



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.17.04.14-TDI

EFEITOS DO CLIMA E DA MUDANÇA NO USO E COBERTURA DA TERRA NO CICLO HIDROLÓGICO, NO SUDESTE BRASILEIRO

Debora Cristina Cantador

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão, aprovada em 17 de dezembro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46CGEUE>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.17.04.14-TDI

**EFEITOS DO CLIMA E DA MUDANÇA NO USO E
COBERTURA DA TERRA NO CICLO HIDROLÓGICO,
NO SUDESTE BRASILEIRO**

Debora Cristina Cantador

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão, aprovada em 17 de dezembro de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/46CGEUE>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Cantador, Debora Cristina.

C166e Efeitos do clima e da mudança no uso e cobertura da terra no ciclo hidrológico, no Sudeste brasileiro / Debora Cristina Cantador. – São José dos Campos : INPE, 2021.
xxiii + 126 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21d/2022/02.17.04.14-TDI)

Tese (Doutorado Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientador : Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão.

1. Recursos hídricos. 2. Mudanças climáticas. 3. Mudanças de uso e cobertura da terra. 4. Abordagem conceitual. 5. Modelagem Hidrológica. I.Título.

CDU 528.8:556.18(815)



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

DEFESA FINAL DE TESE DE DEBORA CRISTINA CANTADOR
BANCA Nº 333/2021, REG 142387/2017

No dia 17 de dezembro de 2021, às 14h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutora em Sensoriamento Remoto. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca e revisão final pelo(s) orientador (es).

Título: "EFEITOS DO CLIMA E DA MUDANÇA NO USO E COBERTURA DA TERRA NO CICLO HIDROLÓGICO, NO SUDESTE BRASILEIRO"

Observações da banca: Observar comentários e revisões do documento que serão enviados pelos membros da banca.

Membros da Banca:

Dra. Maria Isabel Sobral Escada - Presidente - INPE
Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão - Orientador - INPE
Dra. Laura de Simone Borma - Membro Interno - INPE
Dr. Daniel Andrés Rodriguez - Membro Externo - UFRJ
Dr. Laszlo Karoly Nagy - Membro Externo - UNICAMP

Declaração de aprovação do Dr. Laszlo Karoly Nagy anexa(8947387)



Documento assinado eletronicamente por **daniel andres rodriguez (E), Usuário Externo**, em 21/12/2021, às 14:14 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Isabel Sobral Escada, Tecnologista**, em 21/12/2021, às 18:35 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo Oliveira E Cruz de Aragão, Chefe da Divisão de Observação da Terra e Geoinformática**, em 27/12/2021, às 09:45 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Laura de Simone Borma, Pesquisador Titular**, em 30/12/2021, às 08:56 (horário oficial de Brasília), com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **8947841** e o código CRC **C3F3A532**.

Referência: Processo nº 01340.008880/2021-15

SEI nº 8947841

A minha pequena,
Alice

AGRADECIMENTOS

Tenho tanto a agradecer por ter conseguido finalizar mais uma etapa tão sonhada em minha vida, desde o ensino médio eu sonhei em um dia estar no INPE, e acabava, várias vezes pensando: “isso não é para mim!”. E agora cá estou, finalizando meu doutorado nessa instituição que eu imaginava estar inalcançável.

Assim, começo agradecendo ao meu orientador Aragão, que me deu essa oportunidade. Ainda me lembro da sua ligação me convidando a fazer parte do seu projeto de pesquisa, sem nem ao menos me conhecer. Obrigada é pouco para expressar minha gratidão, por todos os ensinamentos, apoio e incentivos em todas as situações acadêmicas e pessoais. Obrigada por acreditar que eu seria capaz em momentos que eu mesma duvidava.

Agradeço aos professores Camilo, Evlyn e Laszlo pelas contribuições e ensinamentos durante o exame de qualificação e proposta que precederam essa tese. Suas colocações agregaram no crescimento dessa pesquisa, assim como me fizeram crescer profissionalmente.

Agradeço também aos professores Maria Isabel, Laura e Daniel por avaliarem e contribuírem na fase final da minha tese e terem me dado esse grande presente de Natal.

Agradecimento especial a professora Ieda, que soube me acalmar e me conduzir na minha trajetória materna dentro da ciência, um exemplo de mulher, cientista e mãe!

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento N°15/2016, pela oportunidade, estrutura e apoio financeiro para realização deste trabalho.

Aos meus companheiros remoteiros que me fizeram gostar ainda mais dessa área incrível dos sensores remotos e imagens de satélite. Andeise, Aline, Alana, Vinicius, Natalia, Celso, Daniel, Danilo, vocês foram essenciais por todos os estudos, trabalhos em grupo, discussões em salas de aula, fofocas no corredor e por deixar essa trajetória mais leve. Agradecimento especial ao Igor, meu parceiro de perto e longe, sua risada cativante sempre fez os meus dias melhores. E claro, ao meu querido bonde, irmãos que essa vida me deu, mesmo perdidos na praça, nós sabíamos que podíamos confiar um ao outro em qualquer situação, vocês fazem falta no meu dia a dia. Jéssica, minha fiel escudeira de apartamento, mal sabia eu que por traz daqueles óculos escuros eu iria descobrir um coração tão grande, bondoso, amigo e carinhoso, sempre pronta pra conversar e ajudar. Juju, meu amorzinho, tenho muito orgulho da mulher que você se tornou, suas histórias sempre me fizeram ver que era melhor rir do que chorar. Carol, eita mulher linda e porreta, você sempre soube me entender sem eu dizer uma palavra, e saiba que quando a vida exige que eu seja forte, me lembrar de você me ajuda a seguir. Wesley, o primeiro “colega” de turma que eu conheci, na frente da secretária, foi ali que descobrimos que faríamos parte do mesmo grupo de pesquisa, dois perdidos, e não é que de colega passamos a ser amigos? Você me mostrou como ser uma amiga melhor, uma pesquisadora melhor e uma pessoa melhor, você soube como me ajudar, não só com a pesquisa, mas em tudo! Você merece o mundo, meu amigo! Sem vocês cinco,

essa tese não estaria pronta. Vocês não têm ideia de como vocês foram e são importantes pra mim.

Agradeço a Dayanne Rios, minha confidente que virou amiga, e manteve minha saúde mental sã e fez me redescobrir durante todo esse processo. “Se está com medo, vai com medo mesmo!”.

Agradeço aos meus pais, Marcos e Idalina, que acreditaram nessa minha louca caminhada, e em nenhum momento, e independente de qualquer coisa, fizeram com que a palavra “desistir” voasse longe quando ela vinha como um leve sussurro. Ao meu irmão, João Pedro, que me mostrou como é possível fazer várias coisas ao mesmo tempo, e foi um símbolo de força e perseverança.

Ao meu companheiro de muitos anos e pai da minha filha, Daniel, obrigada por ter entrado comigo nessa, e ter sido meu apoio em todos os momentos.

E por fim, o agradecimento mais importante, que eu não imaginava existir. À minha pequena Alice, que transformou minha vida pra melhor e fez com que eu me tornasse minha melhor versão. Filha, esse trabalho é para você. Só nós sabemos o que passamos juntas, obrigada por entender que a mamãe estava trabalhando, obrigada por ficar madrugadas dormindo no meu colo na frente do computador, obrigada por entender por que eu não podia ir no parquinho, obrigada por entender o meu cansaço e me abraçar forte e dizer “você consegue, mamãe!”. E sim, a mamãe conseguiu! Você é a peça que faltava na minha vida. Eu tenho muito orgulho de você e de quem você é. Eu sempre, sempre, vou estar com você, dentro do seu coração!

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana seja apenas outra alma humana.”

Carl G. Jung

RESUMO

Nos últimos 50 anos, os ecossistemas vêm sofrendo processos de degradação ambiental, o que acarreta em consequências na organização, estrutura e nos serviços ecossistêmicos, sendo as ações humanas e as mudanças climáticas as principais atividades que atuam nesse sentido. As mudanças climáticas podem alterar o ciclo hidrológico, como a dinâmica da precipitação e evapotranspiração, umidade do solo, disponibilidade de água subterrânea e a magnitude e o tempo do processo de escoamento, já as atividades humanas, associadas principalmente com as mudanças no uso e cobertura da terra, impactam diretamente na disponibilidade de água, aumentam as superfícies impermeáveis, reduzem a área natural de vegetação, alteram as propriedades do solo, a interceptação da precipitação e a rugosidade superficial. Assim, avaliar esses impactos se tornou contribuinte essencial para o planejamento e gestão adequada dos recursos hídricos, servindo de base para a compreensão da dinâmica de uma bacia hidrográfica. Várias são as metodologias aplicadas com a finalidade de auxiliar no conhecimento e a atuação dessas forçantes de forma dissociada. A abordagem conceitual e a modelagem hidrológica são exemplos dessas metodologias. A primeira capaz de trazer resultados rápidos com a aplicação de uma série histórica de dados hidroclimáticos, de no mínimo 10 anos, e a modelagem, que exige uma quantidade maior de dados, porém possibilita a simulação de cenários que podem ser úteis na proposição de medidas mitigadoras. Dessa forma, essa tese objetivou analisar o impacto das mudanças de uso e cobertura da terra e das mudanças climáticas sobre três sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, aplicando-se as metodologias citadas anteriormente. Os resultados mostraram que a bacia hidrográfica do Rio Sapucaí está sujeita as tendências climáticas mundiais, além de ser uma bacia composta por altas taxas de degradação ambiental. As mudanças de uso e cobertura da terra foram aquelas que mais trouxeram impactos nas taxas de fluxo de água para as três sub-bacias analisadas, em decorrência das altas taxas de desmatamento ocorridas entre 1940 a 1970. Os cenários também mostraram como o crescimento urbano pode trazer consequências sobre a demanda hídrica para a população. Assim, a aplicação dessas metodologias se mostrou viável e contribuíram para a análise histórica e de simulação de situações, que podem auxiliar na gestão desta e de outras bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Recursos Hídricos. Mudanças Climáticas. Mudanças de uso e cobertura da terra. Abordagem conceitual. Modelagem Hidrológica.

EFFECTS OF CLIMATE AND CHANGE IN LAND USE AND LAND COVER IN THE HYDROLOGICAL CYCLE IN SOUTHEASTERN BRAZIL

ABSTRACT

In the last 50 years, tropical ecosystems have been negatively affected by forest fragmentation and degradation, which directly impacts the organization, structure and the fulfillment of the ecosystem services. Human actions and climate change appears to be the primary activities acting in this direction. Climate change may maximize the negative effects of the ongoing degradation by altering the hydrological cycle, such as the dynamics of precipitation and evapotranspiration processes, soil moisture, groundwater availability and the magnitude and timing of the runoff process, as well as land use and land cover changes induced by human activities directly impact the availability of water, increase impermeable surfaces, reduce the natural area of natural vegetation, alter soil properties, interception of precipitation and surface roughness. Thus, assessing these impacts has become essential for planning and management of water resources, contributing for better understanding of the dynamics on hydrographic basins. Amongst several methodologies that have been applied to assist the knowledge and performance of these forcings in a dissociated way, the conceptual approach and hydrological modeling were chosen. The first one allows us to quick results by using historical series of hydroclimatic data, at least 10 years-window, and the modeling, which requires a larger amount of data, but allows to simulate scenarios that gives support to mitigation programs. Thus, this thesis aimed to analyze the impact of land use and land cover changes, and climate change on three sub-basins of the Sapucaí river basin by applying the methodologies above mentioned. The results showed that the Sapucaí river basin is subjected to global climate trends, in addition to being a highly environmental degraded. Changes in land use and land cover impacted the most on water flow rates as a result of the high historical rates of deforestation between 1940 and 1970 for all three studied basins. The scenarios also provided important insights on how urban growth impacts the water demand for the population. Thus, the application

of these methodologies proved to be viable and contributed to historical analysis and scenario simulation, supporting the management of hydrographic basins.

Keywords: Water resources. Climate changes. Changes in land use and land cover. Conceptual approach. Hydrological Modeling.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág</u>
Figura 2.1 - Representação do ciclo da água (azul) e do carbono (marrom).....	7
Figura 2.2 - Representação esquemática dos componentes do balanço hídrico dada uma condição natural.....	10
Figura 2.3 - Modelo conceitual de mudanças eco-hidrológicas associadas as mudanças climáticas e de uso e cobertura da terra.	14
Figura 2.4 - Relação escala espaço-temporal para os modelos sobre o ciclo da água e carbono.	17
Figura 3.1 - Localização geográfica da Bacia do Rio Sapucaí.....	27
Figura 3.2 - Hipsometria da Bacia do Rio Sapucaí.	28
Figura 3.3 - Perfil longitudinal do rio Sapucaí, da nascente no município de Campos do Jordão (SP), até sua foz, desaguando no Rio Grande (MG).....	29
Figura 3.4 - Crescimento populacional da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.....	30
Figura 3.5 - Fluxograma das etapas da metodologia do diagnóstico ambiental.....	35
Figura 3.6 - Precipitação diária acumulada e evapotranspiração diária potencial média para o período de 1980-2016 na BHRS.....	39
Figura 3.7 - Temperatura máxima e mínima para o período de 1980-2016 na BHRS...	40
Figura 3.8 - Diagrama climático de Walter e Lieth (temperatura x precipitação mensal) durante o período de estudo de 1980-2016 para a Bacia do Rio Sapucaí.	41
Figura 3.9 - Anomalia anual de precipitação para a Bacia do Rio Sapucaí, para o período de 1980 a 2016, com os anos de <i>El Niño</i> e <i>La Niña</i> em destaque.....	42
Figura 3.10 - Somatório mensal de eventos anômalos positivos e negativos de precipitação, com nível de significância de 2.5%, 5.0% e 10.0%.	43
Figura 3.11 - Anomalia anual de temperatura para a Bacia do Rio Sapucaí, para o período de 1980 a 2016, com os anos de <i>El Niño</i> e <i>La Niña</i> em destaque.....	44
Figura 3.12 - Somatório mensal de eventos anômalos positivos e negativos de temperatura média, com nível de significância de 2.5%, 5.0% e 10.0%.....	45
Figura 3.13 - Resultado do algoritmo BFAST aplicado para as séries históricas de precipitação (a) e temperatura média (b), da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (1980-2016).....	46
Figura 3.14 - Resultado do algoritmo BFAST aplicado para a séries histórica de evapotranspiração de referência, da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (1980-2016)..	47

Figura 3.15 - Balanço Hídrico Climatológico mensal da bacia do Rio Sapucaí, para o período de 1980 a 2014.	48
Figura 3.16 - Localização das estações fluviométricas na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí.	49
Figura 3.17 - Taxas médias anuais de vazão das estações fluviométricas sobre o rio Sapucaí.	50
Figura 3.18 - Uso e cobertura da terra da bacia do Rio Sapucaí, para os anos de 1985 e 2019.	51
Figura 3.19 - Percentual de cada classe de uso e cobertura da terra para a BHRS.	52
Figura 3.20 - Transição do uso e cobertura da terra do ano de 1985 para 2019, na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí.	53
Figura 4.1 - Localização das três sub-bacias utilizadas no estudo.	62
Figura 4.2 - Percentual das classes de uso e cobertura da terra para as três bacias de estudo.	62
Figura 4.3 - Médias de precipitação (PPT), vazão (Q) e temperatura (T) para as bacias A, B e C para todo o período de análise.	68
Figura 4.4 - Resultados da aplicação das assinaturas hidrológicas e do Teste de Pettitt (linha vermelha) na série de vazões de água para as três bacias hidrográficas.	70
Figura 4.5 - Porcentagem de cada classe de uso e cobertura do solo (barras) e o número total de habitantes por ano (pontos) para cada bacia.	71
Figura 4.6 - Dispersão do excesso de energia (Eex) contra o excesso de água (Pex) para as três bacias hidrográficas.	72
Figura 5.1 - Localização das três sub-bacias usadas.	80
Figura 5.2 - Dados de entrada de (a) uso da terra, (b) declividade e (c) solos, necessários para a criação das HRUs pelo SWAT, de cada sub-bacia.	83
Figura 5.3 - Fluxograma das etapas da metodologia dos processos no ambiente SWAT.	85
Figura 5.4 - Uso da terra atual (a) e uso da terra usado na análise de cenários (b) para as três bacias hidrográficas.	90
Figura 5.5 - Vazão simulada e observada para a Bacia A, juntamente com os dados observados de precipitação.	92
Figura 5.6 - Dispersão dos dados simulados e observados para a Bacia A.	93
Figura 5.7 - Vazão simulada e observada para a Bacia B, juntamente com os dados observados de precipitação.	94

Figura 5.8 - Dispersão dos dados simulados e observados para a Bacia B.	94
Figura 5.9 - Vazão simulada e observada para a Bacia C, juntamente com os dados observados de precipitação.	95
Figura 5.10 - Dispersão dos dados simulados e observados para a Bacia C.	96
Figura 5.11 - Simulação do cenário de regeneração para as áreas de pastagem na Bacia A.	96
Figura 5.12 - Simulação do cenário de regeneração para as áreas de pastagem na Bacia B.	97
Figura 5.13 - Simulação do cenário de regeneração para as áreas de pastagem na Bacia C.	97

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág</u>
Tabela 2.1 - Exemplos de variáveis usadas na modelagem e os sistemas de sensoriamento remoto potenciais para aquisição desses dados.	23
Tabela 3.1 - Características morfométricas da bacia do rio Sapucaí.	29
Tabela 3.2 - Resumo das estações fluviométricas localizadas na BHRS.	33
Tabela 3.3 - Legenda do mapeamento de uso e cobertura da terra utilizado no trabalho de pesquisa, adaptada de MapBiomias.	34
Tabela 4.1 - Descrição da Agência Nacional das Águas usadas para obtenção dos dados de precipitação e vazão.	63
Tabela 4.2 - Descrição das estações do INMET usadas para obter os dados de temperatura.	63
Tabela 4.3 - Adaptação da legenda usada nesse estudo para o uso e cobertura da terra com base em Dias et al. (2016) e Projeto MapBiomias.	65
Tabela 4.4 - Resumo da precipitação média (PPT), vazão (Q) e temperatura (T) para os períodos de análise.	69
Tabela 5.1 - Resumo dos dados de entrada do SWAT.	81
Tabela 5.2 - Descrição das classes de uso e cobertura da terra do MapBiomias e banco de dados SWAT.	82
Tabela 5.3 - Síntese dos dados de entrada do modelo SWAT, separado por cada sub-bacia.	83
Tabela 5.4 - Resumo das estações fluviométricas, da Agência Nacional das Águas (ANA) utilizadas no estudo.	84
Tabela 5.5 - Parâmetros de calibração de vazão e seus limites, utilizados para as três bacias hidrográficas de estudo.	87
Tabela 5.6 - Estatísticas recomendadas para avaliação de desempenho da vazão no modelo.	89
Tabela 5.7 - Valores dos parâmetros adotados para o processo de calibração.	91
Tabela 5.8 - Resultados obtidos da avaliação do desempenho do modelo para a Bacia A.	91
Tabela 5.9 - Resultados obtidos da avaliação do desempenho do modelo para a Bacia B.	93
Tabela 5.10 - Resultados obtidos da avaliação do desempenho do modelo para a Bacia C.	95

SUMÁRIO

1 PANORAMA GERAL DA PESQUISA	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos da pesquisa	4
1.3 Estrutura da tese.....	5
2 EMBASAMENTO TEÓRICO	6
2.1 Os processos do ciclo hidrológico	6
2.1.1 Balanço hídrico climático nas bacias hidrográficas	9
2.2 Impactos climáticos e humanos no ciclo hidrológico.....	11
2.3 Breve contextualização sobre metodologias de análise de impactos humanos e climáticos em bacias hidrográficas.....	12
2.3.1 Abordagem conceitual: estrutura de <i>Tomer-Schilling</i>	13
2.3.2 Aplicações da estrutura de <i>Tomer-Schilling</i>	15
2.3.3 Modelagem Ambiental	16
2.3.4 Modelo de avaliação de água e solo – SWAT.....	17
2.3.5 Aplicações do modelo SWAT	19
2.4 Contribuição do sensoriamento remoto para as análises ambientais.....	21
3 DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ NO PERÍODO DE 1980 A 2016	24
3.1 Introdução.....	24
3.2 Materiais e métodos.....	26
3.2.1 Área de estudo	26
3.2.2 Descrição dos dados	31
3.2.3 Processamento dos dados	34
3.2.3.1 Dados hidroclimáticos	35
3.2.3.2 Dados ambientais.....	38
3.3 Resultados.....	39

3.3.1	Análise hidroclimática da bacia do rio Sapucaí.....	39
3.3.2	Análise ecossistêmica da bacia do rio Sapucaí.....	50
3.4	Discussão	53
3.5	Considerações finais	57
4	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS HUMANOS E CLIMÁTICOS EM TRÊS SUB-BACIAS DO RIO SAPUCAÍ.....	59
4.1	Introdução.....	59
4.2	Materiais e métodos.....	61
4.2.1	Área de Estudo	61
4.2.2	Descrição de dados	63
4.2.3	Processamento dos dados	65
4.3	Resultados.....	67
4.3.1	Caracterização climática.....	67
4.3.2	Assinaturas hidrológicas.....	69
4.3.3	Uso e cobertura da terra.....	70
4.3.4	Modelo conceitual de <i>Tomer-Schilling</i>	71
4.4	Discussão	72
4.5	Considerações finais	76
5	APLICABILIDADE DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO DA VAZÃO EM TRÊS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICA NA REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA ..	77
5.1	Introdução.....	77
5.2	Materiais e métodos.....	79
5.2.1	Área de estudo	79
5.2.2	Descrição dos dados	80
5.2.2.1	Dados de entrada para o modelo SWAT	80
5.2.3	Processamento dos dados	85
5.2.3.1	Delimitação das bacias hidrográficas e respectivas HRUs.....	86

5.2.3.2 Calibração automática, validação e avaliação de desempenho do modelo	86
5.2.3.3 Análise de cenários de mudança de uso e cobertura da terra.	89
5.3 Resultados.....	90
5.3.1 Calibração e validação da vazão.....	90
5.3.2 Análise de cenário de mudança de uso e cobertura da terra.	96
5.4 Discussão.....	98
5.5 Considerações finais.....	99
6 CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
APÊNDICE A – TABELA COM A DESCRIÇÃO DOS MUNICÍPIOS PERTENCENTES A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ. REFERENTE AO CAPÍTULO 1.....	121
APÊNDICE B – TABELA COMPLEMENTAR COM A DESCRIÇÃO DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA DOS DADOS UTILIZADOS NO CAPÍTULO 4.....	124

1 PANORAMA GERAL DA PESQUISA

1.1 Introdução

Desde o século XVI, os ecossistemas no Brasil são alterados continuamente pelas ações humanas, através da exploração madeireira, dos incêndios florestais, do desmatamento, e da expansão urbana. Essas mudanças resultam em impactos ambientais, como a redução da cobertura florestal primária, o que acarreta em consequências para o ciclo hidrológico, o armazenamento do estoque de carbono e no provimento dos serviços ecossistêmicos, que estão relacionados com o bem-estar humano, manutenção da estabilidade climática e o equilíbrio funcional dos ambientes (BUTCHART et al., 2010; LAURANCE et al., 2012).

Globalmente, a sociedade está se deparando com problemas relacionados com as mudanças de uso e cobertura da terra, que influenciam diretamente no ciclo hidrológico e nas mudanças climáticas. Essas alterações ocorrem principalmente devido à abertura de áreas para o plantio de monoculturas, cujo impacto, não se restringem somente ao desmatamento, mas também na modificação da estrutura do solo, na contaminação do lençol freático, além de ser o setor que mais consome os recursos hídricos (TURNER II; LAMBIN; REENBERG, 2007).

Somente na década de 90, por exemplo, houve uma remoção global de 7,3 milhões de hectares de florestas tropicais, e durante o período de 2000 a 2015, mais 3,3 milhões de hectares (KEENAN et al., 2015). Segundo Lewis et al. (2015), quando as florestas tropicais estão intactas, elas atuam como reguladoras do clima global e no sequestro de carbono, emitindo para a atmosfera, por volta de 0,5 a 1,0 Pg C ano⁻¹ (1 Petagrama = 10¹⁵ gr), no entanto, em áreas desmatadas essas emissões passam para 2,0 a 2,8 Pg C ano⁻¹ (LEWIS; EDWARDS; GALBRAITH, 2015). Esse aumento da quantidade de carbono emitido para a atmosfera pode acelerar ainda mais o processo de mudanças climáticas.

No Brasil, historicamente, as mudanças de uso e cobertura da terra, causadas pelo desmatamento, são a maior fonte de emissões de carbono para a atmosfera (JOLY et al., 2014). A Mata Atlântica é um dos biomas brasileiros onde essas mudanças, geradas pelo desmatamento, é mais crítico. Este bioma abriga cerca de 60% da população brasileira, e fornece uma variedade de serviços ecossistêmicos essenciais para a

sobrevivência e bem-estar de toda esta população, como por exemplo, a produção de alimentos, a estabilidade climática e a disponibilidade hídrica. Essa alta densidade populacional pode aumentar a vulnerabilidade da sociedade aos desastres naturais e o consumo de recursos naturais (JOLY; METZGER; TABARELLI, 2014).

Este bioma abriga também uma das biotas mais diversificadas das florestas tropicais do mundo. Originalmente, cobria cerca de 150 milhões de hectares (RIBEIRO et al., 2009), e, atualmente, o que se encontra da Mata Atlântica são pequenos fragmentos, menores que 100 hectares, isolados uns dos outros e compostos por florestas secundárias em estágio inicial e médio de sucessão (METZGER et al., 2009; JOLY et al., 2014), os quais estão cercados por pastagens, campos agrícolas e área urbana.

Scarano e Ceotto (2015) afirmaram que, dado o histórico de impactos antrópicos na Mata Atlântica, os recursos naturais ali presentes, estão suscetíveis a sérios problemas que preocupam a sociedade. Estes estão relacionados, novamente, ao aumento da ocorrência de eventos extremos: chuvas fortes, deslizamentos de terra, ondas de calor, inundações e secas. A disponibilidade de água, em quantidade e qualidade, é outro problema que está alertando vários âmbitos governamentais e sociais, e este cenário pode piorar se os fragmentos de mata não forem devidamente preservados.

Para contornar tais problemas, Ribeiro et al. (2009) sugerem algumas diretrizes para a conservação desses fragmentos. Primeiro que os fragmentos de maior área devam ter prioridade de conservação, e segundo que todos eles sejam gerenciados de forma que possam manter sua funcionalidade ambiental, minimizando o efeito de borda e melhorando a conectividade entre eles, para que assim possa se ter uma possibilidade de recuperação dessas florestas.

O Brasil se propôs, através da sua participação na criação do *Sustainable Development Goals* (SDGs), negociados em agosto de 2015, por ocasião das Nações Unidas para o Desenvolvimento Sustentável, a cumprir com 17 objetivos que buscam integrar as dimensões econômica, social, ambiental e de desenvolvimento sustentável. Dentro desses objetivos se encontra: Objetivo 6: assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos; Objetivo 13: tomar medidas urgentes para combater a mudança do clima e seus impactos; e Objetivo 15: proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as

florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e a perda de biodiversidade. E para mitigar esses problemas o governo brasileiro se comprometeu a reduzir suas emissões de carbono em 37% abaixo dos níveis de 2005 (2,1 gigatoneladas de CO₂) até 2025, além de restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas até 2030, estipulada em sua Contribuição Nacionalmente Determinada (*intended Nationally Determined Contribution* – iNDC), apresentada as Nações Unidas dentro do contexto das negociações sobre as mudanças climáticas (BRASIL, 2005).

O presente trabalho é parte integrante do Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração – Parque Estadual de Campos do Jordão (PELD - PECJ), cuja proposta é intitulada “Ecossistemas, impactos de mudanças globais e manejo adaptativo em uma unidade de conservação: harmonização da conservação de um ecossistema altamente ameaçado com o uso de serviços ecossistêmico”.

Este programa se propõe a analisar: 1) a sensibilidade ao clima do Planalto de Campos do Jordão e as demais áreas da Serra da Mantiqueira; 2) o impacto ambiental sobre o PECJ, em relação às mudanças climáticas, mudança de uso e cobertura da terra, hidrologia e produtividade de biomassa; 3) a resistência dos serviços ecossistêmicos; e 4) aplicar os resultados para o manejo e a conservação do PECJ.

Nesse sentido, este trabalho gerou informações que auxiliam no cumprimento dos objetivos do PELD, assim como poderá servir de modelo para estudos em outras áreas. O estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí (BHRS), e três sub-bacias, onde o PECJ está inserido, com o objetivo geral de analisar os impactos ambientais das mudanças climáticas e de uso e cobertura da terra ocorridas neste local.

Dessa forma, através de uma análise interligada entre a dinâmica ambiental, este trabalho buscou responder os seguintes questionamentos: 1) Qual o contexto histórico da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, em relação as mudanças climáticas globais? 2) A bacia já está sujeita as tendências mundiais relacionadas as mudanças climáticas? 3) Quais foram os impactos mais influentes na região, mudanças climáticas ou humanas? 4) Em cenários de mudanças de uso e cobertura da terra, qual a dinâmica de fluxo de água para a região?

Essas questões foram respondidas através da utilização de dois métodos de análises ambientais, consideradas eficientes para investigar sobre os impactos das forçantes

humanas e climáticas nas bacias hidrográficas, a abordagem conceitual de *Tomer-Schilling* (TOMER; SCHILLING, 2009), que visa separar os impactos humanos e climáticos, e a modelagem hidrológica, através do modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), desenvolvido para simular o impacto das alterações do uso e cobertura da terra dentro do ciclo hidrológico.

1.2 Objetivos da pesquisa

Esta pesquisa visou analisar o impacto das mudanças de uso e cobertura da terra e das mudanças climáticas sobre três sub-bacias da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, através de duas abordagens: conceitual e modelagem hidrológica.

Dessa forma para atingir o objetivo principal dessa pesquisa, foi necessário cumprir os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar e caracterizar as condições hidroclimáticas e de uso e cobertura da terra para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí;
- b) Implementar a metodologia da abordagem conceitual da estrutura de *Tomer-Schilling* em três sub-bacias;
- c) Verificar quais forçantes (climáticas ou humanas) exerceram maior influência nas sub-bacias;
- d) Adequar as variáveis climáticas e ambientais necessários para implementar o modelo SWAT;
- e) Calibrar o modelo a partir de parâmetros necessários, de acordo com a literatura;
- f) Aplicar o modelo SWAT para a simulação da vazão nas três sub-bacias;
- g) Aferir, através de cenários de mudança de uso e cobertura da terra, sobre a dinâmica da vazão nas três sub-bacias.

1.3 Estrutura da tese

Além desse capítulo introdutório, a tese possui mais quatro capítulos distintos. O Capítulo 2, “Embasamento Teórico”, refere-se ao referencial teórico usado durante a pesquisa, e os capítulos 3, 4 e 5 são escritos seguindo a estrutura: 1) Introdução; 2) Materiais e Métodos; 3) Resultados; 4) Discussão e 5) Considerações Finais.

Assim o Capítulo 3, “Diagnóstico ambiental da Bacia do Rio Sapucaí no período de 1980 a 2016”, apresenta as características da bacia hidrográfica, comparando os resultados encontrados frente às tendências mundiais. Os resultados foram subdivididos em duas categoriais: 1) diagnóstico climático, onde são mostradas as características de precipitação, temperatura, evapotranspiração, anomalias climáticas, balanço hídrico climatológico e análises de tendência das séries temporais; e 2) diagnóstico físico/ambiental, composto pela caracterização da bacia quanto ao uso e cobertura da terra.

No Capítulo 4, “Avaliação de impactos humanos e climáticos em três sub-bacias do Rio Sapucaí, através do modelo conceitual de *Tomer-Schilling*”, traz sobre a aplicação da abordagem conceitual, que indica as forçantes mais atuantes dentro de cada bacia (humanas ou climáticas).

No capítulo seguinte, Capítulo 5, “Aplicação do modelo SWAT na simulação e análise de cenários da vazão em três sub-bacias na região sudeste brasileira”, é abordado sobre a técnica de modelagem com a utilização do modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) em três sub-bacias. Os processos referentes a adequação dos dados, calibração e validação do modelo são apresentados neste capítulo, bem como a análise dos cenários.

E por fim, o Capítulo 6 “Considerações Finais e Sugestões”, são apresentadas as considerações finais em relação aos três capítulos anteriores, um breve resumo sobre os resultados encontrados em cada capítulo e as recomendações em relação às questões que ficaram em aberto na pesquisa.

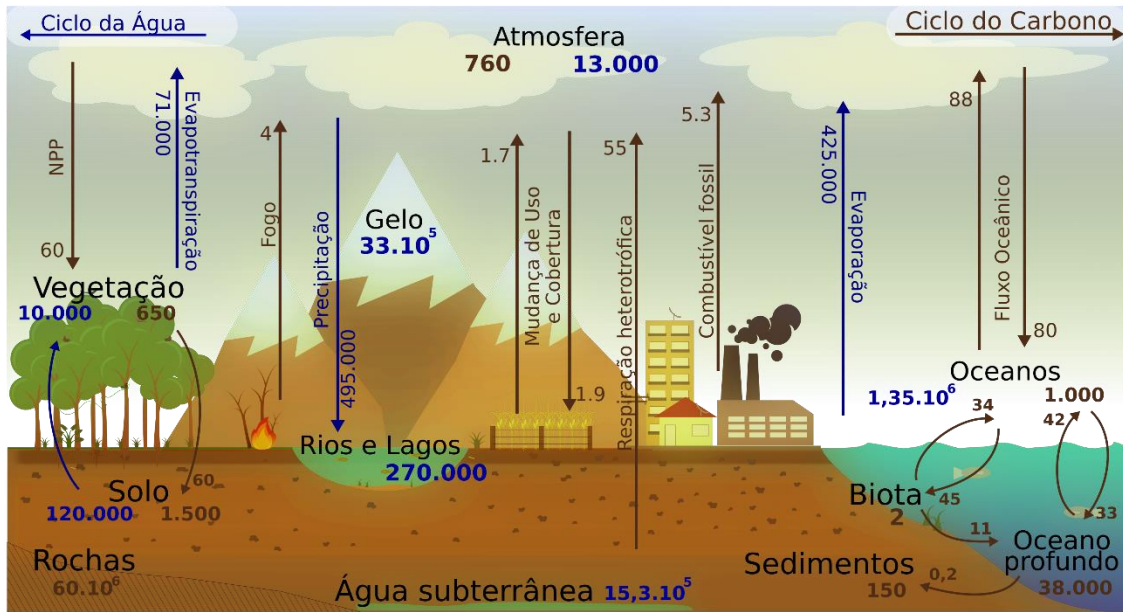
2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Este capítulo auxilia no entendimento dos conceitos, ideias e discussões referente ao desenvolvimento de toda a tese. O embasamento teórico foi pensado da seguinte forma, primeiro o conhecimento base sobre o ciclo hidrológico e como ele ocorre associado ao ciclo do carbono, outro elemento muito discutido em relação as mudanças climáticas e de uso e cobertura da terra. Posteriormente passou-se para a discussão sobre os impactos climáticos e humanos sobre o ciclo da água, a fim de entender, como eles acontecem e qual o intuito dessas grandes discussões mundiais sobre o tema. Em seguida apresentou-se sobre como esses impactos podem ser analisados e avaliados, quais são as metodologias e ferramentas existentes para essa abordagem, dando enfoque para aquelas utilizadas na tese.

2.1 Os processos do ciclo hidrológico

Os ciclos da água, juntamente com o do carbono são ciclos importantes para o controle e a manutenção do meio ambiente, e para a regulação do clima local e global. O ciclo da água (Figura 2.1) corresponde ao deslocamento contínuo da água através da atmosfera, superfície e subsuperfície terrestre. Está presente em grandes reservatórios, os oceanos, as geleiras e os lençóis freáticos, e também, reservatórios menores, como os rios e lagos, camadas superiores do solo e rochas, além da vegetação e nos animais (ALLAN et al., 2020).

Figura 2.1 - Representação do ciclo da água (azul) e do carbono (marrom).



As setas em azul representam o ciclo hidrológico e, complementando, as setas em marrom o ciclo do carbono, os processos e os valores são as quantidades aproximadas que passa pelos reservatórios, sendo $\text{km}^3\text{ano}^{-1}$ para a água e Pg ano^{-1} ($1 \text{ Pg [Petagramo]} = 10^{15}$) para o carbono.

Fonte: Adaptado de Bourotte (2011).

O tempo de permanência tanto da água nos reservatórios não é estática, ele varia em função da escala espacial do processo em questão, global, regional ou local (BEAR et al., 2016). Podendo permanecer desde 3.200 anos nos oceanos a 9 dias na atmosfera (CHAPIN III et al., 2010).

Segundo Gentine et al. (2019), o ciclo da água e do carbono possuem fortes conexões. Assim, quando a concentração de dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera aumenta, reflete diretamente no clima, aumentando a temperatura atmosférica, que por sua vez altera a quantidade de água no solo necessária para que as plantas possam absorver o CO_2 . Ao mesmo tempo, o aumento crescente das concentrações de CO_2 na superfície terrestre muda a regulação das plantas e a biomassa, o que altera o processo de fotossíntese e as taxas de evapotranspiração de todo o ecossistema (CIAIS et al., 2013).

A precipitação é considerada como o fenômeno que desencadeia os demais processos do ciclo hidrológico, e apresenta grande variação temporal e espacial, e acontece em decorrência da condensação das partículas líquidas ou congeladas que caem na forma de

chuva, granizo ou neve, sobre superfícies naturais ou antropizadas (BEAR et al., 2016). Essa água precipitada, carrega partículas de CO₂ para a superfície terrestre, pois a água presente na atmosfera reage naturalmente com as partículas de carbono ali presente, originando o ácido carbônico (H₂CO₃), sendo que o aumento da quantidade de CO₂ pode acarretar numa diminuição do pH dessa água (SADATSHOJAIE et al., 2020).

No processo de fotossíntese, a água e o carbono novamente atuam em conjunto, no qual a vegetação absorve parte do CO₂ da atmosfera, juntamente com a energia solar, os sais minerais e parte da água infiltrada no solo (BOLIN et al., 1979). A outra parte do CO₂, volta para a atmosfera pelo processo da respiração autotrófica (vegetação) e heterotrófica (microbiana e microrganismos do solo) (WARING; RUNNING, 2007), e o que não é utilizado em nenhum desses processos é armazenado pela vegetação, na forma de biomassa (CIAIS et al., 2013).

A água utilizada no processo de fotossíntese é captada pelas raízes das plantas nas camadas mais superficiais do solo, conhecido como zona não saturada. Porém, nem toda a água armazenada nesta zona é utilizada para a fotossíntese, o excedente percola para camadas mais profundas, denominada de zona saturada, ou então escoar lateralmente, processo conhecido como escoamento subsuperficial. A zona saturada é a camada que se inicia no lençol freático e se estende até a rocha, sendo que a água que chega até essa zona é, normalmente, destinada ao abastecimento freático e dos mananciais (BENNIE; HENSLEY, 2004)

Vale lembrar que antes da água atingir o solo, uma parcela evapora durante a queda da precipitação, e outra é interceptada e armazenada pela vegetação (FONTES JÚNIOR, 2016; WARING; RUNNING, 2007). O volume de água que é interceptado, depende da capacidade de armazenamento da planta, da intensidade da chuva e da evaporação durante tal processo, sendo assim, o valor da sua perda é muito variável. Por exemplo, se a quantidade de chuva for pequena e de baixa intensidade, pode ocorrer à retenção de toda a água no dossel. Em contrapartida, se a intensidade da chuva é muito alta, além da água ser interceptada, ela conseguirá atingir o solo, iniciando os processos de infiltração, percolação, escoamento superficial e subsuperficial. Esses processos fazem parte tanto da dinâmica da água quanto do carbono no solo, alterando as características

físico e químicas do mesmo, influenciando diretamente na quantidade e no comportamento desses elementos (FONTES JÚNIOR, 2016).

A quantidade de CO₂ presente no solo, se origina através de processos de decomposição da matéria orgânica acumulada sobre ele, o que contribui para a sua fertilidade e purificação. Além de auxiliar na capacidade de retenção da água e proteção contra os riscos de erosão (PAN et al., 2014). Ao mesmo tempo, a água influencia na capacidade de armazenamento do CO₂ no solo, quanto mais úmido e poroso o solo maior é a atividade microbiana e maior a decomposição da matéria orgânica, diminuindo conforme o solo se torna seco. Porém, em solos saturados a taxa de degradação da matéria orgânica é baixa, o que aumenta a quantidade de carbono (SMITH et al., 2015).

Esses solos saturados atuam também no processo de infiltração, interferindo diretamente no escoamento superficial, fazendo com que a água não consiga mais infiltrar e escoar, formando as enxurradas, córregos, ribeirões, rios e lagos ou reservatórios de acumulação (WARING; RUNNING, 2007). Assim quanto maior a infiltração, menor é o escoamento superficial, o que determina a velocidade da água na vertente e o potencial erosivo (transporte de partículas sólidas) e químico (empobrecimento e contaminação do solo) (GUO, 2020).

A água retorna para a atmosfera, pelo processo de evapotranspiração, que engloba a evaporação e a transpiração. O primeiro trata-se de um processo no qual a água, localizada numa superfície líquida ou úmida, volta para a atmosfera na forma de vapor, e a transpiração que acontece através da ação fisiológica das plantas (PENG et al., 2019).

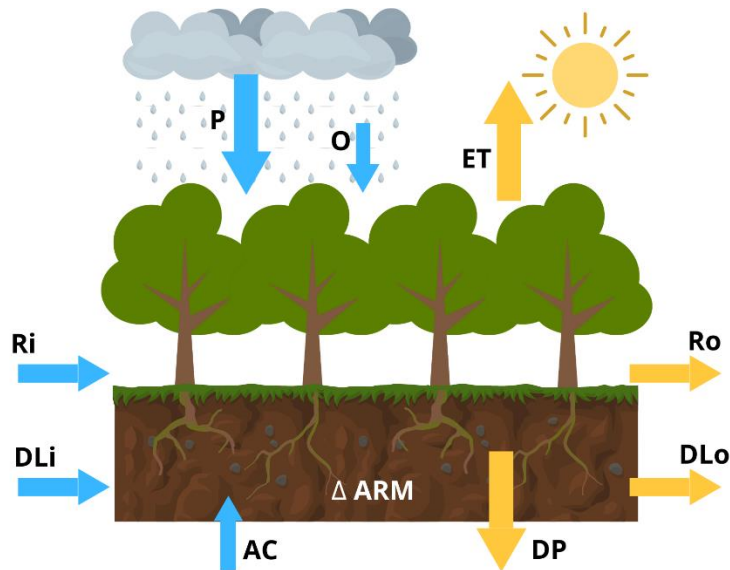
2.1.1 Balanço hídrico climático nas bacias hidrográficas

O balanço hídrico climático é considerado como a contabilização entre a entrada e saída de água em determinado sistema, dado um intervalo de tempo. Pode ser considerado como o próprio ciclo hidrológico, trazendo informações sobre a quantidade de água disponível em toda a biosfera. Em uma escala de bacia hidrográfica, a dinâmica da água pode ser representada pelas taxas de vazão. Em épocas que a chuva é menor que a demanda atmosférica por vapor d'água, a tendência da vazão é diminuir, em contrapartida em períodos em que a chuva supera essa demanda, a vazão irá aumentar. Numa escala local, o balanço hídrico tende a mostrar a variação de armazenamento de

água no solo, e assim, permitir o conhecimento sobre a deficiência hídrica de uma determinada vegetação (PEREIRA et al., 2002).

Determinar o balanço hídrico não é simples, vários métodos foram desenvolvidos, a partir de variáveis climatológicas, para facilitar o procedimento. Um método muito difundido é o de Thornthwaite e Matter (1955), que possibilita prever a variação do armazenamento de água no solo, assim como estima a evapotranspiração real, o déficit e excedente hídrico. O método se baseia que a perda de água por evapotranspiração varia linearmente com o armazenamento de água no solo. E assim, dada uma condição natural, os componentes do balanço hídrico são representados conforme a Figura 2.2, e representam: 1) ENTRADAS: Precipitação (P); Orvalho (O); Escoamento Superficial (Ri – Run In); Drenagem Lateral (DLi); Ascensão Capilar (AC); e 2) SAÍDAS: Evapotranspiração (ET); Escoamento Superficial (Ro – Run Off); Drenagem Lateral (DL0); Drenagem Profunda (DP).

Figura 2.2 - Representação esquemática dos componentes do balanço hídrico dada uma condição natural.



Fonte: Produção do autor.

Equacionando as entradas e saídas do sistema, a variação do armazenamento de água no solo ($\Delta \text{ ARM}$) é dada pela Equação 2.1.

$$\Delta \text{ ARM} = P + O + R_i + DL_i + AC - ET - R_o - DL_o - DP \quad (2.1)$$

A principal fonte de entrada é a precipitação, sendo que a participação do orvalho se torna relevante apenas em regiões como, por exemplo, nas florestas ou mata nebulares, do contrário pode ser desprezada. A entrada de água pela ascensão capilar ocorre em locais onde o lençol freático seja próximo a zona de raízes e em períodos muito secos, no entanto, a contribuição dessa variável é muito pequena, sendo também, irrelevante para o balanço. As taxas de escoamento superficial e de drenagem lateral (R_i , R_o , DL_i e DL_o), em áreas homogêneas anulam-se, pois eles se compensam. Na saída de água do sistema, a evapotranspiração é considerada como a principal atuante, principalmente nos períodos secos, e a drenagem profunda constitui-se como a saída de água do volume de controle do solo nas épocas de chuvas excessivas. Dessa forma o balanço hídrico pode ser resumido pela Equação 2.2 (PEREIRA, 2005).

$$\Delta ARM = P - ET - DP \quad (2.2)$$

Através da Equação 2 é possível determinar a variação de disponibilidade de água no solo, e caso conheça a capacidade de água disponível (CAD) desse solo, pode-se estimar também a quantidade de água armazenada por ele (RODRIGUES et al., 2018).

Dessa forma, conhecer os elementos que compõe o balanço hídrico é um direcionamento das ações relacionadas para o planejamento e gestão de uma bacia hidrográfica, além do zoneamento climático e agroecológico e a seleção de técnicas de conservação de água e solo (CECILIO et al., 2012).

2.2 Impactos climáticos e humanos no ciclo hidrológico

A influência das mudanças de uso e cobertura da terra sobre o funcionamento dos sistemas naturais e os serviços ambientais por eles prestados, tem gerado um aumento nas investigações no mundo todo, principalmente sobre sua contribuição em relação as alterações das coberturas florestais para os demais usos, como pastagem, agricultura, área urbana, reflorestamento, resultando em um ambiente fragmentado (BRINCK et al., 2017).

A fragmentação florestal trata-se de um processo em que extensas áreas de mata são divididas em fragmentos de menores extensões e isoladas em meio a um habitat diferente do original (CERQUEIRA et al., 2003). A fragmentação e a sua conversão em outros usos contribuem para o aumento da degradação ambiental e o isolamento de fragmentos, diminuindo a biodiversidade (DECIAN et al., 2016).

O principal agente da fragmentação é a atividade humana, através da prática do desmatamento. Esta ação reduz a evapotranspiração, influenciando nas taxas das chuvas locais e regionais (DEBORTOLI et al., 2016). Assim, algumas previsões apontam que o desmatamento reduzirá as chuvas em algumas regiões em até 30% (LAWRENCE; VANDECAR, 2015).

Além do impacto na precipitação, o desmatamento pode aumentar a temperatura, alterando a umidade e os fluxos de calor entre a superfície e a atmosfera. Isso pode resultar em ambientes mais secos, o que gera o acúmulo de biomassa na superfície, aumentando a propagação dos incêndios florestais. As partículas de aerossóis dos incêndios podem espalhar a radiação solar e interromper a elevação do vapor d'água (TOKINAGA et al., 2012).

A retirada da cobertura florestal pode aumentar os processos de escoamento superficial, que levam a erosão do solo, e também aumentar o escoamento direto, resultando no aumento dos níveis de água nos cursos d'água (NYBERG et al., 2012). Pilaš et al. (2010) atentam que esse aumento dos níveis de água em conjunto com a ocorrência de eventos de precipitação longos e intensos, aumentam ainda mais a saturação do solo e reduzem a sua capacidade de absorção, o que pode resultar em inundações.

2.3 Breve contextualização sobre metodologias de análise de impactos humanos e climáticos em bacias hidrográficas

As mudanças climáticas e as atividades humanas estão trazendo impactos significativos para o ciclo hidrológico, como visto anteriormente no item 2 deste capítulo. Sendo a vazão, um dos componentes mais vulneráveis do ciclo hidrológico e que está associada com a demanda por água em diferentes setores da sociedade (DEY; MISHRA, 2017), entender como o clima e o homem interagem com o fluxo de água pode contribuir para a melhoria das ações mitigadoras das tendências climáticas mundiais. Assim, investigar essas interações em uma bacia hidrográfica é favorável e vantajoso, uma vez que essas análises possibilitam um melhor entendimento da recorrência dos processos (TURETTA, 2011), e principalmente no Brasil onde a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e execução do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Por muitos anos, os estudos hidrológicos basearam-se apenas na interação entre precipitação e fluxo de água e as modificações humanas costumavam ser tratadas como impulsionadoras isoladas do sistema hidrológico (VOGEL et al., 2015). Quando as atividades humanas começaram a causar impactos significativos no ciclo hidrológico, elas começaram a ser investigadas como um fenômeno interligado, e uma nova geração de estudos emergiu (VOGEL et al., 2015; CAVALCANTE et al., 2019; DOSDOGRU; KALIN, 2020).

Em relação aos impactos causados pelas mudanças climáticas e as atividades humanas, eles podem ser analisados separadamente por meio de quatro abordagens distintas: a) modelagem hidrológica (MACHADO et al., 2018; SOUZA et al., 2020); b) análises conceituais, como a hipótese de *Budyko*, desenvolvidas e explicadas por Zhang et al. (2008) e a estrutura de *Tomer-Schilling* (TOMER; SCHILLING, 2009); c) análise analítica, por elasticidade climática e sensibilidade hidrológica (CAVALCANTE et al., 2019); e d) análises experimentais, como cálculos de tendências hidrológicas e estudos de bacias pareadas (RIZZO et al., 2020).

Como os modelos hidrológicos, a análise de elasticidade climática e os testes de sensibilidade hidrológica exigem uma grande quantidade de dados e um grande poder de processamento (VOGEL et al., 2015), análises conceituais baseadas na estrutura de *Tomer-Schilling* e estudos experimentais de bacias emparelhadas são as técnicas mais viáveis quando considerando a limitação dos dados hidrológicos existentes (ADDOR et al., 2018). Dentre as abordagens experimentais, as análises de tendência também se destacam como um bom método para investigar a resposta em dados de séries temporais hidroclimáticas (FOOLADI et al., 2021).

2.3.1 Abordagem conceitual: estrutura de *Tomer-Schilling*

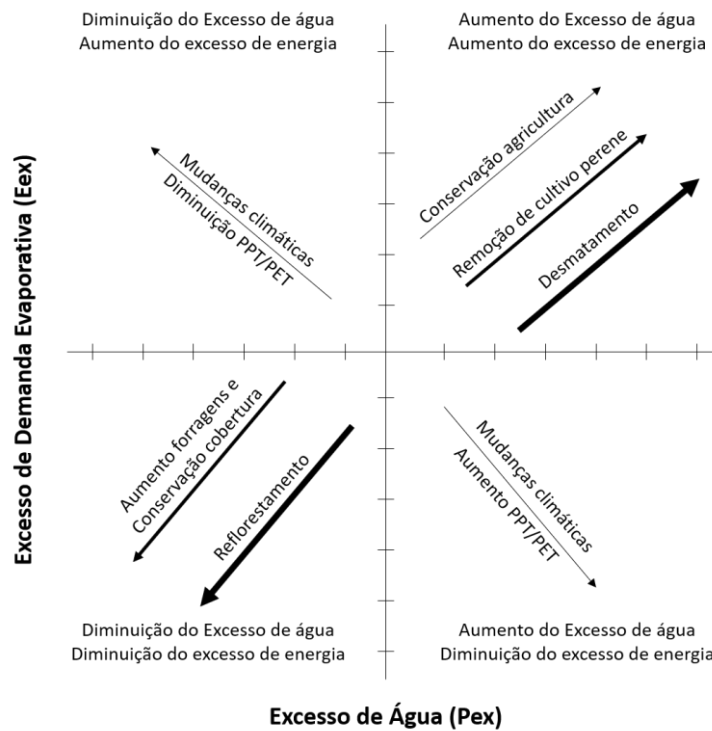
Essa abordagem auxilia na avaliação do uso de água e energia pelo ecossistema associado com dados de precipitação (PPT), evapotranspiração potencial (PET) e evapotranspiração real (ET). E assim fornece uma visão geral sobre se as influências que ocorrem na dinâmica de fluxo de água, são devido às mudanças climáticas ou atividades humanas, por meio de duas variáveis de estado eco-hidrológicas não dimensionais, o excesso de energia (Eex) e o excesso de água (Pex) (RENNER et al., 2012), definidos matematicamente pelas Equações 2.3 e 2.4.

$$P_{ex} = (PPT - ET / PPT) \quad (2.3)$$

$$E_{ex} = (PET - ET / PET) \quad (2.4)$$

As variáveis são apresentadas em um gráfico (Figura 2.3). Assim as mudanças de uso e cobertura da terra impactam diretamente sobre a evapotranspiração, o que resulta no aumento ou diminuição do excedente de água e energia, dependendo do efeito da mudança na evapotranspiração. As mudanças climáticas são necessárias para impactar no aumento ou diminuição da razão PPT/PET no tempo, a direção dessas mudanças resulta em um aumento ou diminuição da umidade e precipitação em escala regional. E mudanças paralelas ao longo de qualquer um dos eixos significa que influências climáticas e humanas estão exercendo magnitude semelhante (TOMER; SCHILLING, 2009).

Figura 2.3 - Modelo conceitual de mudanças eco-hidrológicas associadas as mudanças climáticas e de uso e cobertura da terra.



Fonte: Traduzido de Tomer e Schilling (2009).

Este método é considerado como um método simples e rápido de ser aplicado, devido a quantidade de variáveis utilizadas. Porém, ele exige que os dados possuam uma série histórica longa, mais de 10 anos, para a precipitação, evapotranspiração real, e temperatura, assim como uma análise histórica das mudanças de uso e cobertura da

terra, para que seja possível inferir sobre os resultados obtidos (DEY; MISHRA, 2017). Lembrando que ele se baseia nos pressupostos de que as atividades humanas são independentes das mudanças climáticas, e que as mudanças de uso e cobertura da terra afetam apenas a evapotranspiração (YE et al., 2013).

2.3.2 Aplicações da estrutura de *Tomer-Schilling*

A abordagem conceitual de *Tomer-Schilling* tem sido bastante implementada em várias pesquisas que visam avaliar os impactos das mudanças climáticas e atividades humanas sobre uma bacia hidrográfica. Wei et al. (2013) afirmam que dada as limitações das metodologias de análise de impactos, o recomendado é a utilização de dois ou três métodos em conjunto para que a pesquisa se torne robusta e evitar que mais estudos de casos sejam realizados.

Dessa forma, tem-se o trabalho de Cavalcante et al. (2019) que realizaram uma análise sobre o balanço hídrico anual e mensal em uma bacia no arco de desmatamento da Amazônia, através da utilização dos métodos de curva de *Budyko*, elasticidade e estrutura de *Tomer-Schilling*, obtendo resultados mostrando que as atividades humanas (desmatamento) foram as principais causas de alteração nas taxas de fluxo de água da bacia, sendo observada uma pequena recuperação no último período analisado.

Outro trabalho que abordou a estrutura de *Tomer-Schilling* com a curva de *Budyko*, foi o de Renner et al. (2012), que trouxe sua contribuição ao analisar uma bacia hidrográfica dos Estados Unidos, para estimar a sensibilidade do fluxo de água em relação as mudanças nas taxas de precipitação e evapotranspiração. Os resultados apontaram que tais alterações foram decorrentes das mudanças climáticas. Resultado semelhante obtido por Ye et al. (2013), porém para uma bacia na China.

Outro trabalho desenvolvido na China, em três bacias hidrográficas foi o de Lian et al. (2020), que explorou as respostas hidrológicas relacionadas com as mudanças climáticas e as atividades humanas após a implementação de projetos de restauração ecológica, e para identificar as características das mudanças em escala de tempo anual e sazonal. Para isso ele utilizou metodologias de análise de tendência e a estrutura de *Tomer-Schilling*.

2.3.3 Modelagem ambiental

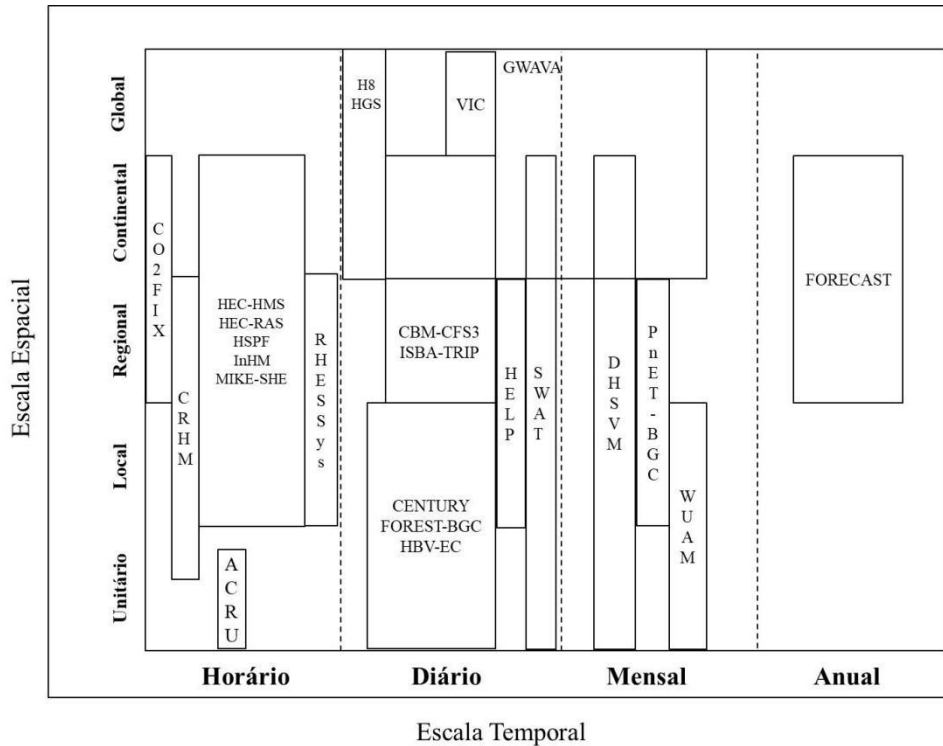
Na simulação de processos ambientais, os modelos são considerados um dos métodos importantes para a aplicação em diversas escalas espaço-temporais, como por exemplo na análise de cenários, que permite, pesquisadores, gestores, e demais setores da sociedade prever e analisar condições atuais e futuras sob diferentes causas (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009). Exemplificando, os modelos hidrológicos representam, matematicamente, o fluxo da água e de seus constituintes em relação aos processos que envolvem o ciclo hidrológico (ALMEIDA; SERRA, 2017). Estes modelos são cada vez mais usados em estudos ambientais e climáticos, auxiliando a entender sobre o impacto das mudanças de uso e cobertura da terra e prever alterações futuras nos ecossistemas (por exemplo, YANG; ZHANG, 2016; LEE; YEO, 2018; JUNG; KIM, 2018).

Para que a modelagem seja utilizada em sistemas ambientais, nas diversas escalas temporais e espaciais, se torna necessário estabelecer as características desses sistemas, definindo quais são as variáveis importantes e como ocorrem os fluxos de matéria e energia no meio ambiente (LIMA, 2021). Segundo Schulze et al. (2019), a principal vantagem dessa modelagem é que ela fornece uma visão geral dos fluxos, uma análise do conteúdo e tempo de permanência dos elementos em cada fase do ciclo, além de esclarecer sobre o destino de cada elemento. Em contrapartida, as variáveis dessa modelagem muitas vezes são apenas estimadas, dada a dificuldade em mensurá-las devido a diversos complicadores, como a variação da escala espacial e temporal.

Atualmente há uma quantidade grande de modelos disponíveis, cada qual com sua particularidade, sendo necessário realizar uma análise prévia sobre o fenômeno e a dinâmica do local que será estudado, a fim de se obter resultados mais significativos e coerentes ao se utilizar o modelo escolhido para a simulação.

Na Figura 2.4 está exemplificado alguns modelos ambientais, dada sua escala espacial e temporal de abrangência. As escalas espaciais foram adaptadas da literatura, para que fosse possível a comparação entre os modelos. Dessa forma, tem-se a seguinte relação: unitário corresponde a menor escala encontrada (0,1 km²); a escala local equivale a sub-bacias; escala regional como a bacia hidrográfica; e as demais ao nível que estão classificadas.

Figura 2.4 - Relação escala espaço-temporal para os modelos sobre o ciclo da água e carbono.



Fonte: Produção do autor.

2.3.4 Modelo de avaliação de água e solo – SWAT

O modelo hidrológico SWAT foi desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) dos Estados Unidos no início da década de 1990. O modelo é uma ferramenta usada para avaliar, analisar e quantificar os impactos decorrentes das práticas de gestão de solo aos recursos hídricos e a produção de sedimentos em nível de bacias hidrográficas, bem como simular diversos cenários atuais e futuros (NEITSCH et al., 2011).

O SWAT é uma ferramenta semi-automatizada, que permite representar os diferentes processos físicos que ocorrem em bacias hidrográficas em uma base física, a partir de parâmetros espacialmente distribuídos (tipos de solos, uso e cobertura da terra, declividade e dados climáticos) (ABE, 2017). Este modelo é capaz de simular cenários atuais e futuros, seja pela ocorrência de processos naturais ou provocados pela intervenção humana. Além disso, segundo Arnold et al. (2012), é um modelo dinâmico,

semi-distribuído, que funciona em passo de tempo diário e é capaz de simular longos períodos de dados.

Em termos metodológicos, a modelagem no SWAT utiliza uma compartimentação da bacia hidrográfica, com base no Modelo Digital de Elevação (MDE), que possibilita a discriminação das condições topográficas relacionadas com informações pedológicas e de uso e cobertura da terra (LELIS, 2011). É a partir do MDE e por uma combinação da declividade, tipos de solos e uso e cobertura da terra, que são geradas as sub-bacias que são posteriormente redistribuídas em áreas de Unidades de Respostas Hidrológicas (*Hydrologic Response Unit – HRU*) (ARGUELLO, 2017).

Nas HRUs ficam armazenadas as respostas do balanço hídrico para as diferentes configurações dos tipos de classes de solo, declividade e uso da terra. Por isso, a estrutura do modelo SWAT é o diferencial em estudos do comportamento físico-químico e ambiental das bacias hidrográficas, pois considera diferentes partes do sistema que reflete nos fluxos de energia e nas interações dos processos hidrológicos (ARNOLD et al., 2012; ARGUELLO, 2017).

Segundo ARNOLD et al. (2012), o modelo trabalha com os componentes: clima, hidrologia, crescimento das plantas, sedimentos e nutrientes e pesticidas. Nesta tese, foram utilizados apenas dois componentes, categorizados como:

- a) Clima: sendo que as variáveis climáticas solicitadas pelo modelo são precipitação, temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar;
- b) Hidrologia: neste caso incluem os processos de (i) escoamento superficial e subsuperficial, (ii) infiltração, (iii) evapotranspiração e (iv) percolação. As simulações são baseadas na Equação 2.5 do balanço hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_i - Q_{surf_i} - ET_i - P_i - Q_{lat_i} - Q_{gw_i}) \quad (2.5)$$

Onde: SW_t é quantidade final de água no solo (mm); SW_0 é a quantidade inicial de água no solo (mm); R é a precipitação diária (mm); Q_{surf} é o escoamento superficial (mm); ET a evapotranspiração (mm); P a percolação de água (mm); Q_{lat} a quantidade de água escoada lateralmente (mm); e Q_{gw} a quantidade água que retorna ao curso d'água (mm);

- Escoamento Superficial: o modelo considera o método curva-número do SCS (*Soil Conservation Service*), que utiliza no cálculo do escoamento, conforme a Equação 2.6:

$$Q_{\text{surf}} = (R - I_a)^2 / (R - I_a + S) \quad (2.6)$$

Onde: R a precipitação diária (mm); I_a as perdas iniciais, incluindo a acumulação superficial, interceptação e infiltração anterior ao escoamento superficial (mm); e S um parâmetro de retenção que varia em relação às mudanças no tipo de uso do solo, manejo, inclinação e temporalmente, em função das variações da umidade do solo,

- Infiltração: considera a equação de Green e Ampt (1911), a qual admite que existe excesso de água na superfície, tendo como base a lei de *Darcy*,

- Evapotranspiração: o modelo realiza o cálculo da evapotranspiração dos processos de transpiração e evaporação das plantas e solo. O SWAT permite que a evapotranspiração seja estimada por três métodos diferentes: (i) método proposto por Hargreaves et al. (1985) que modela a evapotranspiração em função da radiação solar máxima e da temperatura do ar; (ii) o método proposto por Priestley e Taylor (1973) baseado na radiação solar líquida e a temperatura do ar; (iii) e por fim o método de *Penman-Monteith* (MONTEITH, 1965; ALLEN, 1986; ALLEN et al., 1989) que considera a radiação solar, a temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa do ar,

- Percolação: o SWAT simula a percolação através de uma técnica de propagação do armazenamento, combinado com um modelo de fluxo de água para até 10 camadas do solo.

2.3.5 Aplicações do modelo SWAT

Este modelo é uma ferramenta eficaz na avaliação de diferentes condições ambientais em escala de bacia hidrográfica. Bastante versátil que abrange vários componentes hidrológicos e agrônômicos, além de ter sido usado, incluindo análises de mudanças climáticas, cenários de uso e cobertura da terra, impactos de melhores práticas de gestão alternativa (BMPs), adoção de culturas de bioenergia, análise de impactos de transporte

de nitrato, sedimentos, nutrientes e/ou pesticidas (FUKUNAGA et al., 2015; LAMPARTER et al., 2016; YANG; ZHANG, 2016; JUNG; KIM, 2018).

Como exemplo, têm-se o estudo de Marhaento et al. (2017) sobre como as mudanças de uso e cobertura da terra provocam mudanças no balanço hídrico em uma bacia hidrográfica da Indonésia, Bacia do rio Samim de 277,9 km². Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, no qual os autores identificaram que as mudanças de uso e cobertura da terra são o principal motor para as alterações nos valores de vazão.

Yang et al. (2016) analisaram a eficiência do modelo SWAT na avaliação dos fluxos de água e carbono em ambiente tropical, que segundo os autores ainda necessitam de estudos que avaliem o seu desempenho nesses ambientes. Os autores concluíram que para executar as simulações nesses locais é necessário realizar a calibração do modelo, pois apenas com as informações padrões o modelo simula de forma razoável os elementos dos ciclos em questão.

Jung e Kim (2018) aplicaram o SWAT para avaliar como as mudanças potenciais de CO₂ impactaram na hidrologia da bacia hidrográfica de *Seolmacheon* (8,48 km²) na Coreia do Sul. Assim, os autores concluíram que usando concentrações de CO₂ como um parâmetro adicional no modelo SWAT é possível obter uma melhor compreensão do papel da evapotranspiração e da umidade do solo nas mudanças climáticas. Além de revelar que a concentração de CO₂ afeta a direção, magnitude e distribuição espacial das respostas hidrológicas.

No Brasil, os estudos utilizando o modelo SWAT iniciaram em 1999, data da primeira aplicação documentada (BOURDIN et al., 2014). Trabalhos que realizaram os procedimentos de calibração e validação do modelo tiveram resultados satisfatórios (RODRIGUES et al., 2015; PEREIRA et al., 2016; MONTEIRO et al., 2016; PONTES et al., 2016; FRANCO; BONUMÁ, 2017; PAZ et al., 2018; SANTOS et al., 2018).

Como o trabalho de Abe (2017), que utilizou o SWAT para avaliar o impacto da mineração de ouro na concentração de sedimentos na Bacia do Rio Crepori (13.600 km²) na Amazônia, em comparação com as mudanças de uso e cobertura da terra, obtendo bons resultados em suas simulações. A autora estimou que a concentração de sedimentos aumentou gradualmente com o aumento das áreas desmatadas.

Outro trabalho é o de Lelis (2011), que estudou o escoamento superficial e a produção de sedimentos na bacia do ribeirão São Bartolomeu (54,22 km²), localizada na Zona da Mata de Minas Gerais. Complementar a esta análise, a autora realizou duas análises de cenários de alterações no uso e cobertura da terra e climáticas futuras, baseadas nas previsões do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). O resultado desse experimento evidenciou que a área urbana é a principal responsável pela produção de sedimentos e escoamento superficial na bacia. As áreas de pastagem, foram aquelas consideradas como as de maior impacto ao ambiente, em relação a produção de sedimentos. E ambos os cenários o modelo sugeriu que a bacia se encontra sensibilizada em relação às mudanças climáticas.

2.4 Contribuição do sensoriamento remoto para as análises ambientais

No meio científico, a utilização de dados provenientes do sensoriamento remoto está cada vez mais difundido. Dada a sua capacidade de estudar e analisar o ambiente terrestre através de sensores que registram a interação da radiação eletromagnética com as componentes e objetos presentes no planeta Terra (NOVO, 1992). Cada elemento possui uma característica única de reflexão e emissão da energia eletromagnética, o que possibilita identificá-los. Portanto, o comportamento espectral de cada objeto ou alvo é dependente das suas propriedades físico-químicas e biológicas (BOULOMYTIS et al., 2011).

Dentro das ciências naturais, o sensoriamento remoto pode auxiliar, por exemplo, no monitoramento atmosférico (temperatura, precipitação, concentração de CO₂), no monitoramento de elementos da superfície terrestre (limnologia, uso e cobertura da terra, florestas), no monitoramento dos oceanos (temperatura da superfície do mar, concentração de clorofila, poluição), e no monitoramento da criosfera terrestre (gelo e neve nas regiões polares) (LORENZETTI, 2015).

Essas informações podem levar a melhores investigações científicas sobre os sistemas naturais, e seu uso está sendo satisfatório dentre as numerosas modelagens sobre esses sistemas (JENSEN, 2009). Modelos hidrológicos com base física e distribuídos, como o modelo SWAT, necessitam de uma grande quantidade de dados espacialmente distribuídos e de alta resolução temporal para representarem a área de estudo. Neste sentido, os dados resultantes do sensoriamento remoto são uma boa alternativa para

cumprir esses requisitos, em oposição aos dados convencionais baseados em pesquisa de amostragem de campo e em um número limitado de medidores que fornecem apenas dados pontuais (ABE, 2017).

Sendo assim, os dados do sensoriamento remoto trazem vantagens para as metodologias de impacto ambiental, fornecendo dados de entrada de longo prazo, permitindo a análise da dinâmica espacial e evolução dos principais componentes do sistema em análise ao longo do tempo (NIJKINK et al., 2017).

Assim, após definir qual o sistema ambiental a ser analisado, o pesquisador precisa saber quais serão as variáveis necessárias para o seu estudo, na Tabela 2.1 há exemplos de variáveis que são comumente usadas nesses estudos, os possíveis sistemas de sensoriamento remoto para obter tais informações.

Tabela 2.1 - Exemplos de variáveis usadas na modelagem e os sistemas de sensoriamento remoto potenciais para aquisição desses dados.

Variáveis	Sistemas de Sensoriamento Remoto Potenciais	Resolução Espacial	Resolução Temporal
Topografia (modelo digital do terreno)	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	30 m	-
Vegetação (NDVI, índice de área folia (LAI ou IAF), evapotranspiração)	Operational Land Imager (OLI)	30 m	16 dias
	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS16A2)	1 km	8 dias
	Multiangle Imaging SpectroRadiometer (MIS)	250 m a 1 km	1 a 2 dias
Condições atmosféricas (temperatura superficial, precipitação)	Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)	5 km	2 a 3 horas
	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	1 km	1 a 2 dias
	Thermal Infrared Sensor (TIRS)	100 m	16 dias
Solos e Rochas (umidade, composição mineral, taxonomia)	Soil Moisture Active Passive (SMAP)	10 km	3 dias
	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)	15 a 90 m	5 a 16 dias
	RADARSAT	9-100 m	1 a 6 dias
Água (cor, hidrologia de superfície, minerais em suspensão, material orgânico dissolvido)	Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT)	20 m (Multi) 10 m (PAN)	26 dias
	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)	1 km	1 a 2 dias
	IKONOS	1 m (PAN) 4 m (Multi)	3 dias
Uso da terra	Operational Land Imager (OLI)	30 m	16 dias
	Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)	1,1 km	12 horas
	Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT)	20 m (Multi) 10 m (PAN)	26 dias

Fonte: Adaptado de Jensen (2009).

3 DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ NO PERÍODO DE 1980 A 2016

3.1 Introdução

Nos últimos 50 anos, os recursos naturais vêm sofrendo processos de degradação ambiental com as ações humanas, o que acarreta em consequências na organização, na estrutura e nos serviços ecossistêmicos (CARVALHO et al., 2010), como por exemplo, as alterações na qualidade e quantidade de água nos reservatórios e na composição atmosférica com a emissão de gases do efeito estufa (SOUZA et al., 2020). As mudanças de uso e cobertura da terra geram impactos ambientais, uma vez que elas englobam e traduzem as ações antrópicas, através, por exemplo, do desmatamento para a criação e/ou ampliação de áreas de agropecuária e a expansão crescente e acelerada dos espaços urbanos.

Para elucidar essa situação, tem-se o bioma Mata Atlântica, que vem sofrendo, desde o século XVI, recorrentes alterações em relação a sua cobertura vegetal. Atualmente é consolidado em uma paisagem altamente fragmentada, caracterizada por áreas de remanescentes florestais, que correspondem apenas 12,4% da sua área, cercado por grandes áreas de pastagem, agricultura e centros urbanos (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2021). Além disso, no período de 1985 a 2015, este bioma apresentou um aumento anual de áreas não vegetadas de 1,3% ao ano (SOUZA et al., 2020), e para o período de 2018 a 2019 as taxas de desmatamento corresponderam a 27,2%, comparadas ao período de 2017 a 2018 (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2021).

As mudanças de uso e cobertura da terra são os principais determinantes das mudanças ambientais globais, sendo consideradas como a segunda atividade que mais contribui para a emissão de CO₂ para a atmosfera, ficando atrás apenas dos combustíveis fósseis (IPCC, 2014). Esse gás é um dos responsáveis pela regulação do efeito estufa, e com o seu aumento ocorre uma intensificação desse efeito acarretando em alterações climáticas, o que gera uma sequência de reações em várias estâncias, como o aumento do nível do mar, enchentes, secas extremas, ciclones, tempestades e extinção de espécies da fauna e flora (MOREIRA; GIOMETTI, 2008; SILVA; ROSA, 2016).

As projeções do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2014) apontaram que os principais efeitos dessas mudanças do clima já afetam e afetarão cada vez mais o Brasil e a América do Sul, algumas situações seriam: 1) aumento de 1.7°C para a América do Sul, e de até 6.7°C para o Brasil, até 2100¹; 2) Redução das taxas de precipitação em 22%, na região nordeste do Brasil e na parte oriental da Amazônia, e acréscimo de 25% no Sul e Sudeste, até 2100; 3) Aumento da evapotranspiração nas regiões semiáridas, associadas com a redução da precipitação, acarretará no aumento do risco de escassez de abastecimento de água; e 4) Alterações nas taxas de vazões e na disponibilidade de água já estão sendo observadas, sendo que as regiões sul e sudeste brasileiras serão as mais vulneráveis.

Estudos já demonstram esses apontamentos diretamente sobre o regime de chuvas, disponibilidade de água, além de comprometer a percepção de estacionaridade defendida por muito tempo (MILLY et al., 2008). Em algumas regiões do Brasil, como na Amazônia, já é possível observar a mudança dos regimes de chuvas e eventos extremos, além do prolongamento da estação seca (MARENGO et al., 2011; FU et al., 2013; MARENGO et al., 2017). Adicionalmente, estudos de projeção do clima para o final do século apontam tendências de redução do volume de chuva tanto durante a estação chuvosa quanto durante a estação seca (SPRACKLEN et al., 2012; MOORE et al., 2007). Dessa forma, vários problemas consecutivos são gerados, e se as atividades humanas não forem geridas de forma consciente e equilibrada, tais problemas podem ocasionar em maiores impactos por todo o mundo.

Dentro de uma bacia hidrográfica é notório os impactos gerados por essas mudanças, uma vez que a dinâmica nesse sistema ocorre de forma integrada, e seu comportamento é controlado em função de vários elementos que a compõe, como a litologia, relevo, solos, cobertura vegetal, fatores climáticos e humanos (SILVA et al., 2021). Elas têm sido amplamente utilizadas como unidades de estudo e planejamento, além disso, Silva et al. (2016) e Cantador (2015) concordam que atualmente existem desafios relacionados ao planejamento e a gestão desses sistemas, exigindo um entendimento

¹ O último relatório apresentado pelo IPCC (2021), mostrou que as taxas de temperatura já subiram cerca de 0.29°C a mais, na última década, do que o constatado no relatório apresentado em 2014.

não só territorial, mas também funcional, necessário uma avaliação de todos os elementos que à compõe, resultado em uma análise integrada da situação.

Frente a isso, os diagnósticos ambientais são ferramentas que auxiliam neste entendimento, sendo uma etapa importante para a proposição de mecanismos de planejamento e gestão adequada, principalmente quando se pretende realizar uma avaliação dos impactos ambientais, causados por diferentes atividades humanas, a fim de averiguar seu potencial de desenvolvimento atrelado ao uso sustentável de seus recursos naturais (SILVA et al., 2021).

Diante da quantidade de informações e dados necessários para a elaboração de um diagnóstico, fica evidente que a utilização de métodos práticos e eficientes são imprescindíveis para efetuar o trabalho da forma adequada. O uso de geotecnologias, para a verificação dos processos que ocorrem sobre a superfície terrestre, é uma boa escolha devido a sua precisão ao trabalhar com informações geográficas (CANTADOR, 2015).

As imagens de satélite por meio do Sensoriamento Remoto permitem a obtenção de dados sobre a superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. A utilização dessas imagens permite adquirir informações em diferentes escalas espaciais e temporais, como o uso e cobertura da terra, taxas de precipitação e temperatura, permitindo análises de grandes séries históricas de bacias hidrográficas, possibilitando o conhecimento sobre a dinâmica territorial ali presente (ARAÚJO et al., 2021).

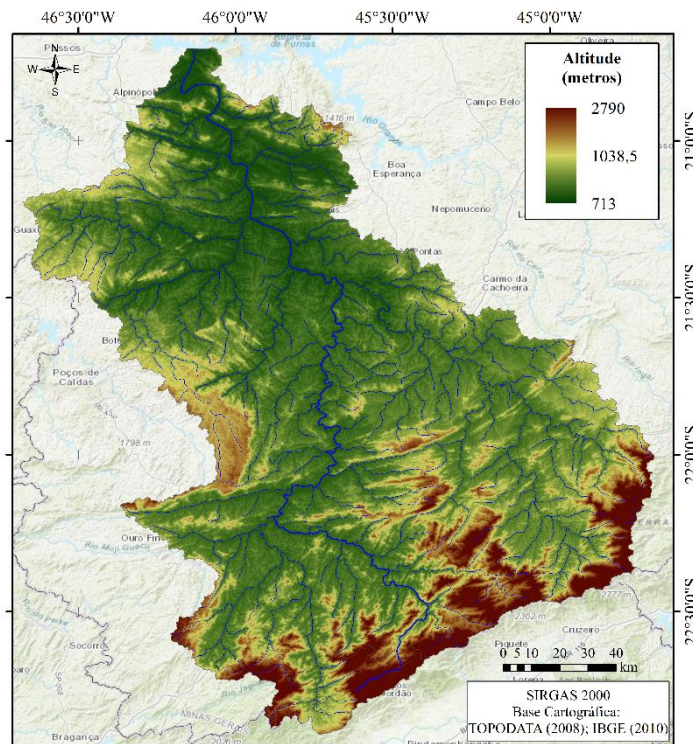
Nesse sentido este capítulo, visa realizar o diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, apresentando suas características climáticas, hidrológicas e de uso e cobertura da terra, para que essas informações possam servir de base para discussão nos capítulos posteriores.

3.2 Materiais e métodos

3.2.1 Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (BHRS) abrange uma área total de 25.135 km² e localiza-se entre os estados de São Paulo (SP) e Minas Gerais (MG), na região Sudeste do Brasil (Figura 3.1). O Rio Sapucaí nasce na Serra da Mantiqueira, no município de

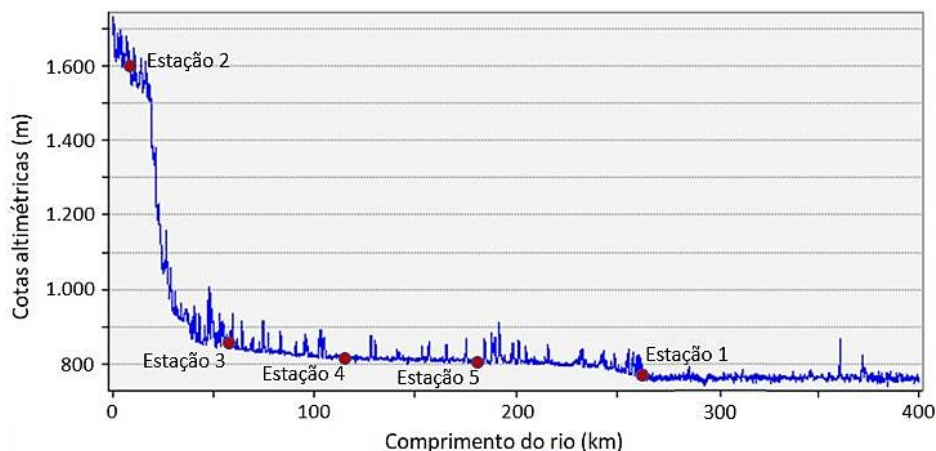
Figura 3.2 - Hipsometria da Bacia do Rio Sapucaí.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.3, está representado o perfil longitudinal do rio Sapucaí e as cinco estações fluviométricas da Agência Nacional das Águas (ANA). O perfil descreve a variação da altitude com a sua distância horizontal, e as maiores declividades do rio se encontram, principalmente, entre os 20 a 50 km a partir da nascente, que provocam uma maior vazão do rio, o que gera um aumento na planície de inundação, trecho com baixa declividade (REIS, 2018).

Figura 3.3 – Perfil longitudinal do rio Sapucaí, da nascente no município de Campos do Jordão (SP), até sua foz, desaguando no Rio Grande (MG).



Fonte: Produção do autor.

A BHRS apresenta as seguintes características morfométricas (Tabela 3.1) que auxiliam no entendimento da sua dinâmica e das suas relações fisiográficas com a hidrologia (ALMEIDA et al., 2017).

Tabela 3.1 - Características morfométricas da bacia do rio Sapucaí.

Características morfométricas	Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí
Área de drenagem (km ²)	25.095,79
Perímetro (km)	1.086,00
Comprimento axial da bacia (km)	244,14
Comprimento do rio principal (km)	399,91
Comprimento total dos cursos de água (km)	17.576,63
Densidade de drenagem (km/km ²)	0,70
Declividade máxima (%)	218
Declividade média (%)	16
Declividade mínima (%)	0
Altitude máxima (m)	2.795
Altitude média (m)	1.006
Altitude mínima (m)	774
Declividade do rio principal (%)	0,01
Fator de forma	0,42
Coeficiente de compacidade	1,92
Índice de circularidade	0,27

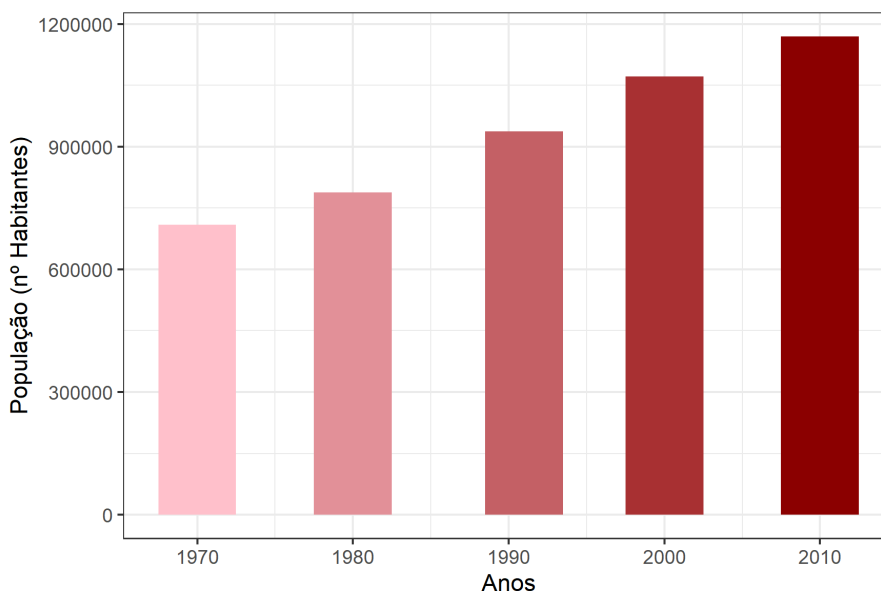
Fonte: Almeida et al. (2017).

O fator de forma de 0,42, o coeficiente de compacidade igual a 1,92 e o índice de circularidade de 0,27, indicam que a BHRS possui um formato irregular, sendo mais alongada, isso indica que existe uma menor possibilidade de chuvas intensas cobrirem simultaneamente toda a sua extensão territorial, e um maior tempo de concentração do escoamento (ALMEIDA et al., 2017). A declividade média do curso d'água indica a velocidade de escoamento de água no leito, e reflete, na magnitude dos valores de vazão máxima de enchente, o que também pode ser verificado pelo perfil longitudinal (Figura 3.3).

No Apêndice A está a síntese dos municípios que compreendem a BHRS, com suas respectivas áreas totais, porcentagem de área que pertence a bacia e número de habitantes, discriminados entre área urbana e área rural. Do total, 70 municípios, se encontram inteiramente dentro da bacia, totalizando 1.119.518 habitantes.

Na Figura 3.4 está sintetizado o crescimento populacional da BRS, os dados apresentados correspondem a somatória do número de habitantes dos municípios que possuem mais que 95% da sua área dentro da bacia, resultando em 73 municípios. A bacia apresentou um crescimento constante de, aproximadamente, 2% a cada 10 anos, resultando numa população, em 2010, com mais de 1.169.531 habitantes.

Figura 3.4 - Crescimento populacional da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.



Fonte: IBGE - SIDRA (2012).

O clima nessa região, pela classificação de *Köppen* (1936), é em sua grande maioria representado por Cwb, um clima úmido subtropical com inverno seco e verão ameno,

sendo que a temperatura média do mês mais quente não ultrapassa 22°C (ALVARES et al., 2013).

A bacia está inserida no domínio fitogeográfico da Mata Atlântica, apresentando na cabeceira do rio Sapucaí remanescentes de Floresta Ombrófila, nas encostas de Florestas Estacionais Semidecíduas, e por fim, matas ciliares, acompanhando os cursos d'águas. O uso da terra predominante na região é a agropecuária, nas regiões próximas a Serra da Mantiqueira há a pecuária de leite e corte em regime extensivo e semiextensivo, e uma agricultura pouca mecanizada, com plantações de café, banana, citrus, entre outras culturas perenes e anuais. Nas áreas mais baixas e planas da bacia, a presença da mecanização agrícola favorece o cultivo de maiores áreas de milho, café e pecuária extensiva (SIQUEIRA, 2017).

3.2.2 Descrição dos dados

O primeiro dado utilizado para dar prosseguimento no trabalho foi o modelo digital de elevação (MDE) do Projeto TOPODATA, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), gerado a partir do processamento digital do MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). No TOPODATA os dados do SRTM passaram por correções em relação a ausência de dados em alguns locais, além do refinamento do tamanho do pixel para ~30metros (VALERIANO; ROSSETTI, 2012). Este dado serviu para a delimitação da BHRS que foi base para a seleção dos demais dados utilizados. A delimitação da bacia considerou a referência determinada pela Agência Nacional das Águas (ANA), na qual o curso do rio Sapucaí nasce no município de Campos do Jordão (SP) e desagua no rio Grande, contribuinte da represa de Furnas (MG). No entanto, tal delimitação difere da utilizada pelo Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, a qual considera como foz do rio Sapucaí o entroncamento do rio com o rio Verde.

Os dados climáticos utilizados são diários de precipitação (pcp), temperatura máxima (Tmax), média (Tmean), mínima (Tmin) e evapotranspiração de referência (evp), para o período de 1980 a 2016. Essas variáveis são provenientes do banco de dados disponibilizados por XAVIER et al. (2016), e possuem resolução espacial de 0,25 graus em latitude e longitude para todo o território brasileiro. Esses dados derivam da interpolação espacial de dados observados, e são validados por um processo que

compara os dados coletados por estações meteorológicas (automáticas e convencionais), com as estimativas obtidas através de seis diferentes métodos de interpolação para cada variável climática. Esses dados disponibilizados dessa forma permitem que não se tenha falhas na base de dados.

Os dados de vazão foram obtidos através do site Hidroweb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>) da Agência Nacional das Águas (ANA). Na BHRS há um total de 29 estações fluviométricas, e desse total, 5 estão localizadas sobre o Rio Sapucaí.

Assim, na Tabela 3.2 tem-se o resumo dessas estações fluviométricas, com as datas da primeira e última medição e a porcentagem de falhas para o período de disponibilidade dos dados. As cinco primeiras estações são aquelas que estão sobre o Rio Sapucaí, sendo a número 1 a mais próxima da foz do rio.

Tabela 3.2 - Resumo das estações fluviométricas localizadas na BHRS.

Número no Mapa	Código Estação	Data Inicial	Data Final	Falhas (%)
1	61425000	05/07/1960	31/12/2016	16.29%
2	61250000	01/10/1934	31/12/2014	0.11%
3	61271000	09/10/1974	31/12/2014	0.21%
4	61305000	01/09/1930	31/12/2014	0.61%
5	61410000	14/06/1965	31/12/2014	0.33%
6	61262100	13/07/2015	31/12/2018	5.13%
7	61267000	13/01/1941	31/12/2014	3.22%
8	61285000	07/09/1935	31/12/2014	0.11%
9	61280000	17/06/1967	31/07/2014	0.18%
10	61295000	17/04/1937	31/12/2014	0.11%
11	61320000	18/04/1937	31/12/2014	1.68%
12	61343000	01/07/1941	31/12/2014	31.37%
13	61360000	02/07/1965	31/12/2014	9.00%
14	61370000	01/07/1937	31/12/2014	7.31%
15	61390000	15/04/1937	31/12/2014	0.11%
16	61460000	01/09/1933	31/12/2014	0.00%
17	61537000	16/11/1967	30/06/2015	2.10%
18	61510000	01/09/1933	31/12/2014	0.00%
19	61473000	07/09/1934	31/12/2014	0.24%
20	61487080	30/01/2013	31/12/2018	1.99%
21	61484000	01/10/1992	31/07/2014	8.37%
22	61500000	01/03/1934	30/09/2014	0.00%
23	61520000	01/05/1935	30/11/2014	5.08%
24	61530000	15/06/1935	20/01/2000	0.00%
25	61566000	20/01/2011	31/12/2018	4.69%
26	61565000	11/08/1939	30/04/2020	28.25%
27	61568000	01/03/1934	31/01/2019	11.16%
28	61610000	10/05/1967	31/01/2013	0.55%
29	61350000	13/09/1934	31/12/2014	1.07%

Fonte: ANA (2020).

Além dos dados hidro climáticos utilizou-se também dados de uso e cobertura da terra, do Projeto MapBiomas – Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. O dado compreende o período de 1985 a 2019, no formato matricial, com pixel

de 30x30 metros (PROJETO MAPBIOMAS, 2020). A legenda desse dado foi adaptada para este trabalho conforme a Tabela 3.3, nela consta as classes e a sua respectiva descrição.

Tabela 3.3 - Legenda do mapeamento de uso e cobertura da terra utilizado no trabalho de pesquisa, adaptada de MapBiomas.

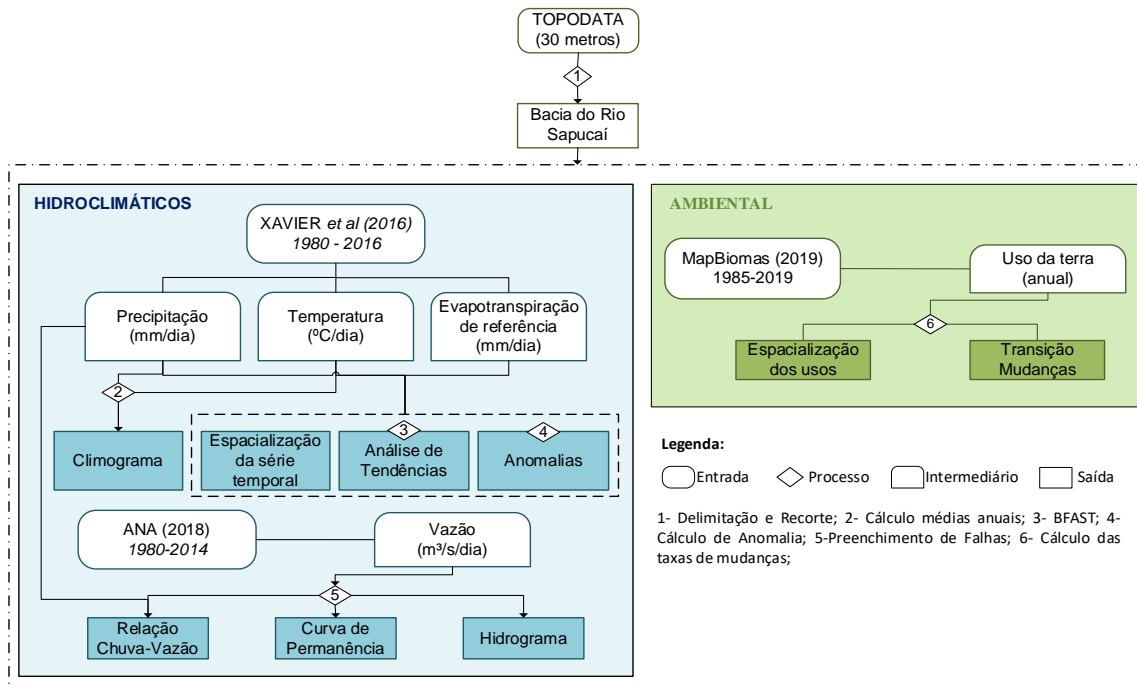
Projeto MapBiomas (Nível 2)	Legenda adaptada	Descrição
Floresta Natural	Floresta Natural	Floresta Ombrófila Densa, Aberta e Mista, Floresta Estacional Semidecídua e Decidual, e Formação Pioneira.
Floresta Plantada	Floresta Plantada	Espécies de árvores plantadas para uso comercial (por exemplo, Eucalyptus, Pinus e Araucária)
Formação Natural Não Florestal	Formação Natural Não Florestal	Formações arbustivas (savanas, pastagens, estepes, arbustos e herbáceas) e por rochas naturalmente expostas sem cobertura de solo, muitas vezes com presença parcial de vegetação rupícola e declive elevado.
Agricultura	Agricultura	Composta por áreas de cultivo temporário, com lavouras de curto a médio prazo, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita precisam ser replantadas. E também por áreas de cultivo perene, com lavouras de ciclo longo (mais de um ano), que permitem safras sucessivas sem a necessidade de nova safra.
Pastagem Mosaico de Agricultura e Pastagem	Pastagem	Áreas de pastagem, natural ou plantada, vinculadas à atividade agropecuária.
Área não vegetada	Área não vegetada	Infraestrutura urbana
Corpos d'água	Corpos d'água	Rios e lagos

Fonte: Produção do autor.

3.2.3 Processamento dos dados

A metodologia do trabalho está esquematizada na Figura 3.5, apresentando onde e como os dados foram utilizados no decorrer do trabalho e quais os resultados foram obtidos a partir dos processamentos realizados.

Figura 3.5 - Fluxograma das etapas da metodologia do diagnóstico ambiental.



Fonte: Produção do autor.

3.2.3.1 Dados hidroclimáticos

O primeiro passo foi a delimitação da área de estudo, a partir do MDE TOPODATA. Executado no *software ArcGis 10.6*, com a utilização da ferramenta *ArcHydro*. Essa delimitação serviu como base para todo o restante das análises hidroclimáticas e de uso e cobertura da terra.

Os dados climáticos de precipitação, temperatura e evapotranspiração diários de Xavier et al. (2016), foram a base para vários cálculos e análises, desse modo, os dados diários foram transformados em valores mensais, anuais e do período todo (1980-2016), esses cálculos foram realizados no *software RStudio*. Posteriormente os dados do período foram espacializados e organizados no *software ArcGis 10.6*.

Com os dados mensais de precipitação e temperatura, foi traçado o diagrama climático, segundo a metodologia de Walter e Lieth (1967), cuja proposta é representar, de forma resumida, a dinâmica das variáveis climáticas dado um determinado tempo, nesse caso de 1980-2016. A precipitação é representada pelo dobro da temperatura do ar, por exemplo, 20 mm na escala da precipitação corresponde a 10°C da temperatura. Esses

diagramas foram denominados por Walter e Lieth (1967) como Diagramas ecológicos do clima.

Posteriormente, sobre os valores mensais e anuais de temperatura e precipitação foi aplicado o algoritmo BFAST (*Breaks for Additive Season and Trend*) desenvolvido para detectar mudanças e ao mesmo tempo analisar tendências em séries temporais. O BFAST utiliza um modelo de decomposição aditiva, onde a série é dividida nos componentes: sazonalidade (S_t); tendência (T_t); e ruído (e_t), em um determinado tempo (t), sendo que a soma destes componentes se dá pela Equação 3.1 (VERBESSELT et al., 2010).

$$Y_t = T_t + S_t + e_t \quad (t = 1, \dots, n) \quad (3.1)$$

Onde Y_t são os dados observados no tempo t ; n representa o número de observações; T_t pode ser ajustado por modelos lineares por partes com inclinações específicas β_i e intercepta α_i em diferentes segmentos, dado a Equação 3.2.

$$T_t = \alpha_i + \beta_i t \quad (T_{i-1}^* < t \leq T_i^*) \quad (3.2)$$

Onde $i = 1, \dots, m$; m representa o número de pontos no componente de tendência, que são as mudanças ocorridas pela área; T_{i-1}^* é o tempo no ponto de quebra i ; dada a Equação 3.3.

$$S_t = \sum_{k=1}^K [\gamma_{j,k} \sin\left(\frac{2\pi k t}{f}\right) + \theta_{j,k} \cos\left(\frac{2\pi k t}{f}\right)] \quad (T_{j-1}^\# < t \leq T_j^\#) \quad (3.3)$$

Onde $j = 1, \dots, n$; n é o número de pontos de interrupção no componente sazonal; k é a ordem da função harmônica que define com maior precisão mudanças complexas. Neste trabalho, nas análises utilizou-se o valor “*harmonic*” para o parâmetro season, com nível de confiança de 0.05, considerado por Souza et al. (2017) como o modelo mais adequado.

Sobre os dados climáticos (precipitação, temperatura e evapotranspiração) também foi calculado as anomalias anuais, no *software RStudio*, com base na Equação 3.4, tomando como nível de confiança os valores de 2,5% (1,96), 5,0% (1,65) e 10% (1,28).

$$\text{Anomalia}_{(i,j)} = \frac{X_{(i,j)} - X_{(i,j),\text{média}}}{\text{Desvio}_{(i,j)}} \quad (3.4)$$

Em que, $X_{(i,j)}$ é o valor do acumulado mensal para precipitação e média mensal para temperatura; $X_{(i,j),média}$ são o acumulado ou média de 1980 a 2016; e $Desvio_{(i,j,trimestre)}$ é o desvio padrão do período.

As anomalias auxiliam na identificação de alterações extremas em uma série climatológica, e estas podem estar associadas aos fenômenos de *El Niño* e *La Niña*, assim ambos foram analisados em conjunto. Os anos de *El Niño* e *La Niña* foram obtidos junto ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que segue a metodologia apresentada em Trenberth (1997). Segundo esta metodologia, os anos dos fenômenos foram divididos entre intensidades forte (anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) > 1.5 °C), intensidade moderada (1.5 °C $>$ TSM $>$ 1.0 °C) e intensidade fraca (1.0 °C $>$ TSM $>$ 0.5 °C). Posteriormente, calculou-se e especializou-se a quantidade de anomalias em cada pixel.

O balanço hídrico climatológico foi baseado na metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), simplificado por Camargo (1962), assumindo uma capacidade de água disponível no solo (CAD) de 100 mm. Foram considerados os dados médios mensais de precipitação, temperatura média do ar e evapotranspiração. Calculou-se a evapotranspiração mensal corrigida (ETP) pela Equação 3.5.

$$ETP = 30 \times ET_t \times Cor \quad (3.5)$$

Onde ETP corresponde a evapotranspiração mensal corrigida; ET_t é a evapotranspiração mensal de referência, utilizada dos dados de Xavier et al. (2016); Cor o fator de correção estipulado por Camargo (1962) com base no fotoperíodo e no número de dias do mês.

Após isso foram obtidas as estimativas de armazenamento de água no solo (ARM), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), na escala mensal, em conjunto com a representação espacial.

Seguindo na análise dos dados hidro climáticos, passou-se para o trabalho com os dados das estações fluviométricas. Foi realizado o preenchimento de falhas nas cinco estações localizadas sobre o rio Sapucaí, pelo Método de Regressão Múltipla, descrito por Tucci

(2001), no qual as informações de uma estação serão correlacionadas com as observações correspondentes de postos vizinhos, por meio da seguinte Equação 3.6:

$$Y_m = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (3.6)$$

Onde k é o número de postos vizinhos considerados; x_1, x_2, \dots, x_k são as observações correspondentes registradas nos postos vizinhos; e b_0, b_1, \dots, b_k os coeficientes a serem estimados. As cinco estações não possuíam dados para o mês de dezembro do ano de 1988, desse modo esse período ficou sem preenchimento.

3.2.3.2 Dados ambientais

Na caracterização ambiental foi considerada apenas as análises do uso e cobertura da terra. Os dados do projeto MapBiomas (2020) foram adquiridos, em formato *Tiff*, diretamente pela plataforma do projeto² e, posteriormente, foram recortados para o limite da BHRS. Tal recorte foi realizado no *software ArcGis* 10.6, assim como a organização das classes de uso de acordo com a legenda pré-estabelecida e adaptada para esse estudo.

Dessa forma, foi possível realizar a espacialização e criação dos mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 1985 e 2019, e o gráfico de porcentagem de uso anual para o período todo da série histórica (1985-2019), esse último procedimento foi realizado no *software RStudio*.

Por fim, através de uma comparação direta entre as camadas anuais das classes de uso, pixel a pixel, calculou-se as taxas (área) de transição de cada classe, os procedimentos também foram realizados no *software RStudio*. Para esse processo foram estabelecidos os seguintes critérios: 1) Corpos d'água e afloramentos rochosos se mantiveram iguais ao longo do tempo e nenhuma outra classe poderia ter se tornado dessas categorias; 2) A classe Áreas não vegetadas, não poderiam ter uma transição para as demais classes, porém as outras classes, exceto aquelas do critério 1, poderiam se tornar Áreas não vegetadas.

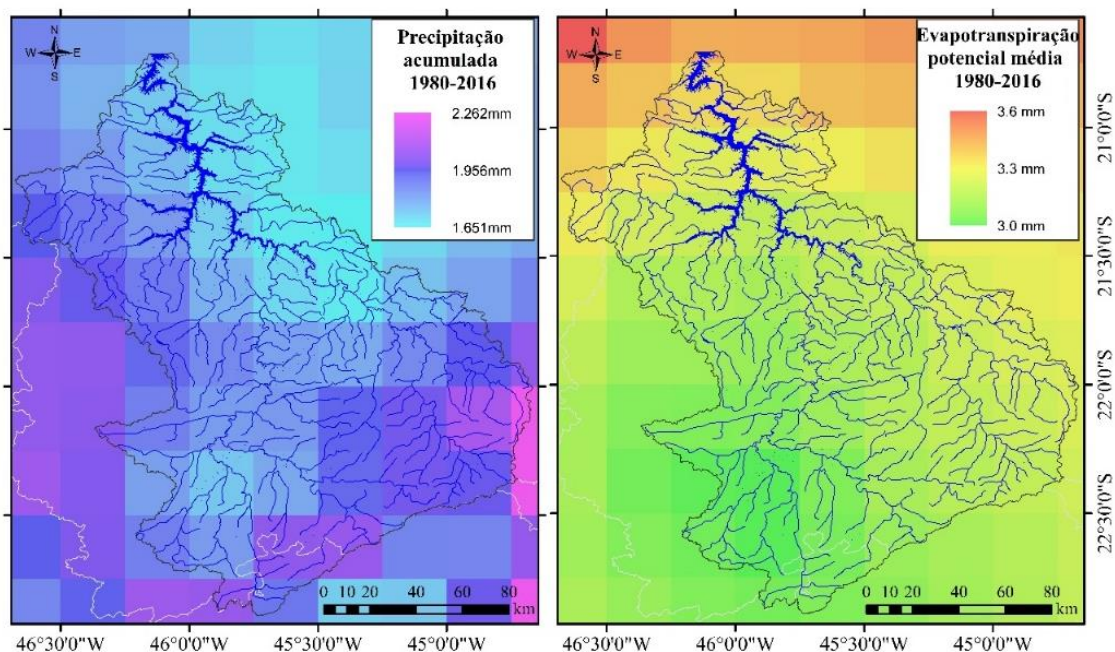
² Site para download dos dados: <https://mapbiomas.org/download>.

3.3 Resultados

3.3.1 Análise hidroclimática da bacia do rio Sapucaí

A Figura 3.6 mostra a precipitação diária acumulada e a evapotranspiração média para o período de 1980 a 2016 para a BHRS. Dessa forma, a precipitação da região variou entre 1.651 mm a 2.262 mm, sendo que os maiores valores se encontram à sudeste da bacia, e os mais baixos na parte central e norte, próximo a foz. A evapotranspiração apresentou valores entre 3.0 mm a 3.6 mm, sendo os valores menores localizados a sudoeste e os maiores próximos na foz.

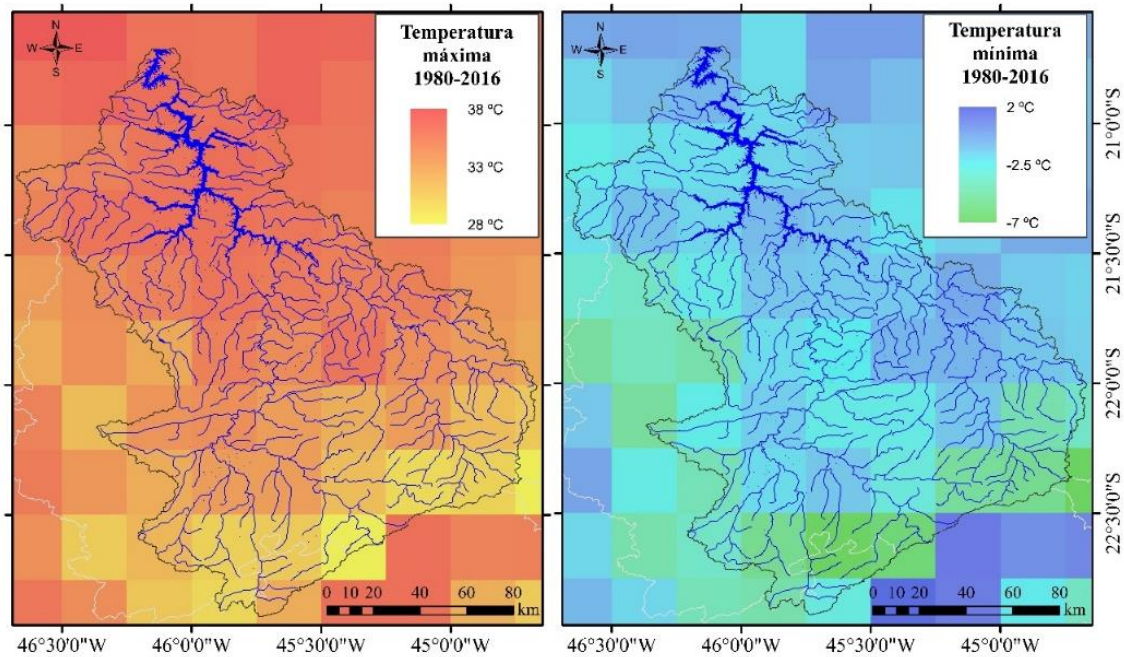
Figura 3.6 - Precipitação diária acumulada e evapotranspiração diária potencial média para o período de 1980-2016 na BHRS.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.7 está representado as temperaturas máximas e mínimas para o mesmo período. As temperaturas máximas variaram entre 28°C na cabeceira da bacia, a 38°C do meio da bacia para a foz, a mesma relação se deu para as temperaturas mínimas, que variaram de -7°C a 2°C.

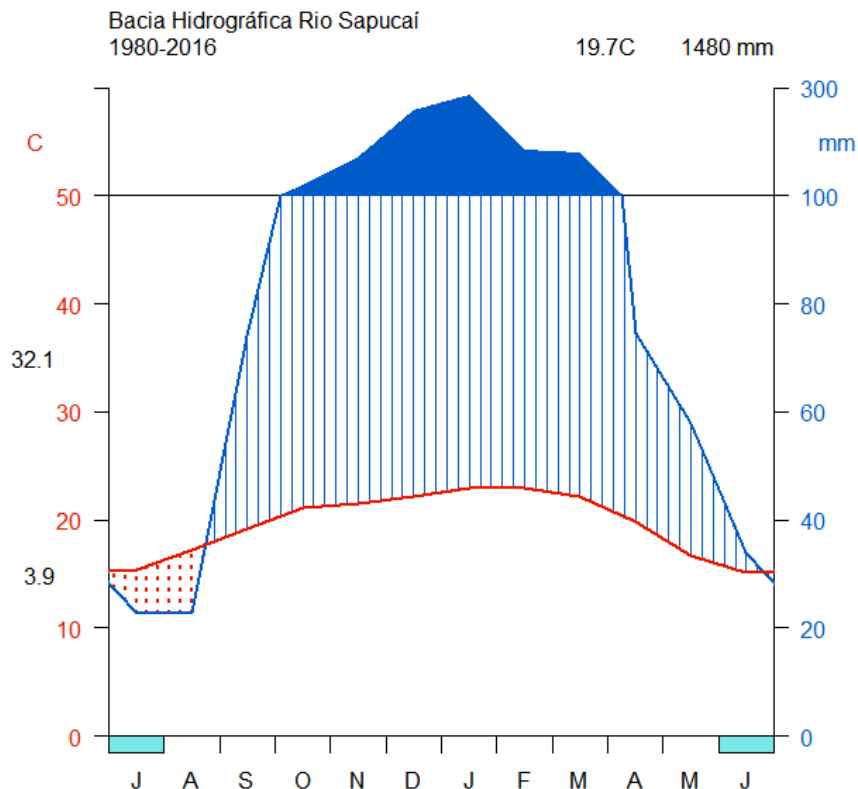
Figura 3.7 - Temperatura máxima e mínima para o período de 1980-2016 na BHRS.



Fonte: Produção do autor.

No diagrama climático de Walter e Lieth (1967), Figura 3.8, apresenta-se um breve resumo sobre as variáveis climáticas médias mensais, precipitação e temperatura, no período de 1980-2016 para a BHRS. O formato do diagrama corresponde, segundo os autores, ao clima subtropical úmido. Observa-se que a linha que representa as médias mensais de precipitação, nos meses de setembro a maio, localiza-se acima daquela da temperatura média mensal, o que caracteriza condições das estações úmidas, e o inverso caracteriza-se pelas estações secas, representadas pela área pontilhada. As temperaturas médias mensais do mês mais frio são superiores a 10°C e do mês mais quente são inferiores a 23°C, sendo que nos meses de junho e julho houve registros de geadas nas regiões mais altas da bacia, com temperaturas mínimas absolutas inferiores a 0°C e a média da temperatura para o período todo é de 19.7°C. O acumulado da precipitação para o período todo é de 1480 mm, sendo que a variação foi acima de 20mm para os meses mais secos, junho, julho e agosto, atingindo taxas de, aproximadamente, 300mm para os meses mais úmidos, dezembro, janeiro e fevereiro.

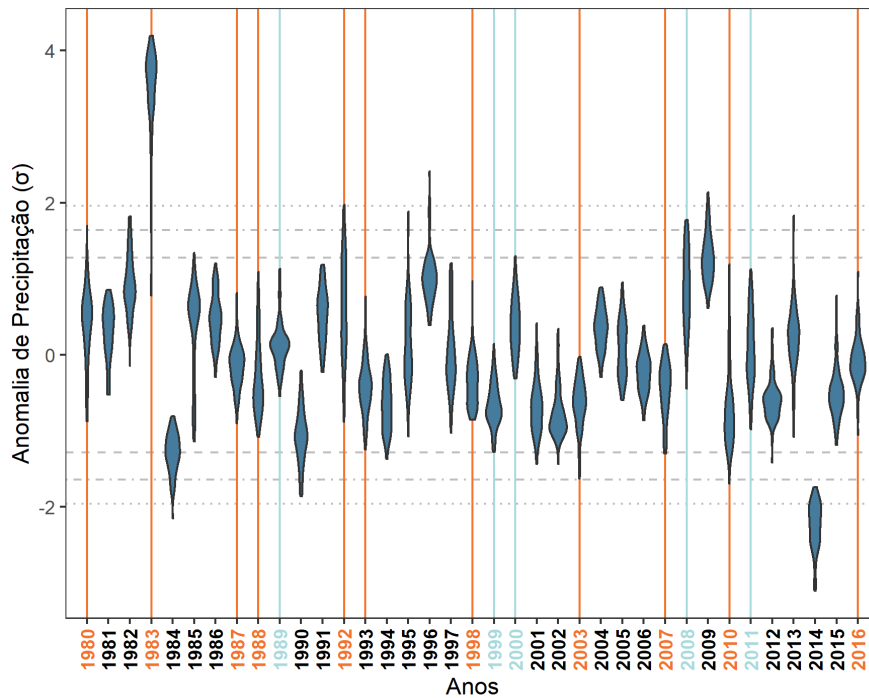
Figura 3.8 - Diagrama climático de Walter e Lieth (temperatura x precipitação mensal) durante o período de estudo de 1980-2016 para a Bacia do Rio Sapucaí.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.9 está representado os eventos de anomalia anual para a série histórica de precipitação, juntamente com os eventos de *El Niño* (cor laranja) e *La Niña* (cor azul). De 1980 a 2016, os anos considerados com intensidade forte são 1983, 1988, 1992, 1998 e 2016. Os de intensidade moderada são 1980, 1987, 1998, 2000, 2003, 2007, 2008, 2010 e 2011. E o de intensidade fraca os anos de 1993 e 1999. Para a precipitação houve dois eventos anômalo muito significativos, o primeiro, positivo, no ano de 1983, que coincidiu com a ocorrência de um evento forte de *El Niño*, e o segundo, negativo, no ano de 2014, que não correspondeu a nenhum dos dois eventos anômalo. Os anos de 1984, 1990, 1996, 2008 (ocorrência de *La Niña*) e 2009, também foram anos que apresentaram anomalias de precipitação, diferenciando-se da oscilação prevista na série histórica.

Figura 3.9 - Anomalia anual de precipitação para a Bacia do Rio Sapucaí, para o período de 1980 a 2016, com os anos de *El Niño* e *La Niña* em destaque.



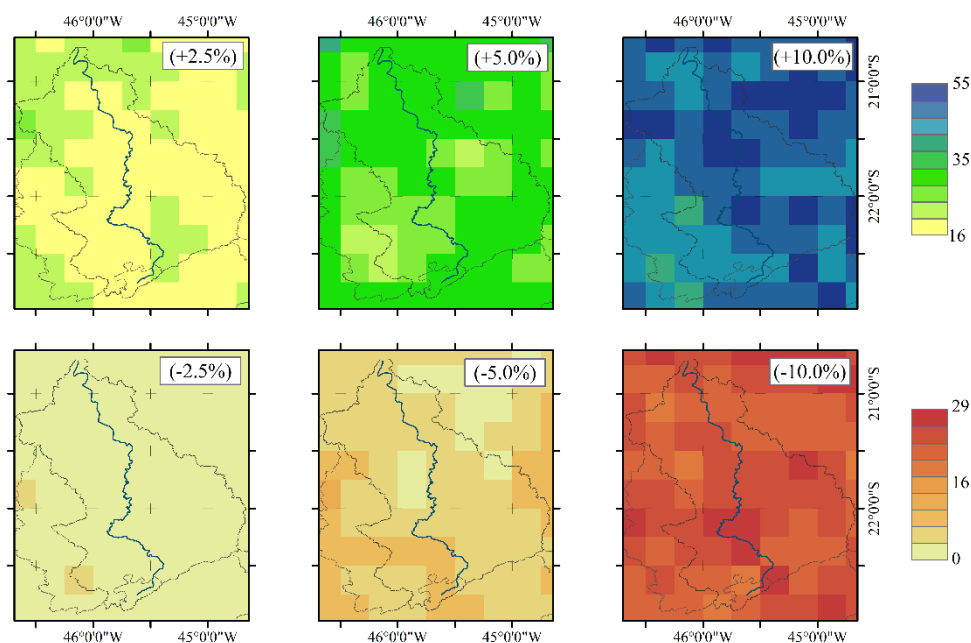
Fonte: Produção do autor.

Ao realizar a somatória mensal dos eventos anômalo de precipitação para a BRS obteve-se como resultado a Figura 3.10, representando a somatória positiva e negativa considerando os níveis de significância de 2.5, 5.0 e 10%. Para as anomalias positivas a ocorrência variou entre 16 e 55 meses, considerando o período de 1980-2016. Sendo que ao nível de significância de 2.5% os valores não ultrapassaram 30 meses e houve mais eventos na borda da bacia. Para 5% de significância, por quase toda a bacia a somatória máxima foi de 35 meses. Ao nível de 10% os valores máximos encontrados foram de 55 meses, principalmente na região central, próximo ao rio Sapucaí. Lembrando que as figuras indicam apenas a quantidade total de meses de ocorrência de eventos anômalo e não qual a data exata que eles ocorreram.

Os eventos negativos de precipitação, para nível de significância de 2.5%, não ultrapassaram a soma de 2 meses em toda a BRS, para 5% e 10%, atingiram somatórias máximas de 13 e 29 meses, respectivamente. Na região central da bacia foi o local que apresentou menores ocorrências de anomalias no período para o nível de significância

de 5%, e praticamente por toda a bacia houve eventos de anomalias altos, ao nível de significância de 10%.

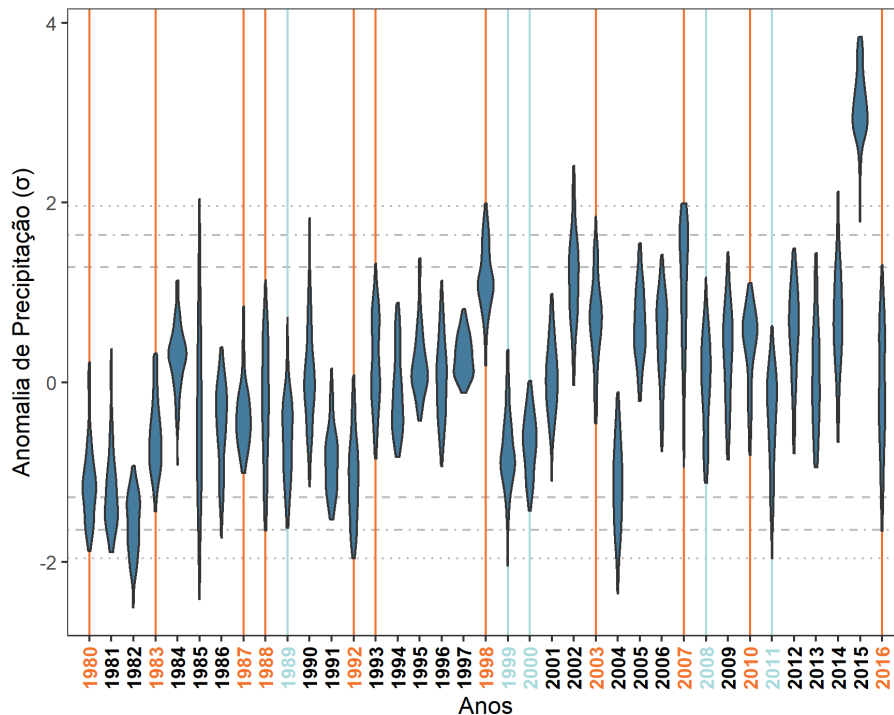
Figura 3.10 – Somatório mensal de eventos anômalo positivos e negativos de precipitação, com nível de significância de 2.5%, 5.0% e 10.0%.



Fonte: Produção do autor.

As anomalias de temperatura média estão representadas na Figura 3.11 para a série histórica de 1980 a 2016, como também em destaque os eventos de *El Niño* (laranja) e *La Niña* (azul), tendo a mesma classificação de intensidade descritas anteriormente. O ano de 1998, 2002 e 2015 foram os anos que apresentaram eventos anômalo positivos significativos, sendo que 1998 houve a ocorrência de *El Niño*, e o ano de 2015 apresentou-se bastante significativo. Para as anomalias negativas, os anos de 1982 e 2004 foram os considerados mais significativos, não coincidindo com anos dos fenômenos *El Niño* ou *La Niña*.

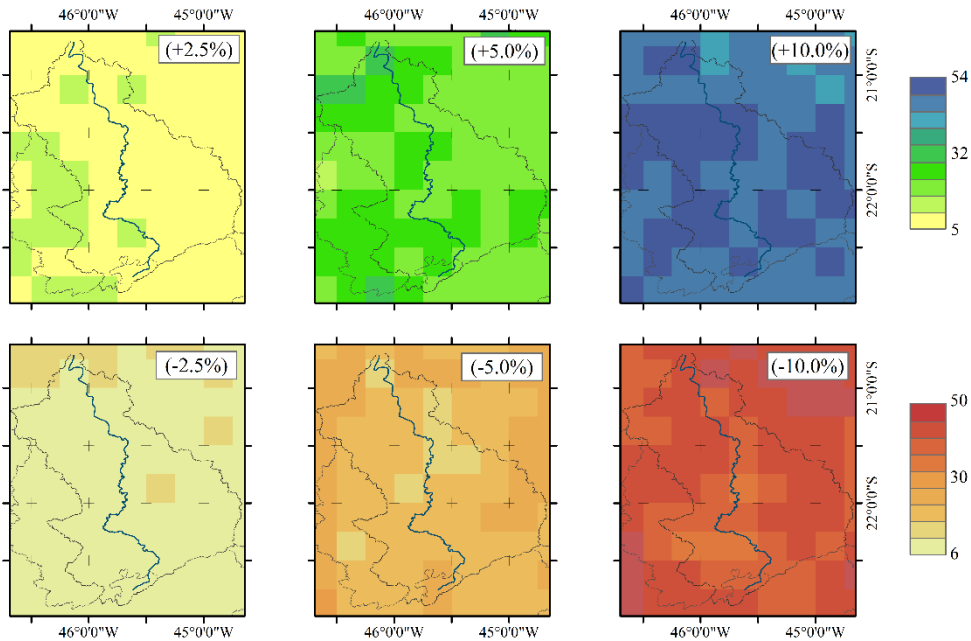
Figura 3.11 - Anomalia anual de temperatura para a Bacia do Rio Sapucaí, para o período de 1980 a 2016, com os anos de *El Niño* e *La Niña* em destaque.



Fonte: Produção do autor.

A somatória da ocorrência de eventos anômalos de temperatura média, positivos e negativos, para o período de 1980-2016, estão representados na Figura 3.12. Considerando o nível de significância de 2,5% positivo e negativo, as anomalias não ultrapassaram a somatória de 16 meses, para as duas situações. No nível de 5%, as anomalias positivas atingiram 32 meses, principalmente na parte oeste da BRS, e as anomalias negativas chegaram a 30 meses, distribuídos por toda a região. Com 10% de nível de significância positivo, atingiu somatório de 54 meses de ocorrência de eventos anômalos, principalmente na região noroeste da bacia. E com 10% de significância negativo, chegou a atingir 50 meses, sendo que as maiores ocorrências acontecerem também na região noroeste e sudeste da área de estudo.

Figura 3.12 - Somatório mensal de eventos anômalos positivos e negativos de temperatura média, com nível de significância de 2.5%, 5.0% e 10.0%.

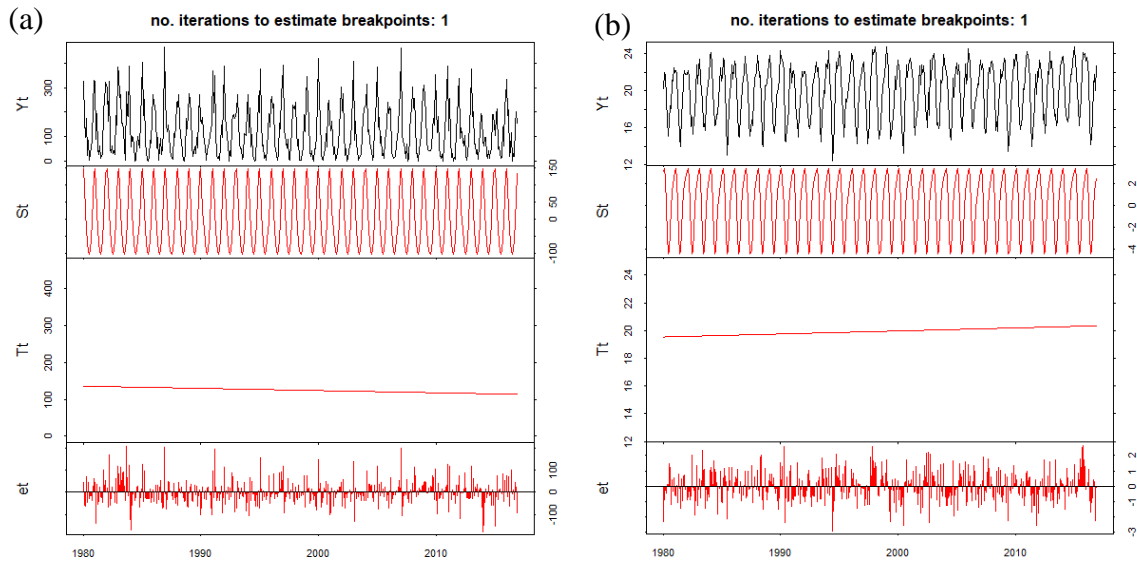


Fonte: Produção do autor.

Ao decompor o comportamento da série histórica de precipitação, temperatura média e evapotranspiração de referência, nos componentes de tendência, sazonalidade e ruído, resultantes da execução do algoritmo BFAST, foi possível analisar se houve ou não mudanças compreendidas no período sazonal da BHRS. Os resultados apresentados são compostos pelo valor da série temporal (Y_t), a sazonalidade esperada dada pelo algoritmo (St), a tendência (Ty) com indicação de quebra (quando houver), e o ruído da série (et).

Para as séries de precipitação e temperatura, conforme Figura 3.13, foi possível verificar que, ambas séries, apresentaram sazonalidade nos dados, e no caso da precipitação (a), verificou-se uma tendência negativa, e para a temperatura média (b), uma tendência positiva, no entanto, em nenhum dos dois casos o algoritmo encontrou ponto de quebra.

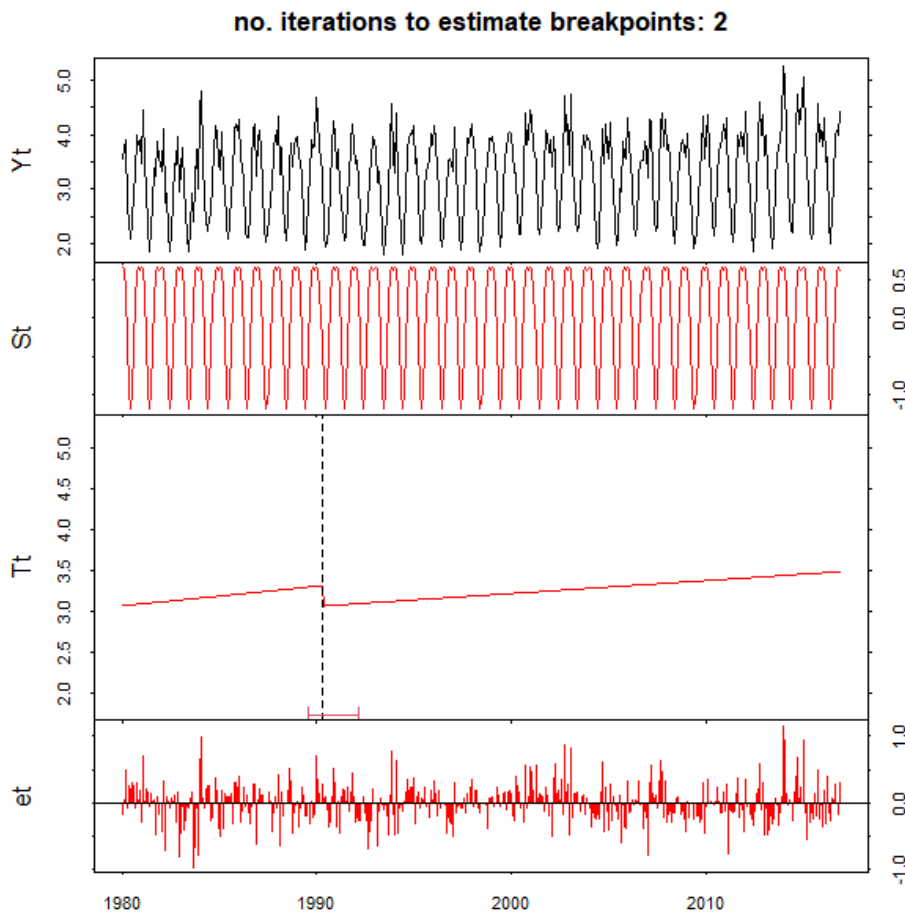
Figura 3.13 - Resultado do algoritmo BFAST aplicado para as séries históricas de precipitação (a) e temperatura média (b), da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (1980-2016).



Fonte: Produção do autor.

Ao analisar os resultados obtidos para a evapotranspiração de referência, o algoritmo também encontrou uma sazonalidade nos dados, e uma tendência positiva para a série Figura 3.14. Também é possível verificar que houve uma quebra negativa no ano de 1992, ou seja, a linha de tendência (anterior à linha tracejada) é rompida por um forte declínio, e em seguida volta a subir.

Figura 3.14 - Resultado do algoritmo BFAST aplicado para a séries histórica de evapotranspiração de referência, da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí (1980-2016).



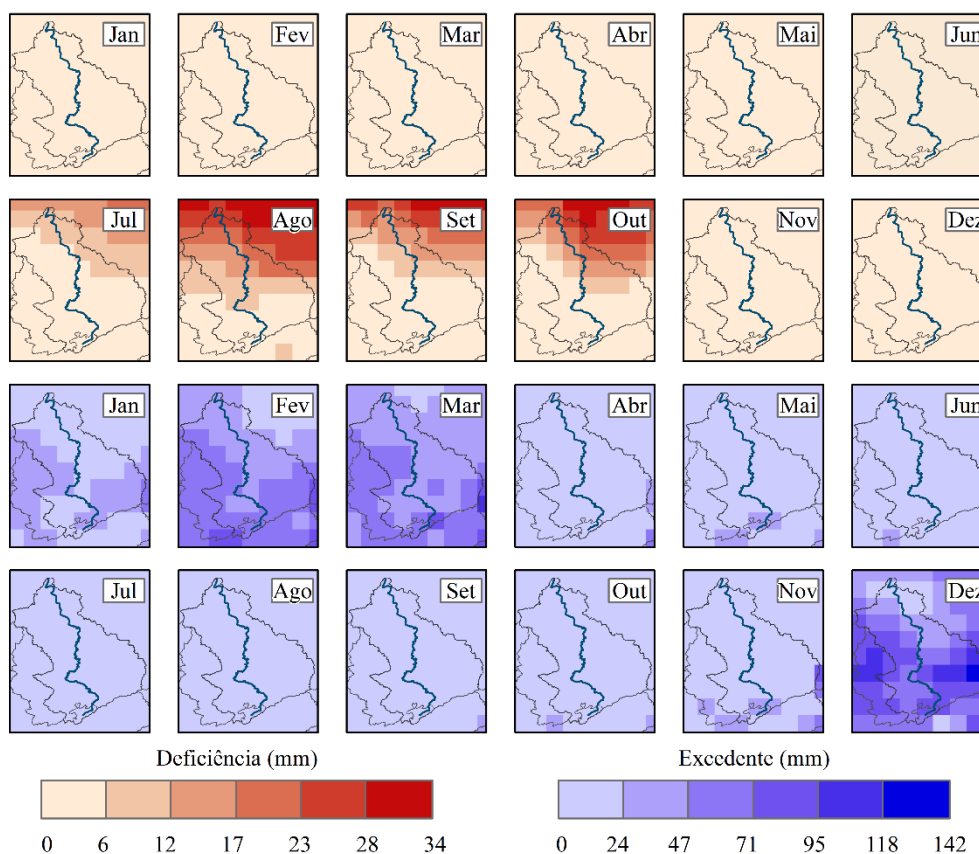
Fonte: Produção do autor.

Observando os resultados do balanço hídrico climatológico na Figura 3.15, nota-se que a BHRS apresentou deficiência hídrica nos meses de julho a outubro, com uma variação de 0 a 34mm. Os meses de julho e setembro, foram os que apresentaram as menores taxas de deficiência, com valores máximos de 11 e 23mm, respectivamente. Os meses de agosto e outubro foram aqueles que apresentaram as maiores taxas de deficiência hídrica, atingindo valores de 28 e 34mm. Em todas as situações, os maiores valores foram registrados na região nordeste da bacia, e no mês de agosto houve registros de valores também na área central, próximo ao curso do rio Sapucaí.

Em relação ao excedente hídrico, apenas os meses de dezembro a março apresentaram valores maiores que 24mm, sendo o mês de dezembro atingindo valores de até 142mm

nas áreas da borda da bacia, e na sua foz os menores valores. O mês seguinte, janeiro, foi o que registrou as menores taxas, não ultrapassando 47mm, novamente valores presentes na borda da bacia. Fevereiro e abril foram meses semelhantes, atingindo valores máximos de 71mm, por toda a área da BHRS.

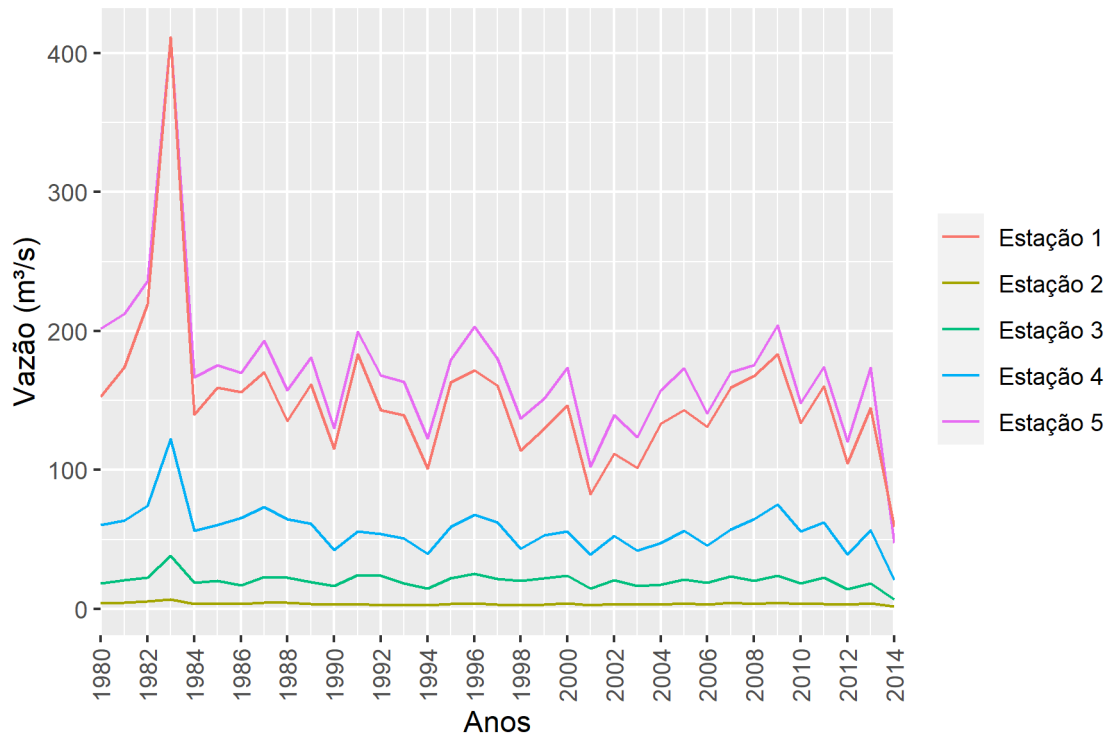
Figura 3.15 - Balanço Hídrico Climatológico mensal da bacia do Rio Sapucaí, para o período de 1980 a 2014.



Fonte: Produção do autor.

A bacia possui um total de 29 estações fluviométricas, distribuídas conforme apresentado na Figura 3.16, a maior parte delas se encontram na região sul e o Rio Sapucaí possui um total de 5 estações sobre ele, sendo que a última estação não está localizada em sua foz, mas próximo a confluência com o rio Verde.

Figura 3.17 - Taxas médias anuais de vazão das estações fluviométricas sobre o rio Sapucaí.

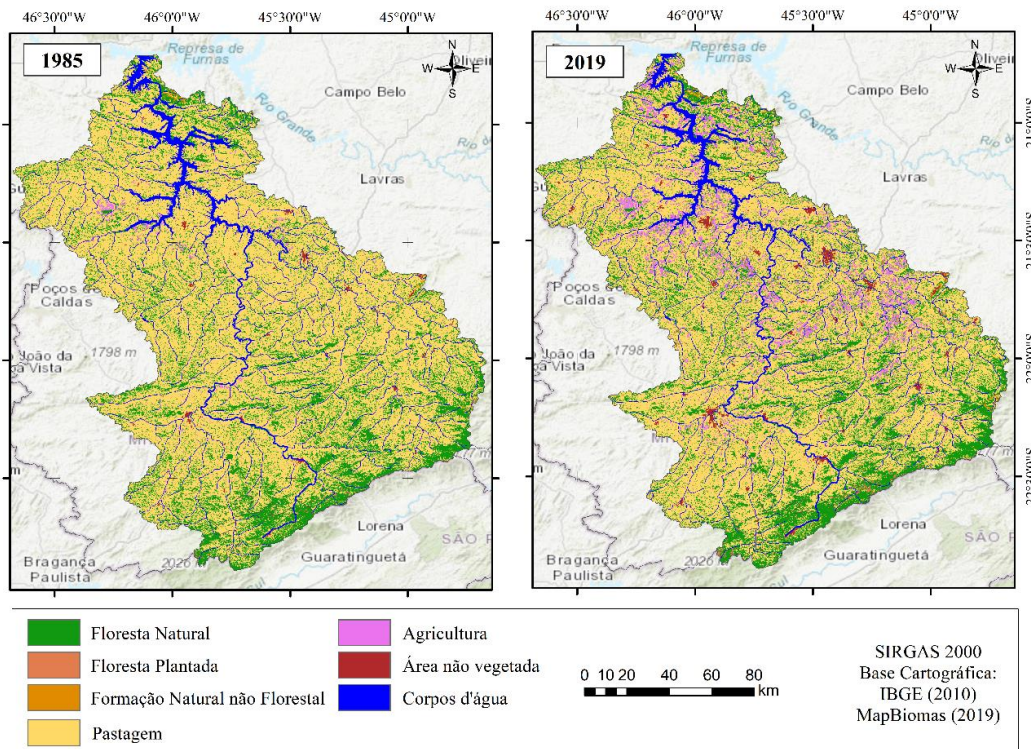


Fonte: Produção do autor.

3.3.2 Análise ecossistêmica da bacia do rio Sapucaí

O uso e cobertura da terra da BRS é composto em sua grande maioria por pastagem, conforme espacializado na Figura 3.18. E em 34 anos, não houve muitas mudanças em toda a bacia, visualmente, apenas as áreas não vegetadas, que correspondem as manchas urbanas, apresentaram crescimento.

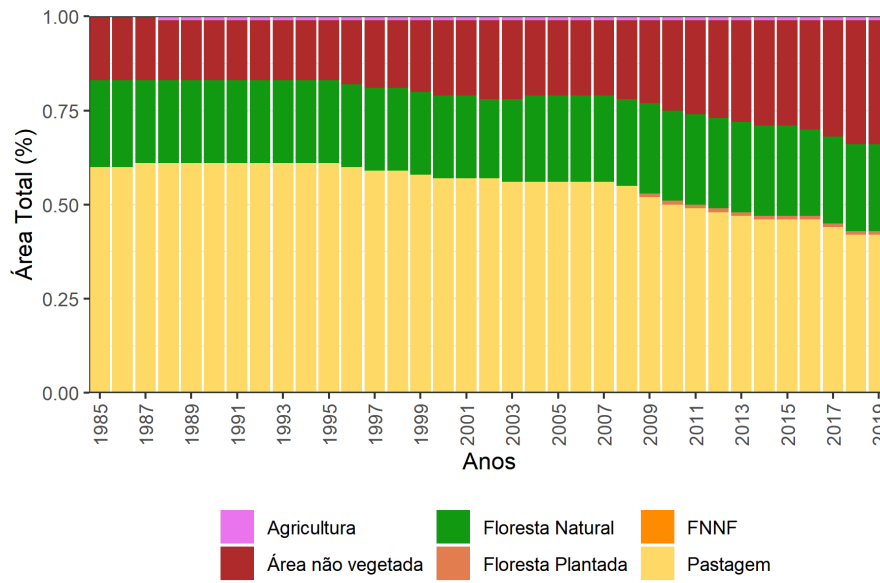
Figura 3.18 - Uso e cobertura da terra da bacia do Rio Sapucaí, para os anos de 1985 e 2019.



Fonte: Produção do autor.

Na Figura 3.19 está discretizado a porcentagem de cada classe de uso por ano, para o período de 1985 a 2019. Novamente, fica evidente que a bacia é composta, majoritariamente, por áreas de pastagem, atingindo valores maiores que 50% até 2010, e maiores que 40% para os anos posteriores. A classe floresta natural, é uma classe bem consolidada, que se manteve em torno de 25% da área total, em todo o período da série histórica.

Figura 3.19 – Percentual de cada classe de uso e cobertura da terra para a BHRS.



Fonte: Produção do autor.

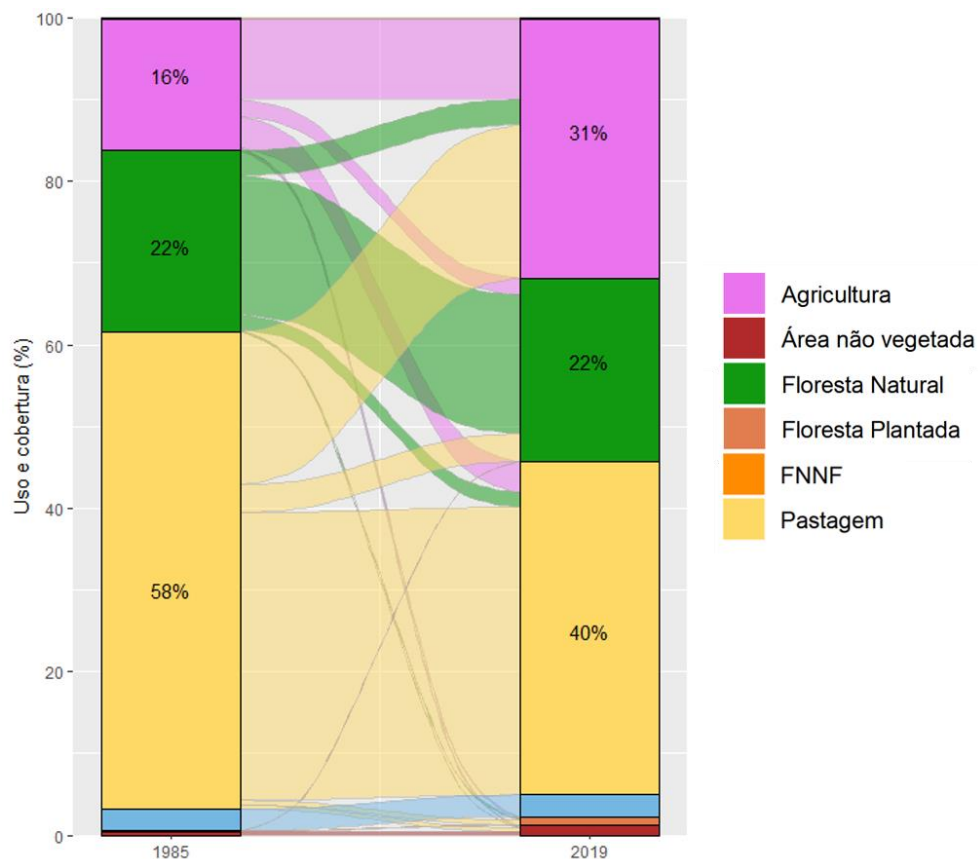
Apesar da estabilidade na dinâmica de uso e cobertura da terra na região, no ano de 2008 foi quando pequenas alterações começaram a aparecer, houve o crescimento das áreas de floresta plantada na região, principalmente na região sudeste da bacia, nas áreas com maiores altitudes. Como também o decréscimo das áreas de pastagem, iniciando em 1985 com 58% da bacia coberta por esta classe e finalizando em 2019 com 40%. As áreas não vegetadas receberam um crescimento acelerado em 2008, cuja expansão também foi registrada na Figura 3.18.

A fim de entender como ocorreram as mudanças de uso e cobertura da terra na região, com a Figura 3.20 é possível verificar as transições dos usos de 1985 para a atual configuração de 2019. Com esse resultado nota-se que a quantificação do uso se manteve durante a série histórica, porém variações interessantes ocorrem no período de 34 anos. A classe Agricultura teve um crescimento de 15% das suas áreas, sendo que, aproximadamente, 19% são oriundas das Pastagens e 3% das Florestas Naturais. No entanto, houve também uma perda de 6.25% dessa classe para as demais.

A classe Floresta Natural se manteve com o mesmo percentual de área, ao se comparar os anos de 1985 e 2019, porém isso aconteceu devido as transições de perdas e ganhos ocorridas durante a série histórica. A Pastagem foi a classe com mais perda de área entre

todas elas, com uma perda total de 18%, principalmente para a classe de Agricultura, como já citado anteriormente, assim como também ganhou áreas dessa mesma classe e da Floresta Natural.

Figura 3.20 - Transição do uso e cobertura da terra do ano de 1985 para 2019, na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí.



Fonte: Produção do autor.

3.4 Discussão

Com a realização do diagnóstico sobre as condições hidroclimáticas e ambientais da BHRS, para o período de 1980 a 2016, verificou-se que a bacia possui características interessantes em relação a sua dinâmica climática e sua configuração de uso e cobertura da terra. A região se mostrou coerente com outras informações encontradas na literatura, como a dinâmica da evapotranspiração, da precipitação e da temperatura.

As maiores taxas de precipitação, estão próximas a nascente do rio Sapucaí, juntamente com os menores valores de evapotranspiração (Figura 3.6). Essa relação inversa, pode

ser explicada fisicamente, pela influência de outras variáveis meteorológicas, como a variação da radiação incidente e a umidade relativa do ar (COLLISCHONN; TUCCI, 2014). Assim, quanto maior a precipitação, maior será a cobertura de nuvens e menor será a radiação solar que chega na superfície, como também o aumento sobre a umidade relativa, o que acarreta na diminuição da evapotranspiração.

A temperatura também influencia de forma direta a evapotranspiração, assim ao comparar os valores de temperatura da Figura 3.6 com as taxas de evapotranspiração da Figura 3.7, nota que nas regiões onde a evapotranspiração é maior, a temperatura também é, isso ocorre porquê quanto menor for a temperatura, maior a pressão de saturação do vapor, e conseqüentemente, menores taxas de evapotranspiração (COLLISCHONN; TUCCI, 2014).

O período de verão na BHRS ocorre de dezembro a março (Figura 3.8), o que corresponde aos períodos mais chuvosos e com isso menores são as taxas de evapotranspiração, isso está relacionado com a Zona de Convergência do Atlântico Sul que rege as taxas de precipitação nessa região. Em contrapartida, no período de inverno, de junho a agosto, com temperaturas menores é quando as taxas de evapotranspiração também caem.

Esses padrões podem ser alterados em anos de anomalias climáticas, que são alterações extremas em uma série climatológica, o que pode gerar impactos em diferentes escalas, quer seja em âmbito social, ambiental ou econômico. Segundo o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2015), o principal impacto encontrado nas literaturas científicas são aquelas relacionadas com o regime de chuvas, que podem estar associadas aos fenômenos de *El Niño* e *La Niña*.

Ao analisar a possibilidade de ocorrência de eventos anômalos para o período de 1980 a 2016 na BHRS, algumas anomalias foram encontradas, como é o caso do ano de 1983 que foi coincidente com o forte evento de *El Niño*. Vários estudos apontaram que este foi um evento que resultou em uma alta concentração de chuvas na região sul e sudeste do Brasil (KAYANO; MOURA, 1986; DESSAY, et al., 2002; ROSSATO et al., 2005). Isso também pode ser verificado para a BHRS, na Figura 3.9 fica evidente como as taxas de precipitação são maiores do que aquelas apresentadas ao longo da série histórica como um todo.

Em compensação, no ano de 2014, houve uma redução das taxas de precipitação (Figura 3.9), porém não foi coincidente com nenhum evento anômalo. Esse período de seca começou no verão de 2014, e foi resultado da ausência de eventos de Zona de Convergência do Atlântico Sul, um dos principais mecanismos responsáveis pela produção de chuva sobre a região sudeste do Brasil (COELHO et al., 2016). O que resultou também nas altas temperaturas que ocorreram posteriormente no ano de 2015, atingindo mais de 2.5°C na média, em algumas regiões brasileiras (MARENGO; ALVES, 2015), fato também registrado pela Figura 3.11. E de modo geral, para o período todo foram registrados mais meses de ocorrência de eventos anômalos positivos para precipitação (Figura 3.10) e mais eventos negativos para a temperatura (Figura 3.12).

Com as análises de tendência da série histórica de precipitação, temperatura (Figura 3.13) e evapotranspiração (Figura 3.14), verificou-se que os padrões de chuva não apresentaram tendência significativa, apesar das anomalias encontradas. Já a temperatura apresentou um aumento na sua tendência, o que vai de acordo com os relatórios mundiais de mudanças climáticas (IPCC, 2014), e indica que a BHRS já está exposta a essa situação.

Essas tendências também foram encontradas por Silva (2018) para a região do sul de Minas Gerais, assim como a tendência positiva para a evapotranspiração. No entanto, apenas para a evapotranspiração as análises estatísticas apontaram um ano de quebra de tendência, em 1992, que correspondeu ao ano da ocorrência de evento *El Niño*, que embora fraco, afetou vários estados brasileiros com as altas taxas de precipitação. Na região sudeste, próximo a nascente do Rio Sapucaí, de setembro de 1992 a janeiro de 1993 foram registradas chuvas acima da média, com taxas de precipitação durante o ano todo (MINUZZI et al., 2006).

Esses fatos podem influenciar sobre a disponibilidade hídrica da região, que segundo Pereira et al. (2002) pode ser quantificada através do balanço hídrico climatológico, que evidencia as variações temporais dos períodos com déficit ou excedente hídrico. Na BHRS os períodos de excedente hídrico (Figura 3.15) corresponderam aos meses de verão, de dezembro a março, com os maiores índices pluviométricos (Figura 3.8), posteriormente o balanço é estabilizado, voltando a se alterar com o déficit hídrico a

partir de julho aumentando até outubro (Figura 3.15), correspondendo aos meses com os menores valores de precipitação e temperatura (Figura 3.8). Essas informações foram compatíveis com os dados do balanço hídrico disponíveis no site do INMET (2020) para as estações de Campos do Jordão – SP e W46S22 (E) – MG, que estão dentro da área da bacia de estudo.

O excesso de água ou o déficit hídrico traz impactos diretos na vegetação e nas taxas de vazão. Como exemplo, na Figura 3.17, o ano de 1983 foi o que apresentou maiores valores de vazão para todas as estações, esse ano foi o qual registrou o evento forte de *El Niño* (1992-1993), que aumentou as taxas de precipitação citado anteriormente. Em contrapartida, o ano de 2014, foi o com menores taxas de vazão, representando também o início dos eventos de seca.

Vale lembrar que a configuração do uso e cobertura da terra também influenciam sobre as condições de evapotranspiração, na interceptação da precipitação (MACEDO et al., 2016; GOTARDO et al., 2018) e, por conseguinte, nas taxas de vazão (ANDRÉASSIAN, 2004). Porém, a magnitude dessas mudanças é influenciada por outros fatores, como tipo de vegetação, idade da cultura, topografia, precipitação média anual, espécies de culturas, proporção de mudança de cobertura (LIU et al., 2016; FILOSO et al., 2017).

A configuração do uso e cobertura da terra da BHRS encontrada neste estudo, também foi relatada pelo Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Sapucaí (COPASA, 2010), que afirma que esta composição é decorrente do seu histórico de ocupação e degradação do bioma Mata Atlântica.

Apesar da BHRS apresentar áreas urbanas (classe Área não vegetada) menores que 2% da área total, a bacia é densamente povoada, com um grau de urbanização de 77%, o que pode trazer impactos na disponibilidade hídrica da bacia, com o aumento do uso consuntivo da água pela população (CANTADOR, 2015), além da impermeabilização do solo, que acarreta na diminuição expressiva da capacidade de infiltração de precipitação e concomitante aumento do escoamento superficial, refletindo em mais oscilação nos picos de maior e menor vazão (ARAGÃO et al., 2017).

A maior parte da bacia é composta por pastagem e agricultura, essas classes são as que mais exerceram pressão de mudança na região (Figura 3.20), e o desmatamento das

áreas de Floresta Natural foram as que mais se transformaram nessa nova categoria. Essa retirada da cobertura florestal reduz a evapotranspiração, aumentando o escoamento e o fluxo imediato; que influenciará nas taxas de precipitação (DEBORTOLI et al., 2017) promovendo a degradação do solo com consequente redução na sua estrutura afetando diretamente a capacidade de retenção de água (NYBERG et al., 2012).

Porém, apesar dessa redução da floresta natural, a sua proporção em relação a área total se manteve constante ao longo do período de análise (Figura 3.19), ou seja, houve uma regeneração da vegetação secundária, isso indica que essa classe contribuiu para a regulação da temperatura e para manter as taxas de infiltração, reduzindo o escoamento superficial (ZELLWEGER et al., 2020).

3.5 Considerações finais

Com o levantamento dessas informações sobre os aspectos hidroclimáticos e de uso e cobertura da terra da BHRS foi possível avaliar a dinâmica desses processos e entender o comportamento da bacia durante este período para prosseguir para análises mais detalhadas sobre ela.

De modo geral, a bacia é um local interessante para estudo devido a sua localização geográfica, com a nascente na Serra da Mantiqueira, e a foz na represa de Furnas, contribuindo fundamentalmente para o seu abastecimento. Isso delimita duas situações bem contrastantes, e que influenciam em todos os processos analisados.

Os resultados mostraram que a BHRS já se encontra exposta as mudanças climáticas previstas pelas tendências mundiais, o que pode trazer impactos para a dinâmica do ciclo hidrológico. Viu-se que a precipitação já possui uma leve tendência a diminuir e a temperatura aumentar, o que pode trazer consequências para o aumento da evapotranspiração e nas taxas de vazão da bacia. Nessas circunstâncias, o que se espera é que ocorram impactos na provisão dos serviços ecossistêmicos, como a diminuição da disponibilidade hídrica, afetando o consumo de água pelas áreas urbanas da região, visto que se trata de uma bacia altamente povoada, como também no fornecimento de água para a represa de Furnas, que durante os últimos anos já apresenta diminuição no seu nível de água.

Esses problemas quando associados com as mudanças de uso e cobertura da terra, podem trazer impactos ainda maiores, e apesar do uso da terra ter se mantido quantitativamente estável na bacia, foram registradas transições durante o período de análise, o que mostra que apesar dessa estabilidade, os usos estão sendo alterados constantemente na área de estudo, principalmente em relação a expansão urbana e a inclusão de novas áreas de pastagem.

Dessa forma, a realização de um diagnóstico foi importante para mensurar a atual condição da bacia, no entanto, trabalhos desse nível exigem um levantamento grande de informações, por isso a escolha dos temas que se deseja abordar no diagnóstico é uma parte importante no desenvolvimento do trabalho.

Com isso, vale ressaltar, que a contribuição dos dados de sensoriamento remoto, auxiliam na realização das análises desejadas, principalmente quando se trata de séries históricas. Tendo em vista que informações de estações pluviométricas, por exemplo, apresentam muitas falhas de dados e retratam apenas uma situação pontual, que para a correção dessas informações é necessário avaliar quais métodos serão mais adequados para o estudo em questão.

Porém, para os dados de sensoriamento remoto a escolha de qual dado usar, também é bastante importante, avaliar as escalas temporais e espaciais são o primeiro passo para a realização de um bom diagnóstico, o que trará resultados condizentes e que poderão servir de base para outros estudos, assim como auxiliar o trabalho de gestores no planejamento e gestão de bacias hidrográficas.

4 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS HUMANOS E CLIMÁTICOS EM TRÊS SUB-BACIAS DO RIO SAPUCAÍ

4.1 Introdução

Por muitos anos, os estudos hidrológicos basearam-se apenas na interação entre precipitação e fluxo de água e as modificações humanas costumavam ser tratadas como impulsionadoras isoladas do sistema hidrológico (VOGEL et al., 2015). Quando as atividades humanas começaram a causar impactos significativos no ciclo hidrológico, elas começaram a ser investigadas como um fenômeno interligado, e uma nova geração de estudos hidrológicos emergiu, com o surgimento de pesquisas voltadas no entendimento dessas duas forçantes atuando em conjunto dentro dos sistemas ambientais (VOGEL et al., 2015; CAVALCANTE et al., 2019; DOSDOGRU; KALIN, 2020).

As mudanças climáticas podem alterar o ciclo hidrológico, como a dinâmica da precipitação e evapotranspiração, umidade do solo, disponibilidade de água subterrânea e a magnitude e o tempo do processo de escoamento (WANG et al., 2013; ZHANG et al., 2019; DOSDOGRU et al., 2020). Além disso, as atividades humanas como mudanças no uso e cobertura da terra impactam diretamente a disponibilidade de água, aumentam as superfícies impermeáveis como a área urbana, reduzem a área natural de vegetação, alteram as propriedades do solo, interceptação de precipitação e rugosidade superficial (WANG et al., 2013; STEPHENS; LALL, 2021).

Entender como o clima e o homem interagem com o fluxo de água pode contribuir para a melhoria das ações mitigadoras, portanto, investigar essas interações em uma bacia hidrográfica é favorável e vantajoso uma vez que uma base hidrográfica possibilita um melhor entendimento dos processos de recorrência (TURETTA, 2011), e principalmente no Brasil onde a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e execução do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Em relação aos impactos causados pelas mudanças climáticas, eles podem ser analisados por meio de quatro abordagens distintas: a) modelagem hidrológica (MACHADO et al., 2018; SOUZA et al., 2020); b) análises conceituais, como a hipótese de *Budyko*, desenvolvidas e explicadas por Zhang et al. (2008) e a estrutura de

Tomer-Schilling (TOMER; SCHILLING, 2009); c) análise analítica, por elasticidade climática e sensibilidade hidrológica (CAVALCANTE et al., 2019); e d) análises experimentais, como cálculos de tendências hidrológicas e estudos de bacias pareadas (RIZZO et al., 2020).

Como os modelos hidrológicos, a análise de elasticidade climática e os testes de sensibilidade hidrológica exigem uma grande quantidade de dados e um grande poder de processamento (VOGEL et al., 2015), análises conceituais baseadas na estrutura de *Tomer-Schilling* e estudos experimentais de bacias emparelhadas são as técnicas mais viáveis quando considerando a limitação dos dados hidrológicos existentes (ADDOR et al., 2018). Dentre as abordagens experimentais, as análises de tendência também se destacam como um bom método para investigar a resposta de dados de séries temporais hidroclimáticas. Além disso, o teste de *Pettitt* tem sido amplamente utilizado como um método para indicar pontos de quebra significativos em uma série histórica (FOOLADI et al., 2021).

Todas as abordagens acima mencionadas fornecem assinaturas hidrológicas satisfatórias para estudos com foco na dinâmica do fluxo. Segundo McMillan (2020), essas assinaturas têm sido amplamente utilizadas em ecohidrologia, análise de processos de bacias hidrológicas e modelagem, pois descreve as propriedades dinâmicas do escoamento da água por meio de métricas estatísticas. Além disso, as assinaturas podem ser facilmente calculadas usando dados históricos de vazão de água (YILMAZ et al., 2008). As assinaturas de Yilmaz et al. (2008) descrevem a forma da curva de permanência, e assim, auxiliam na avaliação da resposta geral de uma bacia hidrográfica (EUSER et al., 2013).

Neste capítulo utilizou-se a análise conceitual da estrutura de *Tomer-Schilling* em três diferentes bacias do rio Sapucaí, sudeste do Brasil, com características distintas de uso e cobertura do solo (pastagem, floresta e urbana). E verificou-se quais motivadores (mudança de uso e cobertura do solo ou clima) influenciaram nos padrões de fluxo de água de 1940 a 2014.

4.2 Materiais e métodos

4.2.1 Área de estudo

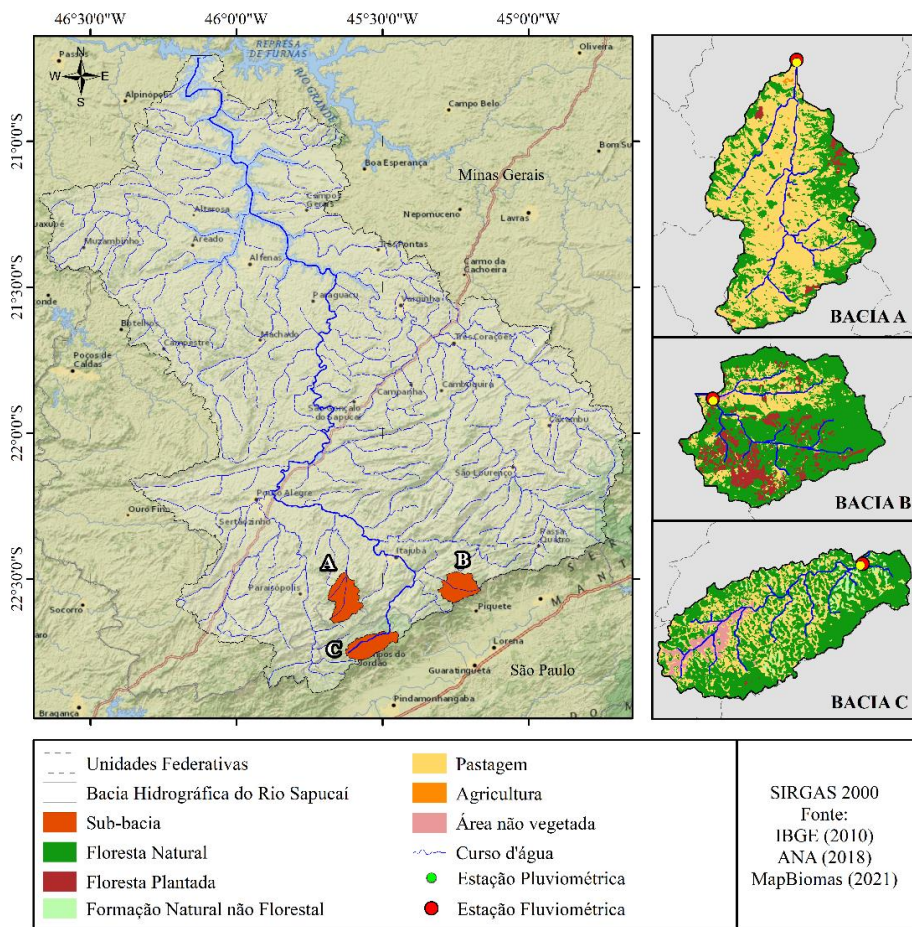
O estudo foi realizado em três sub-bacias (Bacia A, B e C) que compõem a bacia hidrográfica do rio Sapucaí, que começa no município de Campos do Jordão, no estado de São Paulo, e deságua na barragem de Furnas, em Minas Gerais. As três bacias estão localizadas a montante do rio Sapucaí, em uma área de fronteira entre os estados (Figura 4.1).

Para este estudo delimitou-se três bacias utilizando o modelo digital de elevação (DEM) do Projeto TOPODATA e desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O produto TOPODATA foi gerado a partir do processamento digital do SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). Correções em relação a ausência de dados em alguns locais, além do refinamento do tamanho do pixel para ~30 metros (VALERIANO; ROSSETTI, 2012).

As bacias A e B estão localizadas no estado de Minas Gerais e possuem área de drenagem de 144.75 km² e 120.05 km², respectivamente. Já a Bacia C está localizada no estado de São Paulo, situada na nascente do rio Sapucaí, e possui uma área de drenagem de 113.33 km².

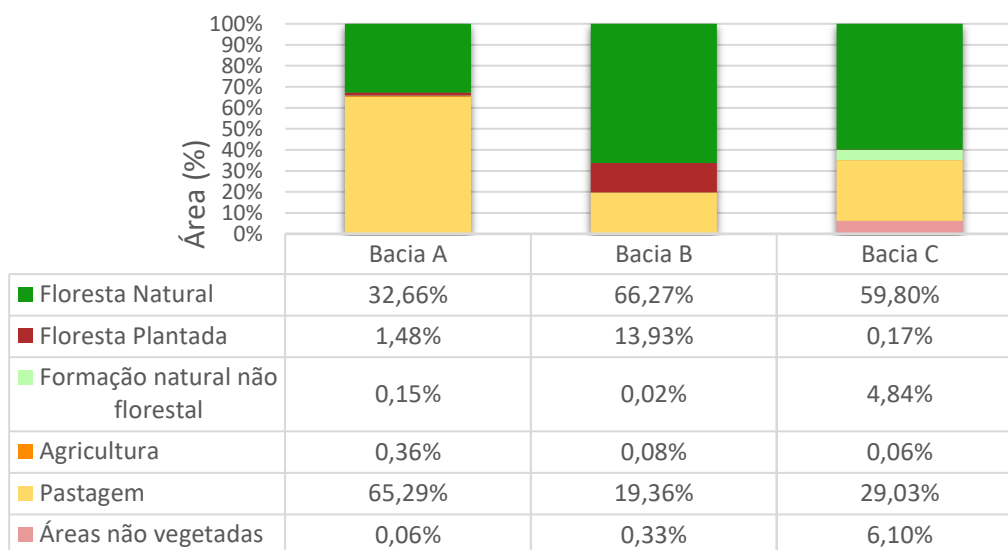
As três bacias foram escolhidas para este trabalho porque possuem características distintas de uso e cobertura do solo (Figura 4.1 e Figura 4.2). A Bacia A é composta principalmente por áreas agrícolas e pecuárias, incluindo categorias como pastagem e agricultura que correspondem a cerca de 65% da área total da bacia. A Bacia B é composta em sua maioria por florestas naturais e plantadas, correspondendo a 66% e 14% de seu território, respectivamente. Por fim, a Bacia C é caracterizada por possuir as maiores áreas não vegetadas, com aproximadamente 6% que corresponde à área urbana de Campos do Jordão.

Figura 4.1 - Localização das três sub-bacias utilizadas no estudo.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.2 - Percentual das classes de uso e cobertura da terra para as três bacias de estudo.



Fonte: Produção do autor.

Na região estudada, a elevação varia de 1.800 a 850 m acima do nível do mar, onde a Bacia A está localizada nas terras baixas e as Bacia B e C nas terras altas, próximas à Serra da Mantiqueira. Segundo a classificação de *Köppen* para o clima no Brasil (ALVARES et al., 2013), o clima nas bacias é um subtropical úmido (Cw). As séries temporais de precipitação e fluxo evidenciam uma estação chuvosa durante o verão austral e uma estação seca durante o inverno austral.

4.2.2 Descrição de dados

Para este trabalho, os dados de precipitação e vazão foram obtidos no site da *Hidroweb* (ANA, 2021) da Agência Nacional de Águas (ANA). Para cada bacia, foram encontrados apenas um posto fluviométrico e um pluviômetro, todos localizados na nascente da respectiva bacia hidrográfica. Todos os dados da estação estão resumidos na Tabela 4.1, descrevendo as datas da primeira e da última medição e a porcentagem de falhas (lacunas) para o período em que os dados estiveram disponíveis.

Tabela 4.1 - Descrição da Agência Nacional das Águas usadas para obtenção dos dados de precipitação e vazão.

Bacia	Tipo	Código	Data inicial	Data final	Falhas (%)
A	Pluviométrica	2245070	01/01/1941	31/07/2019	17,1
	Fluviométrica	61295000	17/04/1937	31/12/2014	0,1
B	Pluviométrica	2245064	01/01/1941	31/07/2019	38,2
	Fluviométrica	61267000	13/01/1941	31/12/2014	3,2
C	Pluviométrica	2245010	01/01/1941	31/07/2019	4,6
	Fluviométrica	61250000	01/10/1934	31/12/2014	0,1

Fonte: Produção do autor.

Para os dados de temperatura, foram utilizadas as estações 83714 (convencional) e A706 (automática) - Campos do Jordão (Tabela 4.2). Esses dados foram obtidos no site do BDMEP (INMET, s/n) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 4.2 - Descrição das estações do INMET usadas para obter os dados de temperatura.

Estação	Temperatura	Data inicial	Data final	Falhas (%)
83714	Máxima	01/01/1941	30/11/2014	30
	Mínima	01/01/1957	19/03/2015	29
A706	Máxima	30/03/1998	31/12/2015	23
	Mínima	30/03/1998	31/12/2015	23

Fonte: Produção do autor.

As análises foram realizadas de 1941 a 2014. Além disso, nenhum preenchimento de falhas foi usado para os dados ausentes, porque as estações próximas tinham um período de ausência de dados mais longo do que as escolhidas, especialmente antes da década de 1960. Preencher a falta de informação acrescentaria maiores erros e incertezas à série histórica, descaracterizando a influência das mudanças locais no uso e cobertura do solo no ciclo hidrológico. Além disso, a falta de dados não teria impacto nos resultados finais porque o método *Tomer-Schilling* é baseado no balanço hídrico de longo prazo (TOMER; SCHILLING, 2009).

Para fornecer informações suficientes para todo o período de análise, os dados de uso e cobertura da terra foram coletados de duas fontes diferentes. De 1941 a 1984, utilizamos dados de uso e cobertura da terra do Grupo de Pesquisa em Interação Atmosfera-Biosfera da UFV (DIAS et al., 2016), e para o período de 1985 a 2014, utilizamos dados do Projeto MapBiomias - Coleção 5 da Série Anual de Terras Mapas de Cobertura e Uso do Solo do Brasil (PROJETO MAPBIOMAS, 2020). O primeiro banco de dados é um mapeamento histórico anual de safras agrícolas, pastagens e produtividade no Brasil de 1940 a 2012, com resolução espacial de 1km x 1km. Esses dados são uma compilação de dados do censo agrícola e de sensoriamento remoto. O segundo banco de dados (Projeto MapBiomias) é uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo, com aproximadamente 30 m, usando processos de classificação automática aplicados a imagens de satélite de 1985 a 2019.

Devido à diferença de legenda entre os produtos de uso e cobertura da terra, os integramos em uma classificação compatível, apresentada na Apêndice B e resumimos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Adaptação da legenda usada nesse estudo para o uso e cobertura da terra com base em Dias et al. (2016) e Projeto MapBiomias.

Dias et al. (2016)	Projeto MapBiomias (Classe 2)	Legenda Adaptada
Pastagem Natural	Formação Natural Não Florestal*	Formação Natural Não Florestal
Áreas cultivadas	Agricultura	Agricultura
Pastagem Plantada	Pastagem	Pastagem
	Mosaico de Agricultura e Pastagem	
	Áreas não vegetadas	Áreas não vegetadas
Outros	Água	Água
	Florestas Naturais	Florestas Naturais
	Florestas Plantadas	Florestas Plantadas
	Não observado	Não observado

* Esta classe pertence ao nível 1 do Projeto MapBiomias e inclui as seguintes classes de nível 2: área úmida, pastagem, salina, afloramento rochoso e outras formações florestais.

Fonte: Produção do autor.

Para realizar a análise do crescimento populacional na região estudada, também foram utilizados dados históricos de 1940 a 2010 para os municípios de Brazópolis (Bacia A), Delfim Moreira (Bacia B) e Campos do Jordão (Bacia C). Os dados censitários foram realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), disponíveis por década (1940, 1950, 1960, 1970, 1980, 1991, 2000 e 2010) (IBGE, 2010).

4.2.3 Processamento dos dados

Para verificar como o ciclo hidrológico responde às mudanças climáticas e antrópicas, foram calculadas três assinaturas hidrológicas relacionadas à curva de permanência das bacias. A curva de permanência foi dividida em três segmentos, conforme demonstrado por Yilmaz et al. (2008), o segmento de alto fluxo (VHIGH), o segmento médio (SLOPE) e o segmento de baixo fluxo (VLOW). O segmento VHIGH está relacionado à vazão que é ultrapassada em 10% do tempo (Q10), o que significa a resposta da bacia a situações extremas de inundação. O segmento médio (SLOPE) está relacionado com a distribuição de umidade na bacia, a regulação do fluxo. Finalmente, o segmento de baixo fluxo (VLOW) está relacionado aos períodos de seca (Q90).

Após o cálculo das assinaturas, um teste não paramétrico foi aplicado às séries históricas para identificar os pontos de quebra nas séries dos fluxos e, em seguida, para ajudar a determinar os anos em que ocorrem as mudanças bruscas, o teste de *Pettitt*

(PETTITT, 1979) foi utilizado. Ele é baseado no teste U de *Mann-Whitney*, que verifica se duas amostras são da mesma população, através da contagem de quantas vezes um elemento da primeira amostra é maior que o outro, separando-as em duas partes homogêneas (ZHANG et al., 2009), e considera a ausência de mudanças nas séries como hipótese nula. Após a identificação dos pontos de quebra e a combinação deles, criou-se períodos definidos, para a aplicação do modelo de *Tomer-Schilling*. Essa divisão foi necessária porque o modelo precisa ser aplicado em períodos suficientemente longos entre dois períodos de seca (TOMER; SCHILLING, 2009).

O modelo visa distinguir os efeitos do uso e cobertura da terra e da variabilidade climática em uma bacia hidrográfica por meio de duas variáveis de estado ec hidrológicas não dimensionais, o excesso de energia relativo (Eex) e o excesso de água relativo (Pex) (RENNER et al., 2012). Assim, o primeiro passo foi analisar o balanço hídrico das bacias, o qual foi calculado por meio da Equação 4.1, de acordo com Tomer e Schilling (2009).

$$PPT = ET + Q + D + \Delta S \quad (4.1)$$

Onde PPT é precipitação; ET é a taxa de evapotranspiração; Q é o fluxo de água (composto de fluxo superficial e base); D drenagem profunda; e ΔS é a variação da água armazenada no solo. Ao se considerar a escala da bacia hidrográfica e longos períodos (maiores que 10 anos), pode-se dizer que as menores variações no balanço hídrico (D e ΔS) são compensadas, e o balanço pode ser calculado utilizando a Equação 4.2 (TOMER; SCHILLING, 2009; YE et al., 2013).

$$PPT = ET + Q \quad (4.2)$$

O ET foi calculado para as três sub-bacias. Essa taxa é regulada principalmente pela água disponível (PPT) e pela demanda evaporativa (PET). Para este trabalho, o cálculo do PET foi realizado com base em dados de temperatura e utilizando o método de Hargreaves e Allen (2003), também descrito por Tomer e Schilling (2009), conforme a Equação 4.3.

$$PET = 0.0023R_a \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} + 17,8 \right) \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \quad (4.3)$$

Onde R_a é radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ t}^{-1}$); T_{\max} e T_{\min} são temperaturas máximas e mínimas ($^{\circ}\text{C}$), que podem ser calculadas usando dados diários ou mensais. O R_a foi

calculado com base na equação de referência de Duffie et al. (1993), expressa a seguir (Equação 4.4).

$$R_a = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.33 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \left[\cos \theta \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi}{360} \omega_s \sin \theta \sin \delta \right] \right] \quad (4.4)$$

Onde G_{sc} é a constante solar global; ω_s o ângulo da hora do pôr do sol para o dia típico n de cada mês; θ o ângulo de latitude para a localização em graus; δ o ângulo de declinação por mês em graus; n é o número do dia juliano do ano de 1º de janeiro a 31 de dezembro.

O ângulo da hora do pôr do sol ω_s é dado pela Equação 4.5.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \theta \tan \delta) \quad (4.5)$$

O ângulo de declinação δ é dado pela Equação 4.6.

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360(254+n)}{365} \right] \quad (4.6)$$

Os valores de PPT, PET e ET nos permitem avaliar o excesso de água relativo (P_{ex}) e energia relativo (E_{ex}) utilizada pelo ecossistema (TOMER; SCHILLING, 2009), aplicando as Equações 4.7 e 4.8.

$$P_{ex} = \left(\frac{PPT-ET}{PPT} \right) \quad (4.7)$$

$$E_{ex} = \left(\frac{PET-ET}{PET} \right) \quad (4.8)$$

4.3 Resultados

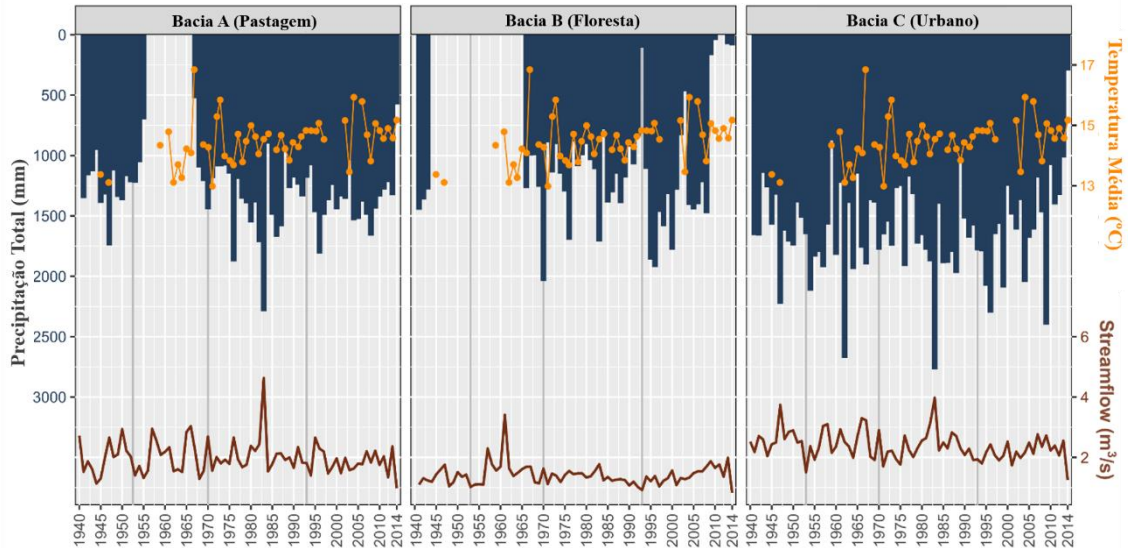
4.3.1 Caracterização climática

A Figura 4.3 mostra a série histórica (1940-2014) dos valores anuais de precipitação, vazão e temperatura para as Bacias A, B e C, indicando os períodos de pontos de ruptura. Os valores resumidos são apresentados na Tabela 4.4, juntamente com os resultados do teste não paramétrico de médias.

A precipitação média foi de aproximadamente 1300 mm anuais, com os maiores registros encontrados em 1983 para as Bacias A e C, onde o valor acumulado foi de 2.281mm e 2.763mm, respectivamente. Diferentemente, a Bacia B registrou o maior valor de precipitação (2.032 mm) em 1970. A vazão registrou valores médios variando

de 1,5 a 8 m³/s, sendo 3,90 m³/s na Bacia C, 3,11 m³/s na Bacia A e 1,99 m³/s na Bacia B.

Figura 4.3 - Médias de precipitação (PPT), vazão (Q) e temperatura (T) para as bacias A, B e C para todo o período de análise.



Fonte: Produção do autor.

Os registros de temperatura variaram de 30,5 °C a -2,9 °C, com valor médio de 14,7 °C ($\pm 0,77$ °C). A temperatura média e a mínima aumentaram significativamente ao longo dos períodos, onde a diferença entre o início das medidas (1940 a 1952) e os últimos registros (1994 a 2014) são, respectivamente, 1,44 °C para a temperatura média e 9 °C para a temperatura mínima.

Em relação ao fluxo de água, não observamos divergência significativa a 5% do nível de confiança nos valores para as Bacia A e B, porém a Bacia C registrou uma diminuição nos valores da ordem de 0,78 m³/s ao longo da série temporal. Além disso, a precipitação não apresenta divergência significativa pelo teste de médias de *Kruskal-Wallis*.

Tabela 4.4 - Resumo da precipitação média (PPT), vazão (Q) e temperatura (T) para os períodos de análise.

Sub-bacias	Variável	Período				
		1940-1952	1953-1970	1971-1993	1994-2014	1940-2014
A – Pastagem	PPT(mm) ^{ns}	1266.57	1029.85	1346.92	1346.46	1296.23
	SD	198	319	322	250	289.46
	Q(m ³ /s) ^{ns}	3.16	3.17	3.29	2.82	3.11
	SD	1.05	1.15	1.21	0.77	1.06
B – Floresta	PPT(mm) ^{ns}	1357.04	1306.45	1078.29	1096.02	1124.57
	SD	85	427	327	631	466.27
	Q(m ³ /s) ^{ns}	1.86	2.32	1.81	2.00	1.99
	SD	0.41	1.09	0.38	0.55	0.68
C – Urbano	PPT(mm) ^{ns}	1562.07	1669.62	1654.86	1550.60	1613.82
	SD	282	410	356	481	394.41
	Q(m ³ /s)*	4.27(a)	4.06(ab)	3.85(ab)	3.49(b)	3.90
	SD	0.79	1.00	0.97	0.68	0.91
A, B e C	Tmax ^{ns}	28.2	30.5	29.0	29.7	30.5
	SD	0.85	1.47	0.98	3.35	2.29
	Tmean*	13.26(a)	14.1(ab)	14.4(b)	14.7(c)	14.7
	SD	0.18	1.03	0.60	0.61	0.76
	Tmin*	-8.3(a)	-4.2(b)	-3.4(b)	-0.7(c)	-2.9
	SD	0.67	1.75	1.99	2.02	2.58

Nota: Resultados do teste não paramétrico de médias, *Kruskal-Wallis*, onde: NS: não significativo, *significativo. Os valores que compartilham uma carta não são significativamente diferentes (p.val <0,05).

Fonte: Produção do autor.

4.3.2 Assinaturas hidrológicas

As assinaturas hidrológicas calculadas (VHIGH, VLOW e SLOPE) são representadas na Figura 4.4, junto com os pontos de quebra identificados do Teste de *Pettitt* (linhas vermelhas).

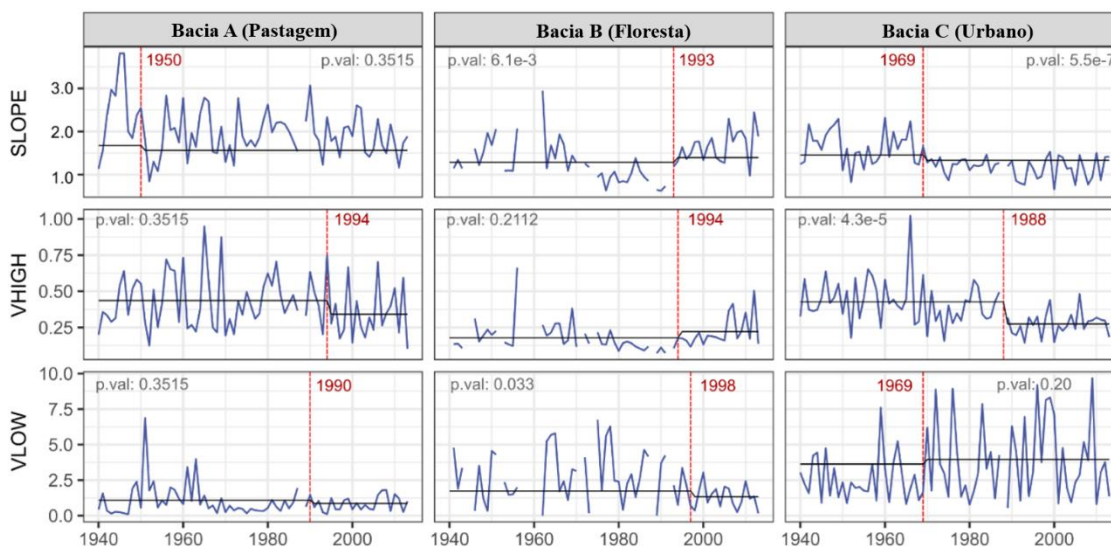
O segmento de alto fluxo (VHIGH) relacionado ao fluxo que ultrapassa 10% do tempo (Q10) variou de 0 a 1,2. Dentre as três bacias, a Bacia C apresentou a menor média com pouca variação de alcance (0 a 0,7). Além disso, os pontos de quebra foram identificados em 1994, 1994 e 1988, para as Bacias A, B e C, respectivamente.

Em relação à SLOPE, que corresponde à inclinação da curva de permanência, os valores variaram de 0,5 a 4,0. Os maiores valores de SLOPE e variação foram encontrados na Bacia A, onde o pico foi de 3,81 em 1946. Como resultado, a partir do teste de *Pettitt*, os

anos de ponto de interrupção foram identificados em 1950 para a Bacia A, 1993 para a Bacia B e 1969 para a Bacia C.

Por fim, o segmento baixo das assinaturas (VLOW) variou de 0 a 10,0, onde a Bacia A apresentou a menor variação ao longo da série, exceto em 1951, quando atingiu o valor de 6,86 e superou a média do período de 1,6. Por outro lado, a Bacia C apresentou as maiores variações, com valor médio próximo a 4,0. Os pontos de quebra corresponderam a 1990, 1998 e 1969, para as Bacias A, B e C, respectivamente de acordo com o Teste de Pettitt.

Figura 4.4 - Resultados da aplicação das assinaturas hidrológicas e do Teste de Pettitt (linha vermelha) na série de vazões de água para as três bacias hidrográficas.



Nota: A linha preta indica os valores médios obtidos antes e depois da quebra identificada pelo Teste de Pettitt.

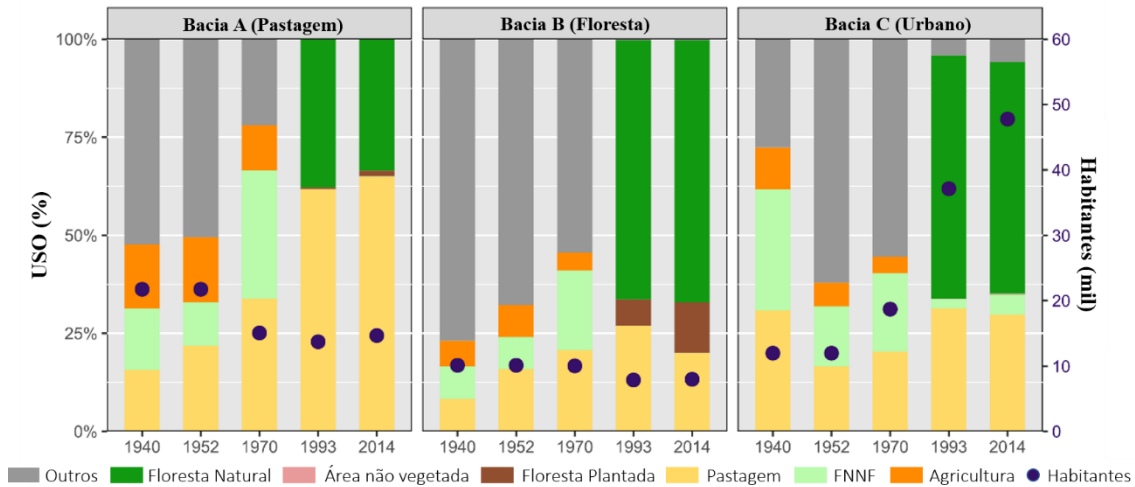
Fonte: Produção do autor.

4.3.3 Uso e cobertura da terra

O uso e cobertura da terra para as bacias A, B e C, são apresentados na Figura 4.5 juntamente com o número de habitantes dos municípios onde as bacias estão localizadas.

Para a Bacia A nota-se um aumento significativo das áreas de pastagem ao longo da análise em contraste com a diminuição de 6 mil habitantes, ocorrida entre 1952 e 1970.

Figura 4.5 - Porcentagem de cada classe de uso e cobertura do solo (barras) e o número total de habitantes por ano (pontos) para cada bacia.



Fonte: Produção do autor.

A Bacia B é a que apresenta os menores valores de pastagem, sendo composta, agora, principalmente por florestas. As mudanças foram mais expressivas a partir de 1993, onde notamos um aumento da classe floresta sobre a pastagem, com aumento expressivo da área de floresta plantada. Essa bacia possui o menor número de habitantes, com queda ao longo do período em aproximadamente 2 mil.

Semelhante à Bacia B, encontramos um aumento nas áreas de pastagem na Bacia C após 1952, mesmo período em que Campos do Jordão inicia seu crescimento populacional, passando dos 10 mil habitantes para quase 50 mil em 2014.

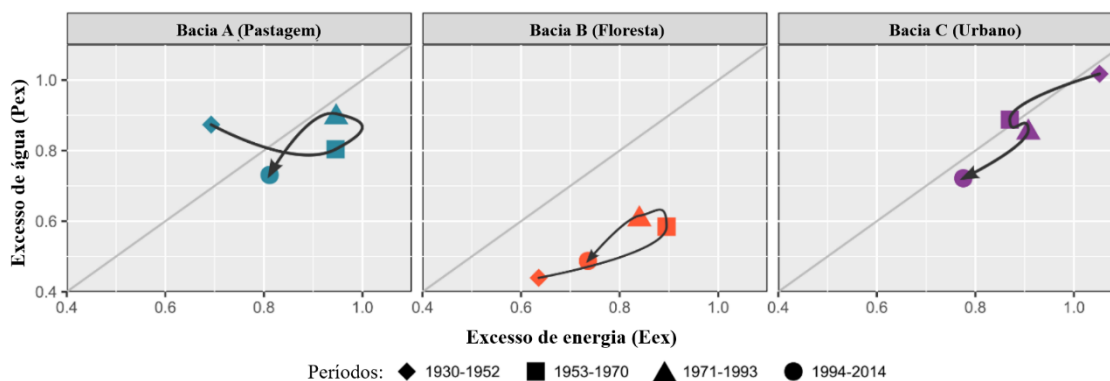
4.3.4 Modelo conceitual de Tomer-Schilling

As propriedades eco-hidrológicas foram calculadas com base nos pontos de ruptura de Pettit, dividindo o período em quatro grupos: a) 1940-1952; b) 1953-1970; c) 1971-1993; e d) 1994-2014. Os resultados estão representados na Figura 4.6. Para a Bacia A, de maneira geral, notou-se uma espiral descendente com redução considerável do Pex e aumento do Eex. Um aumento no Pex e uma não mudança na variável Eex foi notado entre o segundo e o terceiro período, indicando influência tanto climática quanto humana. Finalmente, uma redução considerável para Eex e Pex foi identificada entre o terceiro e o quarto período.

Para a Bacia B, um aumento para Pex e Eex foi identificado entre o primeiro e o segundo período, indicando a influência das mudanças de uso e cobertura da terra. Posteriormente, houve uma diminuição no Eex e um pequeno aumento no Pex durante os períodos seguintes, indicando a influência climática nas mudanças nas taxas de fluxo de água. Finalmente, uma diminuição tanto para Eex quanto para Pex nos últimos períodos, indicando influência do uso e cobertura da terra e variabilidade climática.

A Bacia C, diferentemente, apresentou uma diminuição geral do padrão ao longo dos períodos, indicando a influência das atividades antrópicas nas variações das taxas de vazões.

Figura 4.6 - Dispersão do excesso de energia (Eex) contra o excesso de água (Pex) para as três bacias hidrográficas.



Fonte: Produção do autor.

4.4 Discussão

Neste estudo, propôs-se investigar qual dos condutores climáticos ou atividades humanas mais influenciou nas vazões de água entre 1940 e 2014 para três bacias hidrográficas do sudeste do Brasil. Em geral, todas as bacias apresentaram diferentes padrões climáticos e de uso e cobertura do solo ao longo da série histórica, o que pode ter influenciado os diferentes padrões de fluxo de água identificados para essas localidades.

Na Bacia A, a influência das mudanças de uso e cobertura da terra excedeu a influência do clima durante o primeiro para o segundo período, quando a maior área classificada como pastagem e não florestal foi identificada para a Bacia A. Esta influência tornou-se

mais intensa a partir do terceiro período quando as pastagens apresentam um acréscimo de 30 pontos percentuais (pp), que veio associado às mudanças no tipo de pastagem, conforme apontado por Dias et al. (2016), onde áreas de pastagens plantadas foram substituídas por naturais em decorrência do abandono. No entanto, o aumento das áreas de pastagem foi responsável pelo aumento da capacidade de armazenamento e da taxa de contribuição por escoamento superficial, verificada nos resultados das assinaturas hidrológicas (Figura 4.4), que mostraram grande variabilidade na resposta da bacia as situações extremas de inundação (VHIGH).

Contudo, a quantidade de vegetação em uma determinada área influencia as condições de evapotranspiração, aumentando a interceptação da precipitação (MACEDO et al., 2016; GOTARDO et al., 2018) que vai interferir no fluxo de água do rio (ANDRÉASSIAN, 2004). A magnitude dessas mudanças é influenciada por outros fatores além da extensão da vegetação, como tipo de vegetação, idade da cultura, topografia, precipitação média anual, espécies de culturas, proporção de mudança de cobertura (LIU et al., 2016; FILOSO et al., 2017).

Bacias próximas tendem a ter características semelhantes (SAWICZ et al., 2014; DAVID et al., 2019) o que foi verificado na maioria das assinaturas hidrológicas (Figura 4.4). Porém, alguns atributos permanecem aderentes ao seu uso e cobertura da terra independentemente de sua proximidade, caso da Bacia B que apresenta as menores vazões (Figura 4.3) e VHIGH (Figura 4.4). Isso se justifica pela maior quantidade da classe Floresta Natural e Plantada, que, a princípio, diminuem o total de água disponível devido ao aumento da evapotranspiração, mas depois de muito tempo, outros benefícios da floresta (como aumento da infiltração e regulação da temperatura) reforçam a capacidade de autorregulação à escala do microclima regional (ZELLWEGER et al., 2020).

Apesar das pressões climáticas desempenharem seu papel na região, os resultados de *Tomer-Schilling* para a Bacia B (Figura 4.6) mostraram que as atividades humanas impactaram mais no primeiro e no segundo período do que nos outros. O principal efeito foi a diminuição da demanda de água na região, um incremento positivo na Eex, que está relacionado ao processo de desmatamento ocorrido neste período, onde a pastagem aumenta (Figura 4.5) ao longo da classe floresta. A supressão da cobertura

florestal reduz a evapotranspiração aumentando o escoamento e o fluxo imediato; entretanto, este processo influencia nas taxas de precipitação local (DEBORTOLI et al., 2017) promovendo a degradação do solo com conseqüente redução em sua estrutura afetando diretamente a capacidade de retenção de água (NYBERG et al., 2012).

Do terceiro para o último período, a Bacia B sofreu um aumento no consumo de água, representando um efeito negativo na Eex, ocasionado principalmente pelo aumento em 3 p.p. na classe Formação Florestal. Essa mudança também foi sentida nas assinaturas hidrológicas (Figura 4.4), tidas como precursoras das quebras de tendência.

Quando a metodologia de *Tomer-Schilling* foi proposta, o modelo conceitual foi derivado de uma base de dados de bacias rurais, considerando que as mudanças na vegetação ou em seu manejo poderão afetar diretamente a evapotranspiração (TOMER; SCHILLING, 2009). Dessa forma, ela não trata sobre o efeito da urbanização e nem sobre os usos consuntivos como atividades humanas que podem influenciar nas variações das taxas de fluxo. Porém resultados interessantes foram observados aplicando essa metodologia para a bacia C.

O processo de expansão urbana ocorrido na bacia C refletiu diretamente nos resultados de *Tomer-Schilling*, os quais indicaram as atividades humanas como o principal fator para as mudanças nas vazões de água para todos os quatro períodos, exceto entre o segundo e o terceiro período quando o clima também afetou ativamente. A diminuição das áreas florestadas, e um aumento das áreas não vegetadas de 1993 a 2014, associado ao maior aumento da população, foi a atividade predominantemente humana que ocorreu na Bacia C. Nessas áreas urbanas, onde a superfície impermeável é maior, houve diminuição expressiva da capacidade de infiltração de precipitação e concomitante aumento do escoamento superficial, refletindo em mais oscilação nos picos de maior e menor vazão (ARAGÃO et al., 2017), verificada nas assinaturas hidrológicas para esta Bacia (Figura 4.4). Porém, neste caso, o resultado do escoamento superficial não refletiu no aumento das vazões, pois a população também aumentou, resultando em maior consumo de água tanto pela população quanto pelas atividades industriais. O abastecimento humano é o segundo uso consuntivo que mais retira água dos cursos d'água, perdendo apenas para o uso dado pela irrigação (CANTADOR, 2015). No Brasil, a irrigação é responsável pela retirada de 52% da água do país e o

abastecimento urbano atinge taxas de aproximadamente 24%, que inclui abastecimento doméstico, comercial e público (ANA, 2019).

Como resultado, as três bacias apontaram que as mudanças humanas causaram respostas maiores aos padrões observados do que as mudanças climáticas (precipitação e temperatura). No entanto, os resultados encontrados para essas três bacias não indicam que as mudanças climáticas não tenham exercido pressão sobre a região, e sim que o efeito do uso da terra é preponderante, considerando os períodos nos quais foi dividida a análise. Anexados a essas informações, alguns estudos de projeção climática alertam sobre possíveis tendências de redução da precipitação tanto durante a estação chuvosa quanto na estação seca até o final do século 21 (MOORE et al., 2007; SPRACKLEN et al., 2012).

Quando essas variáveis de estado eco-hidrológicas foram analisadas, as mudanças climáticas influenciam tanto a precipitação (PPT) quanto a demanda evaporativa (PET), enquanto o uso e cobertura da terra impacta apenas a evapotranspiração (ET), mas não impacta o PPT ou PET, portanto o aumento ou diminuição em Pex e Eex dependem do efeito da mudança em ET (YE et al., 2013). Por outro lado, as mudanças no PPT e PET são necessárias para aumentar o Pex e diminuir o Eex, ou vice-versa.

Com isso em mente e com base nos resultados encontrados neste estudo, podemos inferir possíveis cenários futuros. Graves consequências podem ser observadas na Bacia A em um cenário de longo prazo, visto que o clima exercerá cada vez mais pressão negativa sobre as vazões, reduzindo as taxas de precipitação e, conseqüentemente, sua disponibilidade hídrica.

Para a Bacia B, se a cobertura florestal persistir a mesma, ela continuará mantendo o equilíbrio climático, mas deve-se considerar que o processo de desmatamento pode comprometer a integridade da bacia. Além disso, as áreas de florestas plantadas incluem um ciclo de colheita para aproveitamento de madeira, deixando a bacia mais suscetível aos impactos climáticos, que até então não eram relevantes. Esse processo intensifica o ciclo hidrológico ao não permitir que o sistema atinja um estado de equilíbrio, ou seja, quando a planta atinge um grau de maturidade suficiente para equilibrar a evapotranspiração, ela é cortada e o plantio é replantado, reiniciando o ciclo.

Finalmente, a Bacia C pode responder às mudanças climáticas futuras e ao crescimento populacional semelhante à Bacia A, porque suas áreas impermeáveis maiores irão reduzir a capacidade de armazenamento, aumentar os impactos extremos da água, como inundações e secas. Além de gerar questões relacionadas ao abastecimento de energia e água.

4.5 Considerações finais

Os impactos do uso da terra e das mudanças na cobertura da terra e mudanças climáticas sobre o fluxo de água em todas as três bacias estudadas do rio Sapucaí para o período 1940-2014 foram investigados separadamente usando uma abordagem eco-hidrológica. Além disso, este estudo forneceu um melhor entendimento sobre os padrões de uso e cobertura do solo ao longo das últimas oito décadas de cada bacia, identificando quando ocorreram as mudanças mais significativas nos padrões de fluxo de água e suas possíveis causas.

Nas três bacias, ficou evidente que o forçamento humano teve mais influência nas mudanças do fluxo de água do que o clima. Em geral, a maior influência veio das altas taxas de desmatamento no primeiro período (1940-1952 e 1953-1970), criando áreas para pastagem (Bacia A e B). Além disso, no primeiro período a influência veio do processo de urbanização, principalmente na Bacia C. Nos últimos períodos (1971-1993 e 1994-2014), as vazões foram influenciadas pelo reflorestamento de áreas nas três bacias estudadas.

No entanto, são necessários mais estudos para investigar e compreender os padrões aqui encontrados, como a influência do aumento urbano nas taxas de vazão de água na Bacia C. Ou as mudanças nas áreas de pastagem em relação ao seu tipo de vegetação.

5 APLICABILIDADE DO MODELO SWAT NA SIMULAÇÃO DA VAZÃO EM TRÊS SUB-BACIAS HIDROGRÁFICA NA REGIÃO SUDESTE BRASILEIRA

5.1 Introdução

No atual contexto mundial, entender como as mudanças climáticas e as atividades humanas impactam sobre os processos dentro de uma bacia hidrográfica, tanto de forma combinada quanto dissociada, é algo imprescindível (GAO et al., 2015). Isso porque, a sociedade está se deparando com vários problemas decorrentes do aumento da quantidade de carbono emitido para a atmosfera, seja pela queima de combustíveis fósseis ou pelas alterações de uso e cobertura da terra, como o desmatamento da vegetação nativa. Este quadro, traz impactos como a redução da evapotranspiração que, conseqüentemente, influencia nas taxas das chuvas locais e regionais (DEBORTOLI et al., 2016).

Algumas previsões apontam que o desmatamento poderá reduzir as chuvas, em algumas regiões, em até 30% (LAWRENCE; VANDECAR, 2015). Além das alterações nas taxas de precipitação, a temperatura aumentará, alterando a umidade e os fluxos de calor entre a superfície e a atmosfera, resultando em ambientes mais secos, o que gera o acúmulo de biomassa na superfície, aumentando a propagação de incêndios florestais, e as partículas de aerossóis dos incêndios podem espalhar a radiação solar e interromper a elevação do vapor d'água (TOKINAGA et al., 2012).

A dinâmica de remoção da floresta pode alterar a estrutura dos solos, reduzir a capacidade de infiltração e armazenamento, promovendo uma maior geração de resposta direta/rápida e assim aumentando os níveis dos rios (NYBERG et al., 2012), aumentando o escoamento e, conseqüentemente, as inundações. Pilaš et al. (2010) atentam para o aumento da vazão nas florestas que pode ocorrer em situações de precipitação longa e intensa, de modo que o solo pode saturar e superar a capacidade de absorção, gerando o aumento do escoamento superficial e inundações.

Cabe assim, então, avaliar os possíveis impactos associados às diferentes influências sobre o uso do solo e demais forçantes climáticas sobre os sistemas naturais. A criação de modelos matemáticos possibilitou representar esses sistemas, bem como antecipar eventos e quantificar impactos em determinadas situações. Esses modelos, nada mais

são, do que uma aproximação do real, através da representação de algum objeto ou sistema, dada a sua construção e funcionamento, incorporando a maioria das características principais do processo em estudo (GASSER et al., 2019). Assim, realizar essa representação envolve reproduzir uma gama de processos físicos, químicos e biológicos, que estão inter-relacionados em um espaço dinâmico (FRAGOSO JUNIOR et al., 2009).

Ao longo de anos de pesquisa, os modelos hidrológicos passaram por constantes aperfeiçoamentos e, atualmente, são capazes de se aproximar relativamente bem do fenômeno simulado (VIOLA, 2011). Eles são considerados um método importante na simulação de processos ambientais em diversas escalas espaço-temporais, sendo aplicados no gerenciamento de recursos hídricos, previsão de vazões, simulação de impactos hidrológicos, análise de cenários de mudanças climáticas, que permite, pesquisadores, gestores, e demais setores da sociedade prever e analisar condições atuais e futuras sob diferentes causas (BECKERS et al., 2009; YANG; ZHANG, 2016; LEE et al., 2018; JUNG; KIM, 2018).

Modelos hidrológicos de base física têm sido desenvolvidos e aplicados, frequentemente, para essas finalidades em diversos estudos ecológicos, gerando uma discussão multidisciplinar, englobando áreas do conhecimento como a biologia, geografia, climatologia e engenharias. Exemplo desses modelos têm-se o *Soil & Water Assessment Tool - SWAT* (ABBASPOUR, 2015), o *Regional Hydro-ecologic Simulation System - Rhessys* (TAGUE; BAND, 2004) e *Variable Infiltration Capacity-VIC* (LIANG et al., 1994). Sendo o modelo SWAT escolhido como metodologia para o trabalho.

O modelo hidrológico SWAT foi desenvolvido pelo Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS) dos Estados Unidos no início da década de 1990. O modelo é uma ferramenta usada para avaliar, analisar e quantificar os impactos decorrentes das práticas de gestão de solo aos recursos hídricos e a produção de sedimentos em nível de bacias hidrográficas, bem como simular diversos cenários atuais e futuros (NEITSCH et al., 2011).

O SWAT é uma ferramenta semi-automatizada, que permite representar os diferentes processos físicos que ocorrem em bacias hidrográficas em uma base física, a partir de

parâmetros espacialmente distribuídos (tipos de solos, uso e cobertura da terra, declividade e dados climáticos) (ABE, 2017). Este modelo é capaz de simular cenários atuais e futuros, seja pela ocorrência de processos naturais ou provocados pela intervenção humana. Além disso, segundo Arnold et al. (2012), é um modelo dinâmico, semi-distribuído, que funciona em passo de tempo diário e é capaz de simular longos períodos de dados.

Nesse sentido, esse capítulo teve como objetivo realizar a modelagem hidrológica em três sub-bacias hidrográficas da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí, localizada entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, aplicando o modelo SWAT para a simulação do fluxo de água das três bacias e assim realizar cenários de mudanças de uso e cobertura da terra sobre elas. E como realizar modelagem hidrológica envolve o levantamento de uma quantidade grande de dados e informações, em várias escalas espaciais e temporais (VIOLA, 2011), utilizou-se dados de sensoriamento remoto, que possibilitam fornecer os dados necessários para isso.

5.2 Materiais e métodos

Este estudo foi realizado utilizando o SWAT+ versão 2.0.6, implementado no sistema de informações geográficas *Quantum GIS* (QGIS) versão 3.16.7-*Hannover*, e os processos de calibração e validação pelo SWAT+ *Toolbox* v0.7.6. Todos os *softwares* utilizados são livres.

5.2.1 Área de estudo

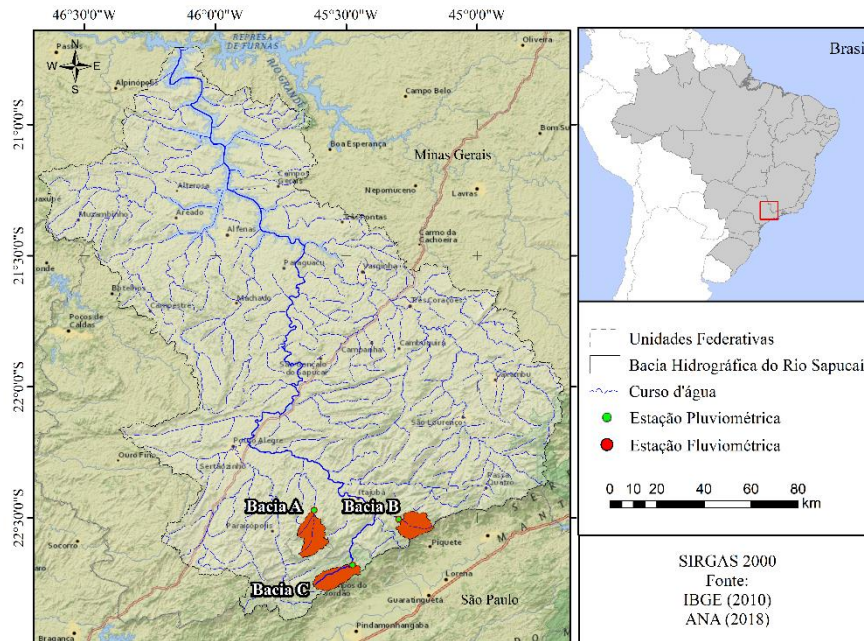
O estudo foi realizado em três sub-bacias (Bacia A, B e C) que compõem a bacia hidrográfica do rio Sapucaí, que começa no município de Campos do Jordão, no estado de São Paulo, e deságua na barragem de Furnas, em Minas Gerais. As três bacias estão localizadas a montante do rio Sapucaí, em uma área de fronteira entre os estados (Figura 5.1). As bacias A e B estão localizadas no estado de Minas Gerais e possuem área de drenagem de 156,01 km² e 112,25 km², respectivamente. Já a Bacia C está localizada no estado de São Paulo, situada na nascente do rio Sapucaí, e possui uma área de drenagem de 119,74 km².

As três bacias escolhidas possuem características distintas de uso e cobertura da terra (Figura 5.1). A Bacia A é composta principalmente por áreas agrícolas e pecuárias, incluindo categorias como pastagem e agricultura que correspondem a cerca de 66% da

área total da bacia. A Bacia B é composta em sua maioria por florestas naturais e plantadas, correspondendo a 67% e 14% de seu território, respectivamente. Por fim, a Bacia C é caracterizada pela maior área não vegetadas, entre as três, com aproximadamente 6% que corresponde à área urbana de Campos do Jordão (Tabela 5.3).

Na região estudada, a elevação varia de 1.800 a 850 m acima do nível do mar, onde a Bacia A está localizada nas terras baixas e as Bacia B e C nas terras altas, próximas à Serra da Mantiqueira. Segundo a classificação de *Köppen* para o clima no Brasil (ALVARES et al., 2013), o clima nas bacias é um subtropical úmido (Cw). As séries temporais de precipitação e fluxo evidenciam uma estação chuvosa durante o verão austral e uma estação seca durante o inverno austral.

Figura 5.1 - Localização das três sub-bacias usadas.



Fonte: Produção do autor.

5.2.2 Descrição dos dados

5.2.2.1 Dados de entrada para o modelo SWAT

Para utilização do modelo SWAT são necessários dois tipos de dados: espaciais e tabulares. Os dados espaciais compreendem o Modelo Digital de Elevação (MDE), o mapa de uso e cobertura da terra e o mapa de solos. Já os dados tabulares correspondem

aos dados quantitativos de precipitação, temperatura, velocidade do vento, umidade relativa e radiação solar (Tabela 5.1).

Tabela 5.1 - Resumo dos dados de entrada do SWAT.

Dados de Entrada SWAT	Resolução Espacial	Fonte
Modelo Digital de Elevação	30 x 30 metros	TOPODATA (VALERIANO, 2008)
Uso e cobertura da terra	30 x 30 metros	MapBiomias (2021)
Solos	1:5.000.000	EMBRAPA (2018)
Precipitação Diária (mm)	0.25°	Xavier et al. (2016)
Temperatura diária (°C)	0.25°	Xavier et al. (2016)
Velocidade do vento diária	0.25°	Xavier et al. (2016)
Umidade relativa diária	0.25°	Xavier et al. (2016)
Radiação solar diária	0.25°	Xavier et al. (2016)

Fonte: Produção do autor.

O modelo digital de elevação (MDE) foi utilizado para delimitar a bacia hidrográfica de estudo e suas sub-bacias, esse modelo é resultado do Projeto TOPODATA, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), gerado a partir do processamento digital do MDE do SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). No TOPODATA os dados do SRTM passaram por correções em relação a ausência de dados em alguns locais, além do refinamento do tamanho do pixel para ~30metros (VALERIANO; ROSSETTI, 2012).

Para a delimitação das Unidades de Respostas Hidrológicas (HRUs) foram necessárias informações de uso e cobertura da terra (a), declividade (b) e solo (c) (Figura 5.2 e Tabela 5.3). O primeiro dado foi obtido do Projeto MapBiomias – Coleção 5 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. Uma iniciativa multi-institucional para gerar mapas anuais de cobertura e uso do solo a partir de processos de classificação automática aplicada a imagens de satélite. O dado compreende o período de 1985 a 2019, no formato matricial, com pixel de 30x30 metros (PROJETO MAPBIOMAS, 2020). O dado do ano de 2018 e a legenda no Nível 2, foi adequada de acordo com o banco de dados do SWAT conforme a Tabela 5.2, nela consta as classes e a sua respectiva descrição do MapBiomias e a classificação determinada pelo banco de dados do SWAT.

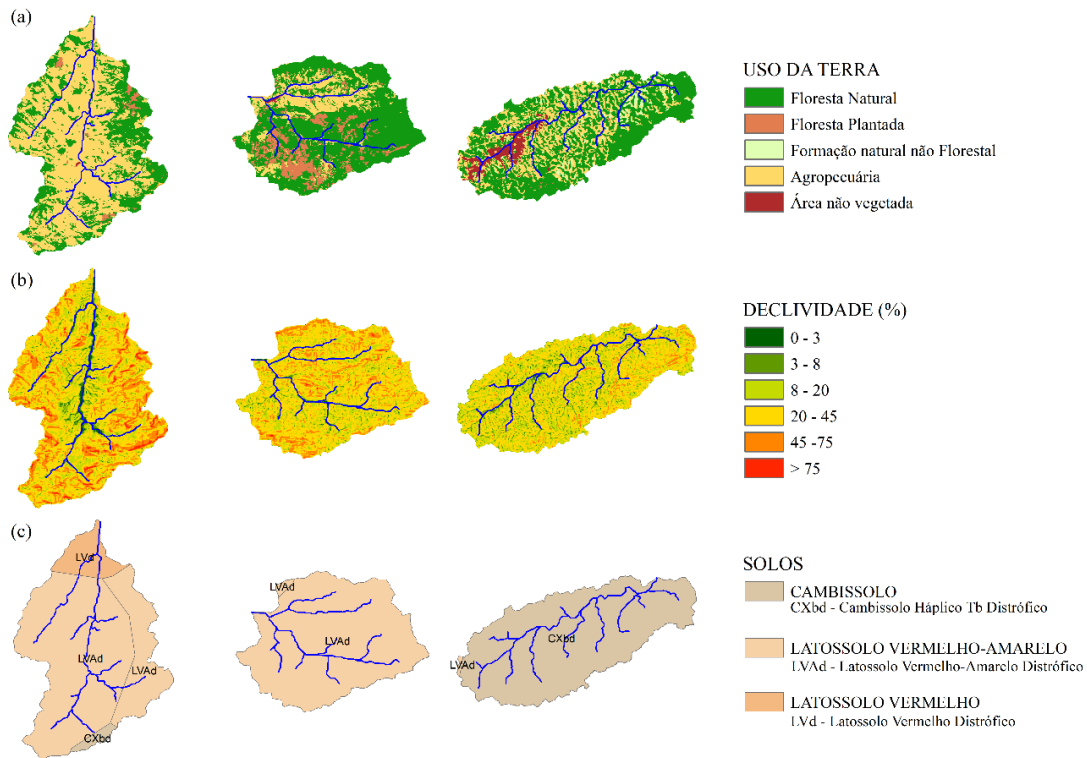
Tabela 5.2 - Descrição das classes de uso e cobertura da terra do MapBiomias e banco de dados SWAT.

Projeto MapBiomias	Descrição MapBiomias	Código SWAT	Descrição SWAT
Floresta Natural	Floresta Ombrófila Densa, Aberta e Mista, Floresta Estacional Semidecídua e Decidual, e Formação Pioneira.	FRSE	Vegetação arbórea nativa com dossel contínuo
Floresta Plantada	Espécies de árvores plantadas para uso comercial (por exemplo, Eucalyptus, Pinus e Araucária)	PINE	Eucalyptus sp ou Pinus sp
Formação Natural Não Florestal	Formações arbustivas (savanas, pastagens, estepes, arbustos e herbáceas) e por rochas naturalmente expostas sem cobertura de solo, muitas vezes com presença parcial de vegetação rupícola e declive elevado.	GRAS	Vegetação arbustiva ou herbácea nativa
Agropecuária	Áreas de pastagem, natural ou plantada, vinculadas à atividade agropecuária. Áreas composta por áreas de cultivo temporário e também por áreas de cultivo perene.	PAST	Áreas desprovidas de cobertura vegetal nativa
Área não vegetada	Infraestrutura urbana	URBN	Áreas edificadas
Corpos d'água	Rios e lagos	WATR	Corpos d'água

Fonte: Produção do autor.

O dado do solo é oriundo do mapeamento de solo da Embrapa (2018), em escala 1:5.000.000, recortado para a área de estudo. Posteriormente os parâmetros físicos requeridos pelo modelo foram calculados a partir de funções desenvolvidas por Saxton e Rawls (2006). As informações de matéria orgânica e granulometria necessárias para as funções foram obtidas no Banco de Dados de Solos (BDSolos) da Embrapa (2014).

Figura 5.2 - Dados de entrada de (a) uso da terra, (b) declividade e (c) solos, necessários para a criação das HRUs pelo SWAT, de cada sub-bacia.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.3 - Síntese dos dados de entrada do modelo SWAT, separado por cada sub-bacia.

		Bacia A (Pastagem)	Bacia B (Floresta)	Bacia C (Urbano)
USO	PAST	66.5%	18.8%	29.0%
	FRSE	31.8%	66.8%	59.9%
	PINE	1.4%	14.1%	0.2%
	URBN	0.2%	0.3%	6.2%
	GRAS	0.1%	0.3%	4.7%
SOLO	CXbd	1.9%	0.0%	99.6%
	LVAd	82.5%	100.0%	0.4%
	LVd	15.5%	0.0%	0.0%
DECLIVIDADE	Plano	4.4%	3.8%	5.6%
	Suave ondulado	4.9%	3.6%	7.2%
	Ondulado	18.1%	18.0%	28.8%
	Forte ondulado	51.4%	59.1%	54.3%
	Montanhoso	18.2%	14.7%	3.9%
	Escarpado	3.1%	0.7%	0.1%

Fonte: Produção do autor.

A declividade utilizada foi baseada nas classificações definidas pela Embrapa (2009), dadas em porcentagem e separadas da seguinte forma: 1) Plano: 0 – 3%; 2) Suave ondulado: 3 – 8%; 3) Ondulado: 8 – 20%; 4) Forte ondulado: 20 – 45%; 5) Montanhoso: 45 – 75%; 6) Escarpado: >75%.

Após a etapa de criação de HRUs, inicia-se o processo das primeiras simulações no SWAT, para isso são necessários dados climáticos tabulares de precipitação, temperatura mínima e máxima, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa. Os dados utilizados são oriundos do banco de dados disponibilizados por Xavier et al. (2016), e possuem resolução espacial de 0,25° em latitude e longitude para todo o território brasileiro. Esses dados derivam da interpolação espacial de dados observados, e são validados por um processo que compara os dados coletados por estações meteorológicas (automáticas e convencionais), com as estimativas obtidas através de seis diferentes métodos de interpolação para cada variável climática. Esses dados compreendem o período de 1980 a 2016, em passo de tempo diário sem falhas.

Posteriormente os dados de vazão foram utilizados no processo de calibração e validação, os quais foram obtidos através do site Hidroweb (<https://www.snirh.gov.br/hidroweb>) da Agência Nacional das Águas (ANA). Assim, na Tabela 5.4 tem-se o resumo dessas estações fluviométricas, com as datas da primeira e última medição e a porcentagem de falhas para o período de disponibilidade dos dados. As cinco primeiras estações são aquelas que estão sobre o Rio Sapucaí (grifadas em azul), sendo a número 1 aquela que se encontra mais próxima da foz do rio.

Tabela 5.4 - Resumo das estações fluviométricas, da Agência Nacional das Águas (ANA) utilizadas no estudo.

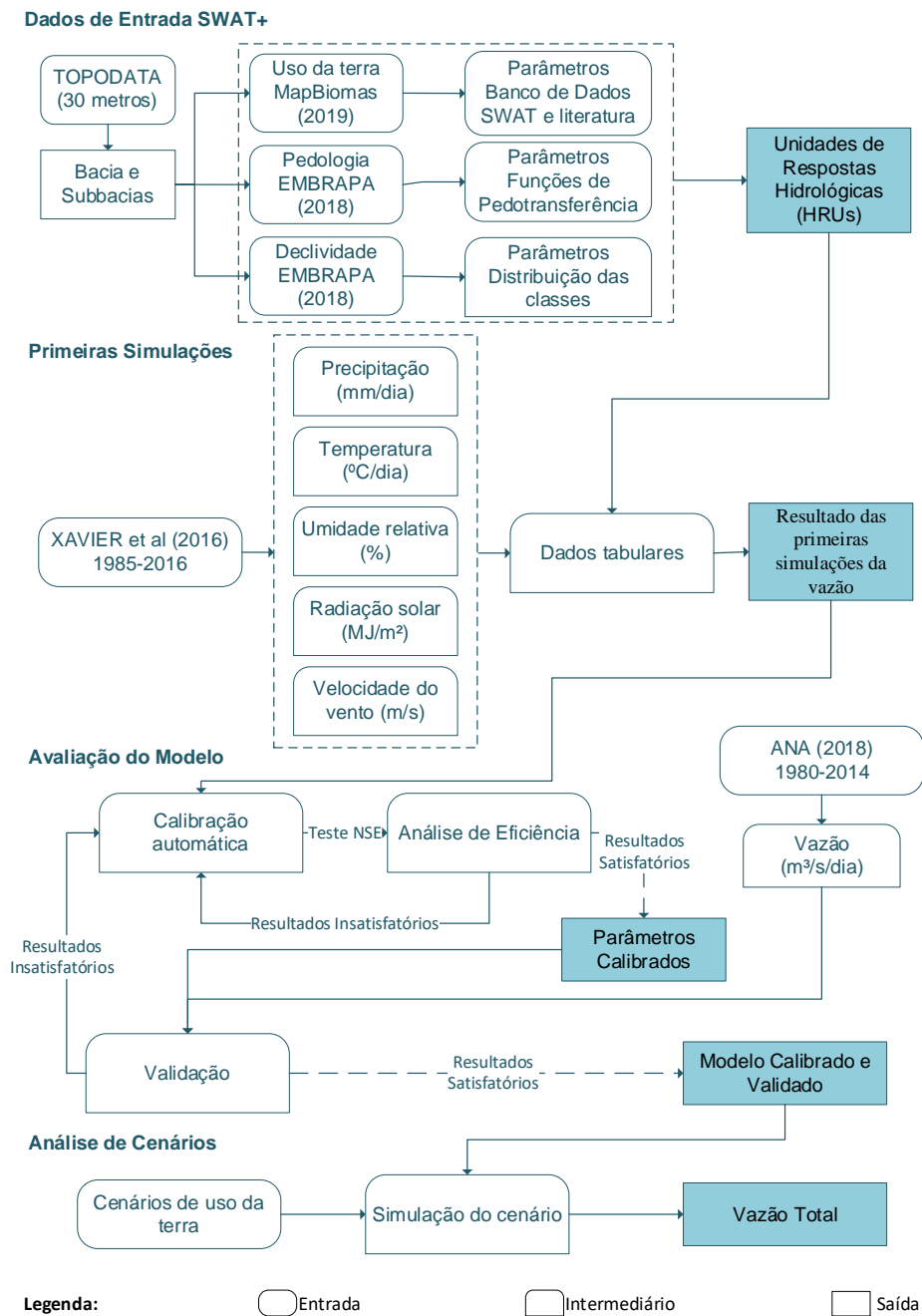
Bacia Correspondente	Código Estação	Data Inicial	Data Final	Falhas (%)
Bacia A – Pastagem	61295000	17/04/1937	31/12/2014	0.11%
Bacia B – Floresta	61267000	13/01/1941	31/12/2014	3.22%
Bacia C - Urbano	61250000	01/10/1934	31/12/2014	0.11%

Fonte: Produção do autor.

5.2.3 Processamento dos dados

Na Figura 5.3, está esquematizado o passo a passo dos procedimentos realizados, iniciando pela organização e pré-processamento dos dados de entrada do modelo, seguindo para a definição dos parâmetros necessários para as primeiras simulações, posteriormente a realização da calibração e validação e finalizando com as análises de cenários de uso e cobertura da terra.

Figura 5.3 - Fluxograma das etapas da metodologia dos processos no ambiente SWAT.



Fonte: Produção do autor.

5.2.3.1 Delimitação das bacias hidrográficas e respectivas HRUs

O primeiro passo foi a delimitação das bacias hidrográficas pelo modelo SWAT, a partir do MDE TOPODATA e da localização das estações fluviométricas, que serviram como base para a escolha da foz de cada bacia.

Com as bacias delimitadas, seguiu-se para a definição das HRUs, para isso foi necessário inserir os dados de uso e cobertura da terra, solos e classes de declividade, cada qual com suas respectivas tabelas, que trazem todas as características descritivas de cada elemento, optou-se por limitar a criação das HRUs em 50 unidades para cada bacia.

Com as HRUs criadas, iniciou-se as primeiras simulações para o período de 1980 a 2014, estabelecendo os seguintes critérios: 4 anos de aquecimento (1980-1984); 16 anos de calibração (1985-2000); 14 anos de validação (2001-2014). Atendendo o recomendado de no mínimo 3 anos de dados diários para o período de aquecimento, 5 anos de dados para calibração, e no mínimo mais 5 anos para o processo de validação do modelo (ABBASPOUR, 2015).

5.2.3.2 Calibração automática, validação e avaliação de desempenho do modelo

A etapa de calibração é uma fase importante e necessária para que os ajustes dos parâmetros sejam realizados. A princípio exige-se que os parâmetros utilizados na modelagem sejam definidos com base em análises de campo, no entanto, como os modelos são aplicados em diferentes escalas, se torna inviável definir tais parâmetros diretamente (ABE, 2017), dessa forma os parâmetros foram escolhidos tomando como base o encontrado na literatura. Na Tabela 5.5, estão listados os parâmetros utilizados neste estudo, com sua descrição e limites estabelecidos.

Tabela 5.5 - Parâmetros de calibração de vazão e seus limites, utilizados para as três bacias hidrográficas de estudo.

Parâmetros	Definição	Limites	
		Min	Máx
cn2	Curva número do escoamento superficial inicial do SCS para a condição de umidade de cada tipo de uso do solo. Baseado em (TUCCI, 2001).	0	100
esco	Fator de compensação de evaporação do solo	0	1
alpha	Fator Alpha para a curva de recessão do aquífero profundo (1/dia)	0	1
ovn	Valor-n de Manning para o canal principal	15	20
cn3_swf	Coefficiente de evaporação	20	30
epco	Fator de compensação de absorção da planta	0	1
awc	Capacidade de água disponível da camada de solo	0.01	1
k	Condutividade hidráulica saturada.	0	2000
surlag	Coefficiente de retardo de escoamento superficial	0.05	24
revap_co	Coefficiente “REVAP”	0.02	0.2
revap_min	Limite profundidade de água em aquífero raso para a percolação de “REVAP” acontecer para o aquífero profundo.	0	5000
perco	Coefficiente de percolação	0	1
slope_lte	Comprimento médio da encosta para erosão	0	10
gwflow_lte	Limite da profundidade de água no aquífero raso necessário para que o retorno da vazão aconteça	0	10
lat_ttime	tempo de viagem do fluxo lateral	0	180
slope	Declive médio em HRU	10	30
slope_len	Média de declividade da sub-bacia	10	50

Fonte: Produção do autor.

A calibração foi realizada a passo de tempo diário e mensal (separadamente), num primeiro momento, de forma automática pelo *SWAT Toolbox*, que utiliza o algoritmo de otimização *Dynamically Dimensioned Search* (DDS), implementado por Tolson e Shoemaker (2007), sendo sua aplicação bem-sucedida na calibração de parâmetros ambientais em bacias hidrográficas (XU et al., 2019). Neste processo, foram realizadas 500 iterações para cada sub-bacia, esse valor é considerado pela literatura, como o ideal

para que, na maioria dos casos, a calibração automática atinja resultados satisfatórios, de acordo com a avaliação de desempenho utilizada para a modelagem (ABBASPOUR, 2015). No entanto, mesmo após essas 500 iterações, na bacia B e C não foram atingidos os níveis satisfatórios, assim foi adotado dois procedimentos para adequar o modelo, a inclusão de novos parâmetros e o ajuste fino dos valores determinado pela calibração automática.

Posteriormente seguiu-se para a validação e avaliação do desempenho do modelo, comparando os resultados obtidos da simulação com os dados observados de vazão das estações fluviométricas da ANA. Assim, desde que a validação do modelo indique bons resultados, o modelo pode ser aplicado para os objetivos que se deseja (ABE, 2017).

Para estas análises, utilizou-se três métricas definidas por Moriasi et al. (2007):

NSE (*Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency*): determina a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados observados, refletindo o ajuste geral de um hidrograma (NASH, 1970). Sendo definido pela Equação 5.1.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (5.1)$$

a) PBIAS (*Percent Bias*) (GUPTA, 1999): indica a tendência média do modelo para super ou subestimar os valores simulados. O valor ótimo do PBIAS é 0%, quando o modelo, está prevendo a variável sem distorções. Definido pela Equação 5.2.

$$PBIAS = 100 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad (5.2)$$

b) R² (Coeficiente de determinação): interpretado como a proporção da variância na variável dependente que é previsível a partir da variável independente. Definido pela Equação 5.3.

$$R^2 = 1 - \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim,i})^2} \quad (5.3)$$

Sendo n o número de dados observados; Q_{obs,i} a vazão observada no dia ou mês; Q_{sim,i} é a vazão simulada no dia ou mês; e $\bar{Q}_{sim,i}$ é a vazão média simulada.

Essas estatísticas foram aplicadas para o período de calibração (1984-2000) e para a validação (2001-2014), e assim comparadas com os valores pré-determinados por

Moriasi et al. (2007) conforme apresentado na Tabela 5.6. E assim, quando as estatísticas foram consideradas com desempenho acima de “Satisfatório” para os dados mensais, o modelo foi considerado calibrado e validado.

Tabela 5.6 - Estatísticas recomendadas para avaliação de desempenho da vazão no modelo.

Desempenho	NSE	PBIAS
Muito bom	$0.75 \leq NSE \leq 1.00$	$PBIAS \leq \pm 15\%$
Bom	$0.65 \leq NSE \leq 0.75$	$\pm 15\% \leq PBIAS \leq \pm 30\%$
Satisfatório	$0.50 \leq NSE \leq 0.65$	$\pm 30\% \leq PBIAS \leq \pm 55\%$
Insatisfatório	$NSE \leq 0.5$	$PBIAS \geq \pm 55\%$

Fonte: Adaptado de Moriasi et al. (2007).

5.2.3.3 Análise de cenários de mudança de uso e cobertura da terra.

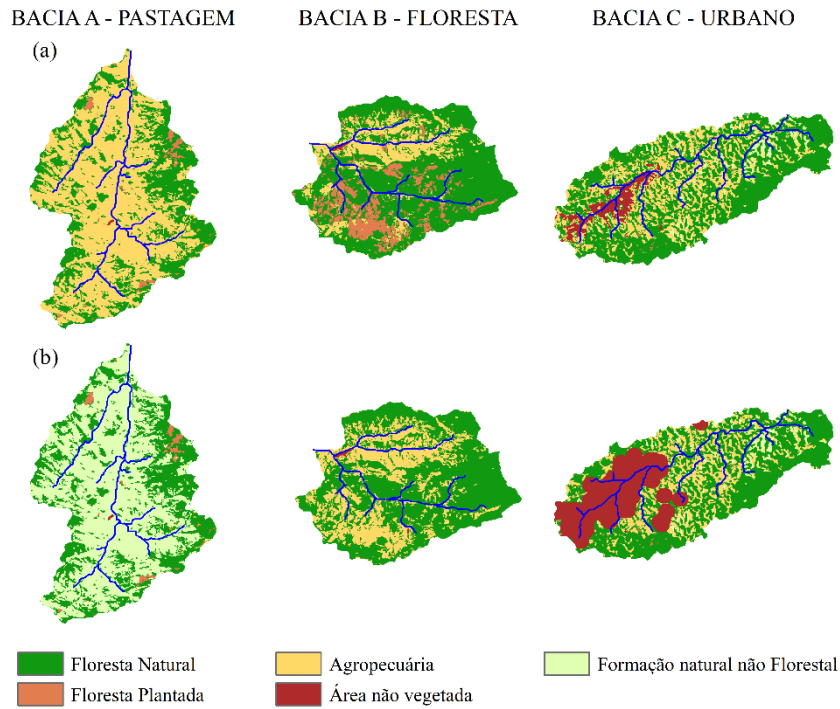
A base dos dados de uso e cobertura da terra do Projeto MapBiomias (2020) foi utilizada para a criação dos cenários, e assim na Figura 5.4, tem-se a comparação da configuração do uso de 2014 (a) e o uso proposto para a análise (b).

As transformações dos usos realizadas para a proposição dos cenários foi o seguinte:

- a) Bacia A (Pastagem): O cenário proposto foi a regeneração das áreas de pastagem (PAST), total de 103,77 km², transformando essa classe em Formação Natural não Florestal (GRAS). Com o objetivo de averiguar, se com a regeneração da paisagem, as taxas de vazão apresentariam uma diminuição, conforme o encontrado na literatura, devido a redução do escoamento direto.
- b) Bacia B (Floresta): Cenário de retirada das áreas de Floresta Plantada (15,78 km²) (PINE), transformando-as em áreas de pastagem (PAST). Com o objetivo de verificar se com o corte dessas áreas, os valores de vazão aumentariam, devido a redução da vegetação que intercepta a precipitação, reduzindo o escoamento.
- c) Bacia C (urbana): Cenário de expansão da área urbanizada (URBN), desconsiderando qualquer aspecto em relação a legislação e preservação ambiental. Foi realizado um buffer de 500 metros ao entorno da configuração urbana de 2014, resultando num aumento de 6% para 23% da área da bacia composta por essa

categoria. Esse aumento foi executado, para inferir sobre se esse aumento seria o suficiente para que houvesse um aumento exacerbado nas taxas de vazão, com a impermeabilização das áreas ao entorno do rio.

Figura 5.4 - Uso da terra atual (a) e uso da terra usado na análise de cenários (b) para as três bacias hidrográficas.



Fonte: Produção do autor.

5.3 Resultados

5.3.1 Calibração e validação da vazão

Como resultado do processo de calibração, os valores adotados para cada parâmetro estão apresentados na Tabela 5.7. Para a Bacia A, a calibração automática já foi suficiente para que o modelo atingisse desempenho satisfatório. Para a Bacia B e C, houve a necessidade de acrescentar outros parâmetros e realizar o ajuste fino (manual), de acordo com o encontrado pela literatura. E para as três bacias, os melhores valores encontrados para a calibração está sobre os dados mensais, isso mostra que o modelo é mais sensível aos dados diários, e com os valores mensais os resultados são suavizados,

o que melhora tanto o modelo quanto a visualização das informações (ABE, 2017), dessa forma apenas as representações mensais foram utilizadas.

Tabela 5.7 - Valores dos parâmetros adotados para o processo de calibração.

Parâmetros	Bacia A - Pastagem	Bacia B - Floresta	Bacia C - Urbano
cn2	21.900	41.064	100
esco	0.016	0.975	0.001
alpha	0.005	0.599	0.905
ovn	-	18.169	2.0
cn3_swf	22.777	21.259	7.707
epco	5.867	0.348	0.00
awc	0.687	0.034	0.010
k	259.221	1184.647	1981.247
surlag	0.368	9.302	0.964
revap_co	0.052	0.120	0.010
revap_min	1415.497	3665.022	5000
perco	0.574	0.982	0.074
slope_lte	0.388	0.007	100
gwflow_lte	-	9.656	2.264
lat_ttime	-	17.479	117.936
slope	-	17.389	500
slope_len	-	29.756	-

Fonte: Produção do autor.

Na Tabela 5.8 estão os resultados obtidos da avaliação do modelo para a Bacia A. Neste caso, não houve a necessidade de inserção ou alteração dos valores obtidos pela a calibração automática. Assim, o modelo atingiu nível satisfatório tanto para os valores diários quanto mensais.

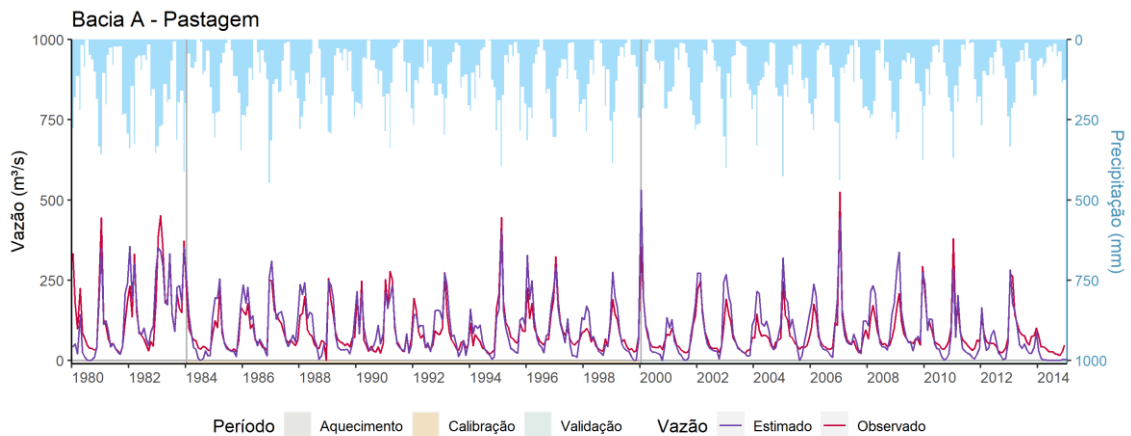
Tabela 5.8 - Resultados obtidos da avaliação do desempenho do modelo para a Bacia A.

	Estatísticas	Calibração	Classificação	Validação	Classificação
Diário	NSE	0.6	Satisfatório	0.5	Satisfatório
	PBIAS	9.6	Muito Bom	6.0	Muito Bom
Mensal	NSE	0.7	Bom	0.7	Bom
	PBIAS	9.9	Muito Bom	6.0	Muito Bom

Fonte: Produção do autor.

Com o modelo calibrado, os resultados obtidos para o fluxo de água para a Bacia A, estão representados na Figura 5.5. Através de uma análise visual, verifica-se que o modelo simula os valores mínimos abaixo e os valores máximos acima do esperado, para o período todo, entre o observado e o estimado.

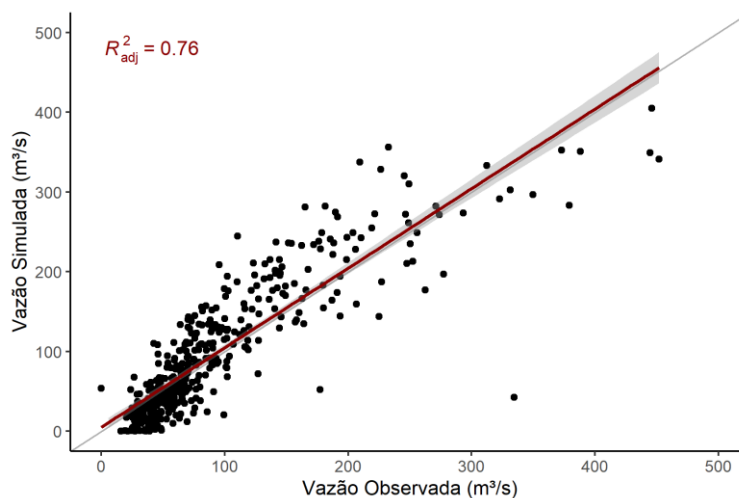
Figura 5.5 - Vazão simulada e observada para a Bacia A, juntamente com os dados observados de precipitação.



Fonte: Produção do autor.

Ao analisar a dispersão dos dados simulados e observados, nota-se que segundo o R^2 , o modelo se ajusta bem as informações, porém há uma subestimação dos valores abaixo de $100 \text{ m}^3/\text{s}$, e uma superestimação após esse valor (Figura 5.6).

Figura 5.6 - Dispersão dos dados simulados e observados para a Bacia A.



Fonte: Produção do autor.

Para a Bacia B, os resultados obtidos pela avaliação do desempenho do modelo estão representados na Tabela 5.9. Neste caso foi necessário inserir mais parâmetros para a realização da calibração, mesmo após as 500 iterações executadas.

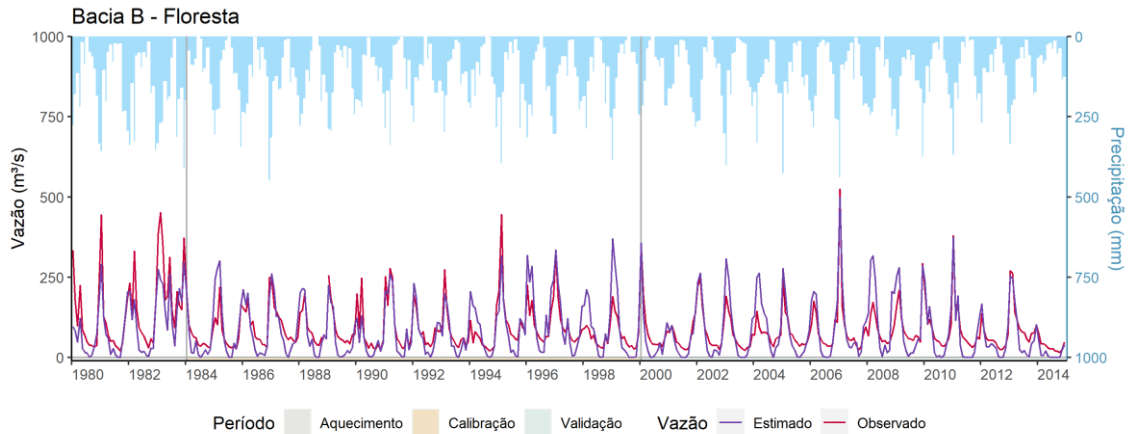
Tabela 5.9 - Resultados obtidos da avaliação do desempenho do modelo para a Bacia B.

	Estatísticas	Calibração	Classificação	Validação	Classificação
Diário	NSE	0.1	Insatisfatório	0.4	Insatisfatório
	PBIAS	17.1	Bom	-3.4	Muito Bom
Mensal	NSE	0.5	Satisfatório	0.6	Satisfatório
	PBIAS	-4.0	Muito Bom	-3.4	Muito Bom

Fonte: Produção do autor.

No caso da Bacia B, a mesma situação encontrada para a Bacia A foi verificada, onde o modelo simula os valores mínimos de fluxo abaixo do esperado e os valores máximo acima (Figura 5.7), representando uma diferença de 1148.025 m³/s entre o observado e o estimado, valor este relacionado com o acumulado total para o período.

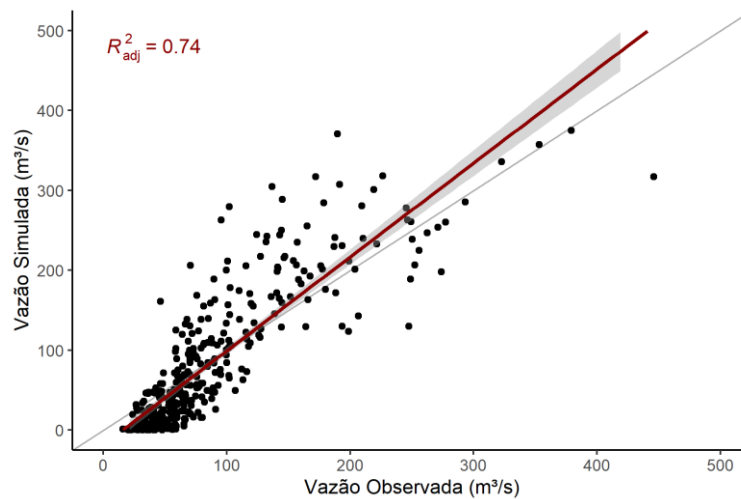
Figura 5.7 - Vazão simulada e observada para a Bacia B, juntamente com os dados observados de precipitação.



Fonte: Produção do autor.

Esse comportamento também pode ser comprovado ao analisar a dispersão dos dados da Bacia B (Figura 5.8), indicando que o modelo está superestimando os valores de pico, e subestimando os fluxos de base.

Figura 5.8 - Dispersão dos dados simulados e observados para a Bacia B.



Fonte: Produção do autor.

A Bacia C, foi a que desprendeu maior tempo para a calibração do modelo, e a que apresentou pior avaliação para as simulações diárias. E apesar do modelo ter apresentado insatisfatório para a validação mensal, decidiu-se prosseguir com as

análises, tendo como suporte os valores de PBIAS classificados como “Muito Bom” (Tabela 5.10).

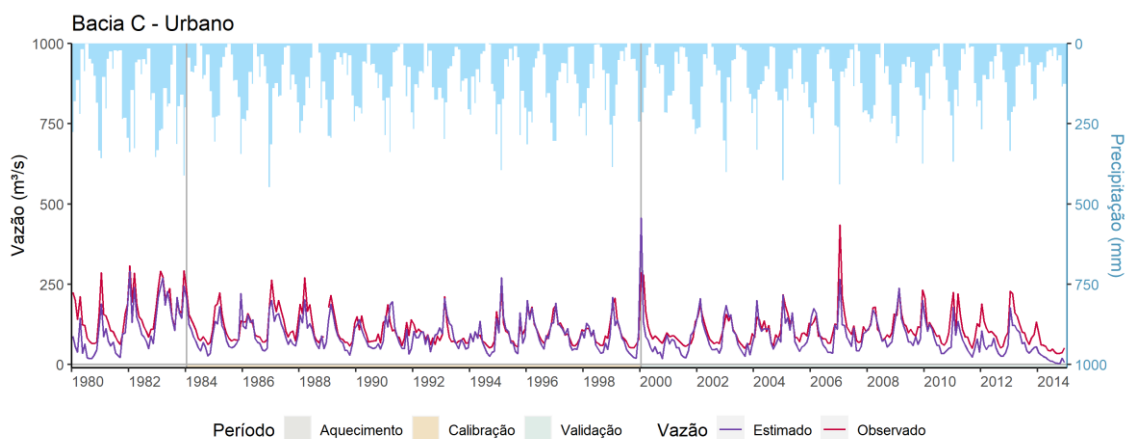
Tabela 5.10 - Resultados obtidos da avaliação do desempenho do modelo para a Bacia C.

	Estatísticas	Calibração	Classificação	Validação	Classificação
Diário	NSE	-0.1	Insatisfatório	-1.4	Insatisfatório
	PBIAS	2.6	Muito Bom	-23.2	Bom
Mensal	NSE	0.6	Satisfatório	0.4	Insatisfatório
	PBIAS	-13.0	Muito Bom	-23.2	Bom

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 5.9, fica evidente, que apesar da pior avaliação entre as três bacias, as simulações foram coerentes com os valores observados, mesmo apresentando em alguns casos, como exemplo, entre os anos de 2006 a 2008, uma subestimação dos valores de máximos.

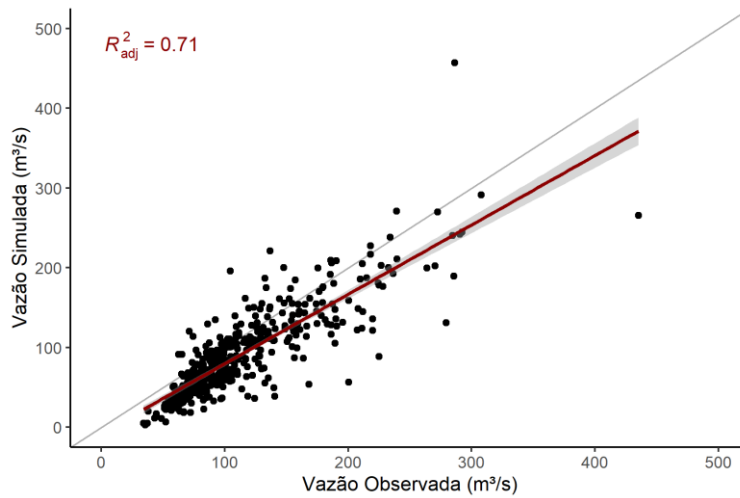
Figura 5.9 - Vazão simulada e observada para a Bacia C, juntamente com os dados observados de precipitação.



Fonte: Produção do autor.

Quando avaliado a dispersão dos valores, o R^2 apresentou-se razoavelmente adequado para a representação do modelo, com uma subestimação considerável em relação a quase todos os dados, principalmente aqueles menores que $200 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 5.10).

Figura 5.10 - Dispersão dos dados simulados e observados para a Bacia C.

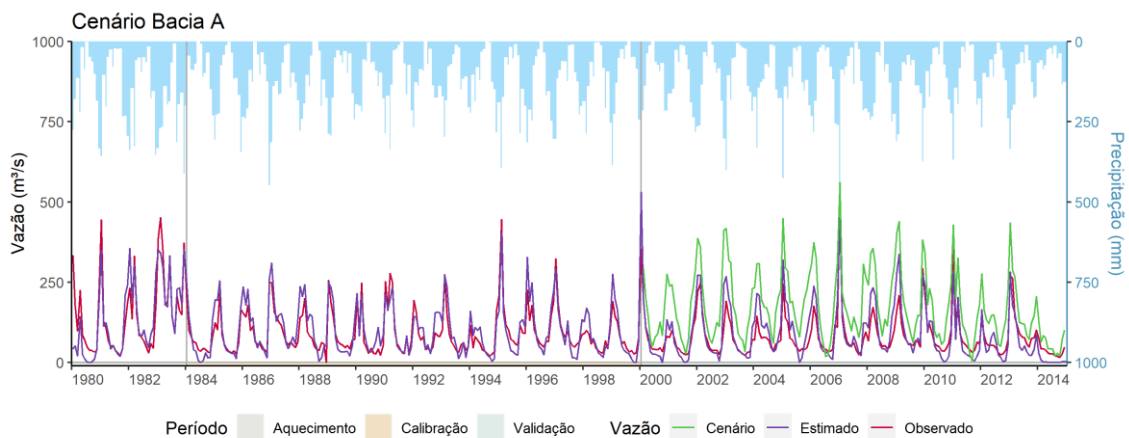


Fonte: Produção do autor.

5.3.2 Análise de cenário de mudança de uso e cobertura da terra

Na proposição dos cenários, para a Bacia A, as áreas de pastagem, passaram por um processo de regeneração, se tornando uma formação natural não florestal, e na Figura 5.11 está representado o resultado obtido através dessa simulação. A qual foi realizada mantendo-se os valores dos parâmetros calibrados anteriormente. Nesse caso nota-se que com a regeneração proposta, ocasionou um resultado fora do esperado, com o aumento dos valores tanto de pico como do fluxo de base, chegando a um acréscimo de 16.082 m³/s de fluxo de água acumulado entre o período de 2000 a 2014.

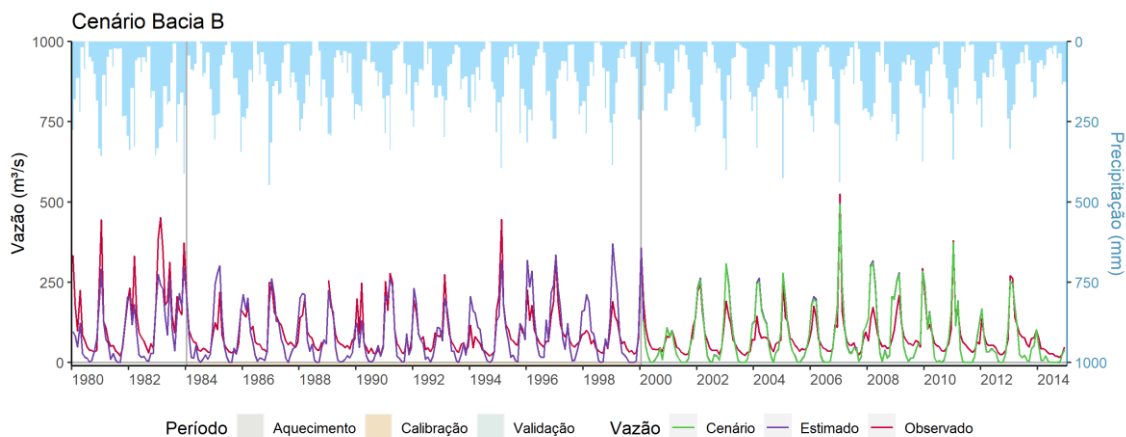
Figura 5.11 - Simulação do cenário de regeneração para as áreas de pastagem na Bacia A.



Fonte: Produção do autor.

O cenário proposto para a Bacia B, está relacionado com o processo de retirada das Florestas Plantadas (~ 10 km²) da sub-bacia, transformando-as em áreas de pastagem. O resultado não apresentou mudanças em relação aos valores estimados e observados (Figura 5.12).

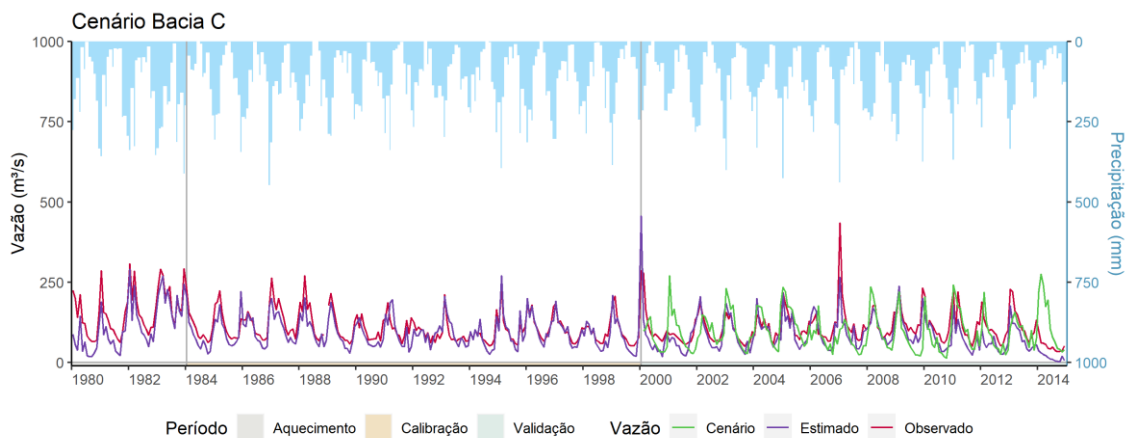
Figura 5.12 - Simulação do cenário de regeneração para as áreas de pastagem na Bacia B.



Fonte: Produção do autor.

Para a Bacia C, o cenário proposto estava relacionado com a expansão da área urbana do município de Campos do Jordão, desconsiderando qualquer situação relacionada com as condições naturais e de legislação ambiental. Dessa forma, o resultado obtido está representado na Figura 5.13, com um aumento geral dos picos, com exceção de situações onde os valores foram acima de 250 m³/s, como entre os anos de 2006 e 2008.

Figura 5.13 - Simulação do cenário de regeneração para as áreas de pastagem na Bacia C.



Fonte: Produção do autor.

5.4 Discussão

Na aplicabilidade do modelo SWAT, vale ressaltar que em relação ao processo de calibração, é importante se conhecer a área de estudo e entender os processos que ocorrem ali, para que os valores inseridos dos parâmetros possam interpretar, de maneira mais realista, o sistema estudado. O SWAT permite que esses valores, sejam inseridos de três maneiras distintas, sendo elas: 1) Porcentagem (*Percentage*) – aumenta ou diminui o valor atual a partir de uma porcentagem específica; 2) Mudança Relativa (*Relative Change*) – aumenta ou diminui o valor atual em um valor especificado; e 3) Substituir (*Replace*) – o valor inserido irá substituir o valor do parâmetro antigo (CHAWANDA, 2021). Dessa forma, tanto os valores como a escolha pelo método de inserção são relevantes, pois isso pode acarretar em alterações na simulação do modelo.

Esse motivo pode ser o que explica o resultado inesperado obtido pelo cenário realizado na Bacia A, onde foi escolhido o método “Substituir” para os parâmetros esco, alpha e epco, que estão relacionados com a absorção e evaporação da água pela planta. Isso leva o modelo a manter o mesmo valor, para todos os tipos de uso e cobertura da terra. Esse método faz com que a variabilidade espacial das coberturas vegetais se perca e dá as mesmas características na geração do parâmetro (CHAWANDA, 2021), no entanto, vale ressaltar que os intervalos e parâmetros usados foram de acordo com aqueles encontrados e sugeridos pela literatura (ABE, 2017; FRANCO, 2017; MALAFAIA FILHO, 2019; ARROIO JUNIOR, 2019), assim, afirma-se que ao se trabalhar com análise de cenários o método “Substituir” não seja o mais adequado para a inserção dos valores dos parâmetros.

No cenário da Bacia A (Figura 5.11), o que se encontrou foi um aumento considerável sobre as taxas de vazão com a regeneração da pastagem, tendo em vista que com o aumento da vegetação, a tendência é de que as taxas de vazão comecem a diminuir, dado que a evapotranspiração, a interceptação e a infiltração aumentam, diminuindo os valores de escoamento superficial, e conseqüentemente, os valores de vazão (ALMEIDA et al., 2012). Outros autores relatam que o aumento das taxas de vazão pode ocorrer, nesse caso, devido ao aumento do volume de chuva, o que pode influenciar na compactação do solo, e assim aumentar o escoamento superficial

(OLIVEIRA et al., 2014), porém neste caso o regime pluviométrico não foi alterado, apenas o uso e cobertura da terra.

Para a Bacia B, com a retirada da área de Floresta Plantada, o que se esperava era a ocorrência de um aumento nas taxas de escoamento superficial e diminuição nas taxas de evapotranspiração, refletindo no aumento das taxas de vazão (BARBOSA, 2015). Porém, não foi encontrado nenhuma alteração em relação aos valores estimados e simulados pelo cenário. Supõe-se que esse fato esteja relacionado com ao tamanho da área de Floresta Plantada na sub-bacia, que corresponde a 14% da área total, e isso culminou na criação de apenas 3 HRUs dentre as 50 criadas pelo modelo, assim a sua retirada não teria sido suficiente a ponto do modelo identificar alterações visíveis nas taxas de fluxo da vazão.

Na simulação do cenário para a Bacia C, com a expansão urbana, com uma maior área impermeável o resultado seria aumento dos picos de vazão, dada a diminuição das taxas de infiltração e armazenamento de água, além do aumento das taxas de escoamento, e isso pode ser verificado pelo modelo. Esse desordenado crescimento urbano, pode trazer impactos para a população ali presente, como a possibilidade da ocorrência de inundações, que pode acarretar em desastres naturais, trazendo inúmeros prejuízos sociais, ambientais e econômicos (GUHA-SAPIR et al., 2014; REIS, 2018).

5.5 Considerações finais

O uso do modelo SWAT auxiliou na simulação do comportamento das taxas de vazão em três sub-bacias de acordo com três cenários propostos de alteração da configuração do uso. O que se esperava era que a vazão fosse se comportar de acordo com o que é dito na literatura, dada as modificações realizadas, no que diz respeito ao aumento ou diminuição das áreas vegetadas, principalmente no impacto direto do escoamento direto e conseqüentemente, aumento ou diminuição das taxas de vazão.

No entanto, os resultados encontrados não foram satisfatórios. Assim o recomendado é que mais estudos e análises sejam realizados sobre os procedimentos da modelagem. Como por exemplo: 1) a realização da execução da calibração do modelo com um método de inserção dos valores dos parâmetros diferente do “Substituir” para as três bacias; 2) a realização de testes de análise de sensibilidade, averiguando quais são os parâmetros mais sensíveis para sua respectiva bacia; 3) a análise do desempenho do

modelo para outras variáveis do ciclo hidrológico, como a evapotranspiração, a fim de complementar a pesquisa sobre a dinâmica da água nas três sub-bacias, bem como avaliar a calibração do modelo sobre os demais elementos.

6 CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES

Essa tese buscou contribuir com informações relevantes a respeito dos impactos das mudanças de uso e cobertura da terra e das mudanças climáticas sobre a bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, fornecendo material para que os objetivos do Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração – Parque Estadual de Campos do Jordão (PELD - PECJ) sejam cumpridos. Assim como, procurou se tornar exemplo para trabalhos de outros estudantes/pesquisadores e gestores ambientais, sendo a sua estruturação pensada como um passo a passo sobre os procedimentos necessários para que uma análise ambiental seja realizada em qualquer área de estudo.

Dessa forma, o Capítulo 2 que traz uma síntese do embasamento teórico, seria o primeiro passo para o entendimento sobre como as forçantes humanas e climáticas atuam sobre o ciclo hidrológico, que desencadeiam uma série de consequências nos âmbitos social, econômico e ambiental. Além de trazer o conhecimento sobre a existência de dados que possam ser utilizados para entender sobre essa abordagem, sendo eles os dados de sensoriamento remoto, e ferramentas e métodos, simples e complexos, que possam ser aplicados com a intenção de entender mais sobre essas questões muito discutidas mundialmente ao longo dos últimos anos.

Em seguida, o Capítulo 3, com o diagnóstico da área de estudo, mostra a importância de se conhecer a área na qual a pesquisa será realizada, trazendo informações relevantes sobre as características hidroclimáticas e de uso e cobertura da terra. No caso da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, ao utilizar dados de sensoriamento remoto, foi possível verificar a dinâmica dos processos dessa área em uma longa série histórica (1980-2016), e comprovou-se que esta bacia já se encontra exposta as mudanças climáticas previstas pelas tendências mundiais, como por exemplo, a tendência de diminuição das taxas de precipitação e aumento da temperatura, trazendo consequências na provisão dos serviços ecossistêmicos, como a diminuição da disponibilidade hídrica. Esses problemas quando associados com as mudanças de uso e cobertura da terra, podem agravar a situação, mesmo se tratando de uma paisagem consolidada, como é o caso da Mata Atlântica, bioma no qual a bacia de estudo está inserida. Com a produção de um diagnóstico, ele aponta qual a situação mais relevante, e auxilia na tomada de decisão de planejadores e gestores, assim como pode se tornar um ponto de partida para o

prosseguimento de estudos mais aprofundados sobre a área em questão. No entanto, vale ressaltar, que esse tipo de trabalho requer uma grande quantidade de informações, exigindo do pesquisador tempo para a escolha e análise dos dados coletados.

Aprofundando mais as análises sobre a dinâmica da área de estudo, procurou com o Capítulo 4, mostrar uma abordagem simples de ser aplicada e que possibilita resultados satisfatórios, cujo objetivo é investigar qual dos condutores climáticos ou atividades humanas mais influenciou nas vazões de água entre 1940 e 2014 para três bacias hidrográficas do sudeste do Brasil, bacias estas com características distintas de uso e cobertura. E para as três bacias, ficou evidente que o forçante humano teve mais influência nas mudanças do fluxo de água do que o clima. Em geral, a maior influência veio das altas taxas de desmatamento no primeiro e segundo período (1940-1952 e 1953-1970), criando áreas para pastagem, além da influência do processo de urbanização, principalmente na Bacia C. Nos últimos períodos (1971-1993 e 1994-2014), as vazões foram influenciadas pelo reflorestamento de áreas nas três bacias estudadas.

Esses resultados contribuíram para o entendimento dos fatores encontrados no Capítulo 3, apontando que apesar da bacia toda estar exposta as tendências mundiais, o fator que contribui para alterações nos componentes do ciclo hidrológico é a atividade humana, o que pode também acarretar e contribuir para as alterações do micro clima local.

Entendendo essas situações, e concluindo que as mudanças de uso e cobertura da terra causaram maiores impactos nessa região de estudo, passou a investigação sob a ótica da modelagem com o Capítulo 5, que complementa os resultados anteriores, e verifica o que aconteceria com o fluxo de água, se a configuração de uso fosse diferente. Porém, vale ressaltar, que a aplicação dessa metodologia, envolve muito mais informações, desprendimento de tempo e processamento de dados, o que a torna complexa, porém essencial para discussões como essa.

Assim, tomando como base os cenários futuros inferidos no Capítulo 4, propôs-se um cenário para cada sub-bacia. Para a bacia A, onde foi observado que graves consequências poderiam ocorrer a longo prazo, com a atuação do clima cada vez maior, o cenário proposto foi o de regeneração dessa paisagem. Para a bacia B, no Capítulo 4, verificou-se que se ela continuar florestada, manteria o seu equilíbrio

climático, e assim o cenário proposto para análise foi o de corte das áreas de reflorestamento. E finalmente, para Bacia C, que poderia responder de forma mais severa entre as três, em relação às mudanças climáticas e ao crescimento populacional, propôs-se o cenário de expansão urbana para a região. Todos os cenários propostos foram pensados com a intenção de avaliar o comportamento das sub-bacias diante de uma nova configuração de uso. Com isso o modelo SWAT, apesar das limitações encontradas, se mostrou uma ferramenta viável, de acordo com a análise de desempenho do modelo, para atender esse objetivo, e avaliar esse comportamento do fluxo de água na área de estudo. No entanto, verificou-se que seria necessário estudos adicionais para que conclusões mais evidentes fosse possível a respeito dos cenários propostos, principalmente no que diz respeito a Bacia A.

Com o final do Capítulo 5, acredita-se que esta tese trouxe contribuições significativas para o meio técnico-científico, fornecendo informações relevantes sobre a área de estudo, assim como, se tornando um exemplo para que outros profissionais possam aplicar as metodologias aqui discutidas em outras áreas, buscando entender e ajudando nas discussões mundiais acerca das mudanças climáticas, sobre o que e como fazer para que os impactos sejam minimizados, além de validar que pesquisas locais também são importantes e fundamentais, tendo a sua contribuição diante do cenário global, alertando, avaliando e/ou quantificando a gravidade do problema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K. C. **SWAT-CUP: Swat calibration and uncertainty programs - a user manual**. Dübendorf, Switzerland: Eawag, 2015. 103 p.
- ABE, C. A. **Swat modelling of streamflow and sediment concentration in an Amazonian basin impacted by artisanal gold mining**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.
- ADDOR, N. et al. A ranking of hydrological signatures based on their predictability in space. **Water Resources Research**, v. 54, p. 8792-8812, 2018.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Hidroweb v3.2.6**. 2021. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Manual de usos consuntivos da água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019.
- ALLAN, R. P. et al. Advances in understanding large-scale responses of the water cycle to climate change. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1472, p. 49-75, 2020.
- ALMEIDA, J. R. D.; SILVA, C. E.; RODRIGUES, M. G. Avaliação dos impactos ambientais do desflorestamento sobre o regime hídrico da região metropolitana de petrópolis (RJ). **Engineering Sciences**, v. 1, n. 1, 2012.
- ALMEIDA, L. T. D. et al. Aspectos morfométricos relacionados ao estudo de enchentes na Bacia do Rio Sapucaí, Minas Gerais. **Nativa**, Sinop, v. 5, p. 169-174, 2017.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **FAE**, Curitiba, v. 20, p. 129-137, 2017.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, p. 1-27, 2004.

ARAGÃO, R. D. et al. Land use and population density impacts on runoff in a Brazilian Northeast Urban Area via Geotechnology and hydrologic modeling. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, 2017.

ARAÚJO, E. M. et al. Uso do sensoriamento remoto como estratégia para a análise e gestão do uso dos solos. **Geama - Ciências Ambientais e Biotecnologia**, p. 23-33, 2021. ISSN 2447-0740.

ARGUELLO, F. V. P. **Simulação hidrológica da bacia do Rio Paraitinga para análise das potenciais causas do evento extremo de cheia e desastre ocorrido na passagem de ano de 2009/2010**. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: model use, calibration, and validation. **Amerian Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.

ARROIO JUNIOR, P. P. A. **Aprimoramento das rotinas e parâmetros dos processos hidrológicos do modelo computacional Soil and Water Assessment Tool - SWAT**. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

BACCINI, A. et al. Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. **Nature Climate Change**, v. 29, p. 1-5, 2012.

BARBOSA, V. H. B. **Modelagem hidrológica em microbacia de eucalipto e pastagem no alto do Rio Doce**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

BEAR, R. et al. Principles of biology. **Legacy**, 2016. Disponível em: <<http://legacy.cnx.org/content/col11569/1.24>>. Acesso em: nov. 2017.

BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta**. Canada: Forrex, 2009.

BENNIE, A.; HENSLEY, M. Advances in soil physics and soil water management research in South Africa 1979-2003. **South African Journal of Plant and Soil**, p. 268-277, 2004.

- BOLIN, B. et al. The global carbon cycle. **Scope**, 1979.
- BOULOMYTIS, V. et al. Proposta metodológica para o estudo da reflectância e da transmitância de uma superfície lambertiana no âmbito do sensoriamento remoto. **Latin-American Journal of Physics Education**, p. 461-466, 2011.
- BOURDIN, D. R.; NIPEN, T. N.; STULL, R. B. Reliable probabilistic forecasts from an ensemble reservoir inflow forecasting system. **Water Resources Research**, n. 50, p. 3108-3130, 2014.
- BOUROTTE, C. L. M. Midia ATP Usp. **O ciclo da água**, 2011. Disponível em: <https://midia.atp.usp.br/plc/plc0011/impressos/plc0011_top06.pdf>.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudanças climáticas**. 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80108/BRASIL%20iNDC%20portugues%20FINAL.pdf>>.
- BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Lei nº9.433, de 8 de janeiro de 1997**: institui a política nacional de recursos hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1 da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm.
- BRASIL. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000**: regulamenta o art. 225, incisos I, II, III e IV a Consituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm.
- BRESSIANI, D. D. A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index, complex watershed modeling, different calibration techniques, and ensemble streamflow forecasting**. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.
- BRINCK, K. et al. High resolution analysis of tropical forest fragmentation and its impact on the global carbon cycle. **Nature Communications**, v. 8, e14855, 2017.

- BURROUGH, P. A.; MCDONELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. New York: Oxford University Press, 1998.
- BUTCHART, S. H. M. et al. Global biodiversity: indicators of recent declines. **Science**, v. 328, p. 1164-1168, 2010.
- CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, p. 163-203, 1962.
- CANTADOR, D. C. **Diagnóstico da gestão dos recursos hídricos no município de Americana (SP), utilizando geotecnologias**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.
- CARVALHO, R. G. D. As bacias hidrográficas enquanto unidades de planejamento e zoneamento ambiental no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, v. Esp., p. 26-43, 2014. ISSN: 2176-5774.
- CASTRO, I. E. D. O problema da escala. In: CASTRO, I. E. D.; GOMES, P. C. D. C.; CORRÊA, R. L.(Ed.). **Geografia: conceitos e temas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2009. p. 117-140.
- CAVALCANTE, R. B. L. et al. Opposite effects of climate and land use changes on the annual water balance in the Amazon Arc of deforestation. **Water Resources Research**, v. 55, p. 3092-3106, 2019.
- CECILIO, R. A. et al. Method for spatialization of the climatic water balance elements. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 478-488, 2012.
- CERQUEIRA, R. et al. Fragmentação: alguns conceitos. In: RAMBALDI, D. M.; OLIVEIRA, D. A. S. (Ed.). **Fragmentação de ecossistemas: causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas**. Brasília: MMA, 2003.
- CHAPIN III, F. S.; MATSON, P. A.; MOONEY, H. A. **Principles of terrestrial ecosystem ecology**. New York: Springer, 2002.
- CHAWANDA, C. J. **SWAT+ Toolbox user manual**. [S.l.: s.n.], 2021.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 236 p.

CIAIS, P. et al. Carbon and other biogeochemical cycles. In: STOCKER, T. F., et al. (Ed.). **Climate change 2013: the physical science basis: contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. New York: Cambridge University Press, 2013. p. 465-570.

COLLISCHONN, B.; TUCCI, C. E. M. Relações regionais entre precipitação e evapotranspiração mensais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 205-214, 2014.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (COPASA). **Plano diretor de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí: diagnóstico e prognóstico**. Belo Horizonte: COPASA, 2010. 407 p.

CUSACK, D. F. et al. **Global change effects on humid tropical forests: evidence for biogeochemical and biodiversity shifts at an ecosystem-scale**. [S.l.]: AGU, 2016.

DAVID, P. C.; CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B. Uso de assinaturas hidrológicas para classificação de bacias hidrográficas do Brasil. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 23., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais...** 2019.

DEBORTOLI, N. S. et al. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural Hazards**, v. 86, p. 557-582, 2017.

DECIAN, V. S. et al. Dinâmica do uso e cobertura da terra e fragmentação florestal em uma área de drenagem no norte do Rio Grande do Sul. **Perspectiva**, v. 40, n. 149, p. 21-32, 2016.

DESSAY, N. et al. Uma análise das diferenças de comportamentos da vegetação na América do Sul durante os dois eventos El Niño de 1982-1983 e 1997-1998. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz de Iguaçu. **Anais...** 2002.

DEY, P.; MISHRA, A. Separating the impacts of climate change and human activities on streamflow: a review of methodologies and critical assumptions. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 278-290, 2017.

DIAS, L. C. P. et al. Patterns of land use, extensification, and intensification of Brazilian agriculture. **Global Change Biology**, v. 22, may 2016.

- DOSDOGRU, F. et al. Potential impacts of land use/cover and climate changes on ecologically relevant flows. **Journal of Hydrology**, v. 584, 2020.
- DYM, C. L. **Principles of mathematical modeling**. 2.ed. California: Academic Press, 2004.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa, 2009. 412p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA SOLOS). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5.ed. Brasília: MMA, 2018.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA SOLOS). **Banco de dados de solos**. Embrapa, 2014. Disponível em: <https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html>. Acesso em: jul. 2020.
- EUSER, T. et al. A framework to assess the realism of model structures using hydrological signatures. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, n. 5, 2013.
- FEDRA, K. GIS and environmental modeling. In: GOODCHILD, M. F.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (Ed.). **Environmental modeling with GIS**. New York: Oxford University Press, 1993. p. 35-50.
- FILOSO, S. et al. Impacts of forest restoration on water yield: a systematic review. **PLoS One**, v. 12, p. 1-26, 2017.
- FONTES JÚNIOR, R. V. D. P. **Experimentação e modelagem hidrológica aplicada à bacia do Alto Ipanema-PE**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.
- FOOLADI, M. et al. Trend analysis of hydrological and water quality variables to detect anthropogenic effects and climate variability on a river basin scale: a case study of Iran. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 34, p. 11-23, 2021.
- FRAGOSO JUNIOR, C. R.; FERREIRA, T. F.; MARQUES, D. D. M. **Modelagem ecológica em ecossistemas aquáticos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- FRANCO, A. C. L. **Calibração do modelo SWAT com evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto e vazão observada**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

FU, R. et al. Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 45, p. 18110-18115, 2013.

FUKUNAGA, D. C. et al. Application of the SWAT hydrologic model to a tropical watershed at Brazil. **Catena**, v. 125, p. 206-213, 2015.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2019/2020**. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica; Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021.

GAO, G. et al. Determining the hydrological responses to climate variability and land use/cover change in the Loess Plateau with the Budyko framework. **Science of the Total Environment**, p. 331-342, 2015.

GASSER, E. et al. A review of modeling the effects of vegetation on large wood recruitment processes in mountain catchment. **Earth-Science Reviews**, p. 350-373, 2019.

GENTINE, P. et al. Coupling between the terrestrial carbon and water cycles: a review. **Environmental Research Letters**, v. 14, 2019.

GOTARDO, R. et al. Evapotranspiração potencial (ETp) e real (ETr) para diferentes usos da terra em uma bacia hidrográfica no sul do Brasil. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, p. 109-126, 2018.

GREEN, W. H.; AMPT, G. Studies of soil physics, part I - the flow of the air and water through soils. **Journal of Agricultural Research**, v.4, n.1, p. 1-24, 1911.

GUHA-SAPIR, D.; HOYOIS, P. H.; BELOW, R. **Annual disaster statistical review 2013**. Brussels: [s.n.], 2014.

GUO, Z. Estimating method of maximum infiltration depth and soil water supply. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

GUZHA, A. C. et al. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: evidence from East Africa. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 15, p. 49-67, 2018.

- HAGGETT, P.; CHORLEY, R. J. Modelos, paradigmas e a nova geografia. In: CHORLEY, R. J.; HAGGETT, P. (Ed.). **Modelos integrados em geografia**. Rio de Janeiro: LTC, 1974. p. 222.
- HALL, F. G.; STREBEL, D. E.; SELLERS, P. J. Linking knowledge among spatial and temporal scales? vegetation, atmosphere, climate and remote sensing. **Landscape Ecology**, v. 2, p. 3-22, 1988.
- HARGREAVES, G. H.; ALLEN, R. G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 129, n. 1, p. 53-63, 2003.
- HARGREAVES, G. L.; HARGREAVES, G. H.; RILEY, J. P. Agricultural benefits for Senegal River Basin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 111, p. 113-124, 1985.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **SIDRA**: sistema IBGE de recuperação automática. 2012. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/acervo#/S/Q>>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico**. 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/>>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Balanco hídrico climatológico decendial**. 2020. Disponível em: <<http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/climatologia/bhclimatologiconormal/index.jsessionid=70b4291ba67fd73beb4bf9470d62>>.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **BDMEP**: Banco de Dados Meteorológicos do INMET. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br>>. Acesso em: 2021.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Impacts, adaptation, and vulnerability** - Part A: global and sectoral aspects. [S.l.]: IPCC, 2014.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Sumário para os tomadores de decisão do quinto relatório de avaliação (2014)**. São Paulo: [s.n.], 2015. 47p.

- JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2.ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- JOLY, C. A.; METZGER, J. P.; TABARELLI, M. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. **New Phytologist**, v. 204, p. 459-473, 2014.
- JUNG, C. G.; KIM, S. J. Assessment of the water cycle impact by the Budyko curve on watershed hydrology using SWAT and CO2 concentrations derived from Terra MODIS GPP. **Ecological Engineering**, v. 118, p. 179-190, 2018.
- KAYANO, M. T.; MOURA, A. D. O El Niño de 1982-83 e a precipitação sobre a América do Sul. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 4, p. 201-214, 1986.
- KEENAN, R. et al. Dynamics of global forest area: results from the fao global forest resources assessment 2015. **Forest, Ecology and Management**, v. 359, p. 9-20, 2015.
- KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. **Handbuch der Klimatologie**, Berlin, v. 1, pt. C, p. 1-44, 1936.
- LAMPARTER, G. et al. Modelling hydrological impacts of agricultural expansion in two macro-catchments in Southern Amazonia, Brazil. **Regional Environmental Change**, v.18, p. 1-13, 2016.
- LAURANCE, W. F. et al. Averting biodiversity collapse in tropical forest protected areas. **Nature**, v. 489, p. 290-294, 2012.
- LAWRENCE, D.; VANDECAR, K. Effects of tropical deforestation on climate and agriculture. **Nature Climate Change**, v. 5, p. 27-36, 2015.
- 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**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- LEWIS, S. L.; EDWARDS, D. P.; GALBRAITH, D. Increasing human dominance of tropical forests. **Science**, v. 349, p. 827-832, 2015.
- LIAN, J. et al. Separating the relative contributions of climate change and ecological restoration to runoff change in a mesoscale karst basin. **Catena**, v. 194, 2020.

LIANG, X. et al. A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general-circulation models. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. D7, p. 14415-14428, 1994.

LIMA, A. J. R. **Os diferentes atores sociais e suas percepções na construção de um sistema de monitoramento da governança das águas**. Jundiaí: Paco, 2021.

LIU, W. et al. Hydrological recovery in two large forested watersheds of southeastern China: the importance of watershed properties in determining hydrological responses to reforestation. **Hydrological Earth System Science**, v. 20, p. 4747-4756, 2016.

LORENZETTI, J. A. **Princípios físicos de sensoriamento remoto**. São Paulo: Blucher, 2015.

MACEDO, F. L. D. et al. Determinação da evapotranspiração real diária em diferentes usos e ocupação do solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, p. 1529-1542, 2016.

MACHADO, R. E.; LOPES, M. S.; RIBEIRO, L. C. L. J. Effect of the substitution of agricultural uses by forest on the hydrological processes in a tropical watershed: analysis through hydrological simulation. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 5, p. 272-286, 2018.

MALAFAIA FILHO, M. **Aplicação do SWAT na modelagem hidrológica da bacia do rio Paraíba do Sul**. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

MARENGO, J. A. et al. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, e L12703, 2011.

MARENGO, J. A. et al. Meteorological context of the onset and end of the rainy season in Central Amazonia during the 2014-15 GO-Amazon Experiment. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, p. 7671-7681, 2017.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **Revista GeoUsp Espaço e Tempo**, v. 19, 2015. ISSN 2179-0892.

- MARHAENTO, H. et al. Attribution of changes in the water balance of a tropical catchment to land use change using the SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 31, p. 2029-2040, 2017.
- MARIA, A. Introduction to modelling and simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1997. **Proceedings...** 1997.
- MARTINS, L. L. et al. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacias hidrográficas caracterizadas pela expansão do cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 576-594, 2020.
- MCMILLAN, H. K. A review of hydrologic signatures and their applications. **Wires Water**, p. 1-23, Nov. 2020.
- METZGER, J. P. Editorial conservation issues in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v. 142, n. 2, p. 1138-1140, 2009.
- MILLY, P. C. D. et al. Stationarity is dead: whiter water management? **Science**, v. 319, p. 573-574, 2008.
- MINUZZI, R. B. et al. Influência do fenômeno climático El Niño no período chuvoso da região sudeste do Brasil. **Revista Geografia UEL**, v. 15, p. 5-19, 2006.
- MOORE, N. et al. Uncertainty and the changing hydroclimatology of the Amazon. **Geophysical Research Letter**, v. 34, n. 14, e L12707, 2007.
- MOREIRA, H. M.; GIOMETTI, A. B. R. Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no mecanismo de desenvolvimento limpo por meio de projetos em energia limpa. **Contexto Internacional**, p. 9-47, 2008.
- MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007.
- NEITSCH, S. L. et al. **Soil & water assessment tool theoretical documentation**. Texas: Texas A&M University System, 2011.
- NIJKINK, R. C. et al. The added value of remote sensing products in constraining hydrological models. In: EGU GENERAL ASSEMBLY, 19., 2017. **Proceedings...** 2017.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1992. 308 p.

NYBERG, G. et al. Soil property changes over a 120-yr chronosequence from forest to agriculture in western Kenya. **Hydrology Earth System Science**, v. 16, p. 2085-2094, 2012.

OLIVEIRA, A. S. D. et al. Stream flow regime of springs in the Mantiqueira Mountain Range region, Minas Gerais State. **Cerne**, v. 3, 2014.

OLIVEIRA, L. T. **Aplicação do modelo SWAT para simular vazões em uma bacia hidrográfica em Aracruz, ES**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

PAI, N.; SARASWAT, D. SWAT2009_LUC: a tool to activate the land use change module in SWAT 2009. **Transactions of the ASABE**, v. 54, n. 5, p. 1649-1658, 2011.

PAN, G. et al. Managing soil organic carbon for multiple benefits case studies – positive exemplars. Benefits of SOM in agro-ecosystems: a case of China. **Benefits of Soil Carbon**, v. 71, p. 383-401, 2014.

PENG, L. et al. Determinants of the ratio of actual to potential evapotranspiration. **Global Change Biology**, p. 1326-1343, 2019.

PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Agrometeorologia**, Bragantia, 2005.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Balanço hídrico climatológico. In: _____ (Ed.). **Agrometeorologia fundamentos e aplicações práticas**. [S.l.]: Agropecuária, 2002. p. 247-267.

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change-point problem. **Journal of the Royal Statistical Society**, v. 28, p. 126-135, 1979.

PILAŠ, I. et al. Multidimensionality of scales and approaches for Forest? Water interactions. In: BREDEMEIER, M., et al. (Ed.). **Forest management and the water cycle**. Netherlands: Springer, 2010. p. 351-380.

PRIESTLEY, C. F. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, p. 81-92, 1973.

PROJETO MAPBIOMAS. **Projeto MapBiomas**: coleção 5.1 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil. 2020. Disponível em: <<http://mapbiomas.org>>.

REIS, J. B. C. D. **Modelo hidrológico distribuído para o monitoramento de inundações na bacia do Rio Sapucaí, MG**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

RENNER, M.; SEPPELT, R.; BERNHOFER, C. Evaluation of water-energy balance frameworks to predict the sensitivity of streamflow to climate change. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 1419-1433, 2012.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, p. 1141-1153, 2009.

RIZZO, R. et al. Land use changes in Southeastern Amazon and trends in rainfall and water yield of the Xingu River during 1976-2015. **Climate Change**, 2020.

RODHE, H. Modeling biogeochemical cycles. In: BUTCHER, S. S., et al. (Ed.). **Global biogeochemical cycles**. [S.l.]: Academic Press, 1992. p. 55-72.

RODRIGUES, G. et al. Climatological hydric balance and the trends analysis climatic in the region of Machado in Minas Gerais State, Brazil. **American Journal of Climate Change**, v. 7, p. 558-574, 2018.

ROSSATO, L.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S. Avaliação da umidade do solo no Brasil durante o episódio El Niño (1982/83). **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, p. 143-153, 2005. ISSN 0104-1347.

SADATSHOJAIE, A.; RAHIMPOUR, M. R. CO₂ emission and air pollution (volatile organic compounds, etc.) - related problems causing climate change. In: BASILE, A.; CASSANO, A.; FIGOLI, A. (Ed.). **Current trends and future developments on (bio-) membranes**. [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 1-30.

- SAWICZ, K. A. et al. Characterizing hydrologic change through catchment classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 273-285, 2014.
- SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. **Soil Science Society of Agronomy Journal**, p. 1569-1578, 2006.
- SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. **Biodiversity Conservation**, v. 24, p. 2319-2331, 2015.
- SCHULZE, E. et al. Approaches to model processes at the ecosystem level. In: BERLIM, H. (Ed.). **Plant ecology**. [S.l.]: Springer, 2019.
- SILVA, J. V. F.; FERREIRA, V. O.; BRITO, J. L. S. Diagnóstico ambiental da Bacia do Ribeirão Douradinho, no triângulo mineiro, através de adaptação e aplicação da matriz de Leopold. **Revista Cerrados**, v.19, n.1, p. 361-382, 2021.
- SILVA, M. K. A.; ROSA, R. Aquisição de dados espaciais e acesso a novas tecnologias para estudos hidrometeorológicos. **Revista Geonorte**, v. 3, n. 9, p. 1279-1290, 2016.
- SILVA, V. O. **Eventos de seca na região sudeste do Brasil: ocorrências temporais e comportamento futuro**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- SIQUEIRA, P. C. **Cenários de uso do solo baseados na cobertura de Áreas de Preservação Permanente (APP) e simulação hidrológica na bacia do rio Sapucaí**. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.
- SMITH, P. et al. Biogeochemical cycles and biodiversity as key drivers of ecosystem services provided by soils. **Soil**, v. 537, p. 537-586, 2015.
- SOUZA, G. F. A. et al. Padrões e tendências das pastagens do Brasil: uma análise a partir de imagens índice de vegetação MODIS e algoritmos de detecção de mudanças. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 18., 2017, Santos. **Anais...** 2017. p. 4977-4984.
- SOUZA, L. F. D. et al. Modeling land use change impacts on a tropical river basin in Brazil. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 2020.

SOUZA, M. L. D. **Mudar a cidade:** uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbanos. Rio de Janeiro: Bertrand, 2008. 560 p.

SPRACKLEN, D. V.; ARNOLD, S. R.; TAYLOR, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, v. 489, n. 7415, p. 282-285, 2012.

STEPHENS, C. M. et al. Landscape changes and their hydrologic effects: interactions and feedbacks across scales. **Earth-Science Reviews**, 2021.

TAGUE, C.; BAND, L. RHESSys: Regional Hydro-ecologic simulation system: an object-oriented approach to spatially distributed modeling of carbon, water and nutrient cycling. **Earth Interactions**, v. 8, n. 19, p. 1-42, 2004.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology, 1955.

TOKINAGA, H. et al. Slowdown of the Walker circulation driven by tropical Indo-Pacific warming. **Nature**, v. 491, p. 439-443, 2012.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. **Water Resources Research**, v. 43, p. 1-6, 2007.

TOMER, M. D.; SCHILLING, K. E. A simple approach to distinguish land-use and climate-change effects on watershed hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 376, p. 24-33, 2009.

TRENBERTH, K. E. The definition of El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 12, p. 2771-2778, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia:** ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS; ABRH, 2001.

TURETTA, A. P. D. **Mudanças de uso da terra em bacias hidrográficas**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

TURNER II, B. L.; LAMBIN, E. F.; REENBERG, A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. **PNAS**, v. 104, n. 52, p. 20666-20671, 2007.

- VALERIANO, M. D. M.; ROSSETTI, D. D. F. Topodata: brazilian full coverage refinement of SRTM Data. **Applied Geography**, v. 32, p. 300-309, 2012.
- VAZ, A. P. M. E. S.; RAMOS, S. M.; FROEHNER, S. J. **Bacia hidrográfica do rio balsas**: diagnóstico físico e avaliação qualitativa de áreas suscetíveis à erosão. [S.l.: s.n.], 2021.
- VERBESSELT, J. et al. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. **Remote Sensing Environmental**, n. 114, p. 106-115, 2010.
- VIOLA, M. R. **Simulação hidrológica na cabeceira da bacia hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- VOGEL, R. M. et al. Hydrology: the interdisciplinary science of water. **Water Resources Research**, p. 4409-4430, 2015.
- WALTER, H.; LIETH, H. **Klimadiagramm-Weltatlas**. Jena: Pustl. Gustav Fischer, 1967.
- WANG, S. et al. Isolating the impacts of climate change and land use change on decadal streamflow variation: assessing three complementary approaches. **Journal of Hydrology**, v. 507, p. 63-74, 2013.
- WARING, R. H.; RUNNING, S. W. **Forest ecosystems: analysis at multiple scales**. 3. ed. California: Academic Press, 2007.
- WEI, X. H.; LIU, W. F.; XHOU, P. C. Quantifying the relative contributions of forest change and climatic variability to hydrology in large watersheds: a critical review of research methods. **Water**, v. 5, n. 2, p. 728-746, 2013.
- WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Sensitivity analysis, calibration and validations for multisite and multivariable SWAT model. **Journal of American Water Resources Association**, v. 41, n. 5, p. 1077-1089, 2005.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, n. 36, p. 2644-2659, 2016.

- XU, J. et al. Dynamically dimensioned search embedded with piecewise opposition-based learning for global optimization. **Scientific Programming**, p. 20, 2019.
- YANG, Q.; ZHANG, X. Improving SWAT for simulating water and carbon fluxes of forest ecosystems. **Science of the Total Environment**, p. 1-11, 2016.
- YE, X. et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China. **Journal of Hydrology**, v. 494, p. 83-95, 2013.
- YILMAZ, K. K.; GUPTA, H. V.; WAGENER, T. A process-based diagnostic approach to model evaluation: application to the NWS distributed hydrologic model. **Water Resources Research**, v. 44, e W09417, 2008.
- ZELLWEGER, F. et al. Forest microclimate dynamics drive plant responses to warming. **Science**, v. 368, p. 772-775, 2020.
- ZHANG, L. et al. Water balance modeling over variable time scales based on the Budyko framework. **Journal of Hydrology**, p. 117-131, 2008.
- ZHANG, W. et al. Temporal and spatial variability of annual extreme water level in the Pearl River Delta region, China. **Global and Planetary Change**, v. 69, p. 35-47, 2009.
- ZHANG, Y. et al. Effects of climate change on lake area and vegetation cover over the past 55 years in Northeast Inner Mongolia grassland, China. **Theoretical and Applied Climatology**, 2019.

**APÊNDICE A – TABELA COM A DESCRIÇÃO DOS MUNICÍPIOS
PERTENCENTES A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SAPUCAÍ
REFERENTE AO CAPÍTULO 1**

Tabela A.1 - Síntese dos Municípios que Compreendem a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí.

Município	Área Total (km²)	% de área da bacia no município	População área urbana (habitantes)	População área rural (habitantes)	Total população (habitantes)
Aiuruoca	649.18	8.74	3123	3050	6173
Alagoa	161.23	13.84	1110	1599	2709
Alfenas	849.98	100.00	69127	4595	73722
Alpinópolis	454.62	7.16	14994	3496	18490
Alterosa	361.85	100.00	10000	3714	13714
Areado	283.00	100.00	11530	2199	13729
Baependi	749.96	97.99	13245	5047	18292
Boa Esperança	860.07	31.80	32188	6321	38509
Borda Da Mata	300.97	97.31	13729	3400	17129
Botelhos	334.00	24.22	11368	3567	14935
Brasópolis	367.43	100.00	7891	6772	14663
Cabo Verde	368.10	78.35	7627	6196	13823
Cachoeira De Minas	304.05	100.00	7064	3970	11034
Camanducaia	528.42	5.61	15475	5599	21074
Cambuí	244.45	100.00	22362	4129	26491
Cambuquira	246.19	100.00	10513	2145	12658
Campanha	335.33	100.00	13328	2107	15435
Campestre	577.61	81.34	10971	9730	20701
Campo Do Meio	275.26	100.00	10106	1412	11518
Campos Do Jordão	288.47	100.00	47526	298	47824
Campos Gerais	769.01	87.90	19177	8446	27623
Capitólio	521.57	0.45	6504	1681	8185
Careaçu	180.89	100.00	4706	1596	6302
Carmo Da Cachoeira	505.93	6.85	8966	2870	11836
Carmo De Minas	322.03	100.00	10189	3563	13752
Carmo Do Rio Claro	1063.92	100.00	14362	6064	20426
Carvalhópolis	81.05	100.00	2461	889	3350
Caxambu	100.40	100.00	21266	453	21719
Conceição Da Aparecida	353.14	100.00	6201	3613	9814
Conceição Das Pedras	102.13	100.00	1509	1240	2749
Conceição Do Rio Verde	369.39	100.00	11450	1500	12950
Conceição Dos Ouros	180.12	100.00	8123	2265	10388
Congonhal	205.02	100.00	7766	2714	10480
Consolação	89.07	100.00	950	777	1727
Cordislândia	179.42	100.00	2757	678	3435

(continua)

Tabela A.1 – Continuação.

Município	Área Total (km ²)	% de área da bacia no município	População área urbana (habitantes)	População área rural (habitantes)	Total população (habitantes)
Córrego Do Bom Jesus	123.58	100.00	2051	1681	3732
Cristina	311.09	100.00	5961	4253	10214
Cruzília	522.01	19.46	13295	1301	14596
Delfim Moreira	407.16	100.00	3025	4946	7971
Divisa Nova	216.87	100.00	4660	1100	5760
Dom Viçoso	113.83	100.00	998	1996	2994
Elói Mendes	499.18	100.00	20417	4849	25266
Espírito Santo Do Dourado	263.74	100.00	1683	2746	4429
Estiva	243.74	94.26	4899	5945	10844
Fama	85.97	100.00	1518	830	2348
Gonçalves	187.94	100.00	1164	3056	4220
Guapé	933.81	15.02	7176	6662	13838
Guaxupé	286.39	18.68	46532	2959	49491
Heliódora	153.84	100.00	4430	1690	6120
Ilicínea	376.11	69.99	9094	2394	11488
Ipuiúna	298.06	15.45	7449	2073	9522
Itajubá	294.61	100.00	82785	7894	90679
Itamonte	431.45	59.98	9616	4391	14007
Itanhandu	143.21	100.00	11930	2253	14183
Jesuânia	153.73	100.00	3094	1674	4768
Juruáia	220.16	100.00	4514	4724	9238
Lambari	212.95	100.00	14052	5517	19569
Machado	585.62	100.00	32068	6616	38684
Maria Da Fé	202.74	100.00	8383	5833	14216
Marmelópolis	107.79	100.00	1557	1411	2968
Monsenhor Paulo	216.38	100.00	6140	2028	8168
Monte Belo	421.14	100.00	9058	4003	13061
Muzambinho	409.87	92.62	15731	4701	20432
Natércia	188.58	100.00	2752	1898	4650
Nova Resende	390.05	37.55	8857	6516	15373
Olímpio Noronha	54.59	100.00	2249	284	2533
Ouro Fino	533.56	17.69	23771	7809	31580
Paraguaçu	424.02	100.00	16680	3561	20241
Paraisópolis	331.03	100.00	16071	3321	19392
Passa Quatro	276.67	100.00	11985	3599	15584
Pedralva	217.83	100.00	5563	5904	11467
Piranguçu	203.47	100.00	1772	3447	5219
Piranguinho	124.71	100.00	4953	3063	8016
Poço Fundo	473.99	100.00	9285	6676	15961
Pouso Alegre	542.76	100.00	119602	10984	130586
Pouso Alto	262.82	100.00	3658	2555	6213
Santa Rita Do Sapucaí	352.73	100.00	32488	5296	37784

(continua)

Tabela A.1 – Conclusão.

Município	Área Total (km²)	% de área da bacia no município	População área urbana (habitantes)	População área rural (habitantes)	Total população (habitantes)
Santo Antônio Do Pinhal	132.09	100.00	3868	2648	6516
São Bento Do Sapucaí	252.41	100.00	5032	5430	10462
São Gonçalo Do Sapucaí	516.32	100.00	19745	4164	23909
São João Da Mata	120.47	100.00	1752	980	2732
São José Da Barra	314.13	16.08	4894	1884	6778
São José Do Alegre	88.73	100.00	2901	1095	3996
São Lourenço	57.97	100.00	41664	0	41664
São Pedro Da União	260.81	6.46	2781	2259	5040
São Sebastião da Bela Vista	167.05	100.00	2889	2059	4948
São Sebastião do Rio Verde	90.77	100.00	1321	789	2110
São Thomé Das Letras	369.45	90.97	3857	2798	6655
Sapucaí-Mirim	284.90	65.49	3783	2458	6241
Senador Amaral	151.04	30.71	3107	2118	5225
Senador José Bento	93.85	99.11	683	1185	1868
Serrania	209.17	100.00	6574	966	7540
Silvianópolis	311.97	100.00	3647	2382	6029
Soledade De Minas	196.71	100.00	3765	1913	5678
Três Corações	825.08	100.00	65851	6945	72796
Três Pontas	689.29	76.29	46242	7583	53825
Turvolândia	220.86	100.00	2910	1748	4658
Varginha	394.67	100.00	119099	4021	123120
Virgínia	326.25	100.00	3936	4690	8626
Wenceslau Braz	102.41	100.00	1270	1283	2553

Fonte: IBGE (2010).

APÊNDICE B – TABELA COMPLEMENTAR COM A DESCRIÇÃO DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA DOS DADOS UTILIZADOS NO CAPÍTULO 4

Tabela A.2 - Legenda completa de Dias et al. (2016) e MapBiomias (2021), com a respectiva descrição de cada categoria, disposição de forma a compatibilizar aquelas em apenas uma.

Dias et al. (2016)		Projeto MapBiomias				
Cat.	Descrição	Cat. Nível 2	Cat. Nível 3			
		Floresta Natural	Formação Florestal	Floresta Ombrófila Densa, Aberta e Mista, Floresta Estacional Semidecidual e Decidual e Formação Pioneira		
			Formação Savana	Estepe, savanas florestadas e arborizadas		
			Mangue	Formações florestais densas e perenes, frequentemente inundadas pela maré e associadas ao ecossistema costeiro de mangue.		
		Floresta Plantada	Espécies de árvores plantadas para uso comercial (por exemplo, Eucalyptus, Pinus e Araucaria)			
		Áreas alagadas	Pântanos com influência fluvial			
		Pastagem	Savannas, Park and Grassland Steppe Savannas, Steppe and Shrub and Herbaceous Pioneers			
		Pastagem Natural	Refere-se a áreas não plantadas onde a vegetação original é grama.	Formação Natural não Florestal	Salinas	Os "apicuns" ou salinas são formações muitas vezes sem vegetação arbórea, associadas a uma área mais alta, hipersalina e menos inundada do mangue, geralmente na transição entre esta área e o continente.
					Afloramento rochoso	Rochas naturalmente expostas sem cobertura de solo, muitas vezes com presença parcial de vegetação rupícola e declive elevado
					Outras Formações não Florestais	Pântanos (com influência flúvio-marinha)

(continua)

Tabela A.2 – Continuação.

Dias et al. (2016)		Projeto MapBiomias		
Cat.	Descrição	Cat. Nivel 2	Cat. Nivel 3	Descrição
Pastagem Plantada	É caracterizada por espécies de gramíneas para pastejo animal, geralmente estabelecidas após o cultivo, a calagem e a fertilização do solo.	Pastagem		Áreas de pastagem, natural ou plantada, vinculadas à atividade agropecuária. Em particular, os biomas Pampa e Pantanal, parte da área classificada como Formação Pastagem, também inclui áreas de pastagem.
Áreas cultivadas	A soma das colheitas permanentes e temporárias. Culturas permanentes são definidas como culturas que duram várias estações, enquanto as temporárias precisam ser replantadas após cada colheita. Banana, laranja, uva e café são exemplos de culturas permanentes, enquanto arroz, milho, soja e cana-de-açúcar são exemplos de culturas temporárias.	Agricultura	Cultivo temporário	Soja: Áreas cultivadas com soja. A safra de Soja começa no ano 2000, antes deste ano está safra é incluída como parte das "Outras Culturas Temporárias"; Cana-de-açúcar: Áreas cultivadas com cana-de-açúcar; outra cultura temporária: Áreas ocupadas com culturas de curto a médio prazo, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita precisam ser replantadas. Mapas anteriores ao ano 2000 incluem safras de soja.
			Cultivo perene	Áreas ocupadas com lavouras de ciclo longo (mais de um ano), que permitem safras sucessivas sem a necessidade de nova safra.
		Mosaico de Agricultura e Pastagem		Áreas de cultivo onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura.
		Áreas não vegetadas	Praias e dunas	Áreas arenosas, de cor branca brilhante, onde não há predomínio de vegetação de qualquer tipo
Infraestrutura Urbana	Áreas urbanas com predominância de superfícies não vegetadas, incluindo estradas, rodovias e construções			

(continua)

Tabela A.2 – Conclusão.

Dias et al. (2016)		Projeto MapBiomias		
Cat.	Descrição	Cat. Nivel 2	Cat. Nivel 3	Descrição
			Mineração	Áreas onde estão presentes sinais claros de extrações minerais extensas, mostra clara exposição do solo pela ação de máquinas pesadas. Foram consideradas apenas as regiões ao redor do AhkBrasilien (AHK) e os dados de referência digital da CPRM.
			Outras áreas não vegetadas	Áreas de superfície não permeáveis (infraestrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes e regiões de solo exposto em áreas naturais ou de cultivo.
		Água	Rios, lagos e oceano	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água
			Aquicultura	Lagos artificiais, onde predominam as atividades de aquicultura e / ou produção de sal