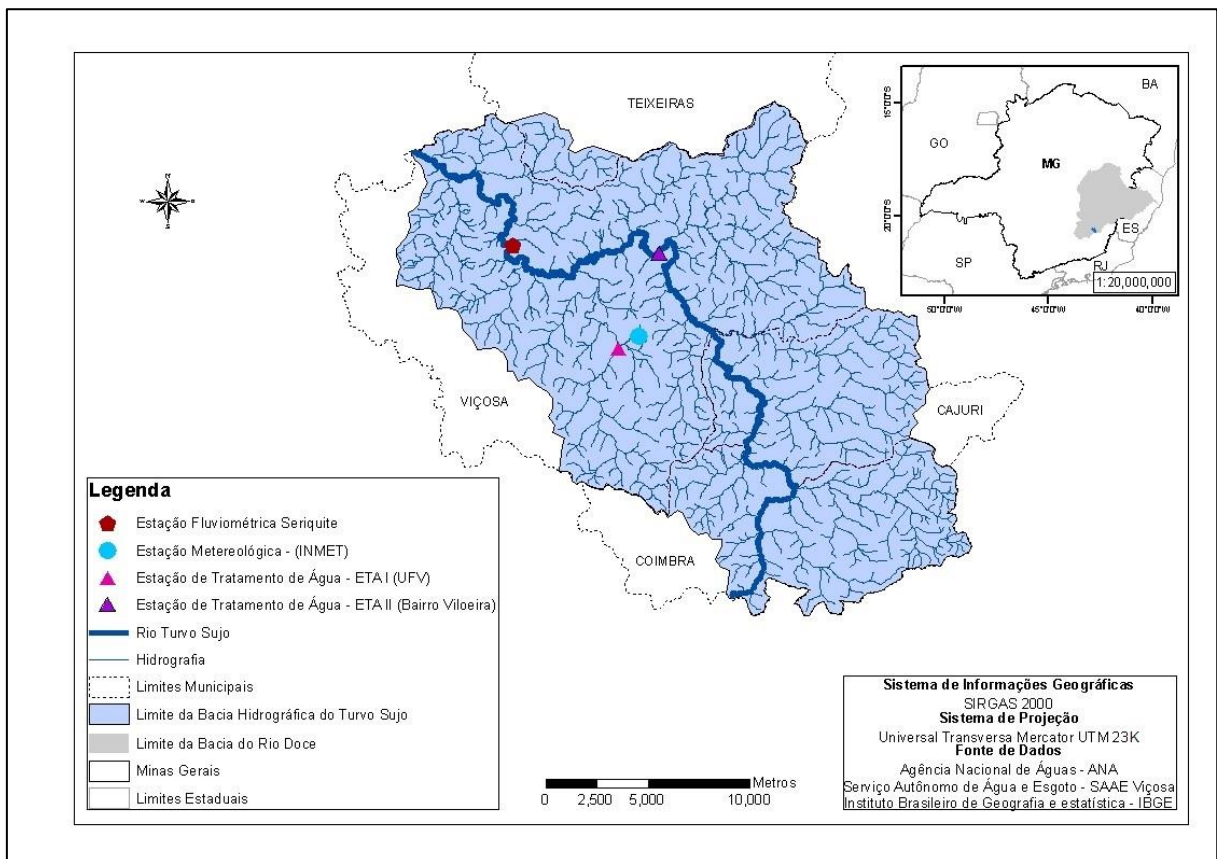
Portanto, o objetivo principal deste estudo foi analisar o histórico e a atual situação ambiental da bacia hidrográfica do Turvo Sujo utilizando o modelo SWAT, a fim de fornecer subsídios para proteção e recuperação das áreas mais impactadas, e preservação dos cursos d'água. Especificamente, objetiva-se (i) analisar a história da hidrologia do Rio Turvo Sujo e identificar qual sua relação com as mudanças do uso da terra e as condições climáticas na bacia; (ii) realizar a projeção de possíveis cenários futuros para vazão na bacia hidrográfica do Turvo Sujo - MG, com base na análise da relação da vazão atual, uso e cobertura da terra e dados climáticos.

MATERIAS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da Área de Estudo:

A bacia hidrográfica Turvo Sujo é uma Sub-bacia Hidrográfica do Rio Doce, com uma área de aproximadamente 40.000 hectares. A bacia está localizada nos municípios de Viçosa (que ocupa 60% da área da bacia), Coimbra (20% da), Cajuri (17%) e Teixeira (3%), (Figura 1) e a altitude varia entre 588 e 992 metros. O Rio Turvo Sujo possui um trecho principal de 63 km, tendo sua nascente principal em Coimbra e sua foz em Viçosa. Seus cursos d'água são importantes para abastecimento de água para a população, diluição de efluentes domésticos e industriais, pecuária e agricultura (NUNES, 2010).

Figura 1: Mapa da Localização e hidrografia da Bacia Hidrográfica Turvo Sujo em Minas Gerais.



Fontes: ANA, IBGE, SAAE. Adaptado pela autora.

Os principais usos e cobertura dos solos na paisagem são pastagem, floresta nativa, agricultura, infraestrutura, florestas plantadas, áreas sem cobertura vegetal e rios, respectivamente. O clima da região é do tipo Cwa na classificação de Köppen, temperado

quente, com estação seca de abril a setembro e chuvosa de outubro a março (ALVAREZ et al., 2013), com média de 1200 mm aproximadamente, registrados na estação meteorológica localizada na bacia do Turvo Sujo em Viçosa. A temperatura média anual na região é de aproximadamente 21 °C (INMET, 2019).

2.2 Dados Meteorológicos

Os dados climáticos da Bacia do Turvo Sujo foram retirados do sistema digital do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Informações como: temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação, direção e velocidade dos ventos são coletadas em campo por meio de uma estação meteorológica convencional, localizada em Viçosa, no Campus da Universidade Federal. Esta estação possui uma série histórica de dados climáticos, que foram medidos da mesma forma até o início do ano de 2018, e para cálculo de anos completos foi realizado o download dessas informações dentre os 1985 a 2017. Após isso foi realizada a organização, padronização dos dados.

Como são informações com uma longa escala temporal (32 anos), houve períodos em que por problemas mecânicos da estação, estes dados climáticos não foram registrados, e para resolver este problema, foi realizado o cálculo da média para preenchimento de dados faltantes. Para isso foi verificado o número de dias sem informações em um período, e com este número, era realizada a média, somada pelos valores dos dias anteriores e posteriores, por fim, era adicionado este resultado aos dados faltantes deste período. Por fim, com os dados organizados foi realizada a construção de gráficos no software R (R CORE TEAM 2020), onde foi possível realizar uma melhor análise e visualização das informações.

Como a estação convencional não produziu dados de radiação solar, foi necessária a modelagem desta informação, que são essenciais para a modelagem hídrica no SWAT. Para isso utilizou as variáveis precipitação, temperatura, horas de insolação e umidade do ar da estação convencional para criação de um modelo preditivo e assim obter valores diários de radiação solar para o período de 1990 a 2017, usando o algoritmo Random Forest (RF) no software R. Huaiwei Sun (2017), em um estudo de avaliação do modelo RF, observou que os valores de radiação diária estimados, seguindo esta metodologia apresentaram boa concordância com os dados medidos.

2.3 Dados históricos de Vazão:

Os dados históricos de vazão foram adquiridos através da plataforma digital Hidroweb, da Agência Nacional de Águas (ANA), que é responsável pela coordenação das atividades da Rede Hidro Meteorológica Nacional (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>), composta por mais de 4 mil estações que monitoram o volume de chuvas, o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos, a evaporação e a qualidade das águas. A estação presente na bacia do Turvo Sujo é denominada de Seriquite (5608500) e tem tipologia de Estação Fluviométrica. Foi realizado o download destas informações entre os anos de 1990 e 2017, e cálculo de média para os dados faltantes. Com os dados de vazão também foram realizados cálculos mensais e anuais, e plotadas em gráficos no software R, para que possibilitasse uma análise mais detalhada desta informação.

2.4 SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

O SWAT foi desenvolvido pelo *Agricultural Research Service of the United States Department of Agricultural* (ARS - USDA), com o objetivo de avaliar o efeito do uso do solo no escoamento, no transporte de sedimento e na qualidade da água em bacias hidrográficas. Os componentes simulados pelo modelo incluem hidrologia, meteorologia, erosão, crescimento de plantas/culturas, manejo do solo e nutrientes. A área de estudo é dividida em sub-bacias, as quais são subdivididas em uma ou mais unidades de resposta hidrológica (HRUs) com homogeneidade de uso, tipo de solo e relevo (ARNOLD et al., 2012).

O SWAT é um modelo semiconceitual, semidistribuído e contínuo no tempo, que opera em um passo de tempo diário, requerendo uma grande quantidade de dados espaciais e não espaciais, que descrevem a heterogeneidade dos sistemas naturais (PEREIRA, 2013). O SWAT é sensível à qualidade dos dados de entrada, assim, a acurácia do modelo depende, em grande parte, dos parâmetros que descrevem as características relevantes da bacia hidrográfica e do quão representativos eles são (Adriolo et al., 2008).

Os arquivos de entrada para o SWAT são definidos em três diferentes níveis de detalhe: bacia hidrográfica, sub-bacia e HRU. O modelo divide a bacia hidrográfica em sub-bacias e depois em HRU, que representam a discretização de porções de áreas das sub-bacias com a mesma classe de solo, além de um único tipo de uso e manejo da terra (NEITSCH et al., 2005).

O SWAT permite fazer simulações de processos físicos em bacias hidrográficas, para conseguir avaliar os danos causados ao solo e ao escoamento superficial e subterrâneo, na produção de sedimentos e na qualidade da água em bacias hidrográficas. (SILVA, 2020). A

simulação do ciclo hidrológico no SWAT baseia-se na solução da equação do equilíbrio hídrico (Equação 1):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (PREC_i - SURQ_i - ET_i - PERCO_i - BF_i) \quad (1)$$

Em que:

SW_t = conteúdo final de água no solo (mm);

SW_0 = conteúdo de água no solo disponível para as plantas, definido como conteúdo de água inicial menos o conteúdo de água no ponto de murcha permanente (mm);

t = tempo (dias);

$PREC_i$ = precipitação diária (mm);

$SURQ_i$ = escoamento superficial diário (mm);

ET_i = evapotranspiração diária (mm);

$PERCO_i$ = percolação diária (mm); e

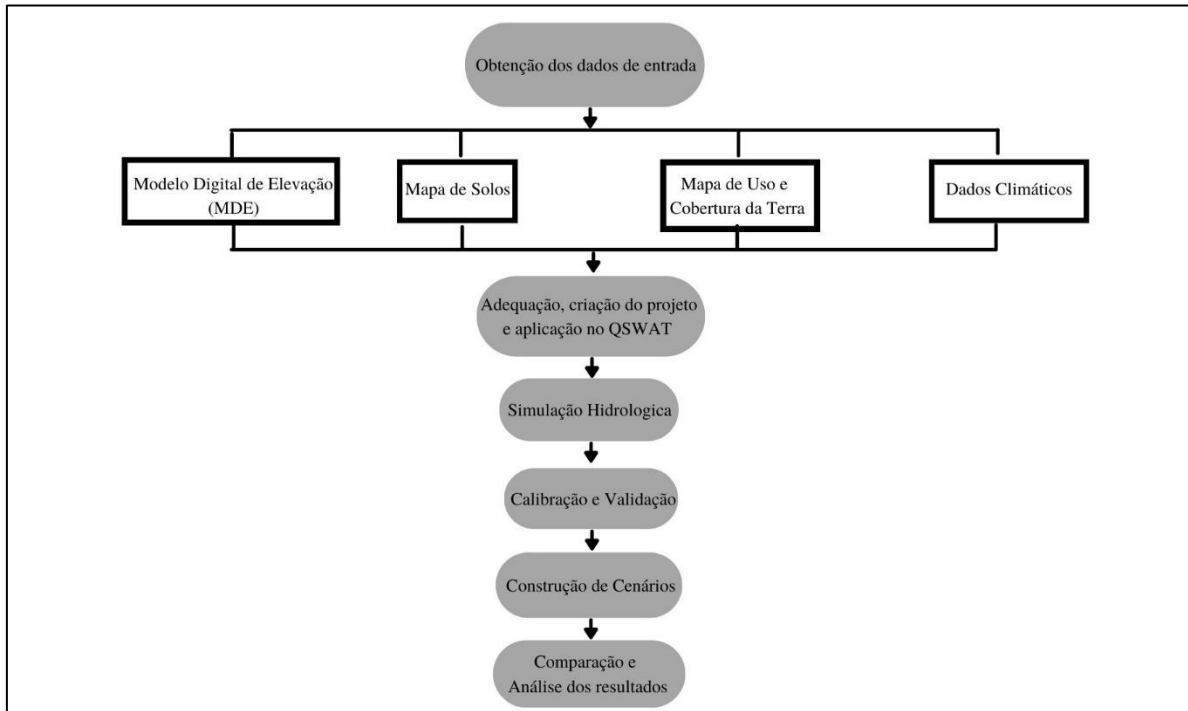
BF_i = fluxo de retorno diário, ou ascensão capilar (mm).

O modelo SWAT tem embasamento físico, necessitando de informações específicas sobre clima, topografia, vegetação e uso do solo. Para qualquer aplicação do modelo SWAT, é importante uma quantificação consistente do balanço hídrico, pois ela é a força motriz de tudo o que ocorre na bacia hidrográfica (CORREIA, 2016). O ciclo hidrológico no SWAT pode ser dividido em duas principais seções: a primeira é a fase terrestre, que controla elementos do canal principal de cada sub-bacia, como água, nutrientes, sedimentos e pesticida; e a segunda é a fase equivalente à de movimentação da água e sedimentos até a rede de canais da bacia hidrográfica, bem como sua descarga.

2.4.1 BANCO DE DADOS PARA PROCESSAMENTO DO SWAT:

A partir do entendimento de funcionamento do SWAT, foi construída a base de dados, e realizada suas configurações e processamentos, que pode ser melhor visualizada pelo fluxograma da Figura 2:

Figura 2: Fluxograma da metodologia de trabalho no SWAT.

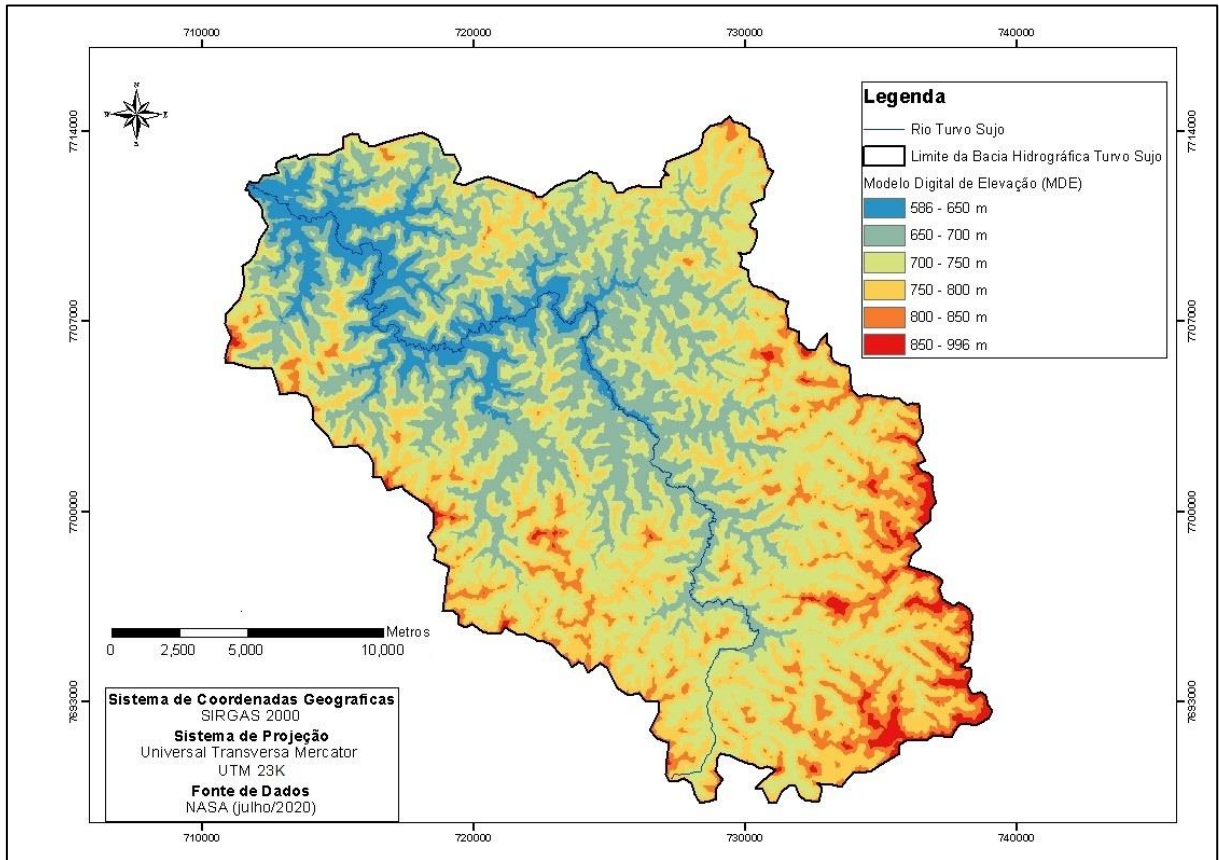


Fonte: A autora.

Modelo Digital de Elevação

O modelo Digital de Elevação (MDE) (Figura 3) escolhido para a pesquisa foi o NASADEM, que contém melhorias de processamento do *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*, como o controle de elevação e preenchimento de vazios (NASA, 2020). O alto nível de detalhamento foi ideal para bacia de estudo, por ter pequena dimensão espacial.

Figura 3: Mapa do Modelo Digital de Elevação da Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG

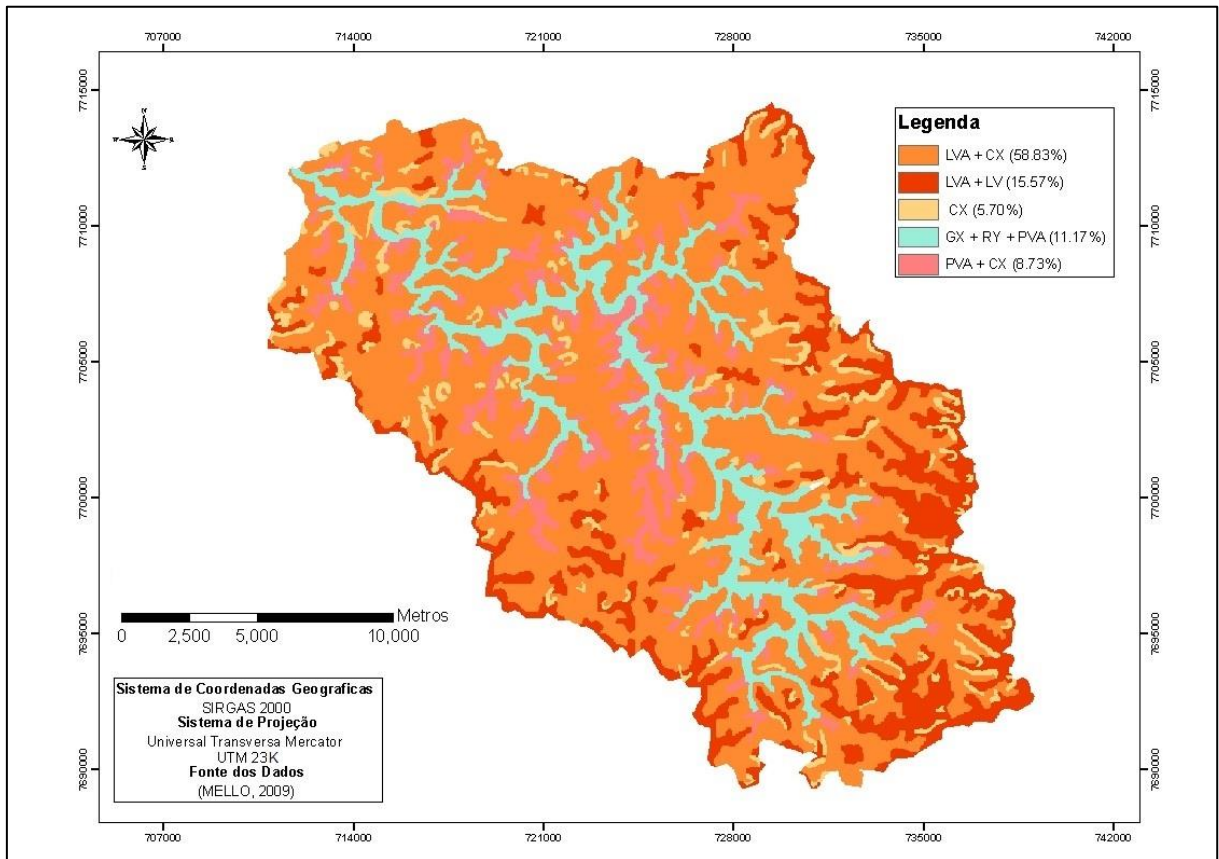


Fonte: NASA. Adaptado pela autora.

Dados de solos

Foram usados dados de mapeamentos da bacia hidrográfica do Turvo Sujo, obtidos no Mapeamento Digital de Classes de Solos elaborado por MELLO (2009). A metodologia que foi utilizada neste mapeamento, indicou a presença de 4 tipologias de solo principais, em ordem de grandeza na bacia: Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (LVAd), Argissolo Vermelho Amarelo Distrófico (PVAd), Cambissolo Háplico Tb Distrófico (CXbd) e Gleissolo Háplico Tb Distrófico (GXbd) (Figura4).

Figura 4: Mapa de Solos da Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.



Fonte: MELLO (2009), adaptado pela autora.

As propriedades físicas dos solos são responsáveis pelo movimento de água e de ar ao longo do perfil, e exercem influência sobre a dinâmica da água dentro das HRU's. (Arnald, et al. 2012). Para utilização dessas informações no SWAT, também foi necessário a criação de uma tabela com dados específicos das propriedades físicas, químicas e hidrológicas dos diferentes tipos de solos presentes na bacia (Anexo I- Tabela 2)

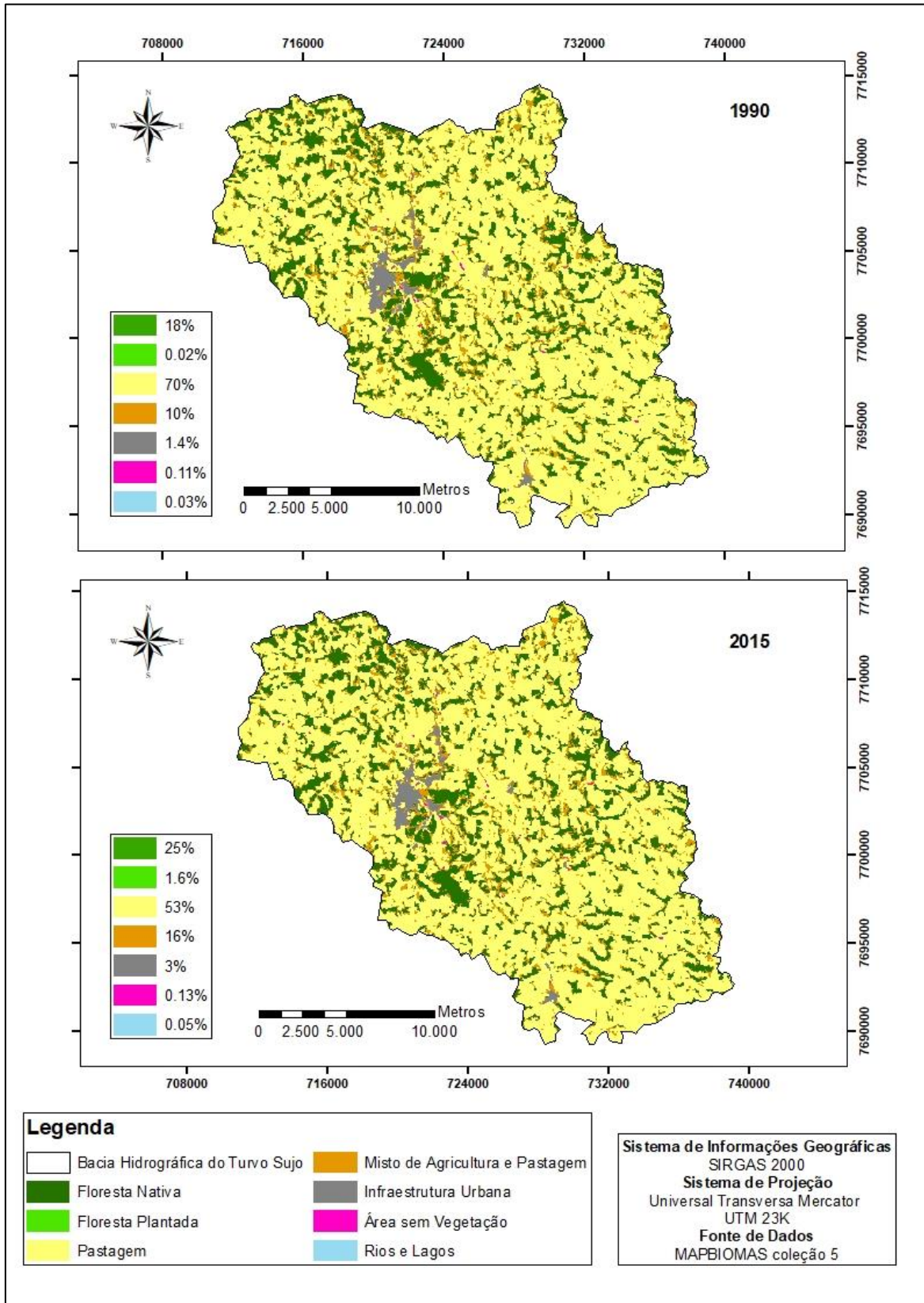
Para completar esta tabela foram pesquisadas na literatura as propriedades de cada solo presente na bacia hidrográfica. O trabalho de MELLO (2009), apresentou as características dos solos conforme perfis amostrados, que foram coletados para realização do mapeamento tradicional de classificação de solos, na bacia do Turvo Sujo.

O mapa do solo, em formato raster foi incluído na ferramenta HRU Analysis, na aba soils, e o arquivo de dados com extensão csv com as informações físicas e químicas das classes dos solos contidos no database do modelo e no mapa. Na Tabela 3 do anexo I, estão discriminados todos os resultados analíticos de propriedades de cada tipo de solo encontrados na bacia do Turvo Sujo.

Dados de Uso e Cobertura do solo

Foram usados os dados históricos de Uso e Cobertura do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil (MapBiomias), (GONÇALVES, et al. 2021). Os dados do MapBiomias foram recortados para a Bacia Hidrográfica do Turvo em diferentes anos,(1990 e 2015), referentes ao primeiro e último ano do período analisado neste trabalho (Figura 5), afim de permitir o entendimento da influência do uso e cobertura do solo na vazão, pelo modelo SWAT no ArcGis. A escolha dos anos dos mapas de Uso e cobertura da terra foi de acordo com a data de disposição dos dados climáticos da estação convencional localizada na bacia hidrográfica.

Figura 5: Mapa de Uso e Cobertura da Terra (1990 e 2015).

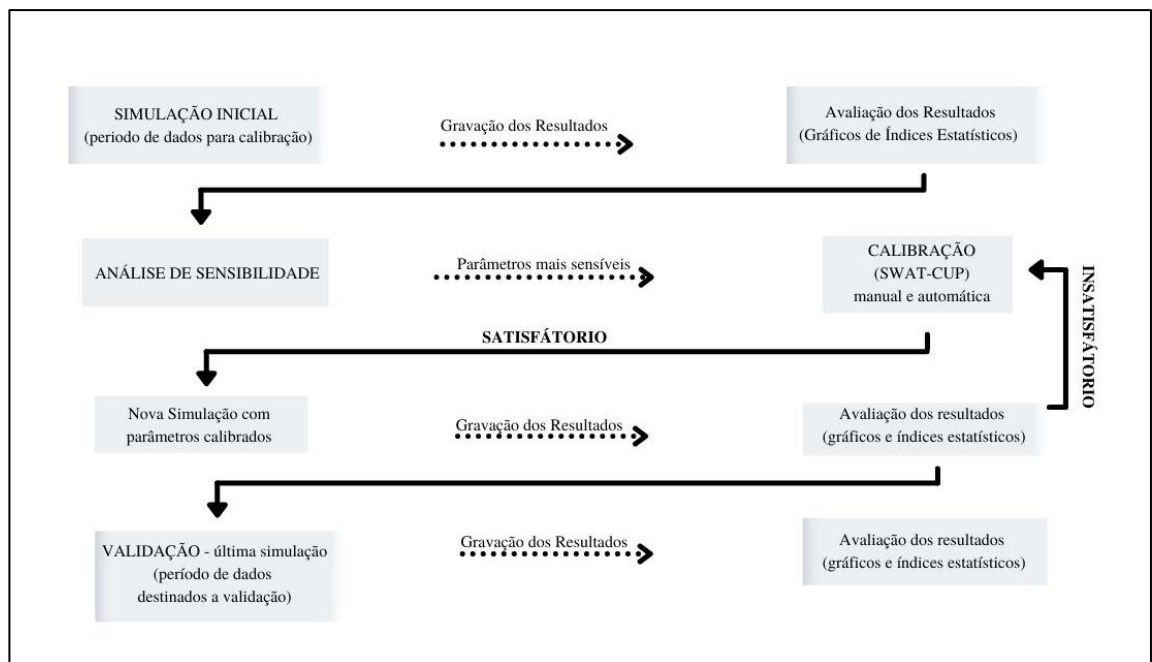


Fonte: MapBiomias c.5. Adaptado pela autora.

2.4.2 PROCESSAMENTO NO SWAT:

Após a organização do banco de dados, deu-se início a simulação do modelo no software Arcgis seguindo o fluxograma representado na figura 6. Para um modelo ser considerado bem robusto e adequado a qualquer finalidade, deve passar por um rigoroso processo de avaliação, que se dá basicamente em 3 etapas: (i) análise de sensibilidade que identifica a influência dos parâmetros com maior efeito sobre a saída do modelo; (ii) calibração que deve seguir um processo hierárquico com análise dos componentes hidrológicos, a fim de observar se a análise de sensibilidade e a função objetivo foram satisfatórias para um bom resultado entre os valores observados e simulados; e (iii) etapa de validação ou verificação do modelo para provar a utilidade em prever condições futuras sobre mudanças climáticas, cenários de uso da terra ou de gestão (WHITE; CHAUBEY, 2005).

Figura 6: Fluxograma do Processo de Modelagem no SWAT.



Fonte: FUKUNAGA (2012). Adaptado pela autora.

2.4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade é o estudo de como um modelo responde, quantitativa e qualitativamente, a diferentes variações nos valores de seus parâmetros, permitindo identificar aqueles que influem significativamente nos resultados, evitando-se perder muito tempo com aqueles aos quais o modelo não é tão sensível (SILVA, 2010). Por essa razão, pode-se dizer que a análise de sensibilidade complementa a calibração dos parâmetros do modelo. A análise foi realizada para entender algumas questões, como: i) verificar quais parâmetros mais contribuem

para a variação nos resultados simulados pelo modelo; ii) determinar os parâmetros do modelo que são pouco sensíveis e que pode ser eliminados do processo de calibração e iii) verificar se e quais conjuntos de dados interagem entre si (SILVA, 2013; PEREIRA, 2013).

O processamento da análise de sensibilidade, acontece pelo ajuste da vazão simulada a vazão observada (real), os parâmetros são incorporados ou descartados conforme a sua relevância e sensibilidade. A primeira etapa foi realizada no SWAT-CUP, pelo método SUFI2, colocando os parâmetros mais usados nos trabalhos com SWAT, principalmente em bacias brasileiras, no Sudeste, e de maior proximidade geográfica com a do Turvo Sujo identificados na literatura consultada (PEREIRA, 2013; LELIS, et al 2011; CORREIA, 2016; PIMENTEL, 2017; GOMES, et al. 2020; CATEIN, 2020). A etapa se iniciou com valores padrões, que foram sendo modificados a cada etapa de interação, onde o modelo era executado 2000 vezes, até se encontrar valores considerados satisfatórios dos índices estatísticos, com base nos critérios adotados por Moriasi et al. (2007). Após isso os novos valores dos parâmetros foram substituídos no no modelo SWAT, e realizada uma nova simulação, que também seguiu os critérios de avaliação de Moriasi et al. (2007).

Com o andamento das etapas no SWAT-CUP foram sendo eliminados os parâmetros que tinham menor efeito no modelo. Dessa forma, os parâmetros mais sensíveis do modelo na análise automática, são os que apresentam o menor valor-P, ou seja, aqueles em que a variação mais interfere na resposta da vazão (ABBASPOUR et al., 2015). O valor-P mede o grau para o qual todas as incertezas são contabilizadas, é a porcentagem dos dados de medição suportado pela previsão de incerteza de 95% (ABBASPOUR, 2007).

Por fim também foi realizada a análise de sensibilidade de forma manual, no próprio projeto do SWAT, com os valores bases dos parâmetros mais sensíveis do modelo, já identificados advindos do SWAT-CUP foi realizado um ajuste da vazão simulada a vazão real. Esse procedimento demonstrou melhoras significativas na etapa de calibração do modelo, que se mostrou diretamente relacionada a análise de sensibilidade, pelo fato, da importância de alguns parâmetros no ajuste da vazão simulada a r vazão real. Ou seja, alguns parâmetros implicaram diretamente no ajuste e avaliação do modelo.

2.4.4 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Para as etapas de Calibração e Validação do modelo, foram escolhidos o período que teve a maior representatividade de dados reais, ou seja, continuidade das informações climáticas e que apresentaram uma vazão simulada mais visualmente parecida com a vazão observada.

Segundo ABBASPOUR (2015), o desempenho do modelo padrão não deve ser drasticamente diferente da medição. Assim, foi escolhido o período de 1990 a 2015 para a modelagem, que foi dividida nas etapas de aquecimento, calibração e validação, como demonstra a tabela 1. A divisão do período para calibração e validação divisão foi com base no estudo de Arsenault (2018), entre outros, onde se concluiu que o uso de maior parte na calibração resultou em uma melhor avaliação.

Tabela 1: Divisão da série de dados no Modelo Hidrológico para as etapas de Aquecimento, Calibração e Validação.

Etapas	Aquecimento	Calibração	Validação
Anos	1990 - 1992	1993-2007	2008-2015
Quantidade de dados (%)	11%	58%	31%

Fonte: A autora.

Na Calibração, os dados de entrada são ajustados até que se obtenha uma resposta satisfatória de saída. Uma vez realizado tal procedimento, o modelo é rodado usando os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação (ARNOLD, et al, 2000). Segundo PEREIRA (2013), a calibração pode ser definida como um processo de busca dos valores ótimos dos parâmetros do modelo hidrológico. Ou seja, definir os valores dos parâmetros do modelo para que se obtenha valores simulados próximos aos valores observados.

A calibração do modelo foi realizada de forma automática, utilizando o software SWAT-CUP, e também de forma manual, no próprio projeto. Os parâmetros mais sensíveis de entrada, indicados pela análise de sensibilidade, foram alterados até que a vazão simulada fosse próxima à vazão observada. Novos intervalos de parâmetros são sugeridos pelo programa para outra interação, que modifica os intervalos anteriores com foco no melhor conjunto de parâmetros da interação atual (Abbaspour et al., 2015).

Ao término da calibração automática, os valores dos parâmetros que resultaram em melhor adequação entre os dados monitorados e os simulados pelo SWAT, foram substituídos no modelo. Também foi realizada a calibração manual dos parâmetros que não respondiam bem a substituição dos valores calibrados automaticamente. No final desse processo, gravaram-se os resultados para a análise estatística deste período. Com isso, foi possível avaliar se a calibração foi suficiente para melhorar os resultados da simulação de vazões mensais diante dos índices estatísticos estabelecidos.

Com os valores satisfatórios, foi selecionado um período de anos diferente (2008 a 2015)

ao da calibração, para validar o modelo. Como afirma Salles (2012), a etapa de Validação tem como objetivo mensurar a aderência dos resultados da simulação com um conjunto de dados independentes ao usado para calibrar os parâmetros. O procedimento de validação de um modelo hidrológico consiste em testes em que se verifica o quanto os resultados previstos com o modelo, nas aplicações pretendidas, se aproximam da realidade observada (PEREIRA, 2013). Com o modelo calibrado e validado, foi realizada a simulação dos cenários.

2.4.5 PROCEDIMENTO DE AVALIAÇÃO DO MODELO SWAT

A avaliação da qualidade das simulações, tanto na calibração, quanto na validação, é realizada por intermédio de índices estatísticos de desempenho, além de uma análise visual dos hidrogramas (PIMENTEL, 2017). Os modelos mais usados na literatura são: o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS) (Equação 2), o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe modificado (NS') (Equação 3), o coeficiente de determinação (R^2) (Equação 4), o índice PBIAS (equação 5) e o RSE (Equação 6), (TAN, et al. 2020; BRESSIANI, et al. 2015), que seguem como anexo II. O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe varia de - infinito a 1, sendo que os valores próximos a 1 correspondem à simulação ótima. Os valores positivos de PBIAS indicam superestimação do modelo, enquanto os valores negativos indicam subestimação (PIMENTEL, 2019).

Para avaliação do modelo tanto na etapa de calibração, quanto na de validação seguiu o padrão sugerido por Green e Verdevan Griensven (2008), Wu e Chen (2009), que estabeleceram padrões de $NSE > 0,4$ e $R^2 > 0,5$ satisfatório para dados mensais, como uma forma de padronização dos resultados. Já para os outros índices seguiu a referência de Moriasi et al. (2007), onde o autor sugere que o coeficiente de RSR deve ser entre 0,60 e 0,70; e PBIAS entre ± 15 e $\pm 25\%$, para dados mensais. Assim, a avaliação do modelo foi de acordo com a classificação da Tabela 2, a seguir.

Tabela 2: Classificação dos coeficientes para avaliação dos resultados do modelo SWAT.

Classificação	NS	RSR	PBIAS (%)
Muito Bom	$0,75 < NS \leq 1,00$	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,65 < NS \leq 0,75$	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,5 < NS \leq 0,65$	$0,60 < RSR \leq 0,7$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$NS \leq 0,5$	$RSR > 0,7$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: MORIASI et al. (2007), p. 891. Adaptada pela autora.

2.4.6 EFEITOS DAS MUDANÇAS DE USO E CLIMA NA HIDROLOGIA

Foram simulados quatro cenários, no primeiro denominado de C1, foi utilizado o mapa de uso e cobertura (1990) da Bacia Hidrográfica Turvo Sujo, derivado do MapBiomias. A escolha do mapa deste determinado ano seguiu o período de modelagem hidrológica, com SWAT realizado nesta bacia, que teve início em 1990. Foram realizadas duas simulações de vazões, uma para os dias atuais, e outra para próximos 29 anos, ou seja, até 2050. Este cenário teve como objetivo verificar como seria a resposta do modelo em um contexto com menor área de florestas, e uma extensão maior de pastagens.

No segundo cenário (C2), foi investigado como a atual condição da bacia se estenderia no futuro, usando o Mapa de uso e cobertura do solo do MapBiomias do ano de 2015. É importante, ressaltar que ao considerar o ano de 2015 como base para a projeção de cenário futuro, não é algo divergente da atual situação da bacia 2019, pois estes anos contém a proporção de floresta nativa equivalentes. Neste cenário, há maior área de florestas, se comparado ao C1.

No C3 foi pressuposto que todas as áreas de Áreas de Preservação Permanente - APP e Reserva Legal - RL da bacia hidrográfica do Turvo Sujo estarão com a vegetação restaurada, conforme determina o Novo Código Florestal Brasileiro. Para isso foi realizada uma junção do dado de APPS e RL registradas no CAR, com o mapa de uso e cobertura do solo de 2015 (C1). Essa adição ao mapa foi realizada através de ferramentas básicas do Arcgis, e as novas áreas foram adicionadas a classe de floresta nativa. Esse método é denominado de abordagem definida (AD) por Pimentel (2017), que baseou se na condição de que a posição geográfica na qual será realizada a alteração do uso do solo pode interferir no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica. Após etapa de processamento no Arcgis, o mapa foi substituído no projeto do SWAT, e criada uma nova vazão simulada até o ano de 2050, para ser analisada juntamente aos outros cenários.

No quarto e último cenário (C4), foi pressuposto que todos os terços superiores de morros da bacia hidrográfica do Turvo Sujo estariam com cobertura de floresta nativa, partindo do entendimento que as florestas preservadas nos topos de morros possuem função hidrológica, na medida em que reduzem a energia cinética da água de escoamento superficial, reduzindo seu potencial erosivo ao longo das encostas, e favorecendo a infiltração de água nas principais áreas de recarga dos aquíferos (OLIVEIRA, 2015). Ou seja, estas áreas são de grande importância ambiental e social em bacia hidrográficas, e por essa razão foi usada o feita a delimitação dos terços superiores dos morros, seguindo a metodologia proposta por OLIVEIRA (2015). Feita a

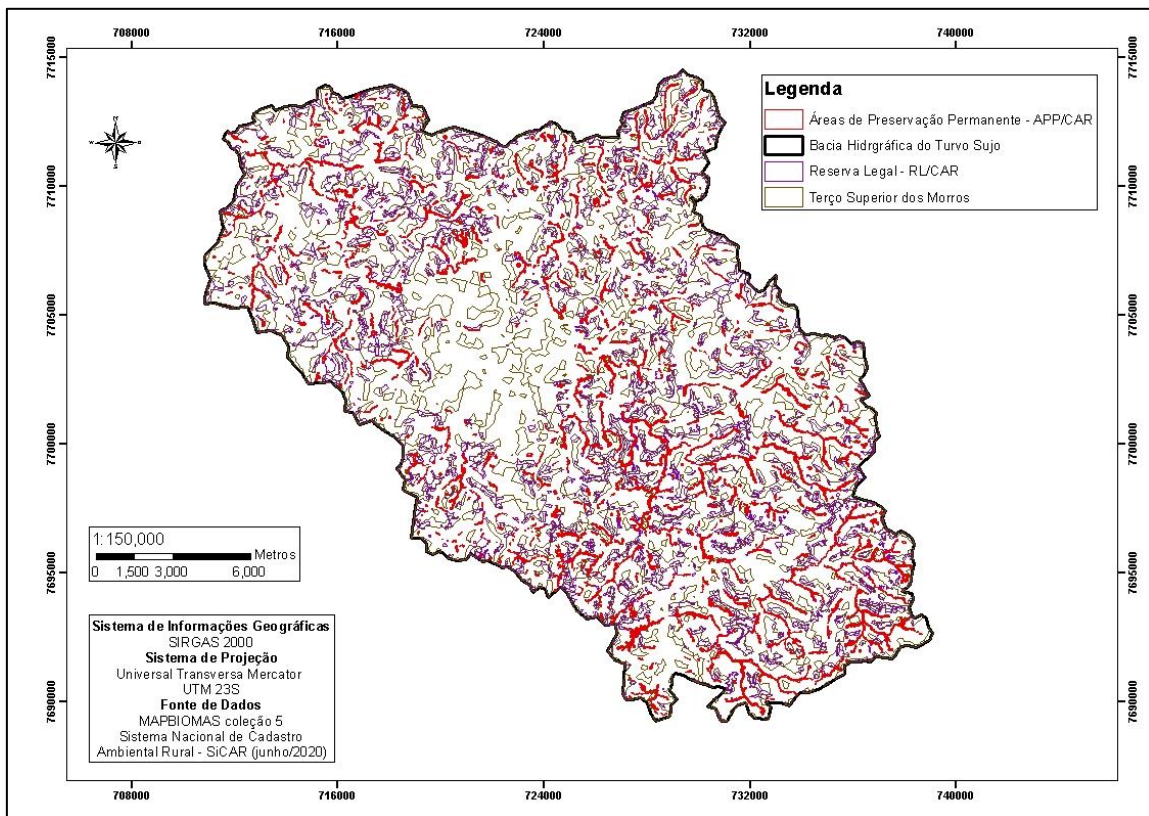
delimitação com uso de Imagem do NASADEM (NASA.2020), essas áreas foram somadas a classe de floresta nativa do mapa de uso e cobertura do solo de 2015 do Mapbiomas, e foram realizadas as simulações no SWAT, como nos outros cenários. A tabela 3 apresenta as diferenças em porcentagem entres os 4 cenários criados neste trabalho, e a figura 7 apresenta o mapa com a demarcação das APPs, RLs registradas no CAR, e Terços Superiores dos morros na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo.

Tabela 3: Tabela com a distribuição em porcentagem (%) das classes de uso e cobertura do solo da Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG nos cenários (C1,C2,C3,C4).

CLASSES	CENÁRIOS			
	C1	C2	C3	C4
Floresta	18	25	32	36
Floresta Plantada	0.02	1.6	1.6	1.3
Pastagem	70	54	50	46
Mosaico de agricultura e pastagem				
	10	16	13	13
Infraestrutura Urbana	1.4	3	3	2.6
Área sem vegetação	0.11	0.13	0.11	0.11
Rios e Lagos	0.03	0.05	0.05	0.05

Fonte: A autora.

Figura 7: Mapa com a demarcação das APPs, RLs e Terços Superiores dos morros na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo.



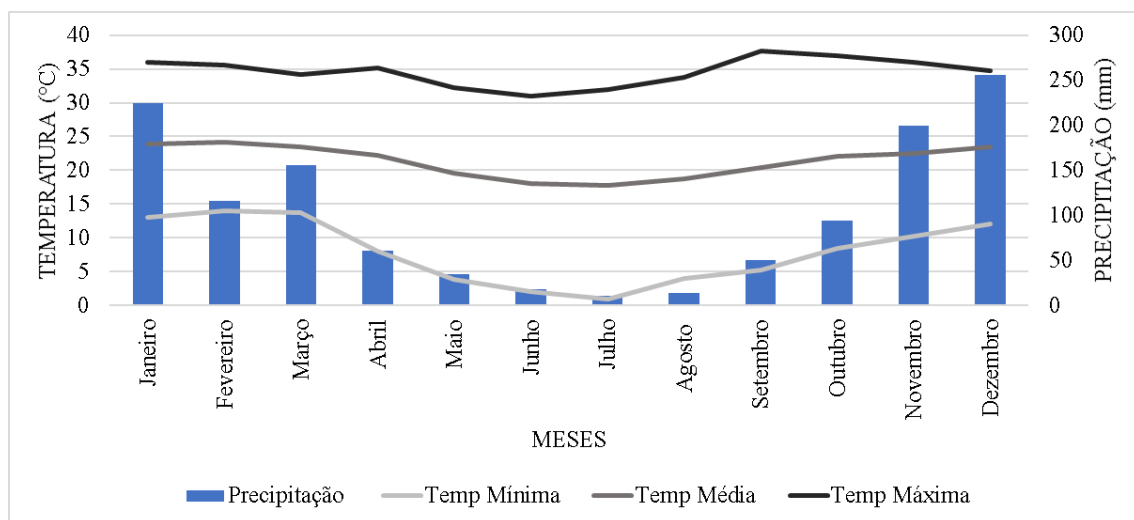
Fonte: A autora.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos Dados Históricos Meteorológicos e da Vazão

O gráfico da figura 8 demonstra a média de precipitação, a mínima, média e máxima de temperatura mensal. O mês de dezembro demonstrou ser o mais chuvoso do ano, (média de aproximadamente 250 mm), seguido de janeiro e março. Já os meses com menor volume de chuva são julho (média de aproximadamente 10mm), agosto e junho respectivamente. Os meses de março e novembro apresentaram valores de precipitação média significativas em todos os anos analisados. Já os meses junho e julho possuem as menores médias, muitas das vezes com valores nulos nos gráficos, dado este que se confirma a figura 8, e o Apêndice C. Já o que diz a respeito da temperatura na Bacia do Turvo Sujo percebe que uma variação entre 11 graus Celsius de mínima e 29 graus Celsius de máxima, mantendo uma média entre 18 e 24 graus Celsius aproximadamente o ano todo. Em ambos os dados, percebe-se a existência de duas estações bem definidas durante o ano (verão e inverno), com máximas e mínimas de temperatura, e maior e menor volume de precipitação respectivamente. O que também visualizado por Dias (2020), e Alvarez (2013), em seus estudos, onde constataram a existência de dois períodos adversos durante o ano na região da Bacia do Turvo Sujo.

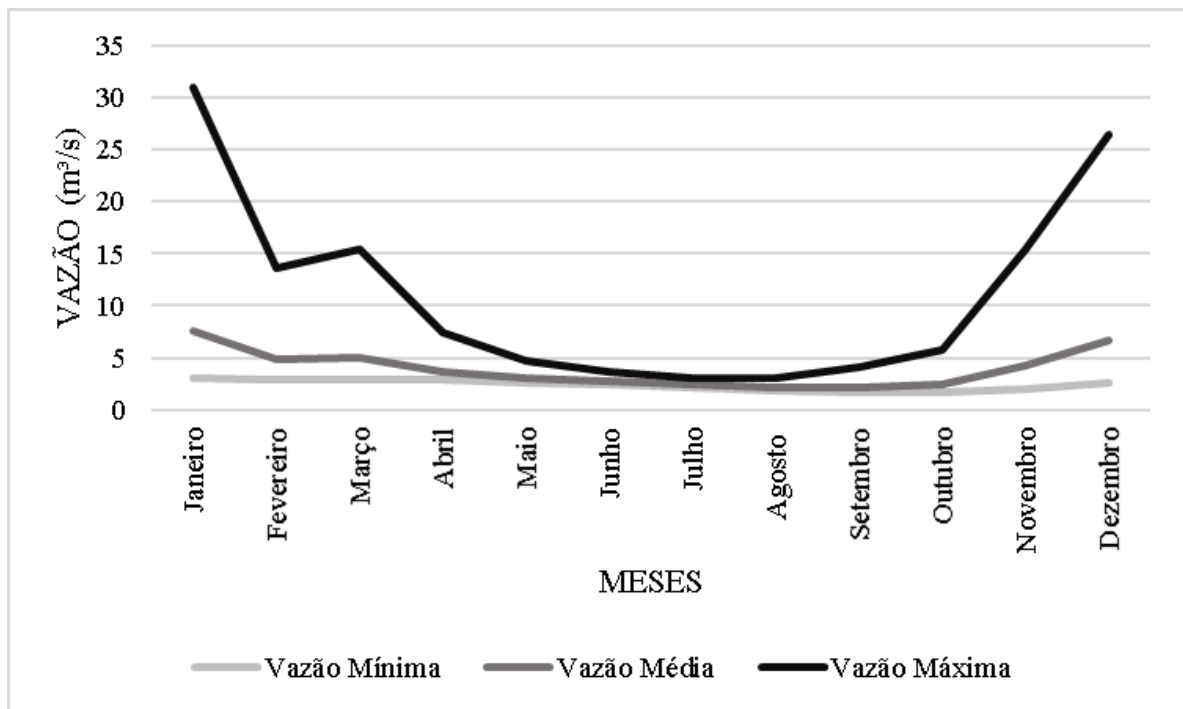
Figura 8: Gráfico da média de precipitação, mínima e máxima de temperatura na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, mensais, MG entre o período (1986-2017).



Fonte: INMET. Adaptado pela autora.

Relacionando as informações climáticas mensais, com a vazão mensal na Bacia (figura 9), percebe-se que há uma relação direta entre o período mais chuvoso, com os períodos de máxima vazão registrados nos meses de janeiro e dezembro, e entre o período mais seco (meses próximos a julho) com as mínimas de vazão registradas.

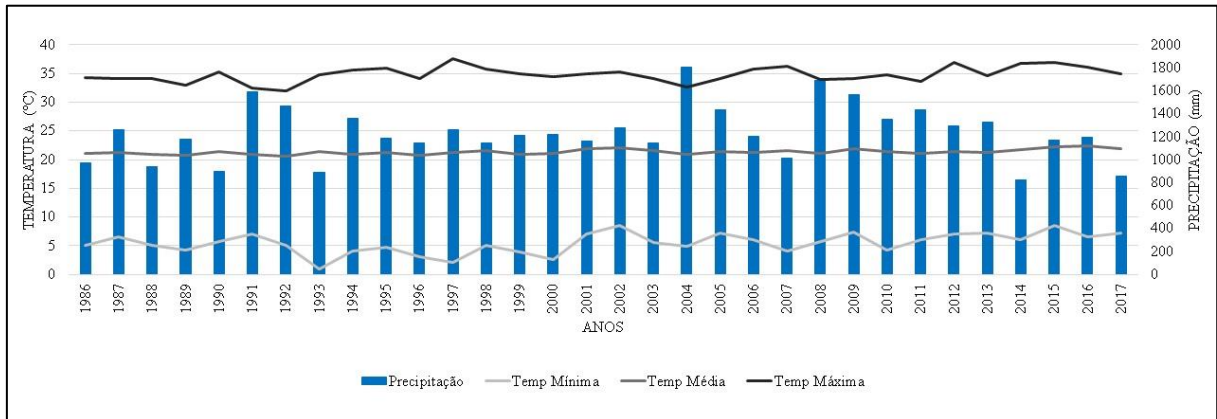
Figura 9: Vazão Mensal na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.



Fonte: HidroWeb. Adaptado pela autora.

Analisando os dados de precipitação e temperatura de forma anual (Figura 10) é possível verificar mudanças mais intensas ao longo do período, como por exemplo a existência de picos entre anos muito chuvosos, destacando o máximo no ano de 2004, com aproximadamente 1800 mm acumulados, (desses 1200 apenas na estação do verão) e o mínimo no ano de 2014 com aproximadamente 500 mm. Outros anos como 1986, 1993, 1998 e 2017 também estiveram abaixo de 1000mm, com o último ano marcando 850 mm aproximadamente, e algo comum entre estes anos é a ocorrência de algum evento climático como El nino ou El Nina registrados de acordo com o CPTEC do INPE. O gráfico também demonstra uma forte diminuição no volume de precipitação a partir de 2010, ano que registrou a presença de El nino e El Nina (INPE, 2021). As medias anuais de temperatura indicam que não houve mudanças drásticas, porém existem variações e uma tendência de aumento de médias das mínimas e máximas. As temperaturas mínima e máxima de cada ano possuem uma maior variação, e apresentam um aumento da temperatura ao longo dos anos, principalmente a mínima, com uma tendência de aumento a partir de 2010. O que também é relatado por Dias (2020) em seu estudo, que indicou aumento de dias quentes, e diminuição de noites frias na região da Bacia do Turvo Sujo.

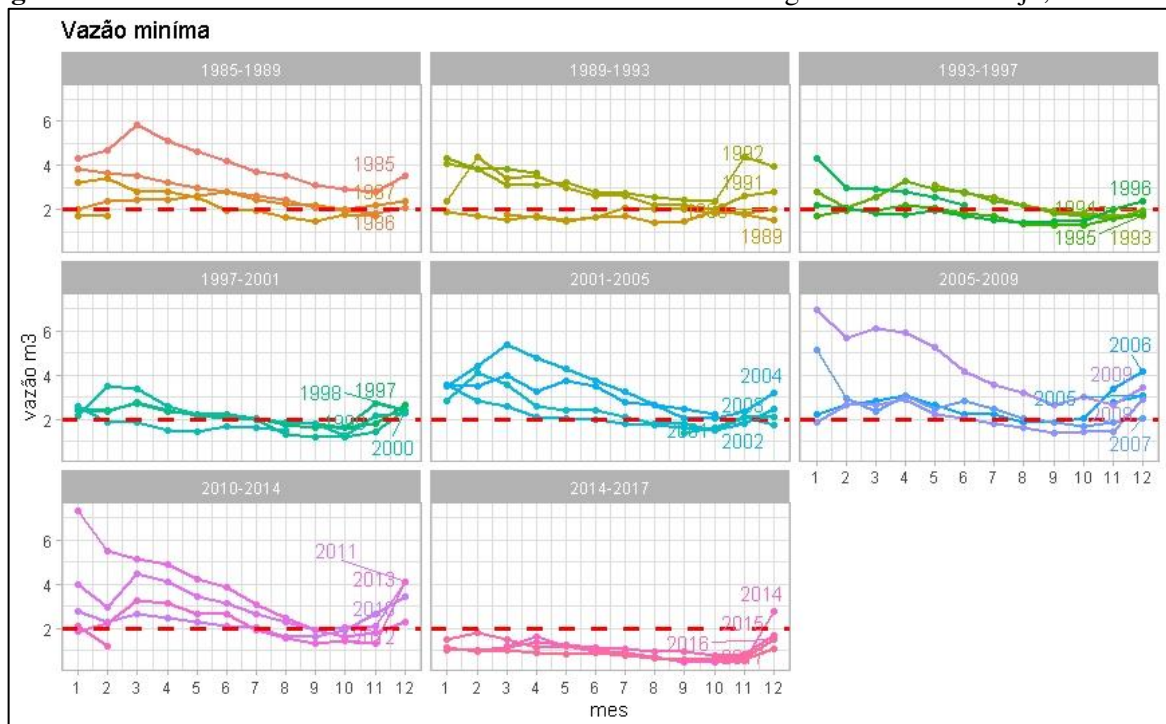
Figura 10: Gráfico da média de precipitação, mínima e máxima de temperatura na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, anuais, MG entre o período (1986-2017).



Fonte INMET. Adaptado pela autora.

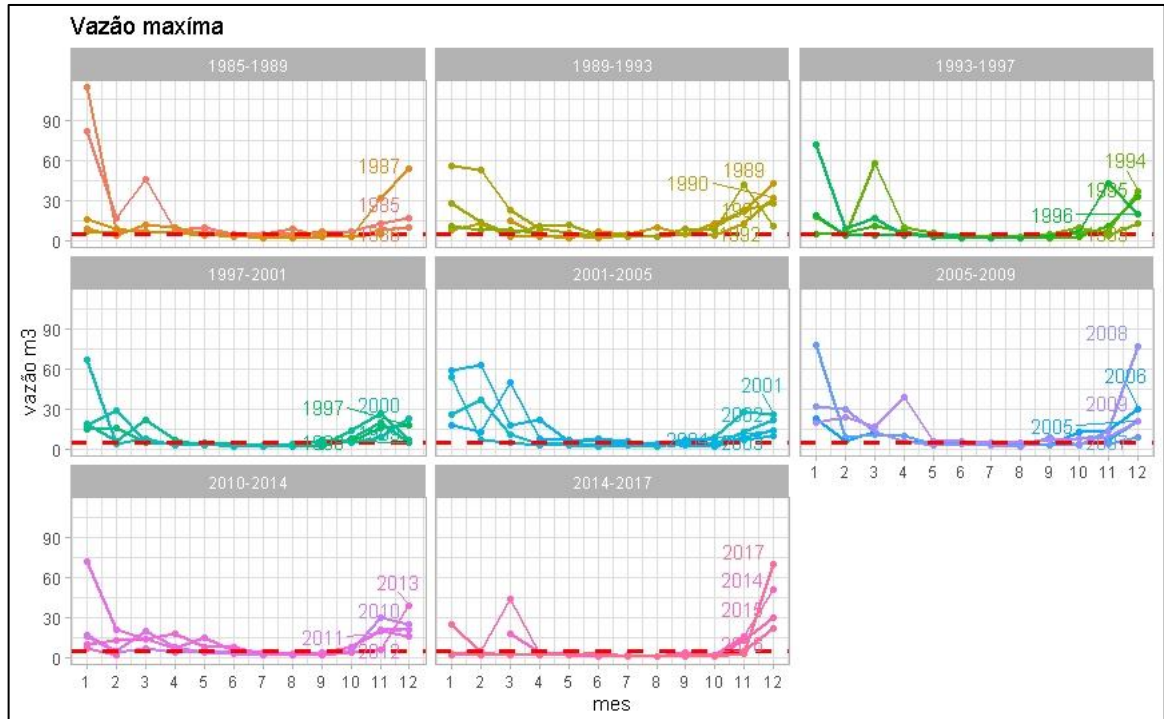
Os resultados da pesquisa indicaram uma coexistência de alguns anos chuvosos, com os de maiores vazões registradas, como por exemplo 1991, 2004 e 2008. A relação entre estes dados é maior quando se analisadas as médias mensais do período, todos os meses tem a mesma proporção, ou seja, os picos de chuva e cheia da vazão são equivalentes, da mesma forma que os meses mais secos. Nas figuras 11 e 12, é possível verificar que a vazão mínima passou de 4 (m³/s) em 1985, para 1 (m/s) em 2017, enquanto a vazão máxima passou de 18(m³/s) para próximo de 8 (m³s), e também as tendências entres essas vazões durante o período estudado.

Figura 11: Gráfico das Vazões mínimas observadas na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.



Fonte: HidroWeb. Adaptado pela autora.

Figura 12: Gráfico das Vazões máximas observadas na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.



Fonte: HidroWeb. Adaptado pela autora.

Considerando todos os anos analisados é possível verificar uma tendência de diminuição da vazão mínima, com um decréscimo maior a partir de 2014 (ano com menor volume de chuva registrado também), ficando abaixo de 2 m³/s no restante do período até 2017. Além disso, a vazão mínima nos meses de verão, que tem médias mais altas de precipitação do que no restante do ano, diminui muito ao longo do período analisado, principalmente se observando os anos iniciais e finais. A vazão máxima diminuiu nos meses secos (inverno), e no passar do tempo, teve uma retomada nos meses mais próximos ao verão, ou seja, com o período seco mais estendido durante o ano. E este retorno passou a acontecer de forma mais intensa e acentuada (indicado pela inclinação das linhas no gráfico), o que pode indicar eventos extremos, como dias de muitas chuvas em um curto período de tempo. Esses eventos também são relatados por Dias (2020) em seu estudo na região.

3.2 Análise do Modelagem Hidrológica com SWAT

3.2.1 ANÁLISE DA PRÉ CALIBRAÇÃO

Na Tabela 4 são apresentados os valores dos índices estatísticos para avaliação da simulação das vazões mensais, antes do procedimento de calibração do modelo para a bacia do Turvo Sujo. De acordo com a classificação de Moriasi et al. (2007), todos os valores dos índices estatísticos foram insatisfatórios.

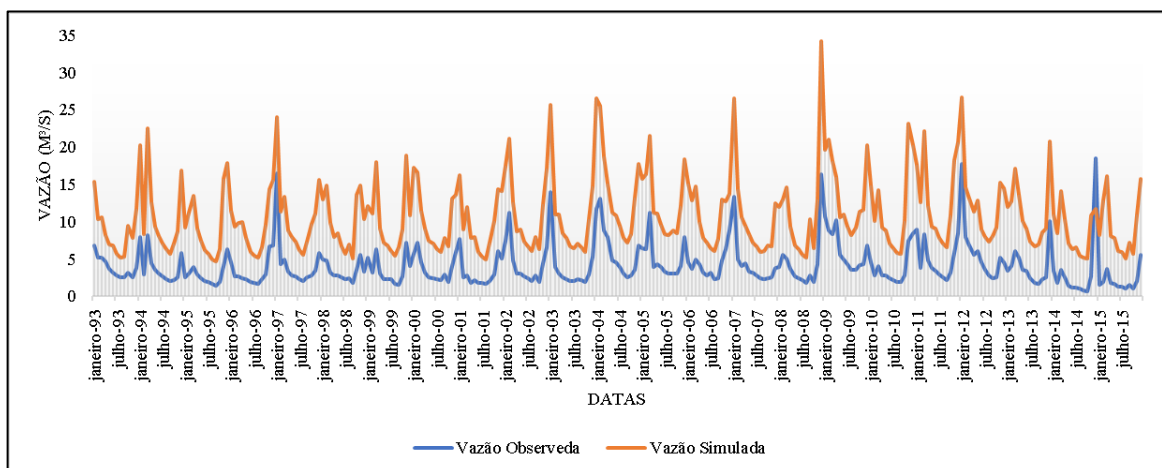
Tabela 4: Índices estatísticos de avaliação da simulação de vazões mensais no modelo SWAT, para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo.

Parâmetros da Pré - Calibração	
Coefficiente de determinação - R ²	-3.4
Coefficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS)	-5.71
Coefficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe ajustado – NS'	-2.4
Percentual de tendência (%) - PBIAS	-175
Erro padrão médio normalizado - RSR	-2.46

Fonte: A autora

Através da análise visual do Hidrograma inicial (figura 13) foi possível identificar uma tendência de superestimava dos dados simulados em relação aos observados, um fluxo de base simulado muito maior que o observado, e picos de vazão muito altos. Segundo ARNOLD (2005), essa avaliação é importante, porque a visualização do hidrograma, auxilia na interpretação do sistema hidrológico e serve de base para a seleção dos parâmetros a serem calibrados.

Figura 13: Hidrograma da Vazão Observada e Vazão Simulada pelo modelo SWAT, para Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.

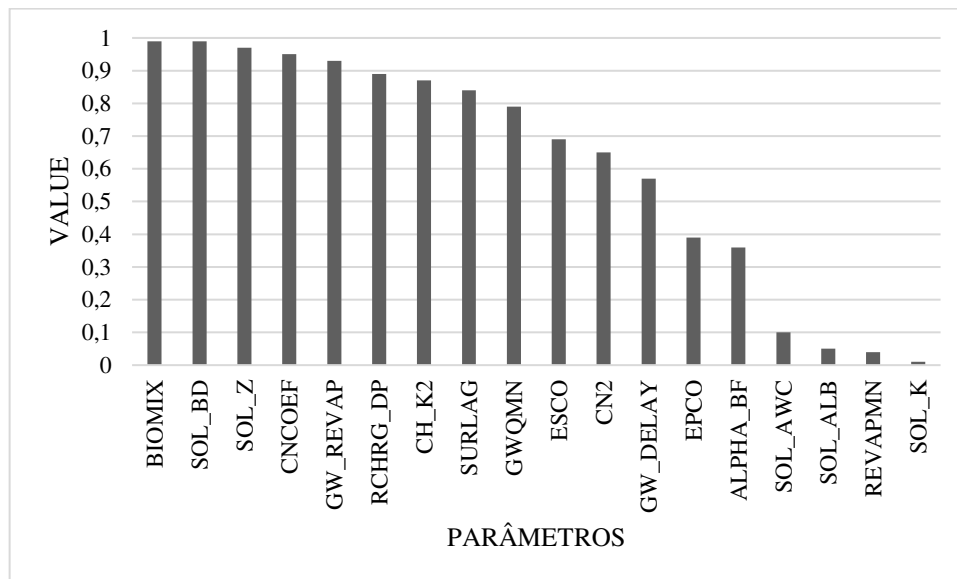


Fonte: A autora.

3.2.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO

Na figura 14, e tabela 5 são apresentados os parâmetros (em ordem decrescente) e os seus respectivos valores finais resultantes da análise de sensibilidade do Modelo Hidrológico realizada de forma automática pelo programa SWAT-CUP, utilizando o método SUF-2.

Figura 14: Parâmetros em ordem crescente de importância obtidos na Análise de Sensibilidade.



Fonte: A autora.

Tabela 5: Valores finais e métodos dos Parâmetros escolhidos na Análise de Sensibilidade.

Parâmetros	Descrição	Valor	Método
CN2	Número da curva na condição II de umidade(adimensional)	-0.1619	Multiplicação
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base (adimensional)	0.42425	Substituição
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias)	47.535	Substituição
GWQMN	Profundidade do limite de água no aquífero raso para o escoamento de base (mm)	0.5115	Substituição
SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H2O/mm solo)	0.48125	Multiplicação
SOL_K	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h ⁻¹)	1.5	Multiplicação

EPCO	Fator de compensação de evaporação da planta (adimensional)	0.02725	Multiplicação
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)	0.62325	Multiplicação
SURLAG	Coefficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional)	12.85726	Multiplicação
SOL_ALB	Albedo do solo úmido (decimal)	0.015813	Multiplicação
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h ⁻¹)	477.8746	Multiplicação
REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o “revap” (mm)	199.125	Multiplicação
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração)	0.27025	Multiplicação

Fonte: A autora.

Como é possível verificar, os parâmetros mais sensíveis foram: a Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (SOL_K), a profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o “revap” (REVAPMN), e o Albedo do solo úmido (SOL_ALB), também identificados por LELIS (2011), PEREIRA (2013) e CORREIA (2016) em seus respectivos trabalhos usando SWAT. Os valores finais dos parâmetros (APÊNDICE D) foram adicionados no SWAT por diferentes métodos (multiplicação e substituição).

Para um melhor ajuste do modelo, também foi necessária a realização de calibração manual nos parâmetros, e os mais sensíveis nessa etapa foram aqueles relacionados às propriedades físicas do solo e ao manejo, como a capacidade de água disponível, e a condutividade hidráulica. Resultados parecidos com os encontrados por LELIS (2012) ao realizar um trabalho com SWAT em uma sub-bacias hidrográfica do Turvo Sujo, que demonstra que a sensibilidade dos parâmetros é influenciada, diretamente, pelo uso e ocupação do solo, pela topografia e por outros fatores físicos e climáticos (Schmalz e Fohrer, 2009). Os parâmetros que mais demonstraram sensibilidade ao serem modificados na etapa de caibramento manual foram(em ordem crescente de sensibilidade): REVAPMN (profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o “revap”), SURLAG (coeficiente de retardo do escoamento superficial), CANMX (armazenamento máximo de água no dossel vegetativo), SLSUBBSN (comprimento da declividade média), SOL_Z (profundidade do solo),

RCHRG_DP (fração de água percolada para o aquífero profundo) e SOL_AWC (Capacidade de água disponível no solo), que por sua vez, tem a capacidade de reduzir significativamente a vazão superestimada pelo modelo, diminuindo o escoamento de base (KANNAN et al., 2007). Essas mudanças foram significativas para aumentar o armazenamento de água no solo, com aumento da percolação e recarga dos aquíferos rasos e profundos, diminuição do escoamento superficial, fluxo lateral e de retorno. Como as etapas de análise sensibilidade dos parâmetros e calibração estão diretamente relacionadas, esses ajustes também resultaram em uma melhora significativa nos índices estatísticos, principalmente para o Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe – NS que passou de -5.7 para 0,68 (Tabela 6).

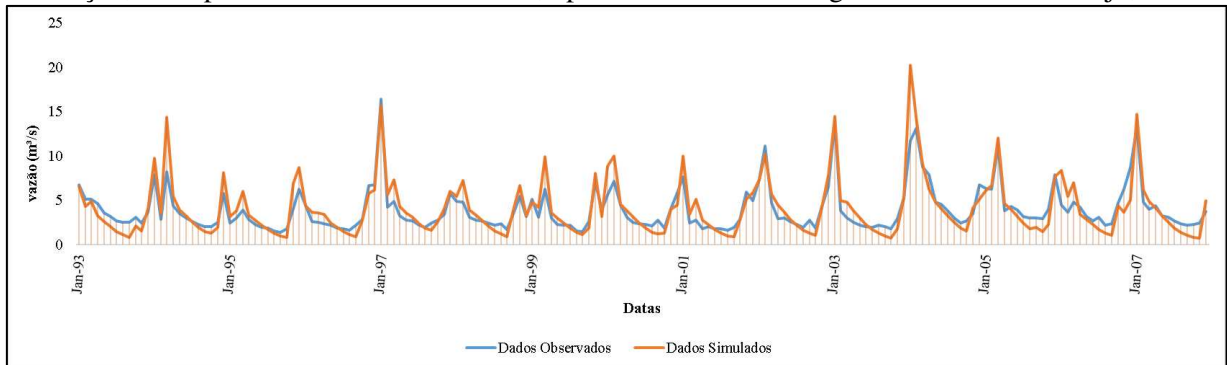
Tabela 6: Índices estatísticos de avaliação da simulação de vazões mensais, após calibração automática e manual, no modelo SWAT, para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG

Parâmetros da Calibração	
Coeficiente de determinação - R ²	0.81
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe – NS	0.68
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe ajustado – NS'	0.49
Percentual de tendência (%) - PBIAS	9.18
Erro padrão médio normalizado - RSR	0.57

Fonte: A autora.

Todos os índices estatísticos foram consideráveis satisfatórios, bons ou muito bons pela avaliação de Moriasi et al. (2007) por Green e Verdevan Griensven (2008), e Wu e Chen (2009), além disso é possível verificar o bom ajuste visual pelo hidrograma comparativo entre a vazão observada e a vazão simulada calibrada (figura15).

Figura 15: Hidrograma da vazão mensal observada e simulada pelo modelo SWAT, após etapa de calibração, no período de 1990 a 2007, para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.



Fonte: A autora.

Com a análise dos hidrogramas foi perceptível a eficiência da calibração para ajustar o escoamento de base e os picos máximos de vazão, ambos superestimados pelo modelo não calibrado. Com resultados satisfatórios encontrados por meio de avaliação dos índices estáticos, e análise das vazões observadas e simuladas, foi realizada a validação do modelo hidrológico para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo (tabela7).

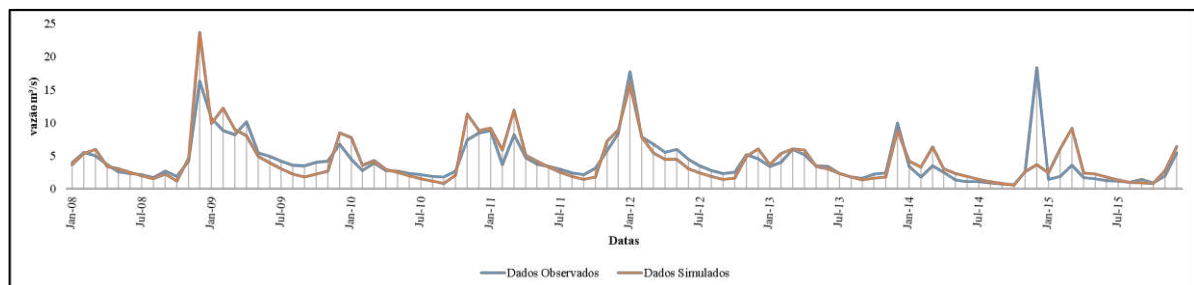
Tabela 7: Índices estatísticos de avaliação da simulação de vazões mensais, após etapa de validação no modelo SWAT, para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG.

Parâmetros da Validação	
Coeficiente de determinação - R ²	0.65
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe - NS	0.59
Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe ajustado – NS'	0.52
Percentual de tendência (%) - PBIAS	16.5
Erro padrão médio normalizado - RSR	0.65

Fonte: A autora.

Alguns valores dos índices tiveram resultados inferiores ao da calibração, porém considerados ainda satisfatórios pelas avaliações de Moriasi et al. (2007) por Green e Verdevan Griensven (2008), e Wu e Chen (2009). Estes valores coincidem com resultados encontrados no mundo, e no Brasil, com estatísticas de R² e NS em período de tempo mensal, próximo ou superior a 0,6 e 0,5, respectivamente, para resultados de simulação satisfatórios (TAN et al. 2020; BRESSIANE, et al. 2015). A figura 16 apresenta o hidrograma com resultados no processo de validação.

Figura 16: Hidrograma da vazão mensal observada e simulada pelo modelo SWAT, após etapa de validação, para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG (período: 2008-2015).



Fonte: A autora.

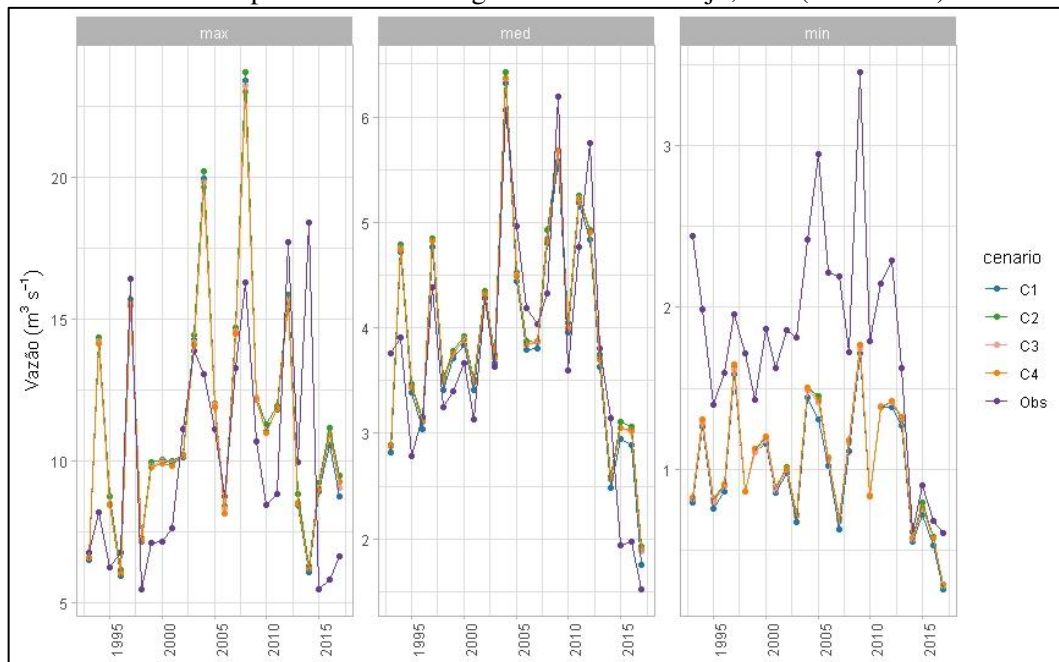
O hidrograma não se mostrou tão ajustado no final da série analisada pela validação, esse desbalanço pode ter ocorrido devido a uma mudança muito brusca no nível de precipitação

a partir de 2012, e ao aumento de eventos extremos, como grande quantidade de chuva em um curto período de tempo, (o que já foi relatado e demonstrada na análise histórica dos dados climáticos e da vazão) gerando um aumento brusco na vazão real. Contudo, pode-se considerar que o desempenho das simulações foi satisfatório considerando todas as limitações da base de dados utilizadas no presente estudo, principalmente por conta do tamanho da série de dados climáticos e a necessidade de modelagem da radiação. Como afirma BRESSIANI (2015), uma das maiores dificuldades encontradas nos trabalhos brasileiros com modelagem hidrológica usando o SWAT, é a escassez de dados de entrada e monitoramento. Todavia, verificou-se neste estudo que os dados das novas estações automáticas de medição meteorológica possuem maior quantidade de informações, e mais constância na presença destes dados se comparada a base convencional usada neste trabalho, o que representa uma esperança para os novos estudos, e trabalhos que não tem necessidade de análises históricas como esta pesquisa.

3.2.4 EFEITOS DAS MUDANÇAS DE USO E CLIMA NA HIDROLOGIA

As simulações de cenários para a bacia hidrográfica do Turvo Sujo, de uma forma geral, possibilitaram verificar os possíveis efeitos hidrológicos ocasionados por mudanças de uso da terra, a sensibilidade do modelo frente a essas diferenças. A primeira constatação observada nos resultados do SWAT nesta bacia, é pelo gráfico da figura 17:

Figura 17: Comparação entre as vazões observadas e vazões simuladas anuais com diferentes mapas de uso e cobertura da terra para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG (1993-2015).

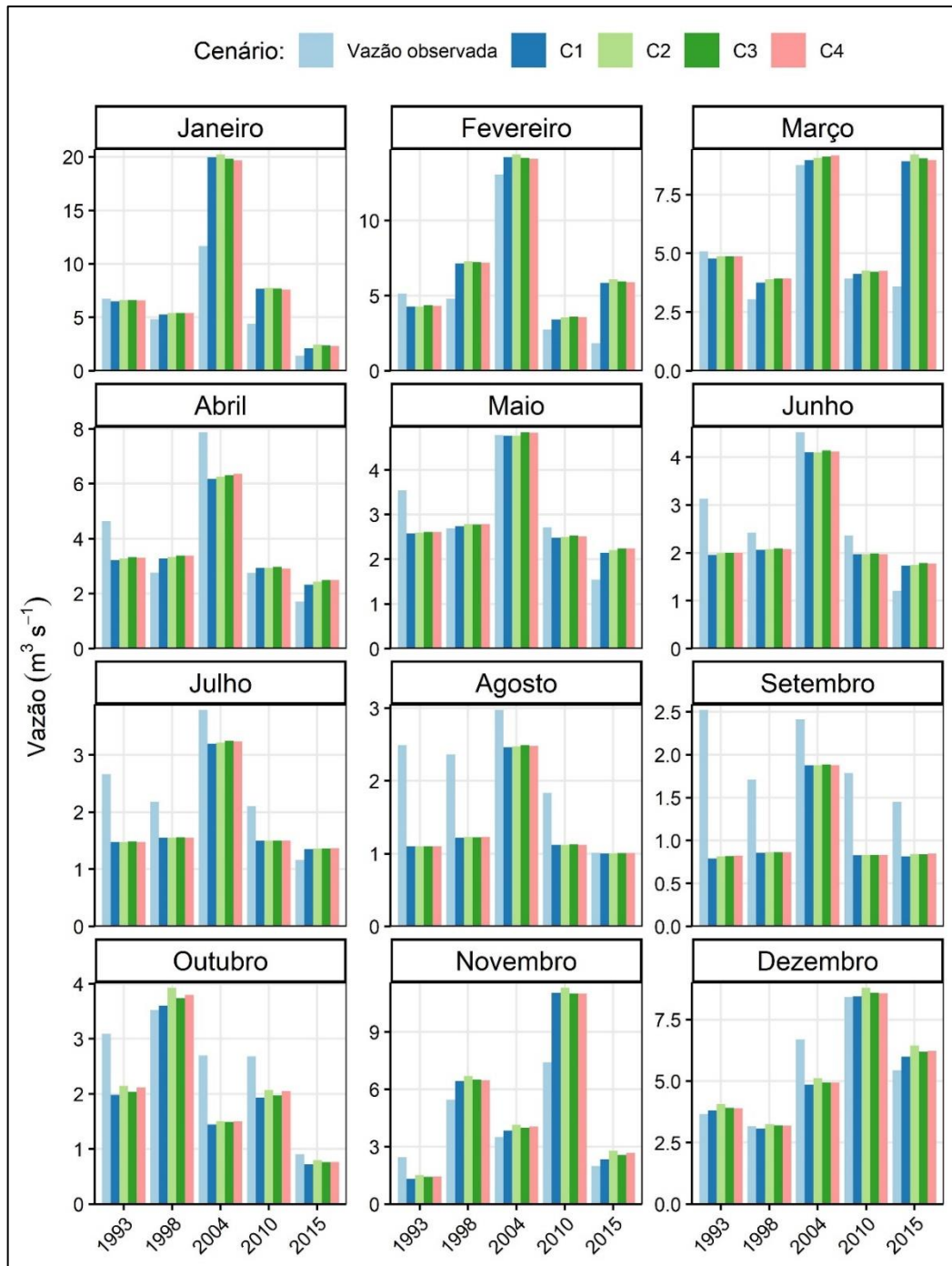


Fonte: A autora.

As vazões máximas foram registradas nos cenários C1 e C2, enquanto em C3 e C4 foram registradas as maiores vazões mínimas. Essa relação pode ser explicada pelos benefícios que as florestas trazem para o solo, em reter umidade, fornecer maior proteção devido a presença da serapilheira, reduzindo a erosão hídrica, o escoamento superficial, propiciando maior infiltração e maior recarga dos aquíferos, levando a uma diminuição lenta do escoamento superficial (CORREIA, 2016; SANTOS, 2013). Resultados semelhantes, onde o aumento da porcentagem de floresta nativa ou plantada, reduz as vazões máximas, são evidenciados em outros trabalhos como (BESKOW; NORTON; MELLO, 2013; PEREIRA, 2013). Contudo, é importante ressaltar que as florestas aumentam a evapotranspiração, e conseqüentemente, aumentam demanda hídrica pela área foliar maior, e a captura de água em profundidades maiores pelas raízes, se comparadas as pastagens por exemplo. BACELLAR (2005) afirma que a evapotranspiração e a interceptação das florestas são expressivamente superiores à da vegetação de menor porte. Portanto, o impacto final das florestas sobre as vazões dos cursos d'água depende do balanço entre o impacto positivo do aumento da infiltração com o impacto negativo do aumento da evapotranspiração (PIMENTEL, 2017).

Outra constatação é que os cenários com maiores porcentagens de floresta, obtiveram os menores valores de vazões de enchentes (máximas), o que comprova a eficiência das florestas na regularização da distribuição da vazão ao longo do ano e no suprimento de água para a recarga dos aquíferos, evitando picos máximos de vazão de grande amplitude (CORREIA, 2016; HONDA e DURIGAN, 2017). Na análise mensal das vazões (figura 18) foi possível identificar maiores diferenças, principalmente em períodos de secas e cheias, onde os maiores valores passam de $4\text{m}^3/\text{s}$ para $20\text{m}^3/\text{s}$.

Figura 18: Comparação entre as vazões observadas e vazões simuladas mensais com diferentes mapas de uso e cobertura da terra para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG (1993-2015).

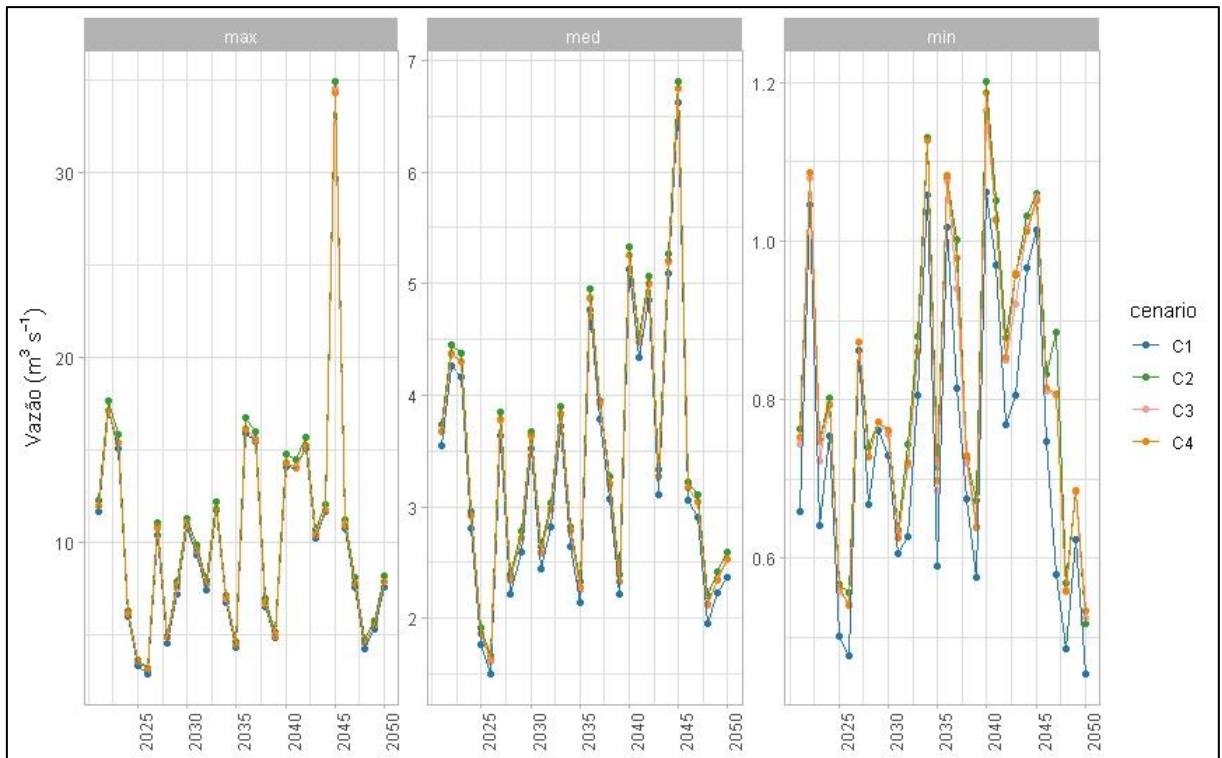


Analisando os dados de forma anual, e mensal, é possível verificar o resultado do aumento de cobertura florestal sob a vazão na bacia, nos meses de seca, demonstrando o efeito de sazonalidade, já percebida pela análise dos dados climáticos. A disponibilidade hídrica evidencia a importância do uso da terra com maiores porcentagens de florestas, reiterando a

importância das florestas no período de estiagem, quando mantêm uma maior vazão nos cursos hídricos, devido principalmente a maior infiltração da água, no período chuvoso, porque os processos hidrológicos de subsuperfície são favorecidos, alimentando o fluxo de base (BRUIJNZEEL, 2004). Como é possível ver na figura 18, os cenários C3 e C4 tiveram a maior vazão registrada em meses e seca de março a outubro, já nos meses de muitas chuvas registradas como dezembro e janeiro, as vazões de C1 e C2 são próximas ou superiores a C3 e C4. Essas diferenças demonstram a incapacidade do solo de infiltrar a água, já que existe nestes cenários menores proporções de floresta nativa, e maiores áreas cobertas por pastagem, agricultura e infraestrutura urbana. Os cenários onde a bacia possui mais áreas florestadas, aumentaram a retenção de água, e conseqüentemente, apresentam maiores vazões nos períodos de estiagem.

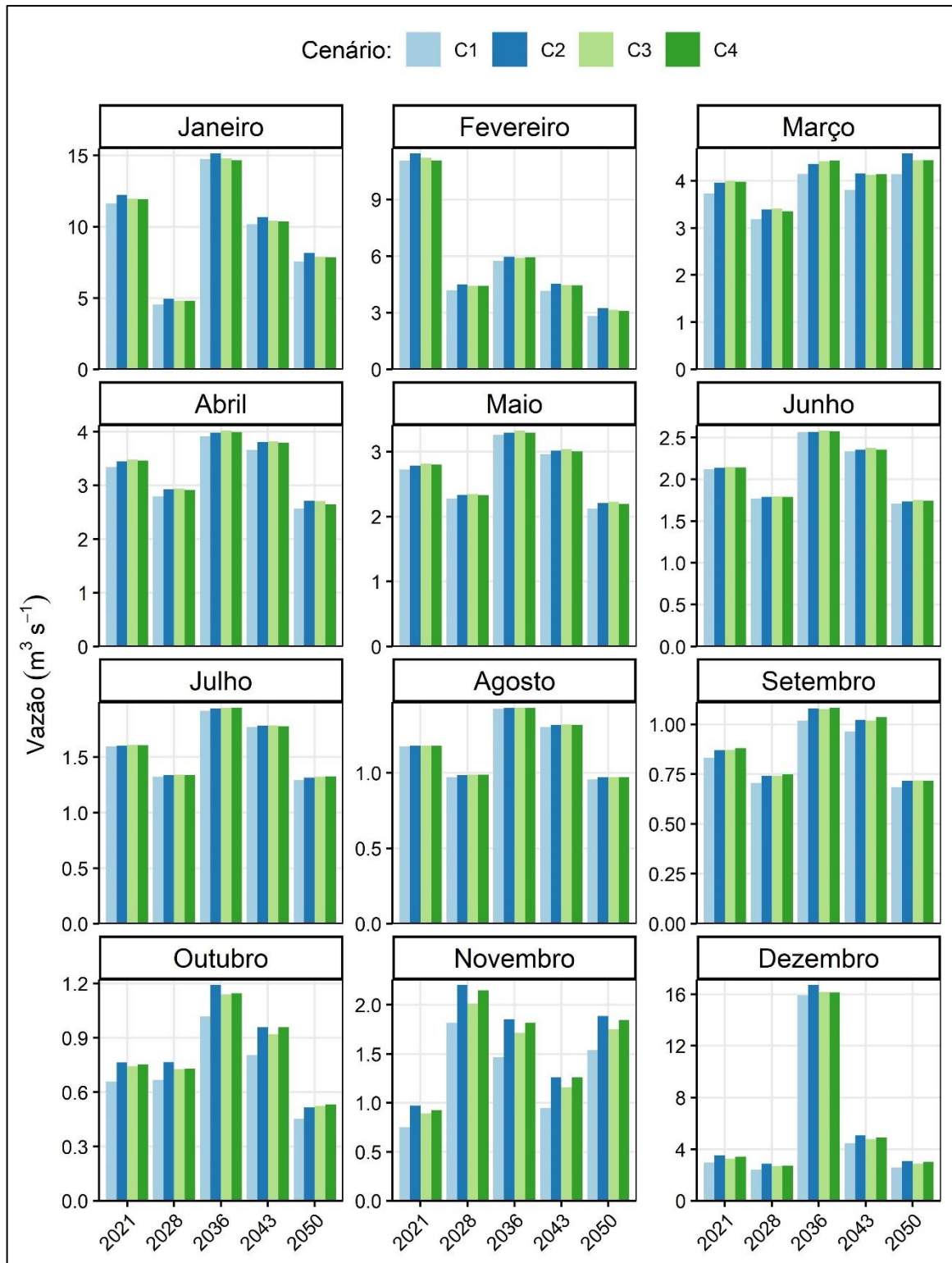
Pela figura 18 também fica visível que a vazão simulada do C2 obteve um volume superior as vazões derivadas dos C3, a C4, e ao C1, e essa diferença pode ser devido ao aumento de floresta nativa, que conseqüentemente irá diminuir o escoamento superficial, prendendo a água por mais tempo no sistema e diminuindo a vazão. Segundo Mendes (2016), as florestas tendam a reduzir a disponibilidade hídrica nos rios, mediante os processos de evapotranspiração, mas as mesmas são importantes recursos naturais no que diz respeito aos aspectos de conservação de bacias hidrográficas. A floresta melhora os parâmetros físicos do solo colaborando para uma maior infiltração, conseqüentemente uma redução do escoamento superficial assim como na geração de sedimentos na bacia (PIMENTEL, 2017). O que é evidenciado nos C3 e C4, que possuem maiores valores de infiltração de água no solo, menores valores de escoamento superficial, maior percentual de abastecimento de aquíferos profundos. Ao contrário de C1 e C2 que possuem maiores proporções de escoamento superficial, demonstrando novamente a influência das florestas na percolação de água no solo. Os cenários futuros com o clima simulado e espelhado, também tiveram resultados parecidos entre si, porém com vazões média e máximas mais altas, como demonstra as figuras 19 e 20 a seguir.

Figura 19: Simulação de Vazões futuras com diferentes mapas de uso e cobertura da terra para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG (2021 – 2050).



Fonte: A autora.

Figura 20: Gráfico das vazões futuras mensais com diferentes mapas de uso e cobertura da terra para a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG (2021 – 2050).



Fonte: A autora.

Na análise das vazões futuras, C1 foi inferior aos outros em quase todos, o que leva ao entendimento da influência da localização geográfica na cobertura vegetal dentro de uma bacia

hidrográfica. No ciclo hidrológico, a retenção de água no solo de C1 é menor, o que prova a influência da vegetação na infiltração e recarga de aquíferos, e como o efeito de cobertura em determinadas localizações na bacia hidrográfica implicaria em um futuro com a situação parecida. Também foi possível notar que a vazão simulada do C2 obteve um volume superiora outras as vazões, o que revela que o grau de impactação no solo é inferior ao C1, mas ainda não é capaz de reter muita água e em um período de tempo maior como em C3 e C4. Esses resultados foram alcançados porque os cenários de incremento nas porcentagens de floresta nestas áreas de importância ecológica e geomórfica, armazena maior quantidade de água dentro do sistema, o que é muito benéfico para o equilíbrio ambiental, abastecimento humano e para diversas atividades econômicas (BUENO et al., 2005). Esse armazenamento de água no sistema permitiu com que houvesse maior volume da vazão durante o período de seca da bacia, nos meses de junho a agosto, mesmo em anos que acusam diminuição do volume de água.

Os resultados de C3 futuros continuaram indicando uma maior infiltração de água no solo, o que comprova a eficiência dessas áreas (APP e RL) no aprisionamento de água no solo por mais tempo, além disso, as APPS tem influência direta na proteção dos cursos 'água, impedindo uma série de consequências que são prejudiciais ao meio ambiente, como a sedimentação, erosão, inundação das margens dos rios, entupimento dos condutos e canais, e degradação da qualidade da água. Como as APPS e RL tem objetivo de ser componente florestal consorciada com áreas economicamente produtivas visando à preservação ambiental de áreas importantes para o ecossistema (OLIVEIRA, et al. 2014), a preservação e manutenção de suas áreas, afim de facilitar os processos de reflorestamento é de extrema importância.

No C4, seguiu-se a mesma tendência de C3, em menor proporção, devido ao aumento da evapotranspiração. Como afirma PIMENTEL, (2017), o impacto final das florestas sobre as vazões dos cursos d'água depende do balanço entre o impacto positivo do aumento da infiltração com o impacto negativo do aumento da evapotranspiração. Os resultados desse cenário não são tão discrepantes devido ao fato principal dessas áreas já conterem uma maior proporção de florestas nativas, e a pequeno acréscimo não teve tantas diferenças significativas no modelo.

Cenários com maiores picos de vazão máxima, significam que menos água ficou retida dentro da bacia hidrográfica, segundo Valente e Castro (1983), uma bacia hidrográfica não deve funcionar como ambiente impermeável, onde a maior parte da água da chuva reflita imediatamente na vazão do rio. A bacia hidrográfica deve reter boa parte de água da chuva, armazená-la no lençol subterrâneo e cedê-la aos poucos aos cursos d'água, mantendo certa

vazão durante os períodos de seca (CORREIA, 2016). Dessa forma pode se afirmar que C2, cenário que se refere à atual situação na bacia do Turvo Sujo, demonstra que apesar do reflorestamento já ser evidente na bacia, é necessário que haja melhor cuidado com o solo, com incentivos de boas práticas de manejo, para que aumente a infiltração de água e abastecimento de aquíferos, como exemplificado nos C3 e C4. Uma vez preservados os ecossistemas naturais, adotar práticas de cultivo e conservação do solo que aumentem a infiltração da chuva em toda a bacia, trará contribuição maior do que o plantio de florestas para assegurar a vazão dos rios mesmo nos meses de estiagem, proporcionando os serviços ecossistêmicos dependentes dessa água. (HONDA e DURIGAN, 2017)

As simulações futuras com base no modelo SWAT, de modo geral, seguiram a tendência de vazão existente no projeto com dados climáticos de 1990 a 2015, e a diminuição do nível médio se deve principalmente a diminuição do volume de precipitação nos anos finais do estudo. Contudo, alguns estudos mundiais demonstram que as vazões elevadas devem diminuir no futuro, mesmo com um aumento da área de cultivo de até 50% na bacia (TAN et al. 2020; Cheng et al. 2017; Walters e Babbar-Sebens, 2016). Por essa razão, é importante que se faça mais estudos com dados climáticos simulados, para avaliar as mudanças de uso e cobertura sob condições extremas de seca e inundação, que são mais vivenciadas nos últimos anos, no mundo todo (Chou et al., 2013; Naveendrakumar et al., 2019).

De forma geral, as simulações de vazões futuras nos quatro cenários indicaram que caso ocorra algumas das mudanças averiguadas neste trabalho, elas não serão tão intensas na Bacia do Turvo Sujo, conforme a precisão do SWAT. Apesar do modelo ainda ser considerado uma ferramenta de simulação totalmente robusta para as condições brasileiras, pelo problema de disponibilidade e número de estações de medição (BRESSIANE, et al. 2015), ele apresenta diversos parâmetros, que podem ser averiguados e adaptados, para servir como uma ferramenta para suporte de decisão pelo governo ambiental e comitês de bacias hidrográficas no Brasil. O aumento da conscientização sobre as mudanças climáticas e seu impacto nos processos hidrológicos regionais tem resultado na formulação urgente de políticas hidroclimáticas relacionadas com os possíveis efeitos de eventos extremos futuros (TAN, et al. 2020). É necessário que isso também ocorra no Brasil, pois o desenvolvimento socioeconômico e as políticas públicas podem favorecer a conservação e expansão da floresta e contribuir para bacias hidrográficas para lidar com os extremos climáticos que se prevêem ser mais comuns no futuro (GOMES, et al, 2020).

CONCLUSÕES

Com esse estudo foi possível constatar que houve uma diminuição da vazão mínima nos últimos anos, principalmente após 2014, e até na estação mais chuvosa do ano (verão) na região. A vazão máxima também diminuiu ao longo dos anos, estendendo o período de seca anual, e com retorno de chuvas mais intensas e acentuadas, indicado pelo aumento da vazão em um curto intervalo de tempo.

Os parâmetros mais sensíveis do modelo SWAT na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo foram aqueles relacionados ao manejo e as propriedades físicas do solo, tais como a capacidade de água disponível (SOL_AWC), e a condutividade hidráulica (SOL_K). O modelo SWAT foi capaz de simular, com desempenho satisfatório, as vazões mensais para esta bacia, após a etapa de calibração e validação.

A criação do cenário simulando as Áreas de Preservação Permanente – APPs e Reserva Legal – RL como floresta nativa (C3), ou seja, considerando total cobertura vegetal nestas áreas, possibilitou verificar que a maior parte da composição dessas áreas seria ao redor de florestas já existentes. Um fato positivo, pois, indica que já existe uma tendência de reflorestamento na Bacia, visto que as APPs e RLs passaram a ter maior cobertura vegetal ao longo dos anos. O cenário com a cobertura total de floresta nativa nos terços superiores dos morros (C4), possibilitou verificar que estas áreas já contém a maior parte conservada, indicada pela pouca variação no percentual da classe nestas áreas, durante todo o período. O que representa um outro ponto positivo para a bacia hidrográfica do Turvo Sujo.

O cenário com mapa de uso e cobertura do solo do ano 1990 (C1), que tem a menor porcentagem de mata, obteve a menor vazão registrada em comparação aos outros, já o cenário criado com mapa de uso e cobertura do solo do ano de 2015 (C2) que tem uma quantidade mais expressiva de mata nativa espalhada de forma heterogênea na bacia, registrou o maior volume de vazão, comparado aos outros cenários.

As simulações futuras de vazão possibilitaram entender a dinâmica do ciclo hidrológico, sob o efeito dos quatro diferentes mapas de uso e cobertura do solo, com aumento da percolação de água no solo, do abastecimento de aquíferos rasos e profundo e aumento da vazão nos meses de seca, caso ocorra o reflorestamento nas APPs, RLs e terço superiores dos morros, e por essa razão, a proteção dessas áreas é essencial à manutenção dos mananciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADRIOLO, M.V.; SANTOS, I.; GIBERTONI, R.C. & CAMARGO, A.S.G. Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS, 6., Belo Horizonte, 2008. Anais... Belo Horizonte, 2008.
- Arnold, J. G.; Moriasi, D. N.; Gassman, P. W.; Abbaspour, K. C.; White, M. J.; Srinivasan, R.; Santhi, C.; Harmel, R. D.; Van Griensven, A.; Van Liew, M. W.; Kannan, N.; Jha, M. K. SWAT: Model use calibration and validation. *Trans. ASABE*, v. 55, n. 4, p. 1494-1508, May 2012.
- ARSENAULT, Richard; et al. 2018. The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of Hydrology*. Volume 566, November 2018, p. 346-362. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169418307145#!> Acesso em: maio 2021.
- Abbaspour et al., 2004. KC Abbaspour , CA Johnson , M.Th. van Genuchten **Estimativa de fluxo incerto e parâmetros de transporte usando um procedimento de ajuste de incerteza sequencial.** *J. Vadouse Zona* , 3 (4) (2004) , pp. 1340 – 1352.
- AVILA-DIAZ, ALVARO et al . Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in Viçosa-Minas Gerais. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, Rio de Janeiro , v. 92, n. 2, e20190388, 2020 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652020000300606&lng=en&nrm=iso>. Acesso em maio, 2021.
- BACELLAR, L. DE A. P. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. *Geo.br*, v. 1, p. 1–39, 2005.
- BESKOW, S.; NORTON, L. D.; MELLO, C. R. Hydrological prediction in a tropical watershed dominated by oxisols using a distributed hydrological model. *Water Resources Management*, v. 27, n. 2, p. 341-363, 2013.
- BRASIL. **Lei federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. POLÍTICA NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS.** [S. l.], 1997.
- BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P.W.; FERNANDES, J.G.; GARBOSSA, L.H.P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E.M. Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. *Journal International of Agricultural and Biological Engineering*, St. Joseph, v. 8, n.3, p. 9-35, 2015.
- BRUIJNZEEL, L. A. Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees?

Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 104, n. 1, p. 185–228, 2004.

CATEIN, J. P. Modelagem hidrogeológica: análise da bacia do rio Itapemirim-ES utilizando o modelo SWAT. Instituto Federal do Espírito Santo, Coordenadoria do Curso de Engenharia de Minas, Curso de Engenharia de Minas, Cachoeiro de Itapemirim, 2020.

Cheng et al., 2017 C. Cheng, Y.C.E. Yang, R. Ryan, Q. Yu, E. Brabec Assessing climate change-induced flooding mitigation for adaptation in Boston’s Charles River watershed, USA Landsc. Urban Plan., 167 (2017), pp. 25-36.

Chou et al., 2013C. Chou, J.C.H. Chiang, C.W. Lan, C.H. Chung, Y.C. Liao, C.J. Lee Increase in the range between wet and dry season precipitation Nat. Geosci., 6 (2013), pp. 263-267.

CORREIA, Tamíres Partélli. **Aplicação do modelo SWAT para simulação de cenários de uso da terra na bacia hidrográfica do Rio Jucu. 2016.** Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro - ES. Orientador: Prof. Dr. Sidney Sara Zanetti. Coorientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio.

GREEN, C. H.; VAN GRIENSVEN, A. **Autocalibration in hydrologic modeling: using SWAT2005 in small-scale watersheds.** Revista Environmental Modelling and Software, v. 23, p. 422-434, 2008.

Gomes, L.C. et al. **Disentangling the historic and future impacts of land use changes and climate variability on the hydrology of a mountain region in Brazil. Journal of Hydrology.** 594 (2021) 125650. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125650>> . Acesso em: jan.2021.

HONDA, E. A., & DURIGAN, G. (2017). **A restauração de ecossistemas e a produção de água. Hoehnea,** 44(3), 315-327. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2236-8906-82/2016> .Acesso em jun. 2021.

HUAIWEI DOM; et al. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416303016#!>> Acesso em abr. 2021.

INMET, 2020. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Available in: <http://www.inmet.gov.br/portal/>

IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change. Working Group II – Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Crown: United Kingdom, 2007.

- IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Portner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]
- KANNAN, N.; WHITE, S. M.; WORRALL, F.; WHELAN, M.J. Sensitivity analysis and identification of the best evapotranspiration and runoff options for hydrological modelling in SWAT-2000. *Journal of Hydrology*, v. 332, p. 456-466, 2007.
- LELIS, T. A. Modelagem do escoamento superficial e perda de solo na bacia do Ribeirão São Bartolomeu, zona da mata de Minas Gerais, utilizando o simulador SWAT. 2011. 164f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L. A. **Modelagem hidrossedimentológica da bacia hidrográfica na região sudeste do Brasil, utilizando o SWAT.** *Revista Ambiente e Água*, v. 5, n. 2, p. 158-174, 2010.
- LELIS, T. A.; CALIJURI, M. L.; SANTIAGO, A. F.; LIMA, D. C.; ROCHA, E. O. **Impactos causados pelas mudanças climáticas nos processos erosivos de uma bacia hidrográfica: simulação de cenários.** *Revista Ambiente & Água*, v. 6, n. 2, p. 282-294, 2011.
- LOPES, T. R. et al 2020. **Hydrological modeling for the Piracicaba River basin to support water management and ecosystem services.** *Journal of South American Earth Sciences* Volume 103, November 2020, 102752. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981120302959>. Acesso em jun. 2021.
- Mello, K. et al 2020. **Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil.** *Journal of Environmental Management*. Volume 270, 15 September 2020, 110879. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720308094#!>. Acesso em jun. 2021.
- MENDES, N. G. D. S. **Estudo das vazões na bacia hidrográfica do rio Itapemirim.** Jerônimo Monteiro: UFES, 2016, 98f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade

Federal do Espírito Santo, UFES, Jerônimo Monteiro, ES, 2016.

MORIASI, D. N. et al. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.

NASA, 2020. **NASADEM: Creating a New NASA Digital Elevation Model and Associated Products.** Disponível em: <https://earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem>. Acesso em: maio.2021.

NAVEENDRAKUMAR G. et al. **Obeysekera South Asian perspective on temperature and rainfall extremes: a review** Atmos. Res., 225 (2019), pp. 110-120

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool - SWAT: Theoretical documentation - Version 2005. Journal Agricultural research service (USDA) e Texas agricultural experiment station, Texas A&M University, p. 541, 2004.

NUNES, D.G. et al 2011. **ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA EM TRECHOS DO RIO TURVO SUJO, VIÇOSA – MG.** Engenharia na agricultura, viçosa - mg, V.19 N.5, p.459-468.

OLIVEIRA, Guilherme De Castro; MARTINS, Vitor Souza; FILLHO, Elpídio Inácio Fernandes; XAVIER, Flávia Vieira. **Classificação supervisionada como ferramenta para avaliação da dinâmica do uso e cobertura do solo.** ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, centro científico conhecer, [S. l.], v. 10, n. 18, p. 924–935, 2014.

PEREIRA, D. Reis. Simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Pomba usando o modelo SWAT. Tese, [S. l.], p. 126, 2013.

PIMENTEL, S. M. **MODELAGEM DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO JUCU SOB DIFERENTES CENÁRIOS DE COBERTURA FLORESTAL.** Tese p.79, 2017.

SALLES, L.A. Calibração e validação do modelo SWAT para a predição de vazões na bacia do ribeirão Pipiripau. Dissertação de Mestrado, Publicação PPG EFL. DM-172/2012, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 114p.

SANTOS, L. L. **MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações.** RBGF-Revista Brasileira de Geografia Física Recife-PE, Vol.2, n.03, set-dez, 2009, 01-19.

SANTOS, F. N. B. Análise comparativa dos custos operacionais de 44 estações de tratamento de esgoto

na região sudeste do Brasil – 2018. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG.

SILVA, L. R. S. Análise de incertezas e avaliação dos fatores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. 2010. 223p. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Disponível em: < https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/7232/1/2010_LucianaRobertaSarmentodaSilva.pdf > Acesso em: jun. 2020.

SILVA, E. A. SILVA, M. T. DETERMINACAO_DE_PARAMETROS_DA_PRECIPITACAO_EM_CRUZETARN_PARA_A_APLICACAO_DE_MODELOS_HIDROLOGICOS. VIII Simpósio Internacional de Climatologia (SIC). Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/339795896_. Acesso em: mar.2021.

SCHMALZ, B. & FOHRER, N. Comparing model sensitivities of different landscapes using the ecohydrological SWAT model. *Adv. Geosci.*, 21:91-98, 2009.

Strauch, M. et al 2012. Using precipitation data ensemble for uncertainty analysis in SWAT streamflow simulation. *Journal of Hydrology*. Volumes 414–415, 11 January 2012, p. 413-424. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411007918#bi0005>. Acesso em: jan.2021.

TUCCI, C. E. M. (1998). Modelos hidrológicos, Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p.

VALENTE, O. F.; CASTRO, P.S. A bacia hidrográfica e a produção de água. *Informe Agropecuário*, v. 9, n. 100, p. 53-56, 1983.

Walters K. M; Babbar-Sebens, M. 2016. Using climate change scenarios to evaluate future effectiveness of potential wetlands in mitigating high flows in a Midwestern U.S. watershed *Ecol. Eng.*, 89 (2016), pp. 80-102

WOLFF BUENO, G. et al. Estado trófico e bioacumulação do fósforo total no cultivo de peixes em tanques-rede na área aquícola do reservatório de Itaipu. *Acta Scientiarum – Biological Sciences*, Maringá, v. 30, n. 3, p. 237-244, 2008

WU, Y.; CHEN, J. Simulation of nitrogen and phosphorus loads in the Dongjiang river basin in south China using SWAT. *Frontiers of Earth Science in China*, v. 1, p. 1-6, 2009.

YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. Rev. Adm. Púb., v.27, n.2, p.5-18, 1993.

ZANETTI, S.S; SILVA, J. M. A.; SOUSA, E. F.; OLIVEIRA, V. P. S.; ALMEIDA, F. T. Modelagem hidrológica em microbacia hidrográfica – Parte I: Aprimoramento do modelo HidroBacia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 13, n. 4, p. 429-434, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Tabela com a soma mensal de Precipitação (mm) na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG no período de 1986 e 2017.

Tabela com a Soma Mensal de Precipitação (mm) na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG													
Mês/ Ano	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Total Anual
1986	293	98	103	42	46	9	26	75	14	4	153	108	971
1987	108	34	239	99	53	4	8	53	101	42	235	284	1257
1988	171	158	54	138	23	1	0	0	19	63	120	192	939
1989	83	121	126	69	2	92	53	2	88	157	178	209	1179
1990	54	147	55	43	41	39	40	22	48	47	154	212	900
1991	496	156	208	51	25	6	8	0	79	110	224	231	1594
1992	302	163	34	139	65	4	5	24	110	99	343	176	1465
1993	197	52	81	36	8	27	0	2	32	138	93	219	885
1994	332	28	353	117	42	20	6	1	0	60	120	284	1363
1995	106	90	194	63	34	5	6	0	5	88	255	343	1189
1996	86	72	100	95	51	1	0	12	68	155	232	273	1143

1997	333	95	114	30	27	25	5	2	73	132	180	239	1257
1998	157	170	78	26	73	0	1	50	6	264	216	107	1146
1999	154	89	275	36	2	14	4	0	50	118	357	108	1207
2000	295	148	106	37	6	14	11	20	82	67	207	229	1220
2001	172	48	149	34	60	0	2	6	80	154	233	224	1162
2002	270	280	99	2	38	2	2	1	78	30	199	279	1280
2003	442	29	78	17	21	0	13	52	48	28	166	253	1147
2004	408	418	174	137	44	40	35	0	0	66	196	284	1803
2005	205	200	268	57	46	33	20	38	68	76	137	291	1437
2006	180	85	187	56	6	12	6	13	73	200	185	200	1203
2007	461	91	46	38	15	2	6	0	30	56	62	204	1010
2008	220	113	239	63	7	13	0	15	147	41	225	606	1690
2009	253	224	243	91	10	54	15	14	72	128	132	333	1567
2010	118	38	193	18	46	1	0	0	23	159	403	354	1352
2011	184	85	284	57	3	23	0	0	5	153	310	330	1434
2012	403	38	107	47	110	8	0	6	47	89	235	199	1290
2013	143	110	228	120	62	25	2	4	44	83	113	390	1324
2014	74	24	183	93	8	2	31	7	12	31	192	168	825
2015	80	164	237	30	55	10	27	6	78	46	196	240	1167
2016	348	75	74	34	16	62	0	11	28	66	217	263	1192
2017	66	78	83	43	48	16	0	0	5	50	105	359	852
Tota l Men sal	7194	3718	4987	1957	1093	564	333	435	1610	2996	6371	8190	39448

Fonte: INMET. Adaptada pela autora.

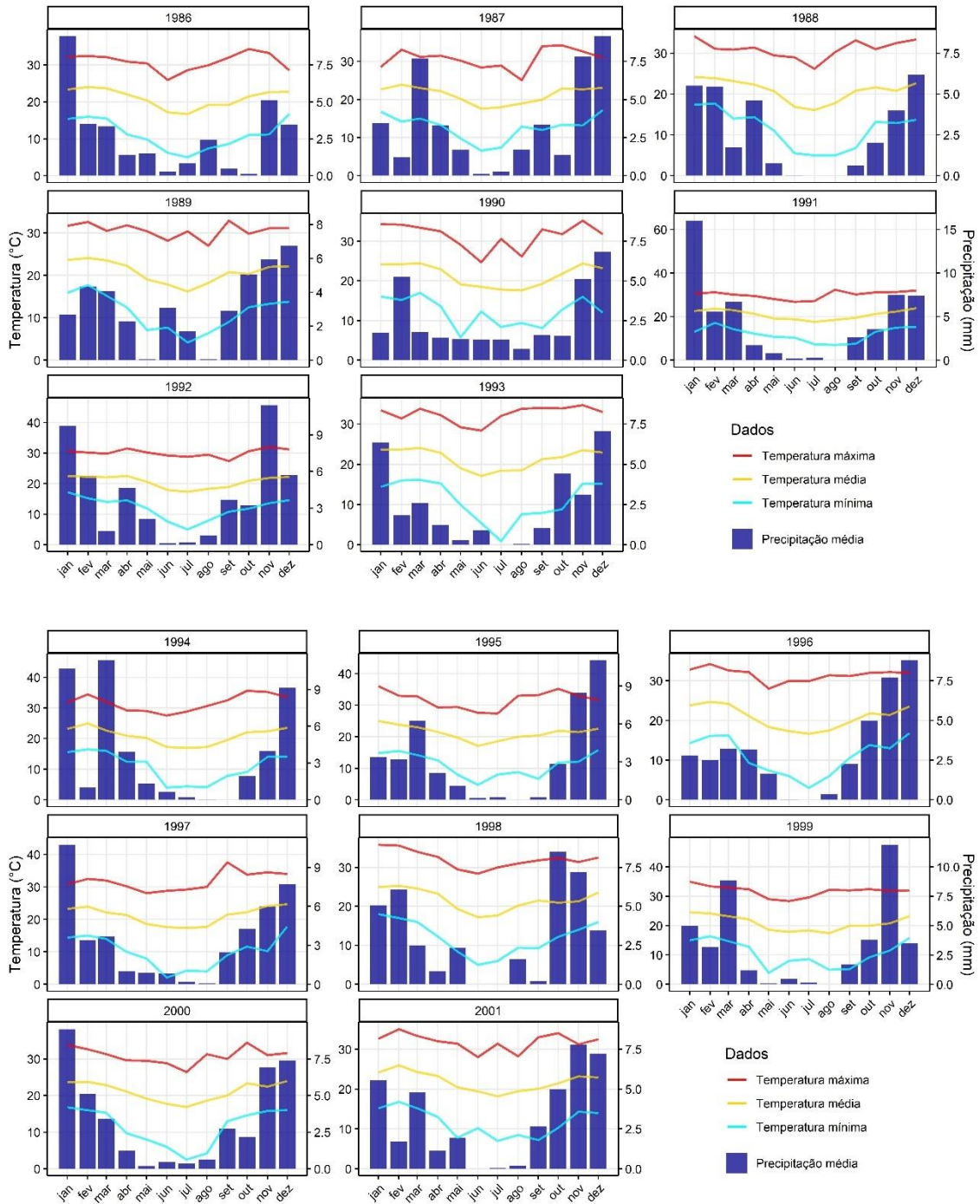
APÊNDICE B – Tabela com Mínima e Máxima da Temperatura (°C) mensal na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, MG no período de 1986 e 2017.

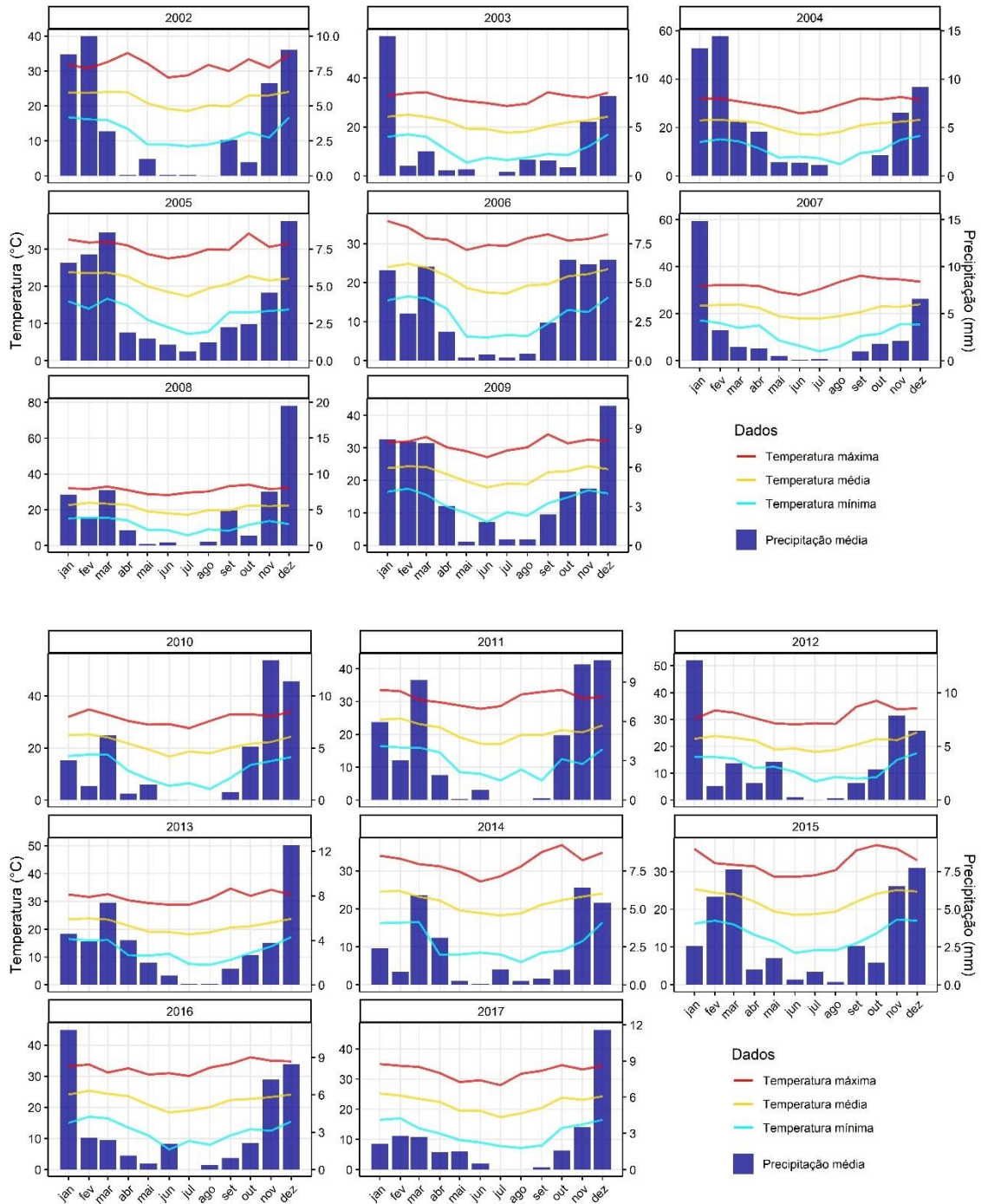
Mínimo da Temperatura Mínima												
Meses / Anos	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1986	15.4	16.0	15.5	11.2	9.8	6.2	5.0	7.4	8.6	11.0	11.2	16.8
1987	16.8	14.2	15.0	13.3	9.8	6.6	7.4	12.9	12.0	13.4	13.2	17.2
1988	17.4	17.7	14.0	14.4	11.1	5.5	5.0	5.0	6.8	13.2	12.9	13.7
1989	15.9	17.7	15.2	12.4	7.1	7.7	4.2	6.4	9.0	12.5	13.3	13.8
1990	16.1	15.2	17.0	13.6	5.8	12.3	8.4	9.4	8.1	12.8	16.0	12.0
1991	13.0	17.2	14.2	12.2	10.8	10.4	7.3	7.0	7.5	13.1	15.0	15.3
1992	17.2	15.2	14.0	14.5	11.9	7.6	5.0	7.9	10.8	11.8	13.6	14.6
1993	14.4	16.0	16.1	15.2	9.9	5.4	0.9	7.6	7.9	8.8	15.2	15.2
1994	15.6	16.5	16.0	12.5	12.5	4.0	4.4	4.2	7.8	9.1	14.0	14.0
1995	14.8	15.5	14.2	12.5	8.0	4.8	8.0	8.8	6.7	11.8	12.1	15.8
1996	14.3	16.1	16.2	9.3	7.4	6.0	3.0	6.0	10.6	13.8	13.0	16.8
1997	14.4	15.0	14.0	10.0	8.0	2.1	4.2	4.0	9.0	11.6	10.2	17.8
1998	18.0	17.0	16.0	12.3	8.4	5.0	6.0	9.4	9.3	12.2	14.0	16.0
1999	15.0	16.4	14.7	12.8	3.9	8.0	8.6	5.0	5.2	9.2	11.5	15.8
2000	16.8	16.0	15.3	9.7	8.0	6.0	2.5	4.2	13.0	14.6	15.8	16.0
2001	15.2	16.8	15.2	13.0	7.8	10.2	7.0	8.5	7.2	10.3	14.3	14.0
2002	16.8	16.2	16.0	13.5	9.0	9.0	8.5	9.0	10.3	12.5	11.0	16.8
2003	16.0	17.0	16.0	10.5	5.5	7.5	6.5	7.5	9.0	8.5	12.0	17.0
2004	14.0	15.2	14.3	11.4	7.6	8.0	7.3	4.9	9.4	10.5	15.0	16.6
2005	16.0	14.0	16.7	14.8	11.0	9.0	7.2	7.8	13.0	13.0	13.4	13.8
2006	15.5	16.5	16.0	13.4	6.2	6.0	6.6	6.3	9.5	13.0	12.5	16.2
2007	17.2	16.0	14.0	15.0	8.6	6.4	4.0	6.1	10.5	11.5	15.6	15.5
2008	15.2	15.6	15.5	14.0	8.8	8.6	5.7	9.0	8.3	11.6	13.7	12.0
2009	16.5	17.5	15.6	12.0	10.0	7.3	10.2	9.2	13.0	14.8	17.0	16.0
2010	17.0	17.5	17.5	11.2	8.0	5.5	6.5	4.3	8.5	13.5	15.0	16.5
2011	16.5	16.0	16.0	14.5	8.5	8.0	6.0	9.3	6.0	12.5	11.0	15.5
2012	16.0	16.0	15.5	12.0	12.4	10.5	7.0	8.6	8.0	8.5	15.0	17.5
2013	16.5	16.0	16.2	10.7	10.5	11.2	7.5	7.2	9.0	11.5	13.8	17.2
2014	16.2	16.4	16.5	8.0	8.0	8.5	8.0	6.0	8.5	9.0	11.5	16.4
2015	16.2	17.0	16.0	13.2	11.5	8.5	9.2	9.2	11.0	13.6	17.3	17.0
2016	15.0	17.0	16.5	13.5	11.0	6.5	9.2	8.0	11.0	13.0	12.5	15.5
2017	16.5	17.0	13.7	12.0	9.8	9.0	7.8	7.2	8.0	13.8	15.0	16.5

Máximo da Temperatura Máxima												
Meses / Anos	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
1986	32.2	32.4	32.1	30.9	30.4	25.9	28.6	29.9	32.0	34.3	33.2	28.6
1987	28.6	33.1	31.2	31.5	30.2	28.4	28.9	25.1	34.0	34.2	32.6	31.0
1988	34.2	31.1	30.9	31.4	29.5	29.0	26.2	30.3	33.2	31.0	32.5	33.4
1989	31.7	32.6	30.5	31.8	30.4	28.2	30.4	27.0	32.9	29.8	31.1	31.1
1990	34.3	34.2	33.4	32.5	29.1	24.7	30.6	26.2	33.0	31.8	35.2	31.8
1991	30.6	31.2	30.1	29.5	28.1	26.8	27.2	32.4	30.2	31.2	31.3	32.0
1992	30.6	30.2	29.8	31.5	30.2	29.2	28.8	29.5	27.4	30.6	32.0	31.2
1993	33.4	31.4	33.8	32.2	29.2	28.4	32.0	33.8	34.0	33.9	34.7	33.0
1994	31.8	34.4	32.0	29.2	29.0	27.5	28.8	30.6	32.5	35.6	35.2	33.5
1995	36.0	33.0	32.8	29.3	29.4	27.6	27.4	33.0	33.2	35.2	33.0	31.6
1996	32.8	34.2	32.6	32.2	28.0	30.0	29.9	31.4	31.2	32.0	32.2	32.0
1997	30.8	32.5	32.0	30.2	28.1	28.8	29.2	30.0	37.6	33.8	34.5	34.0
1998	35.8	35.6	34.0	32.7	29.5	28.4	30.0	31.0	31.8	32.4	31.4	32.5
1999	35.0	33.4	32.9	32.4	29.0	28.4	29.6	32.2	32.0	32.4	31.8	32.0
2000	33.8	32.6	31.3	29.6	29.5	28.8	26.4	31.3	30.0	34.4	31.0	31.6
2001	32.6	35.0	33.3	32.0	31.4	28.0	31.4	28.2	33.0	34.0	31.2	32.5
2002	31.8	30.8	32.6	35.2	32.2	28.2	28.8	31.8	30.0	33.4	31.0	34.8
2003	32.8	33.8	34.2	31.8	30.6	29.8	28.6	29.6	34.2	32.8	32.0	34.0
2004	31.8	32.0	30.8	29.4	28.2	25.8	26.8	29.4	32.0	31.6	32.6	31.4
2005	32.6	31.8	32.0	31.0	28.7	27.5	28.2	30.0	29.8	34.2	30.6	31.6
2006	35.8	34.2	31.4	31.0	28.4	29.6	29.5	31.4	32.4	30.8	31.2	32.4
2007	31.8	32.2	32.2	31.8	29.2	28.0	30.4	33.6	36.2	35.0	34.6	33.6
2008	32.0	31.6	33.0	31.0	28.8	28.2	29.6	30.2	33.2	34.0	31.6	32.2
2009	31.8	32.0	33.4	30.2	29.0	27.2	29.2	30.2	34.2	31.4	32.6	32.2
2010	32.0	34.8	32.8	30.4	29.0	29.2	27.6	30.4	33.0	33.0	32.2	34.0
2011	33.6	33.2	30.5	29.8	28.8	27.8	28.6	32.2	33.0	33.6	31.0	31.4
2012	30.2	33.4	32.6	30.6	28.6	28.2	28.6	28.4	34.8	37.0	33.8	34.2
2013	32.5	31.6	32.6	30.4	29.4	28.8	28.8	31.0	34.6	32.0	34.2	32.4
2014	34.0	33.2	31.8	31.2	29.8	27.2	28.6	31.2	35.0	36.8	32.8	34.8
2015	36.0	32.2	31.8	31.4	28.6	28.6	29.0	30.4	35.6	37.0	36.0	33.0
2016	33.2	33.8	31.2	32.6	30.6	31.0	30.1	32.8	34.0	36.1	35.0	34.8
2017	35.0	34.4	34.0	32.0	29.0	29.6	28.0	31.8	32.8	34.6	33.2	34.4

Fonte: INMET. Adaptada pela autora.

APÊNDICE C - Gráficos da média de precipitação, mínima e máxima de temperatura na Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo, mensais, MG entre o período (1986-2017):





Fonte: INMET. Adaptado pela autora.

ANEXOS

ANEXO A - Base de dados para o SWAT:

Tabela 1: Tipos de uso/cobertura da terra existentes na Bacia do Turvo Sujo e a correlação com o banco de dados do SWAT.

Classificação de uso e cobertura da terra (MapBiomias)	Classes adotadas no SWAT	Siglas
1 Floresta Nativa	Floresta Nativa	FRST
2 Floresta Plantada	Reflorestamento - Eucalipto	EUCA
3 Pastagem	Pastagem	PAST
4 Misto de Agricultura e Pastagem	Agricultura	AGRL
5 Infraestrutura Urbana	Área Urbana	URLD
6 Áreas não vegetadas	Solo Exposto	BARR
7 Rios e Lagos	Massas de Água	WATR

Fonte: SWAT (2005). Adaptado pela autora.

Tabela 2: Tabela com os atributos físicos dos solos exigidos para implemento no SWAT.

Sigla no SWAT	Descrição do parâmetro
SNAM	Nome das classes de solo
NLAYERS	Número de camadas (horizontes) do solo
HYDGRP	Grupo hidrológico do solo (A, B, C e D)
SOL_ZMX	Profundidade máxima possível de alcance da raiz (mm)
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo (decimal)
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte (mm)
SOL_BD	Densidade aparente do solo (g/cm^3)
SOL_AWC	Capacidade de retenção de água do solo (mm/mm)
SOL_K	Condutividade hidráulica em solo saturado (mm/h)
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico do solo (%)
CLAY	Porcentagem de argila no solo (%)
SILT	Porcentagem de silte no solo (%)
SAND	Porcentagem de areia no solo (%)
ROCK	Porcentagem de cascalho no solo (%)
SOL_ALB	Albedo do solo (decimal)
USLE_K	Fator de erodibilidade(K) da USLE

Fonte: (NEITSCH, et al. 2004); SWAT (2005). Adaptado pela autora.

Tabela 3: Valores dos parâmetros dos solos utilizados para modelagem, para cada perfil:

PARÂMETROS	PERFIS DOS SOLOS			
	LVA	PVA	CX	GX
SNAM				
NLAYERS	6	9	3	3
HYDGRP	A	B	C	D
SOL_ZMX	2100	1800	2630	900
ANION_EXCL	0.5	0.5	0.5	0.5
SOL_CRK	0.5	0.5	0.5	0
TEXTURE	SCL	LS	C	SICL
SOL_Z1	100	100	260	150
SOL_BD1	1.5	1.5	1.4	1.4
SOL_AWC1	0.5	0.5	0.5	0.24
SOL_K1	6.013931	58.26431	1.201618	4
SOL_CBN1	1.09	0.58	3.22	2
CLAY1	29	10	45	41
SILT1	7	7	18	52
SAND1	64	83	37	7
ROCK1	1	8	2	0
SOL_ALB1	0.283443	0.402578	0.065469	0
USLE_K1	0.108463	0.101893	0.1031	0.21

Fonte: (MELLO, 2009), (CORREIA, 2016), (PIMENTEL, 2017), (PEREIRA, 2013). Adaptado pela autora.

ANEXO B - Parâmetros utilizados na Análise de Sensibilidade do Modelo:

Parâmetros	Descrição
CN2	Número da curva na condição II de umidade (adimensional)
ALPHA BF	Constante de recessão do escoamento de base (adimensional)
GW_DELAY	Tempo de retardo do fluxo subterrâneo (dias)

SOL_AWC	Capacidade de água disponível no solo (mm H ₂ O/mm solo)
ESCO	Fator de compensação de evaporação do solo (adimensional)
REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer o “revap” (mm)
SURLAG	Coefficiente de retardo do escoamento superficial (adimensional)
EPCO	Fator de compensação de evaporação da planta (adimensional)
CH_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h ⁻¹)
GWQMN	Profundidade do limite de água no aquífero raso para o escoamento de base (mm)
RCHRG_DP	Fração de água percolada para o aquífero profundo (fração)
SOL_K	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h ⁻¹)
SOL_ALB	Albedo do solo úmido (decimal)

Fonte: SWAT(2005). Adaptado pela autora.

ANEXO C - Coeficientes de Avaliação do Modelo SWAT:

Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS) (Equação 1):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe modificado (NS') (Equação 2):

$$NS' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - S_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|} \quad (2)$$

Coeficiente de determinação (R²) (Equação 3):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \hat{S}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2} \quad (3)$$

Índice PBIAS (equação 4):

$$\text{PBIAS} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \cdot 100 \quad (4)$$

RSE (Equação 5):

$$\text{RSR} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (5)$$

Em que:

n = número de observações durante o período simulado;

O_i = vazões observadas;

S_i = vazões simuladas pelo modelo;

\bar{O} = média dos valores observados; e

\bar{S} = média dos valores simulados

\hat{S}_i = obtido pela regressão linear entre os dados observados (O_i) e estimados (S_i), $\hat{S}_i = a + b \cdot O_i$.

Fonte: Green e Verdevan Griensven (2008); Wu e Chen (2009); Moriasi et al. (2007). Adaptado pela autora.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Do exposto neste trabalho, conclui se que a Bacia Hidrográfica do Turvo Sujo possui maior porcentagem de área coberta por pastagens, contudo, no período analisado (1985-2019) há um aumento considerável da floresta nativa, e uma diminuição constante de pastos na paisagem. As tendências mencionadas anteriormente, aumento de floresta e diminuição de pastagem, é visível nas Áreas de Preservação Permanente, Nascentes e Reserva Legais registradas pelos proprietários ruais no Cadastro Ambiental Rural. Os terços superiores dos morros da bacia têm cobertura vegetal predominante de floresta nativa, e este valor teve pouca alteração durante o período, registrando maior mudança apenas nos anos finais, com aumento de floresta plantada e agricultura nestas áreas.

O modelo SWAT se mostrou adequado para a Bacia do Turvo Sujo, contudo, é necessário que em próximos estudos utilizando o modelo nesta bacia seja feita revisão com dados de mais alguma estação meteorológica próxima. A inconsistência de informações em um período muito longo de análise dificultou o processo de calibração e validação.

As simulações futuras para a bacia do Turvo Sujo, considerando apenas modificações de uso e cobertura do solo, indicam um cenário com poucas diferenças do atual cenário, visto que, já existe na região uma tendência de aumento de floresta nativa, principalmente nas áreas de APP e RL. Os cenários permitiram visualizar que o aumento da floresta nativa, nestes lugares especificamente, acarretaria no aumento de vazão nos períodos de seca, principalmente nos meses de junho a agosto. É importante que nas próximas pesquisas se faça a análise com simulação de dados climáticos futuros, pois o clima demonstrou mudanças mais intensas nos anos finais do estudo.