UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Christian Milanez Preis

Impacto hidrológico das alterações previstas de uso do solo para a bacia hidrográfica do rio Itajaí simulado com o SWAT

FLORIANÓPOLIS
2019

Christian Milanez Preis

Impacto hidrológico das alterações previstas de uso do solo para a bacia hidrográfica do rio Itajaí simulado com o SWAT

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.
Orientador: Prof. Dr. Davide Franco

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Preis, Christian
Impacto hidrológico das alterações previstas de uso do solo para a bacia hidrográfica do rio Itajaí simulado com o SWAT / Christian Preis ; orientador, Davide Franco, 2019.
89 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. SWAT. 3. Mudanças de uso e cobertura do solo. 4. Bacia hidrográfica do rio Itajaí. 5. Impacto hidrológico. I. Franco, Davide. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. III. Título.

Christian Milanez Preis

Impacto hidrológico das alterações previstas de uso do solo para a bacia hidrográfica do rio Itajaí simulado com o SWAT

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profª. Alexandra Rodrigues Finotti, Drª.
Universidade Federal de Santa Catarina

Profª. Patrícia Kazue Uda, Drª.
Universidade Federal de Santa Catarina

Luis Hamilton Pospissil Garbossa, Dr.
Epagri / Ciram

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia Ambiental.

Maria Eliza Nagel Hassemer:46358234900
Assinado de forma digital por Maria Eliza Nagel Hassemer:46358234900
Dados: 2019.10.31 15:03:43 -03'00'

Profª. Drª. Maria Eliza Nagel Hassemer
Coordenadora do Programa

Davide Franco:00393200906
Assinado de forma digital por Davide Franco:00393200906
Dados: 2019.10.31 18:09:08 -03'00'

Prof. Dr. Davide Franco
Orientador

Florianópolis, 31 de outubro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu orientador, professor Davide Franco, por ter me dado todo o apoio necessário para a realização deste mestrado, sempre com dicas e orientações muito importantes para a qualidade do trabalho.

Agradeço também à colega de orientador, Priscilla Kern, que era meu canal de comunicação no Lahimar para saber se "o Davide está no laboratório?". Me poupou algumas viagens à UFSC.

Um muitíssimo obrigado também à minha querida parceira Sophia Varela, que me deu todo o apoio possível durante estes últimos dois anos e meio, sempre com ótimas ideias e contribuições para a minha dissertação. Importante destacar que nos conhecemos em função deste mestrado, na disciplina lecionada pelo professor Davide, que me "obrigou" a cursá-la. Muito obrigado, cupiDavide!

Agradecimento especial também aos meus pais, os maiores responsáveis por eu ser quem sou hoje. Não é clichê, é a maior verdade.

Finalmente, mas não menos importante, agradeço aos meus chefes, gerente Rafaela Sander e diretor Antônio Macedo, por me darem o apoio necessário para que eu pudesse realizar este mestrado, e também à ex-gerente Sibeli Warmling e ao coordenador / engenheiro / advogado Alisson Martins, que foram os responsáveis por eu começar toda a trajetória do mestrado.

RESUMO

A característica do uso do solo, o estado de regeneração das florestas e as práticas das atividades econômicas locais influenciam diretamente na qualidade e na quantidade de água em uma bacia hidrográfica. Neste sentido, este estudo realizou uma análise dos impactos que as alterações previstas para o uso do solo nos próximos anos podem causar na hidrologia da bacia hidrográfica do rio Itajaí, que possui aproximadamente 15.000 km² de área, e localiza-se na região norte do estado de Santa Catarina, Brasil. O estudo foi realizado por meio da elaboração de um modelo hidrológico no software SWAT (Soil and Water Assessment Tool). A calibração e a validação do modelo foram realizadas com dados mensais de vazão e mapa de uso e ocupação do solo do ano 2000. O período de calibração foi de 2000 a 2004, e de validação foi de 2005 a 2006. Os resultados foram satisfatórios, com KGE de 0,76 para a calibração e de 0,63 para a validação na estação fluviométrica mais a jusante da bacia hidrográfica. O modelo apresentou bons resultados de simulação das médias de vazões e na variabilidade de vazões. Observou-se que a presença de empreendimentos hidrelétricos e dados inconsistentes prejudicaram o desempenho do modelo em algumas sub-bacias, principalmente as que se localizam nas cabeceiras. Para esta pesquisa, foram avaliados dois diferentes cenários com o uso do SWAT. O cenário inicial avaliado foi o mesmo da calibração, com dados pluviométricos de 2000 a 2004 e uso do solo de 2000. O cenário futuro foi avaliado com a utilização do mapa de uso e ocupação do solo correspondente ao ano de 2027, que foi gerado com o auxílio do software TerrSet, antigo ISIDRI, a partir do módulo Land Change Modeler (LCM), que utiliza redes neurais para o processo de calibração. A comparação dos resultados não identificou alterações de vazões com validade estatística no exutório da bacia. No entanto, o modelo identificou uma redução média anual de até 5% de água percolada na bacia. Em sub-bacias de cabeceira, a redução da Q_{95} chegou a 23,3%, e a redução da contribuição da água subterrânea nos rios chegou a 26,0%. Identificou-se que estas alterações podem ter origem no aumento significativo da área de silvicultura na bacia hidrográfica, que subiu de 1,30% da área total da bacia em 2000 para 11,17% em 2027. Os resultados deste estudo mostraram a possível redução da recarga de aquíferos e a importância do planejamento do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica para evitar a redução da disponibilidade hídrica no futuro.

Palavras-chave: SWAT. Mudanças de uso e cobertura do solo. Bacia hidrográfica do rio Itajaí. Impacto hidrológico.

ABSTRACT

Land use, forest regeneration stage and local economic activities influence on water quality and quantity of a watershed. This study conducted an analysis of the impacts that can be caused by predicted land changes on the hydrology of the Itajaí river basin, which has an area of approximately 15.000 km², and is located on the northern region of Santa Catarina state, Brazil. The software SWAT (Soil and Water Assessment Tool) was used to conduct this study. The model was calibrated and validated with monthly flow data and a land use map from the year 2000. The calibration period was from 2000 to 2004, and the validation from 2005 to 2006. The results were satisfactory, with a KGE of 0,76 for the calibration and 0,63 for the validation on the river station located closer to the river basin outlet. The model had good results on simulating flow means and flow variabilities. The presence of hydroelectric constructions and inconsistent flow data in some watersheds impaired the model performance, mainly on the watersheds located at the headwaters of the river basin. On this study two different land use scenarios were evaluated by using SWAT. The first scenario was the same as the model calibration, with rainfall data from 2000 to 2004 and land use map from 2000. The second scenario used the land use map from the year 2027, which was predicted and generated by the software TerrSet, former IDRISI, using the Land Change Modeler (LCM), that uses neural network for the calibration process. The results from both scenarios didn't show statistical differences for the river basin. However, the model identified a mean annual reduction of up to 5% from percolated water in the river basin. On headwaters watersheds, the Q_{95} flow and groundwater flow to main streams reduction reached 23,3% and 26,0%, respectively. The cause of these reductions may be from the important growth of planted forest areas in the river basin. This land use jumped from 1,30% of the total river basin area in 2000 to 11,17% in 2027. This study results showed a possible reduction of aquifer recharge in the river basin, and also the importance of planning the river basin land use to avoid the reduction on water availability in the future.

Keywords: SWAT. Land use changes. Itajaí river basin. Hydrologic impact.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. 19
Figura 2 – Possíveis trajetórias da água precipitada no SWAT. 26
Figura 3 – Diagrama de fluxo da metodologia deste trabalho..... 29
Figura 4 - Localização e relevo da bacia hidrográfica do rio Itajaí. 30
Figura 5 – Localização das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas. 38
Figura 6 – Representação da metodologia de seleção das estações pluviométricas para o cálculo de preenchimento de falhas. 40
Figura 7 – Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do rio Itajaí. 42
Figura 8 – Sub-bacias e estações fluviométricas utilizadas em cada etapa de calibração. 47
Figura 9 – Mapas de uso e ocupação do solo dos anos de 1990, 2000, 2010 e 2015. 49
Figura 10 – Alterações ocorridas entre 1990 e 2015 para cada tipo de uso do solo. 50
Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo simulado para o ano de 2027. 52
Figura 12 – Desempenho do modelo não calibrado, conforme o KGE obtido em cada sub-bacia. 55
Figura 13 – Valores *p-value* na análise de sensibilidade global dos parâmetros. Os que se encontram abaixo da linha vermelha foram selecionados para a calibração. 56
Figura 14 – Desempenho do modelo calibrado e da validação cruzada, conforme o KGE obtido em cada sub-bacia, e localização de empreendimentos hidrelétricos. 58
Figura 15 – Hidrogramas mensais dos dados simulados e observados para a sub-bacia 98.... 60
Figura 16 – Hidrogramas mensais dos dados simulados e observados para a sub-bacia 69.... 60
Figura 17 – Hidrogramas mensais dos dados simulados e observados para a sub-bacia 40.... 61
Figura 18 – Hidrogramas mensais dos dados simulados e observados para a sub-bacia 48.... 61
Figura 19 – Desempenho do modelo validado, conforme o KGE obtido em cada sub-bacia, e localização de empreendimentos hidrelétricos. 64
Figura 20 – Dados de precipitação e de vazão na sub-bacia 17, com indicação do possível período inconsistente..... 64
Figura 21 – Localização das sub-bacias 5, 58, 63, 119 e 120. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das mudanças de uso do solo. 20
Tabela 2 - Principais características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Itajaí. 31
Tabela 3 – Vazões estimadas pelo PERH para a bacia hidrográfica do rio Itajaí. 32
Tabela 4 – Usos da água identificados na bacia hidrográfica do rio Itajaí e vazões de consumo. 32
Tabela 5 – Taxas de crescimento anual da demanda de água para cada tipo de usuário. 33
Tabela 6 – Projeções para vazões de retirada em 2027 na bacia hidrográfica do rio Itajaí. 34
Tabela 7 – Simplificação das classificações de uso e ocupação do solo. 36
Tabela 8 – Fontes de obtenção dos dados de entrada e dados observados para a realização das simulações no SWAT. 36
Tabela 12 – Tipos de solo identificados na bacia hidrográfica do rio Itajaí. 43
Tabela 13 - Parâmetros físico-hídricos dos tipos de solo e respectivas fontes. 43
Tabela 14 - Associação entre as categorias de uso do solo identificadas na bacia e as existentes no banco de dados do SWAT. 44
Tabela 17 – Evolução do uso e ocupação do solo nos anos de 1990, 2000, 2010 e 2015. 48
Tabela 18 – Comparação geral das áreas de cada tipo de uso do solo entre o mapa simulado e o mapa observado. 51
Tabela 19 – Comparação das áreas de cada tipo de uso e ocupação do solo entre os anos de 2015 e 2027. 52
Tabela 20 – Desempenho geral e coeficiente KGE do modelo não calibrado. 54
Tabela 16 – Parâmetros selecionados para a análise de sensibilidade e respectivos métodos de ajuste e valores iniciais mínimos e máximos. 57
Tabela 17 – Desempenho geral e coeficiente KGE da calibração do modelo. 59
Tabela 18 – Desempenho geral e coeficiente KGE da validação cruzada do modelo. 59
Tabela 22 – Desempenho geral e coeficiente KGE da validação do modelo para cada sub-bacia. 63
Tabela 23 – Comparação do desempenho geral do modelo na pré-calibração, na calibração e na validação. 66
Tabela 24 – Comparação das áreas de cada tipo de uso e ocupação do solo entre os anos de 2000 e 2027. 67
Tabela 25 – Comparação das vazões média, máxima e mínima simuladas para os dois cenários avaliados no exutório da bacia. 68

Tabela 26 – Comparação do balanço hídrico simulado entre os dois cenários de uso do solo.69
Tabela 27 – Alterações observadas nas sub-bacias que apresentaram maiores reduções de vazão com o cenário de 2027. 69
Tabela 28 – Comparação entre as vazões de referência apresentadas no PERH e as obtidas no modelo SWAT, considerando o período de 2000 a 2004 e o uso do solo de 2000. 72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas;

CGH – Central de Geração Hidrelétrica;

CPTEC/INPE – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos;

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa;

EPAGRI – Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina;

ESRI – Environmental Systems Research Institute;

HRU – Hydrologic Response Units;

IDW – Ponderação do Inverso da Distância;

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia;

KGE – Coeficiente de Kling-Gupta;

LCM – Land Change Modeler;

MCMC – Monte Carlo via Cadeias de Markov;

MDT – Modelo Digital de Terreno;

MLT – Multi-layer Perceptron;

NSE – Nash-Sutcliffe efficiency;

PCH – Pequena Central Hidrelétrica;

PEHR – Plano Estadual de Recursos Hídricos;

SDS – Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável;

SIG – Sistemas de Informação Geográfica;

SUFI-2 – Sequential Uncertainty Fitting Version 2;

SWAT – Soil and Water Assessment Tool;

SWAT-CUP – SWAT Calibration and Uncertainty Procedures;

UHE – Usina Hidrelétrica;

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 OBJETIVOS 16
1.1.1 Objetivo Geral 16
1.1.2 Objetivos Específicos 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
2.1 PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS 17
2.2 PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS 17
2.3 INFLUÊNCIA DO USO E COBERTURA DO SOLO NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA 19
2.3.1 TerrSet 21
2.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA 23
2.4.1 O modelo SWAT 24
2.4.2 Análise de sensibilidade, calibração e validação de modelos hidrológicos 26
3 METODOLOGIA 29
3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 29
3.2 PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE SANTA CATARINA 31
3.2.1 Diagnóstico 31
3.2.2 Prognóstico 33
3.3 MAPAS DE USO DO SOLO 34
3.4 DADOS DE ENTRADA PARA AS SIMULAÇÕES NO SWAT 36
3.4.1 Dados meteorológicos 36
3.4.1.1 Dados de precipitação 39
3.4.2 Dados de vazão 40
3.4.3 Modelo Digital de Terreno 41
3.4.4 Pedologia 41
3.4.5 Uso e cobertura do solo 44

3.5 UTILIZAÇÃO DO SWAT 45
3.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO 45
4 RESULTADOS 48
4.1 EVOLUÇÃO DO USO DO SOLO 48
4.1.1 Projeção para 2027 51
4.1.1.1 Calibração do modelo no TerrSet 51
4.1.1.2 Simulação para 2027 51
4.2 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA COM O SWAT 53
4.2.1 Desempenho do modelo não calibrado 53
4.2.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros 55
4.2.3 Calibração, validação cruzada e validação do modelo 56
4.2.4 Simulação do cenário com uso do solo de 2027 67
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 71
REFERÊNCIAS 74
APÊNDICE A – Estações pluviométricas 79
APÊNDICE B – Estações fluviométricas 81
APÊNDICE C – Estações meteorológicas 82
APÊNDICE D – Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade 83
APÊNDICE E – Valores calibrados para cada parâmetro e respectivo método de ajuste 85

1 INTRODUÇÃO

A água é um insumo básico, necessário para a sobrevivência dos seres vivos. Conforme preconiza a Política Nacional de Recursos Hídricos, instituída pela Lei nº 9.433 de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), a água é um bem de domínio público, sendo um recurso natural limitado, dotado de valor econômico. O uso múltiplo das águas deve ser proporcionado pela gestão dos recursos hídricos, sendo que, em situações de escassez, devem ser priorizados o consumo humano e a dessedentação de animais, garantindo água em quantidade e qualidade adequadas.

Devido a esta ligação direta entre as áreas de superfície e os cursos d'água, as atividades antrópicas têm impacto direto na qualidade e na quantidade de água das bacias. Os rios e os demais tipos de corpos d'água estão entre os ecossistemas mais afetados pelas atividades humanas (MALMQVIST; RUNDLE, 2002; DUDGEON et al., 2006). Dentre as ações antrópicas que mais impactam na qualidade e na quantidade de água nas bacias hidrográficas, destacam-se o desmatamento, o assoreamento, a poluição das águas em função de efluentes industriais, urbanos e agrícolas, as alterações físicas do leito dos rios, a construção de barragens e a captação de água para usos consuntivos (EGLER, 2012). Estas ações estão geralmente conectadas, apresentando uma sinergia com o uso e ocupação do solo que, normalmente, não é planejado adequadamente.

Além disso, diversos estudos ao redor do mundo indicam que o uso do solo é um fator que interfere na disponibilidade de água de uma bacia hidrográfica (GHAFFARI et al., 2010; BLAINSKI et al., 2011, 2017; RODRIGUES et al., 2015; ZHANG et al., 2017). A característica do uso do solo, o estado de regeneração das florestas e as práticas das atividades econômicas locais – principalmente as práticas agrícolas – influenciam diretamente na qualidade e na quantidade de água em uma bacia hidrográfica (EGLER et al., 2012).

Para que seja possível o uso múltiplo permanente dos recursos hídricos, é essencial que haja um planejamento adequado da gestão das águas. Com este objetivo, o Estado de Santa Catarina, por meio da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável, lançou, recentemente, o Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH (SDS, 2018). Este plano visa evitar ou reverter potenciais conflitos que possam ocorrer em função da escassez de água. O PERH avaliou um horizonte de 10 anos, para o qual foram estimadas as demandas de uso da água futuras para cada setor da economia. O balanço hídrico foi calculado considerando os regimes de vazão identificados atualmente nas bacias hidrográficas do Estado de Santa Catarina.

O PERH apresenta uma estimativa de crescimento da demanda de uso da água, no entanto, ao calcular o balanço hídrico, não considera as mudanças que poderão ocorrer no regime de vazões por consequência da alteração do uso do solo. Neste sentido, este estudo realizou uma análise da influência das alterações previstas para o uso do solo nos próximos anos no regime de vazões da bacia hidrográfica do rio Itajaí, localizado na região norte do estado de Santa Catarina, Brasil.

O estudo foi realizado por meio da elaboração de um modelo hidrológico no *software* SWAT (*Soil and Water Assessment Tool).* Modelos hidrológicos são representações aproximadas da realidade, tornando-se, portanto, ferramentas importantes para o planejamento de recursos hídricos. Dentre os *softwares* de modelagem existentes no mundo, o SWAT tem se destacado em função da sua ampla utilização (P. W. GASSMAN et al., 2007). Diversos estudos que analisam a influência de mudanças do uso do solo no regime de vazões já foram realizados ao redor do mundo com a utilização do SWAT (GHAFFARI et al., 2010; BLAINSKI et al., 2011, 2017; RODRIGUES et al., 2015; ZHANG et al., 2017).

No Brasil, o SWAT começou a ser utilizado no final dos anos 90 e, desde então, mais de 100 estudos com utilização do SWAT no Brasil foram publicados, tanto em revistas nacionais como internacionais (BRESSIANI et al., 2015). A maior parte destes estudos tiveram como objetivo avaliar a aplicabilidade do SWAT para representar determinados componentes das bacias hidrográficas brasileiras, com maior foco na simulação de vazões e de sedimentos.

O SWAT foi desenvolvido por agências governamentais e universidades dos Estados Unidos para identificar impactos do uso do solo e aplicação de compostos químicos agrícolas nos recursos hídricos e produção de sedimentos (NEITSCH et al., 2011). É um modelo hidrológico baseado no equacionamento físico do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica. Neste documento são apresentadas as principais equações, premissas e limitações do modelo. Também são apresentadas as fontes dos dados de entrada necessários para a calibração do modelo.

Para a simulação de cenários futuros de uso do solo, este estudo utilizou o *software* TerrSet, antigo IDRISI, desenvolvido pela Clark Labs, da Clark University. A simulação de padrões de mudança do uso do solo tem sido cada vez mais facilitada devido ao rápido avanço em modelos geoespaciais (SANG et al., 2011). Para simular cenários futuros de uso do solo, o Terrset utiliza o modelo de Multi-layer Perceptron-Markov (MLP-MC), que tem apresentado melhores resultados quando comparado com outros modelos (OZTURK, 2015).

Este estudo também realizou uma avaliação da evolução do uso do solo na bacia desde o ano de 1990. Por meio do projeto MapBiomas, foram obtidos mapas de uso e ocupação do solo de 1990, 2000, 2010 e 2015.

A estruturação deste documento conta, inicialmente, com a fundamentação teórica para entendimento da pesquisa. São abordados tópicos referentes a processos hidrológicos, bacias hidrográficas, o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina, mudanças de uso e cobertura do solo, o modelo Terrset, modelagem hidrológica e o modelo SWAT. Em seguida, é apresentada a metodologia proposta para a pesquisa, com apresentação da área de estudo, descrição geral das rotinas do modelo SWAT, e indicação de como foram obtidos os principais dados de entrada, como dados hidrológicos, topografia, pedologia e uso e cobertura do solo da área de estudo. Ainda dentro da metodologia, é apresentado como foram realizadas a calibração e a validação do modelo. Finalmente, são apresentados os resultados obtidos com a pesquisa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar os impactos hidrológicos das alterações previstas para o uso do solo nos próximos anos na Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí com o auxílio do modelo SWAT.

1.1.2 Objetivos Específicos

a) Analisar a evolução do uso e ocupação do solo na bacia entre os anos de 1990 e 2015;
b) Estimar o cenário de uso e ocupação do solo para o ano de 2027;
c) Avaliar os dados hidrológicos apresentados no Plano Estadual de Recursos Hídricos para a bacia hidrográfica do rio Itajaí.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PLANOS DE RECURSOS HÍDRICOS

Em 8 de janeiro de 1997, foi publicada no Brasil a lei nº 9.433, conhecida como Lei das Águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos. Esta lei criou instrumentos voltados para a gestão de recursos hídricos no território nacional, estabelecendo um sistema nacional que integra a federação e os estados.

Entre os instrumentos criados pela Lei das Águas estão os Planos de Recursos Hídricos, que são documentos que definem a agenda dos recursos hídricos de uma região, indicando políticas de gestão, projetos, obras e investimentos prioritários. Os planos podem ser regionais, abrangendo uma bacia hidrográfica específica; estaduais, abrangendo todas as bacias hidrográficas de um estado; ou ainda nacional, abrangendo todas as bacias do país.

Os planos de recursos hídricos apresentam uma visão integrada dos diferentes usos da água, e contam com a participação de órgãos governamentais, da sociedade civil e dos usuários dos recursos hídricos. Para a avaliação do diagnóstico de cada bacia hidrográfica, os planos consideram a disponibilidade de água superficial e subterrânea para os usuários. Estes dados são confrontados com a demanda por água em toda a bacia, estabelecendo, por fim, o balanço hídrico e a situação dos recursos hídricos.

2.2 PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

A água é um componente fundamental para os seres vivos, e o estudo dos seus processos é de fundamental importância. O campo da ciência que estuda estes processos é a Hidrologia, que define um ciclo hidrológico como sendo um fenômeno de circulação fechada da água dentro do globo terrestre, ocasionado pelas energias solar, gravitacional e de rotação do planeta (TUCCI et al., 2014). A água está presente na Terra nas formas sólida, líquida e gasosa, e seus principais processos hidrológicos envolvem a precipitação, a evapotranspiração, a interceptação, a infiltração e os escoamentos superficial e subterrâneo. Estes processos são responsáveis pela circulação da água existente na atmosfera, no solo e nos oceanos (KOBIYAMA et al., 2011).

Consideradas as unidades territoriais básicas para estudos hidrológicos, as bacias hidrográficas possuem diferentes conceitos na literatura, que são, porém, semelhantes entre diversos autores. Bacia hidrográfica refere-se a uma área de captação natural de água

precipitada que converge os escoamentos para um único ponto de saída, chamado de exutório (TUCCI et al., 2014). As bacias hidrográficas podem ser classificadas conforme sua localização (litorâneas ou interiores); e ainda de acordo com sua importância (principais, secundárias e terciárias), em função do porte dos rios.

As bacias hidrográficas podem ser divididas em sub-bacias, dependendo do exutório considerado ao longo do seu eixo-tronco ou canal coletor (SANTANA, 2003). Uma determinada bacia hidrográfica interliga-se a uma outra de ordem hierárquica superior, configurando-se como uma sub-bacia desta última.

Os processos hidrológicos que ocorrem dentro de uma bacia hidrográfica podem ter, predominantemente, fluxo vertical ou longitudinal. O vertical corresponde aos processos de precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo; enquanto que o longitudinal corresponde ao escoamento na direção dos gradientes da superfície (rios e escoamento superficial) e do subsolo (escoamento subterrâneo) (TUCCI; CLARKE, 1997).

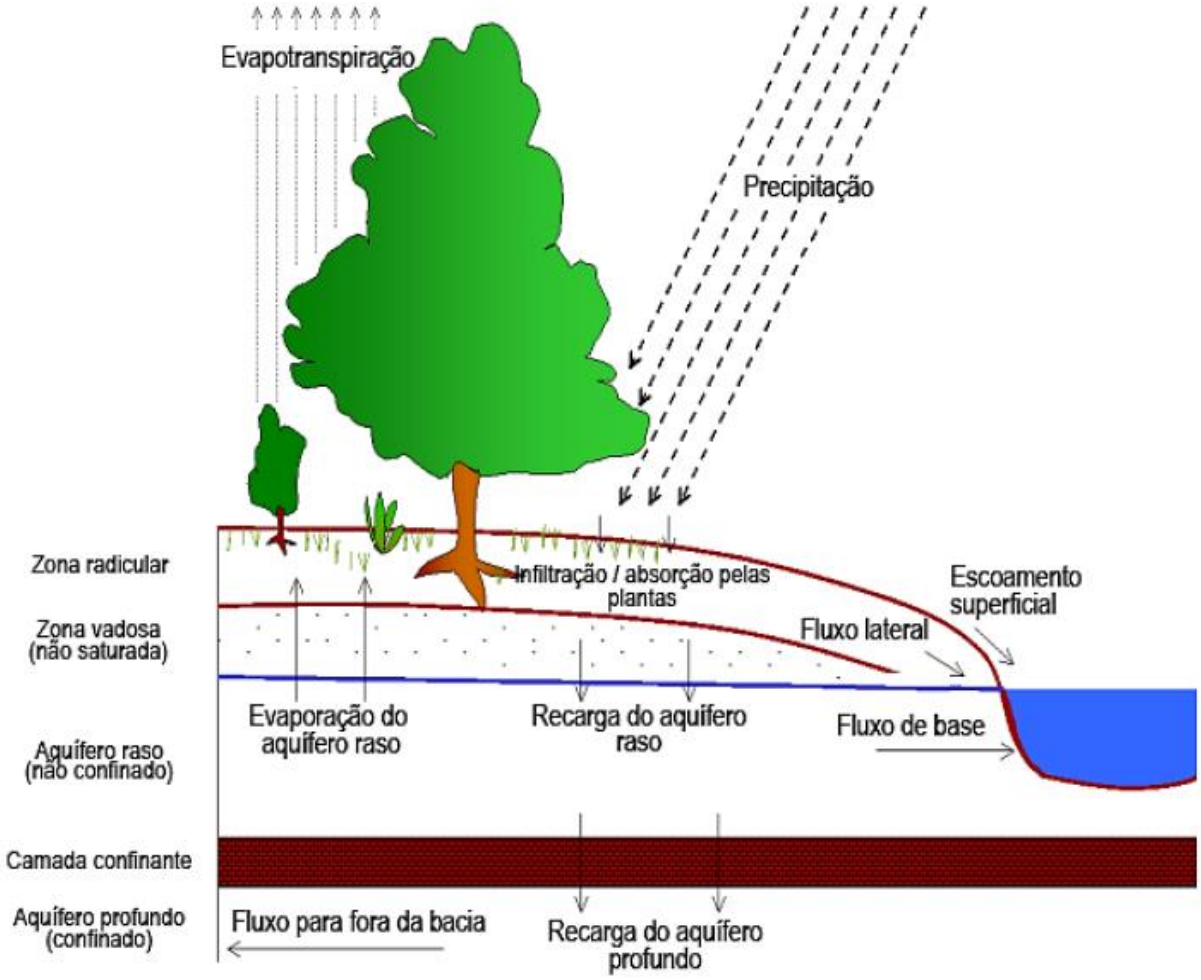
A precipitação corresponde a toda água proveniente da atmosfera que atinge o solo. Este processo pode ocorrer de diferentes formas, como chuva, neblina, granizo, orvalho, geada e neve. A chuva é a forma de precipitação mais importante na hidrologia devido à sua capacidade de gerar escoamento superficial, armazenar-se em depressões ou infiltrar-se no solo. Estes possíveis caminhos dependem de diferentes variáveis, como a quantidade de umidade pré-existente e características do solo e de sua cobertura. A parte da água que infiltra no solo alimenta reservatórios subterrâneos que escoam e atingem rios e oceanos (TUCCI et al., 2014). A absorção pelas plantas, o fluxo lateral e a recarga de aquíferos rasos e profundos são os possíveis caminhos da água infiltrada. De forma resumida, os possíveis caminhos da água precipitada são apresentados na Figura 1.

É fundamental conhecer o processo de infiltração para o manejo e conservação do solo em uma bacia hidrográfica, visto que corresponde a um processo importante na ocorrência do escoamento superficial (BRANDÃO, 2003). A água de chuva que infiltra no solo, diferente da que compõe o escoamento superficial, chega de forma bastante lenta até o corpo d'água principal de uma bacia hidrográfica. Em situações de estiagem, um aquífero freático transfere volume de água para o rio, mantendo-o com um volume mínimo de água, chamado de fluxo de base, que pode diminuir conforme rebaixa-se o nível d'água do aquífero freático (TUCCI et al., 2014).

Todos os tipos de uso do solo em uma bacia hidrográfica interferem no ciclo hidrológico. As diferentes atividades humanas têm potencial para aumentar ou diminuir o

quantitativo de escoamento superficial (CHRISTOFOLETTI, 1981). No entanto, o uso do solo pelo homem vem sendo realizado com pouco ou nenhum planejamento.

Figura 1 – Representação de processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica.



Fonte: adaptado de (NEITSCH et al., 2011).

2.3 INFLUÊNCIA DO USO E COBERTURA DO SOLO NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA

O uso do solo é um fator importante que influencia diretamente na capacidade de infiltração de uma bacia hidrográfica, podendo causar alterações no fluxo de base, na vazão média anual e na frequência e severidade de cheias (BUYTAERT et al., 2006; GHAFFARI et al., 2010; ZHANG et al., 2017). Na Tabela 1 são apresentadas as principais classificações em relação à mudança de uso do solo.

Para auxiliar na predição de cenários futuros de uso do solo, modelos matemáticos têm sido cada vez mais utilizados, como por exemplo o TerrSet, antigo IDRISI, desenvolvido pela

Clark Labs, da Clark University. Por meio do módulo Land Change Modeler (LCM), que incorpora técnicas de processamento por redes neurais, é possível obter mapas de uso do solo para anos futuros (EASTMAN, 2016).

Tabela 1 - Classificação das mudanças de uso do solo.

Classificação	**Tipo**	**Principais impactos sobre o escoamento**
Mudança da superfície	Desmatamento	Aumento da vazão média, aumento ou diminuição da vazão mínima
	Reflorestamento	Redução do escoamento médio, capacidade erosiva
O uso da superfície	Urbanização	Redução da infiltração no solo, aumentando o escoamento superficial, reduzindo o escoamento subterrâneo, redução da evapotranspiração. Aumento das vazões máximas e na produção de sedimentos, e a deterioração da qualidade da água.
	Reflorestamento para exploração sistemática	Redução do escoamento médio, impacto da construção de estradas e a capacidade erosiva gerada pela superfície desprotegida após a extração
	Culturas agrícolas de subsistência e permanentes	Intensidade pequena ou intermediária
	Culturas anuais	Intensidade alta, pois prevê a preparação do solo (aragem) antes do período chuvoso. O plantio sem nenhum cuidado tende a aumentar a erosão e o escoamento.
Método de alteração	Manual	Menor impacto, porém, dispendioso
	Equipamentos	Compactação do solo, reduzindo a infiltração de água no solo

Fonte: (TUCCI, 2005)

A avaliação de alterações nos processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica em função do uso e ocupação do solo pode ser realizada por meio de monitoramento e modelagem hidrológica (CARAM, 2010). A predição de cenários futuros com o auxílio de modelos matemáticos pode auxiliar no manejo das bacias hidrográficas.

Estudos evidenciaram que as mudanças no uso do solo influenciam nas respostas hidrológicas em termos de produtividade da água, uma vez que há alterações nas taxas de evaporação para diferentes tipos de vegetação (ANDRÉASSIAN, 2004; BRUIJNZEEL, 2004). Estudos em microbacias indicam que a remoção da floresta tende a aumentar a vazão nos rios, porém estes resultados não são claros para bacias de grande escala (TRANCOSO; CARNEIRO FILHO; TOMASELLA, 2007).

Hibbert (1967) realizou um levantamento em 39 bacias experimentais existentes no mundo, onde avaliou e relacionou o uso do solo com processos hidrológicos. Ele identificou que a redução da cobertura florestal aumenta a vazão média.

Bosch e Hewlett (1982) realizaram um estudo parecido em bacias experimentais, e confirmaram a conclusão de Hibbert em relação ao aumento da vazão média quando há redução da cobertura florestal. No entanto, identificaram que é possível obter uma ordem de magnitude das alterações com base na precipitação e no tipo de vegetação. Também concluíram que, quando o desmatamento é inferior a 20%, não é possível detectar alteração na vazão média.

Estudos realizados no Brasil também indicaram alterações em processos hidrológicos em função de alterações no uso do solo. Collischonn (2001) identificou que alterações de uso do solo ocorridas na década de 70 contribuíram para o aumento da vazão na bacia hidrográfica do rio Taquari. Ele identificou que a substituição do cerrado por pastagens ou por plantações de soja reduziram a evapotranspiração média anual e aumentaram a recarga do aquífero, ocasionando a ocorrência de maiores vazões mínimas.

Rodriguez et al. (2010) realizou um estudo na bacia do rio Ji-Paraná com o objetivo de identificar alterações hidrológicas em função de mudanças no uso do solo. Eles concluíram que os impactos das mudanças reduzem com a escala da bacia. Também identificaram tendências significativas nos parâmetros hidrológicos em função das mudanças de uso do solo.

2.3.1 TerrSet

O TerrSet, antigo IDRISI, é um *software* desenvolvido pela Clark Labs, da Clark University, que compreende um grupo de oito ferramentas interdependentes e integradas. Para este estudo foi utilizado o *Land Change Modeler* (LCM), que analisa mudanças de uso do solo por meio da identificação empírica de relações entre variáveis independentes, e permite a projeção de mudanças futuras no uso do solo (EASTMAN, 2016).

No LCM, as ferramentas para avaliação e previsões de mudanças de uso do solo são organizadas em três etapas fundamentais: análises das mudanças, transições potenciais, e previsões de mudanças. Para a realização destas tarefas, o usuário deve fornecer ao modelo dois cenários de uso do solo de anos diferentes (EASTMAN, 2016).

Na etapa de análise das mudanças, o modelo identifica as transições que ocorreram entre um tipo de uso do solo e outro, e fornece ao usuário dados quantitativos das alterações que ocorreram na bacia entre os anos analisados.

Na determinação das transações potenciais, o modelo identifica o potencial de transição de cada pixel (área de terreno) para outro tipo de uso do solo. Nesta etapa, o modelo cria mapas de potencial de transição para cada possível transição de um tipo de uso do solo a outro, conforme os resultados obtidos na etapa de análise das mudanças. O LCM se baseia, de maneira empírica, em grupos de variáveis direcionais, chamadas de *drivers*, para agrupar os mapas de transições. Estes *drivers* são utilizados pelo LCM para modelar o processo histórico de mudanças no uso do solo. Por exemplo, na modelagem de mudança de floresta para agricultura, os principais *drivers* considerados são declividade, proximidade de estradas, e proximidade de outras áreas que já possuam agricultura. Todas estas informações de *drivers* devem ser fornecidas pelo usuário ao LCM (EASTMAN, 2016).

As transições potenciais podem ser modeladas a partir do uso de uma rede neural *Multi-Layer Perceptron* (MLP), de regressão logística, ou de uma ferramenta de aprendizado computacional baseada em instância ponderada por similaridade (*SimWeight*). Neste estudo foi utilizado o MLP, que apresenta resultados similares ao *SimWeight* e é um processo mais automatizado, exigindo menos intervenções do usuário, o que torna seu uso mais simples (EASTMAN, 2016).

Para gerar os mapas de transições, o MLP inicia seu processo treinando as redes neurais a partir dos pixels que apresentaram mudanças ou não de uso do solo. Por meio de diversas iterações, o MLP seleciona e altera os parâmetros com o objetivo de aprimorar as simulações. O processo finaliza quando o erro quadrático médio obtido atinge seu melhor valor possível (EASTMAN, 2016).

Finalmente, após a calibração da geração dos mapas de transição, o LCM está apto a realizar a tapa de previsão de mudanças do uso do solo, quando o usuário fornece ao modelo o ano do mapa de uso do solo que deverá ser gerado pelo modelo. Nesta etapa também é possível fornecer ao modelo informações de incentivos ou restrições para determinadas mudanças de uso do solo. Por exemplo, pode ser informado ao modelo áreas onde existem Unidades de Conservação, onde não poderá ocorrer desmatamento.

Para validar a calibração do LCM, solicita-se ao modelo que seja gerado o mapa de uso do solo de um ano cujas condições de uso e ocupação do solo sejam conhecidas. Os dados obtidos na comparação entre o mapa simulado pelo LCM e o mapa observado permitem a utilização de coeficientes de eficiência. O coeficiente de Kappa é o mais utilizado em pesquisas que envolvem a simulação de uso do solo (AGUEJDAD et al., 2017). Este coeficiente é calculado com base em uma matriz de confusões, e sua metodologia compensa a existência de possíveis acertos por sorte (FOODY, 2002).

2.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Modelos são ferramentas desenvolvidas para representar algum objeto ou sistema por meio de uma linguagem de fácil acesso ou uso. Na hidrologia, modelos são utilizados para melhor entender e representar bacias hidrográficas, com o objetivo de buscar respostas para diferentes entradas. Simulações hidrológicas são limitadas pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que resulta em diversos modelos diferentes disponíveis para utilização. As limitações destes modelos geralmente envolvem a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos disponíveis para a bacia em estudo, além da simplificação das variáveis e fenômenos envolvidos nos processos hidrológicos (TUCCI, 2005). Os modelos podem ser agrupados em classes, de acordo com suas características principais:

- **Contínuo e discreto**: os modelos são contínuos quando os fenômenos são contínuos no tempo, e discretos quando as mudanças de estado ocorrem em intervalos de tempo discretos;
- **Concentrado e distribuído**: os modelos são concentrados quando não consideram a variabilidade espacial, e distribuídos quando as variáveis e os parâmetros dependem do tempo e/ou do espaço;
- **Estocástico e determinístico**: os modelos são estocásticos quando o relacionamento entre entrada e saída é estatístico, e determinístico quando, para uma mesma entrada, há sempre a mesma saída;
- **Conceitual e empírico**: os modelos são conceituais quando suas funções consideram processos físicos, e empíricos quando os valores calculados são ajustados aos observados por meio de funções que não possuem relação com os processos físicos envolvidos.

A utilização de modelos hidrológicos envolve diversas etapas, como a escolha do modelo, obtenção e análise dos dados de entrada, ajuste e verificação dos parâmetros envolvidos (análise de sensibilidade, calibração e validação), definição dos cenários que serão avaliados, prognóstico e identificação das incertezas dos resultados obtidos (TUCCI, 2005).

Para este estudo foi utilizado o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) que, comparado a outros modelos, apresenta as vantagens de ser gratuito, ter amplo material disponível na literatura, e ser eficiente em simulações de longo prazo em bacias hidrográficas. O SWAT tem sido aplicado com sucesso ao redor do mundo em pesquisas sobre o impacto de

alterações no uso do solo em processos hidrológicos (WANG et al., 2008; ULLRICH; VOLK, 2009; GHAFFARI et al., 2010; MUKUNDAN; RADCLIFFE; RISSE, 2010; OEURNG; SAUVAGE; SÁNCHEZ-PÉREZ, 2011; TIBEBE; BEWKET, 2011; ZHANG et al., 2017). Pesquisas neste mesmo sentido utilizando o SWAT também foram realizadas no Brasil (PEREIRA et al., 2014; RODRIGUES et al., 2015).

2.4.1 O modelo SWAT

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em parceria com a Universidade Texas A&M, com o lançamento da sua primeira versão no início da década de 90 (NEITSCH et al., 2011). Trata-se de um modelo matemático de parâmetros semi-distribuídos que foi desenvolvido para prever impactos gerados pelo manejo do solo em relação à água, sedimento e produção química agrícola em bacias hidrográficas. O SWAT é mais recomendado para simular impactos de longo prazo (NEITSCH et al., 2011).

O SWAT é de domínio público com código aberto, e possui interfaces amigáveis disponíveis para utilização. Para realizar a integração do SWAT com programas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a extensão ArcSWAT é a mais utilizada. Esta ferramenta possibilita inserir os dados de entrada do modelo por meio do software ArcGIS, desenvolvido pela ESRI (Environmental Systems Research Institute).

O SWAT compõe uma estrutura de comandos que determinam a propagação do escoamento, dos sedimentos e dos agroquímicos por uma bacia hidrográfica. O modelo determina parâmetros hidrológicos por meio da topografia do terreno e das características de uso do solo. Para realizar a modelagem, a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias menores, que são parametrizadas por meio das Unidades de Resposta Hidrológica (Hydrologic Response Units – HRU). Cada HRU compreende uma única combinação de declividade e de tipo e uso do solo (NEITSCH et al., 2011).

Para a realização das simulações, os dados mínimos de entrada no SWAT são topografia, pedologia, dados de clima e uso do solo. Os dados de clima solicitados pelo modelo são precipitação, temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Com exceção da precipitação, as variáveis climáticas podem ser geradas pelo gerador climático do SWAT, que pode ter como base séries históricas fornecidas pelo

usuário. O gerador climático também pode ser utilizado para preencher falhas nos dados de entrada (ARNOLD et al., 2012).

Todas as estimativas do SWAT têm como base o balanço hídrico, que é dividido entre a fase terrestre do ciclo hidrológico, e a fase de propagação no canal.

Na fase de propagação no canal, são modelados o fluxo de massa e as transformações dos elementos químicos no canal e seu leito. No canal principal, o SWAT calcula a propagação considerando a água, os sedimentos, os nutrientes e os compostos orgânicos. A propagação da vazão pode ser calculada por meio do método de Muskingum ou do método do coeficiente de armazenamento variável desenvolvido por Williams (1969) (NEITSCH et al., 2011).

Na fase terrestre, o modelo SWAT realiza suas simulações a partir da equação geral do balanço hídrico aplicada ao perfil de solo, apresentada a seguir:

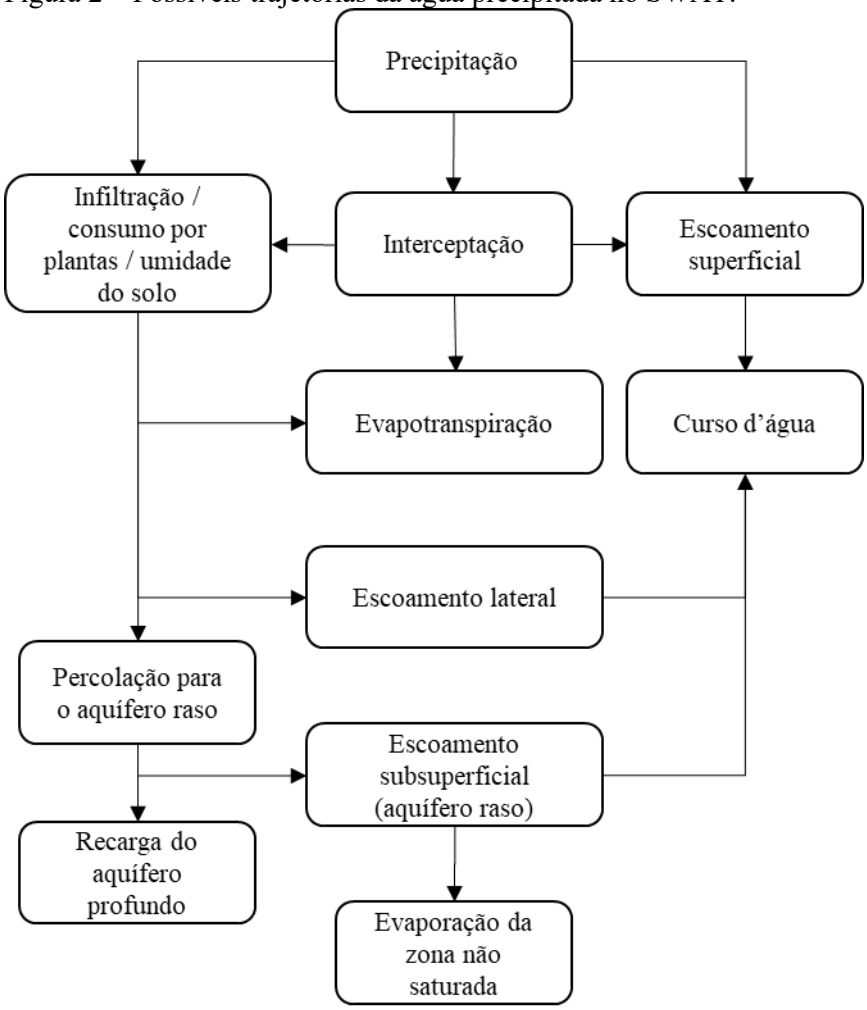
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{i} (R_{day} - Q_{swf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

onde SW_t é o conteúdo final de água no solo (mm), SW_0 é o conteúdo inicial de água no solo no dia i (mm), t é o tempo (dias), R_{day} é a precipitação no dia i (mm), Q_{swf} é o escoamento superficial no dia i (mm), E_a é a evapotranspiração no dia i (mm), w_{seep} é a quantidade de água que percola na zona vadosa (mm) e Q_{gw} é a quantidade de água que retorna ao curso d'água no dia i por escoamento subsuperficial (mm). O escoamento é estimado individualmente para cada HRU, e o escoamento total da bacia é obtido a partir da propagação dos valores individuais de cada HRU (NEITSCH et al., 2011).

Para a realização das simulações, o SWAT considera que a água precipitada pode atingir diretamente a superfície do solo ou ser interceptada e permanecer no dossel da vegetação até evaporar ou escoar. A água que cai diretamente na superfície do solo pode infiltrar ou escoar superficialmente até um curso d'água. A parcela de água que infiltra pode ser evapotranspirada, percolar até o aquífero profundo, ou, ainda, atingir um aquífero superficial e escoar até um curso d'água superficial (NEITSCH et al., 2011). O fluxograma apresentado na Figura 2 apresenta as possíveis trajetórias da água dentro do SWAT.

Outras informações podem ser inseridas no modelo, de acordo com a necessidade de detalhamento. O modelo ainda permite a escolha da metodologia de cálculo dos processos hidrológicos, como o escoamento superficial e a evapotranspiração.

Figura 2 – Possíveis trajetórias da água precipitada no SWAT.



Fonte: adaptado de (NEITSCH et al., 2011).

2.4.2 Análise de sensibilidade, calibração e validação de modelos hidrológicos

A análise de sensibilidade consiste na avaliação da influência das variáveis e parâmetros de um modelo nos resultados. Esta etapa pode identificar parâmetros que tem ou não influência significativa sobre as simulações (VAN GRIENSVEN et al., 2006). Resultados menos eficientes podem ocorrer quando não há conhecimento dos parâmetros mais sensíveis, o que resulta em tempo gasto de forma desnecessária em ajustes nas simulações (LENHART et al., 2002)

A calibração de um modelo consiste em identificar a faixa de valores mais adequada para os parâmetros mais sensíveis da área de estudo, determinados na etapa de análise de sensibilidade (ARNOLD et al., 2012). A validação consiste na execução do modelo calibrado para um intervalo de tempo diferente do utilizado na calibração, e na comparação dos dados simulados com os dados observados. O objetivo desta etapa é demonstrar a eficiência do

modelo em simular o comportamento da bacia hidrográfica para períodos não calibrados (ARNOLD et al., 2012).

A calibração pode ser realizada de forma manual, por tentativa e erro, ou de forma automática ou semiautomática, por meio da utilização de algoritmos e funções objetivo. O coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) é a função objetivo mais comumente utilizada na calibração de modelos hidrológicos. No entanto, este coeficiente não é muito sensível a *outliers*. Resultados mais confiáveis têm sido obtidos com o uso do coeficiente de Kling-Gupta (KGE) (ZHU et al., 2016). Esta função objetivo foi desenvolvida a partir da decomposição do NSE e do Erro Quadrático Médio (GUPTA et al., 2009).

O KGE foca em três dimensões: (i) a correlação linear entre vazões simuladas e observadas (r); (ii) a razão entre os desvios padrões das vazões simuladas e observadas (α); e (iii) o erro tendencial (*bias*) entre as vazões simuladas e observadas (β) (GUPTA et al., 2009; KLING; FUCHS; PAULIN, 2012). O KGE é definido pela seguinte equação:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (2)$$

Os valores de KGE variam de -∞ a 1, sendo 1 a consistência perfeita entre as vazões simuladas e observadas. As simulações podem ser consideradas satisfatórias com valores de KGE maiores ou iguais a 0,6 (PATIL; STIEGLITZ, 2015).

No SWAT, as etapas de análise de sensibilidade, calibração e validação podem ser realizadas por meio da ferramenta automatizada SWAT-CUP (SWAT *Calibration Uncertainty Procedure*), que possui cinco diferentes métodos de calibração: GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*); ParaSol (*Parameter Solution*); MCMC (*Markov chain Monte Carlo*); PSO (*Particle Swarm Optimization*) e SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fitting*) (ABBASPOUR, 2015). Yang et al. (2008), ao compararem os diferentes métodos de calibração para uma bacia hidrográfica na China, observaram melhores resultados por meio de uma abordagem Bayesiana de Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC). No entanto, o SUFI-2 foi o que apresentou resultados satisfatórios com o menor número de iterações, o que representa uma vantagem computacional. Wu e Chen (2015), ao compararem os métodos GLUE, SUFI-2 e ParaSol em uma outra bacia da China, identificaram que o SUFI-2 apresentou melhores resultados, além de maior eficiência computacional.

O SUFI-2 é um algoritmo que auxilia no processo de calibração por meio de sucessivas iterações, cada uma com um número fixo de simulações. Para cada simulação, o SWAT-CUP

define um valor para cada parâmetro sendo calibrado. Os intervalos de valores dos parâmetros calibrados são reduzidos a cada iteração, de acordo com os melhores resultados obtidos na iteração anterior. A função objetivo, o número de iterações e o número de simulações são definidos pelo usuário (ABBASPOUR, 2015). Geralmente, de três a cinco iterações são suficientes para fornecer resultados satisfatórios (ABBASPOUR et al., 2015).

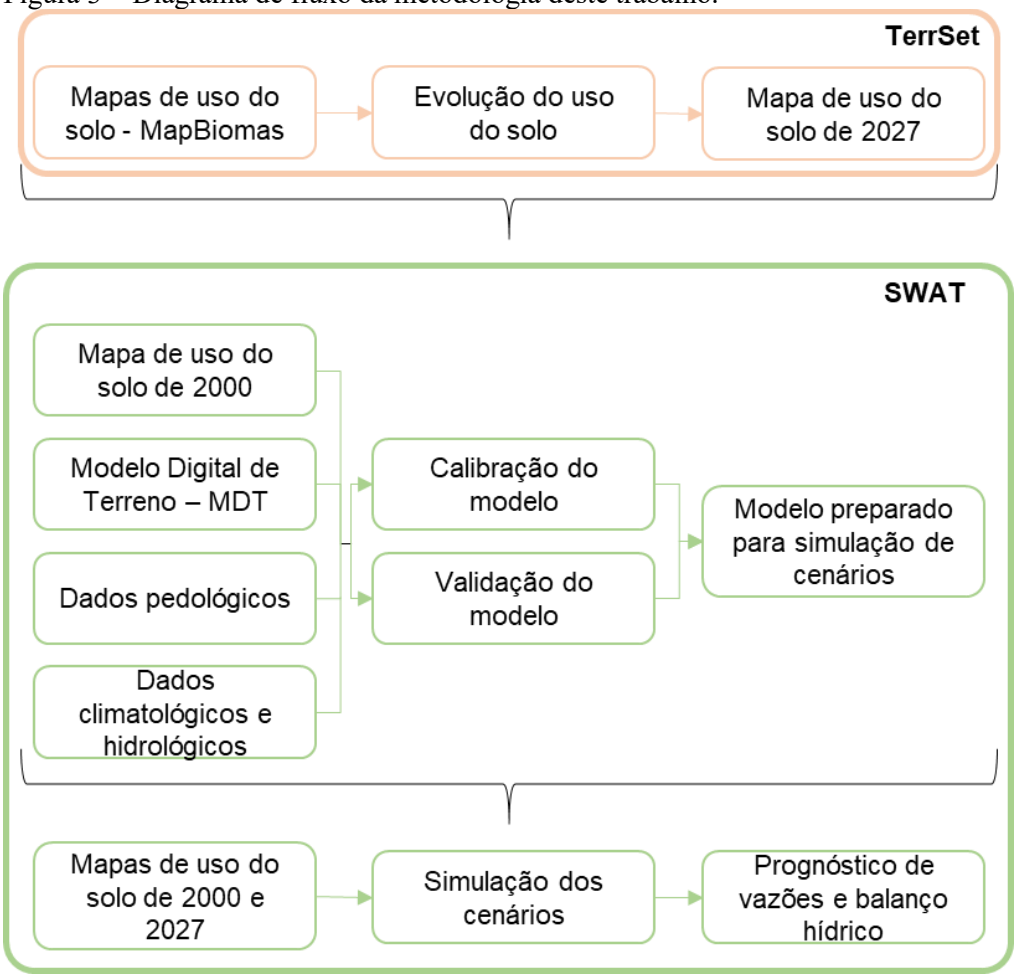
No SWAT-CUP, as incertezas do SUFI-2 correspondem ao intervalo de 95% de probabilidade calculada para os percentis 2,5% e 97,5% da distribuição de probabilidade acumulada da variável de saída do modelo. Cada intervalo de parâmetros utilizados em cada iteração, amostrados por meio do hipercubo latino, produz uma faixa de resultados da variável de saída durante as *n* simulações. Duas estatísticas são apresentadas pelo SWAT-CUP e podem ser utilizadas para avaliar o intervalo de parâmetros utilizado em cada iteração: o fator-p e o fator-r. O fator-p indica o percentual de dados observados – que devem ser fornecidos pelo usuário ao SWAT-CUP – presente na faixa de 95% dos valores simulados. O fator-r representa a amplitude da faixa de valores simulados, por meio da razão entre a distância média dos percentis 2,5 e 97,5 e o desvio padrão médio dos dados observados. Uma simulação perfeita teria 1,0 como fator-p e zero como fator-r. A calibração pode ser considerada adequada para valores de fator-p maiores do que 0,70 e de fator-r menores do que 1,5 (ABBASPOUR, 2015).

O SWAT-CUP também permite a realização de uma análise de sensibilidade para auxiliar na definição dos parâmetros que serão calibrados. O SUFI-2 estima a sensibilidade dos parâmetros por meio de uma análise de regressão múltipla, e fornece dois valores para análise: o t-Stat e o valor p. O t-Stat corresponde ao coeficiente do parâmetro dividido por seu desvio padrão, e avalia a significância relativa de cada parâmetro. Quanto maior o valor absoluto do t-Stat, mais sensível é o parâmetro. O valor-p testa a hipótese nula (H_0) de que o coeficiente seja zero. Um valor-p menor do que 0,05 indica que a hipótese nula pode ser rejeitada, e o parâmetro pode ser considerado sensível com um intervalo de confiança de 95% (ABBASPOUR, 2015).

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo descrever a metodologia adotada neste trabalho para atingir os objetivos propostos. Primeiramente, para contextualização, é apresentada uma breve descrição da área de estudo e dos principais resultados do PERH. Em seguida são descritos os métodos de obtenção e de preparação dos mapas de uso do solo que foram utilizados no TerrSet. Finalmente, são apresentados os métodos de obtenção e de preparação dos dados de entrada que foram utilizados no SWAT. Para facilitar a visualização do processo metodológico, apresenta-se na Figura 3 um diagrama de fluxo que foi seguido para a execução dos trabalhos.

Figura 3 – Diagrama de fluxo da metodologia deste trabalho.

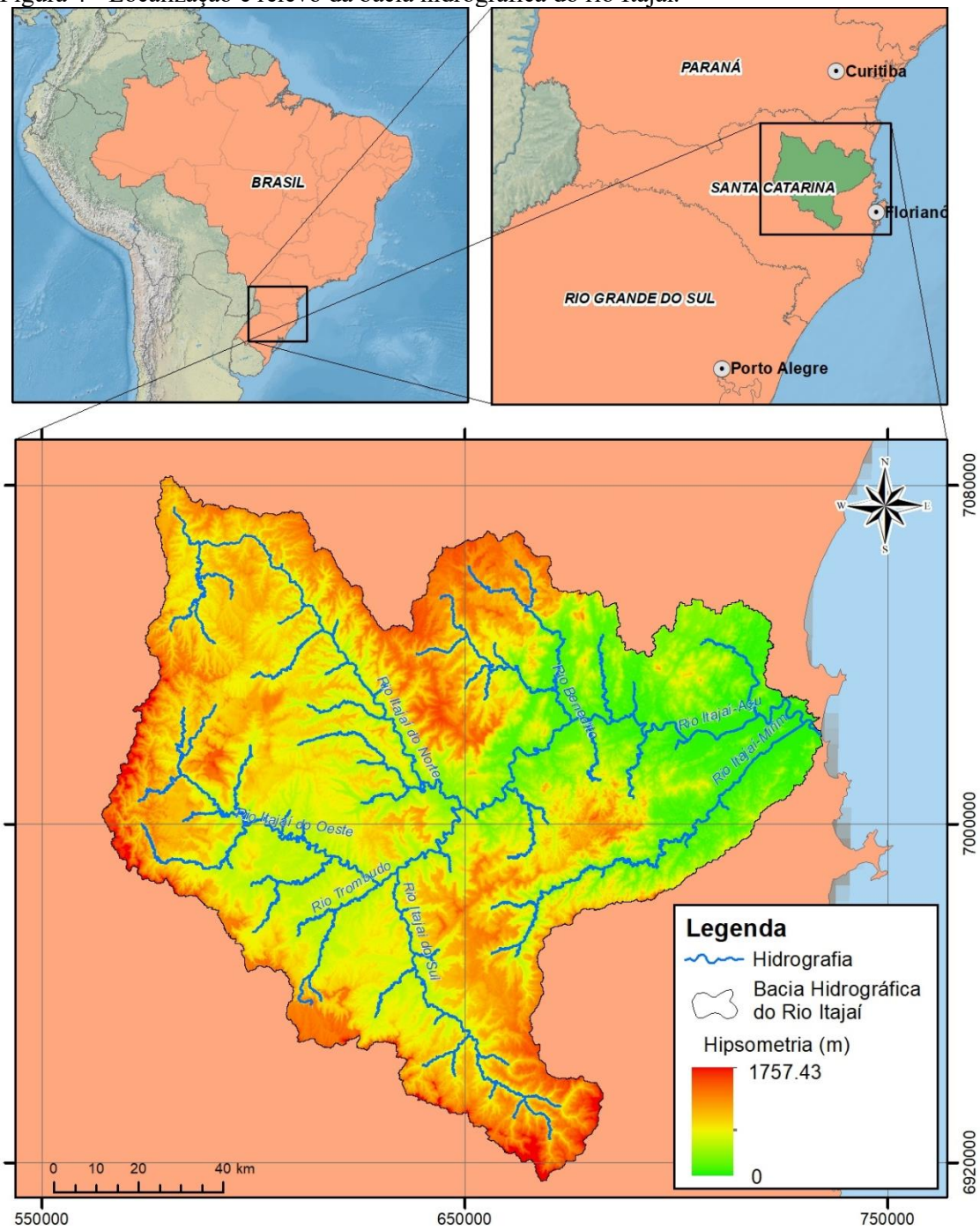


3.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Itajaí localiza-se na região norte do estado de Santa Catarina, no sul do Brasil. Os seus divisores de água encontram-se a Oeste, na Serra Geral e na Serra do Espigão, ao Sul, na Serra da Boa Vista, na Serra dos Faxinais e na Serra do Tijucas, e,

ao Norte, na Serra da Moema. Na Figura 4, é apresentada a localização da bacia hidrográfica do rio Itajaí dentro do estado de Santa Catarina.

Figura 4 - Localização e relevo da bacia hidrográfica do rio Itajaí.



Os principais cursos d'água da bacia têm suas nascentes na Serra Geral, na elevação 1.000 m. O rio Itajaí-Açu, mais importante da bacia, percorre cerca de 200 km desde a cidade de Rio do Sul, onde assume este nome, até sua foz no oceano, junto às sedes dos municípios de Itajaí e Navegantes. A bacia do rio Itajaí tem como principais afluentes os rios Itajaí do Norte,

Benedito, Cedro, Texto e Luiz Alves pela margem direita, e os rios Neisse, Warnow, Garcia, Engano e Itajaí-Mirim pela margem esquerda (SDM, 1997). Na Tabela 2 são apresentadas as principais características fisiográficas da bacia.

Tabela 2 - Principais características fisiográficas da bacia hidrográfica do rio Itajaí.

Característica	**Valor**
Extensão do curso d'água principal	283 km
Área de drenagem	15.000 km²
Perímetro	1.222 km
Comprimento axial da bacia	169 km
Somatório do comprimento dos cursos d'água da bacia	5.755 km

Fonte: (SDM, 1997).

Trata-se de uma das bacias hidrográficas mais importantes do estado de Santa Catarina, abrangendo a área total ou parcial de 60 municípios. Segundo dados do último censo demográfico brasileiro, realizado no ano de 2010, a bacia hidrográfica do rio Itajaí possui um total de 1.264.294 habitantes, que corresponde à 20% da população estadual (SDS, 2018).

Com relação ao clima, a bacia apresenta temperaturas médias anuais do ar com um gradiente crescente no sentido oeste-leste, variando de 20ºC nas porções mais baixas a 14ºC nas porções mais altas. A temperatura média geral na bacia toda é de 17ºC. O volume total precipitado por ano na bacia é de 1.550 mm, em média, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano.

3.2 PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE SANTA CATARINA

O governo do estado de Santa Catarina lançou, no início de 2018, o Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH). Este documento servirá como base para as políticas públicas do estado voltadas aos recursos hídricos. O PERH apresentou um diagnóstico dos recursos hídricos do estado de Santa Catarina e um prognóstico para um horizonte de 10 anos.

3.2.1 Diagnóstico

Para a determinação da disponibilidade hídrica de cada bacia hidrográfica, o PERH apresentou vazões médias de longo termo (Q_{mlt}), vazões médias mensais com permanência de 90, 95 e 98% (Q_{90}, Q_{95}, Q_{98}) e vazão mínima anual de 7 dias consecutivos e 10 anos de período de retorno ($Q_{7,10}$). Todos estes dados foram estimados por meio de equações de regionalização.

A Tabela 3 apresenta os dados estimados para a bacia hidrográfica do rio Itajaí. O PERH também realizou um levantamento dos usos da água nas bacias do estado. A Tabela 4 apresenta os valores estimados pelo PERH de demanda de vazão para cada uso da água identificado na bacia hidrográfica do rio Itajaí.

Tabela 3 – Vazões estimadas pelo PERH para a bacia hidrográfica do rio Itajaí.

Q_{mlt} (m³/s)	Q_{90} (m³/s)	Q_{95} (m³/s)	Q_{98} (m³/s)	$Q_{7,10}$ (m³/s)
490,69	127,58	98,14	68,7	25,67

Tabela 4 – Usos da água identificados na bacia hidrográfica do rio Itajaí e vazões de consumo.

Uso da água	**Vazão de retirada (m³/s)**
Abastecimento urbano (residentes)	2,98
Abastecimento urbano (população flutuante)	0,81
Abastecimento da população rural	0,24
Aquicultura	1,07
Criação animal	0,36
Irrigação	7,46
Mineração	0,18
Uso industrial	4,47
Total	**17,55**

Para o cálculo do balanço hídrico quantitativo, o PERH utilizou a seguinte equação:

$$Balanço\ hídrico = \frac{VRT}{Disponibilidade} x100 \quad (3)$$

onde *VRT* corresponde à vazão total de retirada, em m³/s, e, *Disponibilidade,* refere-se à vazão de referência utilizada como indicador de disponibilidade hídrica, também em m³/s. O PERH utiliza as faixas de classificação de disponibilidade hídrica propostas pela *European Environmental Agency*, que são consideradas adequadas para estudos no Brasil (ANA, 2013), e são apresentadas a seguir:

- < 5%: Excelente;
- 5 a 10%: Confortável;
- 10 a 20%: Preocupante;
- 20 a 40%: Crítica;
- 40 a 100%: Muito crítica;
- > 100%: Péssimo.

O cálculo do balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Itajaí, considerando a vazão de referência Q_{98} para a disponibilidade, indicou que, atualmente, a bacia retira 27,55% da vazão disponível, resultado que classifica a situação da bacia como crítica.

3.2.2 Prognóstico

Para a elaboração do prognóstico das demandas hídricas, o PERH considerou o cenário tendencial de evolução das demandas por recursos hídricos dos diferentes tipos de usuários. Como horizonte de longo prazo, o PERH considerou o ano de 2027, que coincide com os Planos Plurianuais de Santa Catarina, programa que direciona os investimentos a longo prazo do governo estadual.

A elaboração do cenário tendencial levou em conta variáveis e indicadores de interesse para a avaliação de tendências de cada tipo de uso da água. Foram observadas, basicamente, taxas de crescimento de cada tipo de uso da água. Na Tabela 5 são apresentadas as taxas de crescimento anual da demanda de recursos hídricos para cada tipo de usuário.

Tabela 5 – Taxas de crescimento anual da demanda de água para cada tipo de usuário.

Usuário	**Taxa de crescimento (% a.a.)**
Eletricidade, água, gás	-12,24
Efetivo suíno	-6,42
Efetivo galináceo	-5,96
Indústria de automóveis	-5,15
Indústria de confecção e têxtil	-4,25
População rural	-0,35
Construção civil	0,71
Indústria de madeira e celulose	1,18
Área de agricultura temporária	1,69
Área de agricultura total	1,79
Efetivo bovino	2,1
População urbana	2,57
Transformação	3,04
Área de agricultura permanente	3,74
Indústria eletrometal e mecânica	11,68
Indústria de alimentos e bebidas	16,65
Outras indústrias	19,6
Extração mineral	21,67

A partir das taxas de crescimento, o PERH apresentou as vazões de retirada previstas para o ano de 2027 nas bacias do estado. A Tabela 6 apresenta os dados referentes à bacia hidrográfica do rio Itajaí.

A partir dos dados de vazão de retirada, o balanço hídrico quantitativo foi estimado para 2027. Para realizar este cálculo, o PERH considerou os mesmos dados de vazão de referência utilizados no diagnóstico, sem considerar possíveis alterações na disponibilidade hídrica das bacias em função de alterações do uso do solo ou de alterações climáticas. O cálculo do balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Itajaí, considerando a vazão de referência Q_{95} utilizada no diagnóstico para a disponibilidade, indicou que, em 2027, a bacia retirará 39% da vazão disponível, resultado que classificará a situação da bacia como crítica.

Tabela 6 – Projeções para vazões de retirada em 2027 na bacia hidrográfica do rio Itajaí.

Uso da água	**Vazão de retirada (m^3/s)**
Abastecimento urbano (residentes)	4,59
Abastecimento urbano (população flutuante)	0,81
Abastecimento da população rural	0,22
Aquicultura	4,69
Criação animal	0,42
Irrigação	9,24
Mineração	2,75
Uso industrial	15,46
Total	**38,16**

3.3 MAPAS DE USO DO SOLO

Para a realização da avaliação da evolução do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Itajaí, foram utilizados mapas de uso do solo de 1990, 2000, 2010 e 2015. Os mapas foram obtidos junto ao projeto MapBiomas, que foi iniciado em 2015 e é uma iniciativa de diversas universidades, Organizações não Governamentais (ONGs) e companhias privadas. O projeto tem como objetivo desenvolver uma metodologia rápida, confiável e de baixo custo para produzir séries anuais de uso e ocupação do solo em todo o território brasileiro. O MapBiomas disponibiliza atualmente uma série de mapas de uso do solo dos anos de 1985 a 2017, totalizando um período de 33 anos (MAPBIOMAS, 2018).

Os mapas disponibilizados pelo MapBiomas foram elaborados a partir de imagens de satélite *LandSat*, com resolução de 30 metros. Os mapas foram gerados a partir de algoritmos nas linguagens Javascript e Python, e diferenciam 18 tipos de uso e ocupação do solo, dos quais 13 foram identificados na bacia hidrográfica do rio Itajaí. Com o objetivo de facilitar a

interpretação dos resultados, este estudo agrupou as 13 classificações propostas pelo MapBiomas em 6 tipos de uso do solo, conforme apresentado na Tabela 7.

Para a definição da simplificação proposta na Tabela 7, foi realizado um refinamento dos usos do solo identificados pelo MapBiomas. Observou-se que muitas áreas definidas como *Mineração*, *Apicum* e *Praia e duna* correspondiam, na realidade, a edificações. Portanto, estas áreas foram reclassificadas para *Infraestrutura urbana*. De forma semelhante, observou-se que muitas áreas identificadas pelo algoritmo do MapBiomas como *Formação campestre* e *Outra área não vegetada* correspondiam a áreas de pastagem. Considerando que as áreas de *mangue* possuem características visuais semelhantes às áreas de *formação florestal*, quando observadas a partir e imagens de satélite, optou-se por agrupar estas duas classificações.

Os mapas de uso do solo de 1990, 2000, 2010 e 2015 foram avaliados e comparados entre si com o auxílio dos *softwares* ArcGIS 10.3 e TerrSet 18.31.

Para a geração do mapa futuro, foram fornecidos ao *Land Change Modeler* (LCM) os mapas de 2000 e de 2010, e por meio do *Multi-Layer Perceptron* (MLP) foram determinadas as transações potenciais de uso do solo. Foram utilizados como *drivers* mapas de declividade, de elevação, hidrografia e rodovias. Após a calibração e a geração dos mapas de transição, foi indicado ao LCM as áreas onde se encontram Unidades de Conservação, locais onde a formação florestal não poderá ter redução de área.

Para a validação, foi solicitado ao LCM a geração de um mapa de uso do solo para o ano de 2015, que foi comparado ao mapa do mesmo ano fornecido pelo MapBiomas. Após a validação e ajuste dos parâmetros do modelo, foi solicitado ao LCM a geração de um mapa de uso do solo para o ano de 2027. A escolha do ano de simulação foi embasada na projeção futura de uso das águas na bacia, contida no Plano Estadual de Recursos Hídricos, principal documento de diretrizes da gestão de recursos hídricos no estado de Santa Catarina.

Tabela 7 – Simplificação das classificações de uso e ocupação do solo.

Classificação de uso do solo simplificada	Classificação de uso do solo existente nos mapas do MapBiomas
Formação florestal	Formação florestal; Mangue
Silvicultura	Floresta plantada
Pastagem	Formação campestre; Pastagem; Outra área não vegetada
Agricultura	Cultura anual e perene; Mosaico de agricultura e pastagem
Infraestrutura urbana	Praia e duna; Infraestrutura urbana; Mineração; Apicum
Corpo d'água	Rio, lago e oceano

3.4 DADOS DE ENTRADA PARA AS SIMULAÇÕES NO SWAT

Para a realização das simulações, os dados mínimos de entrada no SWAT são topografia, pedologia, dados de clima e uso do solo. Os dados de clima solicitados pelo modelo são precipitação, temperaturas máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. Para a realização da calibração e da validação são necessários dados observados de vazão. Nos itens abaixo, é apresentada a metodologia de obtenção destes dados, e a Tabela 8 apresenta, em resumo, as fontes de obtenção dos dados.

Tabela 8 – Fontes de obtenção dos dados de entrada e dados observados para a realização das simulações no SWAT.

Variável	Resolução	Período	Fonte
Precipitação	-	1998 – 2013	Hidroweb ANA e EPAGRI
Dados meteorológicos	-	2010 – 2018	INMET e EPAGRI
Vazão	-	1999 – 2006	Hidroweb ANA
MDT	10m	-	SDS/SC
Pedologia	1:250.000	-	EMBRAPA
Mapas de uso do solo	30m	-	MapBiomas

3.4.1 Dados meteorológicos

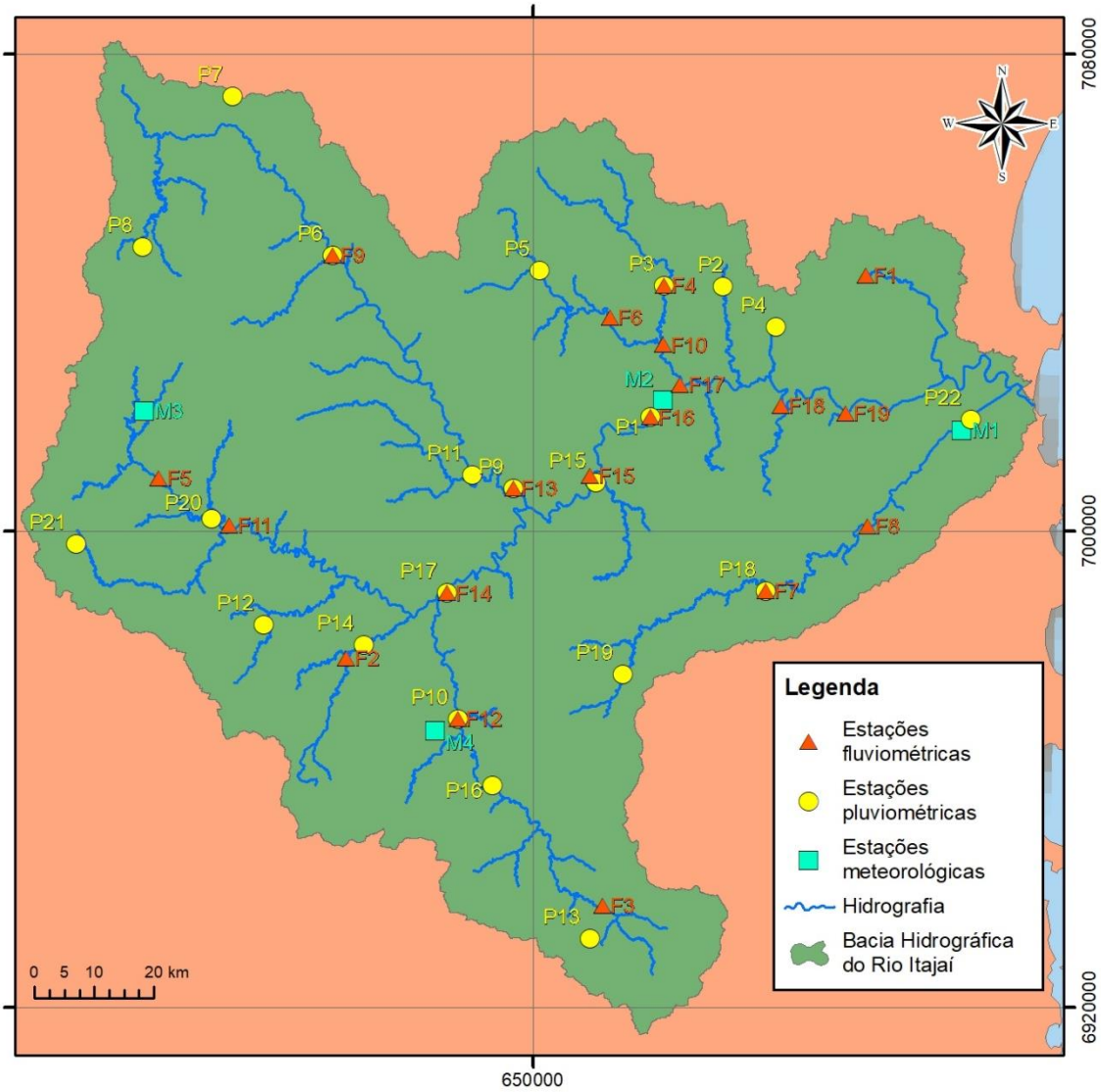
Foram coletadas séries históricas de temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, velocidade do vento, radiação solar e precipitação de 4 estações meteorológicas localizadas dentro da bacia hidrográfica do rio Itajaí. As séries históricas compreenderam os anos de 2010 a 2018, coincidindo com o período selecionado para a pluviometria. Os dados das

quatro estações foram fornecidos pelo INMET, e os dados referentes ao ano de 2010 da estação meteorológica de Itajaí foram fornecidos pela EPAGRI/SC. O Apêndice C apresenta a listagem das estações meteorológicas, seus códigos de identificação e as coordenadas geográficas. A localização das 4 estações meteorológicas é indicada na Figura 5.

Os dados meteorológicos foram organizados e fornecidos ao banco de dados do modelo que, por meio da ferramenta *Weather Generator*, interpreta os dados e gera informações para os anos utilizados nas simulações. O modelo gera uma série de dados meteorológicos para cada sub-bacia, baseado nos dados fornecidos pelo usuário (NEITSCH et al., 2011). O SWAT utiliza estes dados para preenchimento de eventuais falhas nos dados diários medidos fornecidos ao modelo.

Uma vez que não havia dados meteorológicos disponíveis para o período avaliado no modelo – exceto para precipitação – foram coletados dados do *Global Weather Data* (GWD), disponível no *website* do SWAT. Esta ferramenta disponibiliza dados meteorológicos diários de 1979 a 2014, coletados a partir de imagens de satélite e calculados pelo *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR). Por meio do GWD, foram obtidos dados diários de velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa, temperatura distribuídos espacialmente ao longo da bacia, para os anos de 1997 a 2006.

Figura 5 – Localização das estações meteorológicas, pluviométricas e fluviométricas.



3.4.1.1 Dados de precipitação

Inicialmente, foram coletadas séries históricas de precipitação de 37 estações pluviométricas localizadas dentro da bacia hidrográfica do rio Itajaí, e outras 23 estações localizadas no entorno da bacia, para auxílio na interpolação de dados faltantes. As séries históricas compreenderam os anos de 1997 a 2013. Todos os dados foram obtidos a partir da plataforma *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA). Também foram utilizados os dados de pluviometria da estação meteorológica da Epagri, localizada no município de Itajaí.

Em uma primeira etapa, avaliou-se a quantidade de falhas existentes em cada estação pluviométrica localizada dentro da bacia hidrográfica do rio Itajaí. Optou-se por descartar estações com mais de 30 dias seguidos de falhas dentro do intervalo de anos da série histórica que fosse selecionado. Neste caso, avaliou-se qual intervalo de anos da série histórica teria o maior número de estações com menos de 30 dias seguidos de falhas. Verificou-se que, ao optar pelo intervalo de anos de 1997 a 2006, haveria o maior número de estações pluviométricas com menos de 30 dias seguidos com falhas – um total de 22 estações. A localização das 22 estações pluviométricas é indicada na Figura 5, apresentada anteriormente. Nesta mesma figura é apresentada a localização das estações pluviométricas e meteorológicas, que são descritas mais adiante. O Apêndice A apresenta a listagem das estações pluviométricas selecionadas e seus códigos de identificação.

O preenchimento das falhas das 22 estações pluviométricas selecionadas foi realizado por meio do método da Ponderação do Inverso da Distância (IDW), que apresenta bons resultados quando comparado a outros métodos (HEISTERMANN; KNEIS, 2011; WAGNER et al., 2012; XUE et al., 2019). O método do IDW utiliza a interpolação por quadrantes, onde para cada quadrante no entorno da estação pluviométrica com falha é considerada a estação sem falha mais próxima, conforme ilustrado na Figura 6. Desta forma, garante-se a utilização de dados pluviométricos de todas as direções. Utilizou-se dois como a potência do inverso da distância, que corresponde à potência mais comumente utilizada na literatura (HEISTERMANN; KNEIS, 2011). A equação do método IDW é apresentada a seguir.

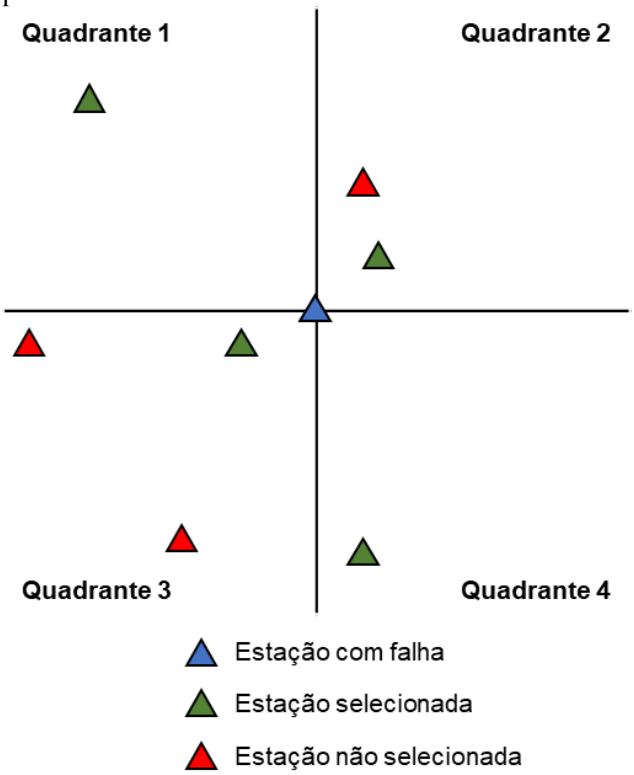
$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^{n}(w_i G_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{4}$$

$$w_i = d_{ij}^{-2} \tag{5}$$

onde P_j é a precipitação (mm) na localização j, G_i é o dado de precipitação observado (mm) na localização i. Neste caso, i corresponde uma das n estações pluviométricas no entorno de j. Por último, d_{ij} corresponde à distância entre as localizações i e j.

Para a realização da interpolação, foram considerados os dados das 37 estações pluviométricas internas à bacia do rio Itajaí, e das 23 estações externas.

Figura 6 – Representação da metodologia de seleção das estações pluviométricas para o cálculo de preenchimento de falhas.



3.4.2 Dados de vazão

Para a realização da calibração e da validação do modelo, foram coletadas séries históricas de vazão de 19 estações fluviométricas localizadas dentro da bacia hidrográfica do rio Itajaí. As séries históricas compreenderam os anos de 1999 a 2006, coincidindo com o período selecionado para a pluviometria. Todos os dados foram obtidos a partir da plataforma *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA). O Apêndice B apresenta as estações fluviométricas utilizadas, cujas localizações podem ser visualizadas na Figura 5, apresentada anteriormente.

3.4.3 Modelo Digital de Terreno

A topografia da bacia hidrográfica foi fornecida ao SWAT por meio de um Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução espacial de 10 metros, que foi processado a partir do MDT com resolução espacial de 1 metro disponibilizado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Social de Santa Catarina (SDS/SC). Este processamento foi realizado com a utilização da função *Aggregate* do *software* ArcGIS. A hipsometria da biacia hidrográfica foi apresentada na Figura 4. O processamento para resolução espacial de 10 metros foi necessário em função de limitações computacionais. A resolução espacial de 1 metro exigiria muito tempo e capacidade computacional.

3.4.4 Pedologia

O SWAT exige, como dado de entrada, a distribuição espacial das unidades pedológicas da bacia hidrográfica em estudo. Para este estudo foi utilizado o mapa pedológico do estado de Santa Catarina, com resolução de 1:250.000, disponibilizado pela EMBRAPA, apresentado na Figura 7. Os tipos e solo identificados na bacia hidrográfica do rio Itajaí e a porcentagem de cada um em relação à área total da bacia são apresentados na Tabela 9. Os tipos de solo mais presentes na bacia são o cambissolo, os solos podzólicos, e os solos litólicos.

Os cambissolos, presentes em mais de 45% da área total da bacia, são solos minerais, não hidromórficos, bem a moderadamente drenados, pouco profundos a profundos. A maior parte dos cambissolos presentes na bacia apresenta textura argilosa (EMBRAPA, 2004).

Os podzólicos, presentes em cerca de 20% da área total da bacia, são solos minerais, não hidromórficos, moderadamente a acentuadamente drenados, pouco a muito profundos. A maior parte dos podzólicos presentes na bacia apresenta textura argilosa (EMBRAPA, 2004).

Os solos litólicos, presentes em cerca de 25% da área total da bacia, são solos minerais, não hidromórficos, bem a moderadamente drenados, pouco profundos, com horizonte A assentado sobre a rocha consolidada. A maior parte dos podzólicos presentes na bacia apresenta textura média e argilosa (EMBRAPA, 2004).

Para cada classe de solo identificada na área de estudo, o SWAT exige que sejam fornecidos ao modelo dados tabulares de parâmetros físico-hídricos. Os valores destes parâmetros foram estimados ou definidos a partir de dados da literatura. Estes parâmetros representam um importante impacto na circulação de água dentro da bacia hidrográfica, pois refletem nas características físicas do solo (NEITSCH et al., 2011). Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros e respectivas fontes.

Figura 7 – Mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do rio Itajaí.

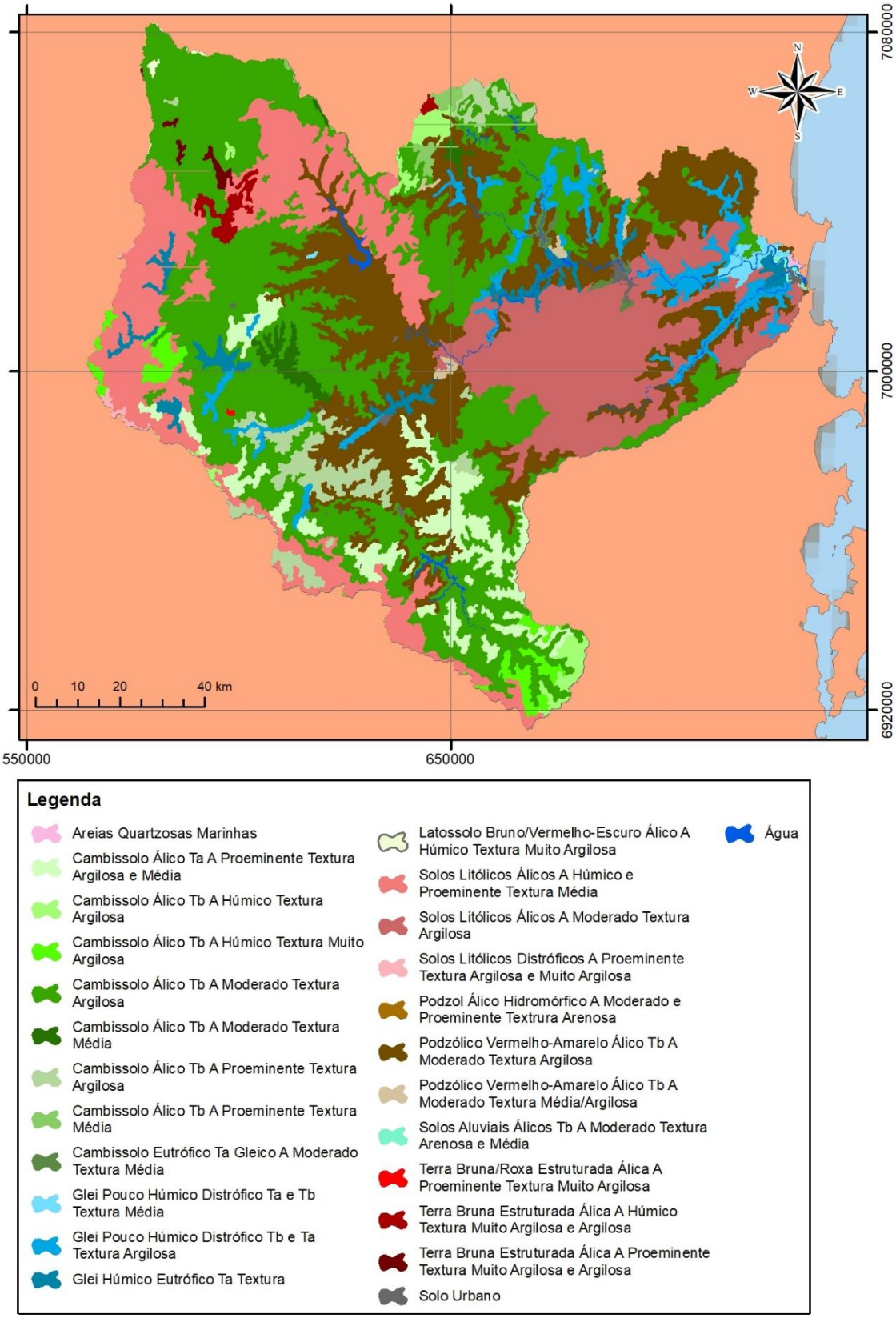


Tabela 9 – Tipos de solo identificados na bacia hidrográfica do rio Itajaí.

Tipo de solo	**Área (%)**
Cambissolo Álico Tb A Moderado Textura Argilosa	33,14%
Podzólico Vermelho-Amarelo Álico Tb A Moderado Textura Argilosa	20,02%
Solos Litólicos Álicos A Húmico e Proeminente Textura Média	13,19%
Solos Litólicos Álicos A Moderado Textura Argilosa	12,49%
Cambissolo Álico Ta A Proeminente Textura Argilosa e Média	4,99%
Glei Pouco Húmico Distrófico Tb e Ta Textura Argilosa	3,99%
Cambissolo Álico Tb A Proeminente Textura Argilosa	3,09%
Glei Húmico Eutrófico Ta Textura Argilosa	1,81%
Cambissolo Álico Tb A Húmico Textura Muito Argilosa	1,38%
Cambissolo Álico Tb A Húmico Textura Argilosa	1,14%
Cambissolo Álico Tb A Moderado Textura Média	0,87%
Terra Bruna Estruturada Álica A Húmico Textura Muito Argilosa e Argilosa	0,61%
Cambissolo Álico Tb A Proeminente Textura Média	0,48%
Glei Pouco Húmico Distrófico Ta e Tb Textura Média	0,46%
Solo Urbano	0,37%
Cambissolo Eutrófico Ta Gleico A Moderado Textura Média	0,29%
Podzólico Vermelho-Amarelo Álico Tb A Moderado Textura Média/Argilosa	0,27%
Terra Bruna Estruturada Álica A Proeminente Textura Muito Argilosa e Argilosa	0,25%
Solos Litólicos Distróficos A Proeminente Textura Argilosa e Muito Argilosa	0,13%
Solos Aluviais Álicos Tb A Moderado Textura Arenosa e Média	0,08%
Latossolo Bruno/Vermelho-Escuro Álico A Húmico Textura Muito Argilosa	0,07%
Areias Quartzosas Marinhas	0,03%
Terra Bruna/Roxa Estruturada Álica A Proeminente Textura Muito Argilosa	0,02%
Podzol Álico Hidromórfico A Moderado e Proeminente Textrura Arenosa	0,00%

Tabela 10 - Parâmetros físico-hídricos dos tipos de solo e respectivas fontes.

Parâmetro	**Identificação no SWAT**	**Fonte**
Número de camadas do perfil	NLAYERS	(EMBRAPA, 2004)
Profundidade máxima da raiz no solo	SOL_ZMX	
Porosidade do solo	ANION_EXCL	
Profundidade de cada horizonte	SOL_Z	
Densidade aparente	SOL_BD	
Teor de carbono orgânico	SOL_CBN	
Porcentagem de argila	CLAY	
Porcentagem de Silte	SILT	
Porcentagem de areia	SAND	
Porcentagem de cascalho	ROCK	
Grupo hidrológico do solo	HYDGRP	(SARTORI; GENOVEZ; LOMBARDI NETO, 2005)
Capacidade de água disponível	SOL_AWC	(SAXTON; RAWLS, 2006)
Condutividade hidráulica saturada	SOL_K	

3.4.5 Uso e cobertura do solo

O SWAT relaciona os dados de uso do solo com parâmetros hidrológicos de escoamento e infiltração, além de trabalhar com uma grande variedade de informações relacionadas à fisiologia vegetal, ao crescimento das culturas e à ciclagem de nutrientes. Estas relações dentro do SWAT apresentam grande complexidade, e suas aplicações em bacias hidrográficas brasileiras costumam utilizar valores incluídos no banco de dados original do modelo (*default*), que tem origem na literatura norte-americana. Este banco de dados possui 127 categorias diferentes de uso do solo na versão 2012 do SWAT, que caracterizam diferentes tipos de culturas agrícolas, feições naturais e coberturas específicas de solo. Para áreas urbanizadas, o SWAT apresenta 9 diferentes categorias de uso do solo relacionadas ao tipo de urbanização e à densidade de edificações.

Para garantir o maior nível de semelhança possível entre as categorias de uso do solo mapeadas para a bacia do rio Itajaí e as presentes no banco de dados do modelo, foi realizada uma associação com os usos existentes no SWAT, conforme indicado na Tabela 11. Para a *Formação florestal* optou-se pela classificação *Forest-Evergreen* do Considerando que a classificação de uso do solo utilizada não diferenciou o tipo de silvicultura, optou-se pela classificação de *Eucalyptus* do SWAT, por representar a espécie mais utilizada em Santa Catarina na silvicultura. Da mesma forma, como a classificação de uso do solo utilizada não diferenciou os tipos de agricultura, optou-se pela classificação genérica do SWAT para este tipo de uso do solo. Para a classe de *Infraestrutura urbana* optou-se pela classificação de maior densidade urbana do SWAT (*Residential-High Density*), pois a maior parte dos centros urbanos da bacia do rio Itajaí apresentam grande concentração de construções que impermeabilizam o solo.

Tabela 11 - Associação entre as categorias de uso do solo identificadas na bacia e as existentes no banco de dados do SWAT.

Classificação de uso do solo na bacia do rio Itajaí	**Classificação de uso do solo existente no SWAT**
Formação florestal	Forest-Evergreen (FRSE)
Silvicultura	Eucalyptus (EUCA)
Pastagem	Pasture (PAST)
Agricultura	Agricultural Land – Generic (AGRL)
Infraestrutura urbana	Residential-High Density (URHD)
Corpos d'água	Water (WATR)

Para as etapas de calibração, validação e obtenção dos dados iniciais de vazão, foi fornecido ao modelo o mapa de uso do solo de 2000, obtido do projeto MapBiomas. Para a simulação do cenário futuro, foi fornecido ao modelo o mapa de uso do solo de 2027, gerado pelo TerrSet.

3.5 UTILIZAÇÃO DO SWAT

Com o auxílio da ferramenta ArcSWAT no *software* ArcGIS, foi realizada a modelagem da bacia hidrográfica do rio Itajaí. Na primeira etapa, por meio do MDT, são delimitados os cursos d'água e as sub-bacias. Foi solicitado ao modelo que a área mínima de contribuição para geração de cursos d'água fosse de 50 km². Foi gerado um total de 136 sub-bacias. Segundo dados avaliados por JHA et al., (2004) o número total de sub-bacias tem baixa influência nas simulações de dados de vazão.

Para a definição das HRUs, são fornecidos ao modelo os mapas de pedologia, declividade e uso do solo. As classes de declividade utilizadas foram de 0% a 3%, de 3% a 8%, de 8% a 30%, de 30% a 60% e maior do que 60%, baseado na classificação de declividades proposta pela Embrapa (2006). Para a calibração do modelo foi utilizado o mapa de uso do solo do ano 2000. Os limites para construção das HRUs foram de 5% para tipo de solo e classes de inclinação de terreno. Esta porcentagem é comumente utilizada para modelagens no SWAT (HER et al., 2015). Não foi estabelecido um limite para uso do solo, uma vez que o principal objetivo deste estudo foi de identificar alterações causadas pelo uso do solo no regime de vazões. Estas configurações resultaram em 5.868 HRUs.

O método selecionado para o cálculo da evapotranspiração foi o de Pristley-Taylor, que apresenta resultados mais realistas na bacia hidrográfica do rio Itajaí quando comparado aos demais métodos (VIEIRA; BLAINSKI; RICCE, 2018).

3.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O período de calibração do modelo compreendeu os anos de 2000 a 2004, totalizando 5 anos. A validação foi realizada com dados dos anos de 2005 e 2006, totalizando 2 anos. Os anos de 1997 a 1999 foram utilizados como *warm*-up do modelo, totalizando 3 anos. Optou-se pela escala mensal de calibração, uma vez que diferentes estudos concluíram que ela apresenta melhores resultados quando comparados à calibração com escala diária (BRESSIANI et al., 2015; FRANCO; BONUMÁ, 2017; XUE et al., 2019). Optou-se pela utilização do algoritmo

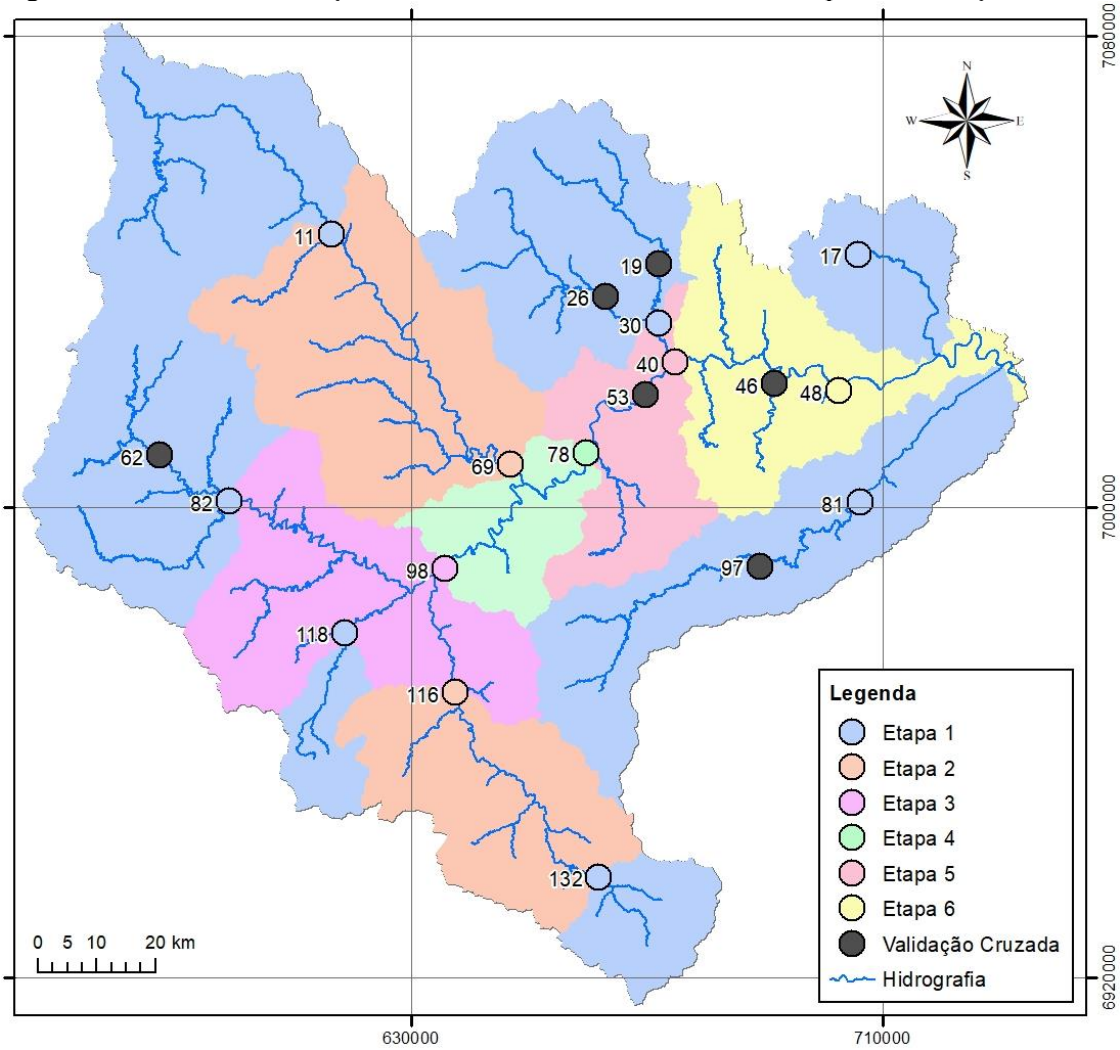
SUFI-2 para realizar a calibração modelo. Como função objetivo, foi utilizado o coeficiente KGE.

Quando são utilizadas múltiplas estações fluviométricas, o processo de calibração deve ser realizado em etapas a fim de evitar que, em uma mesma etapa, sejam utilizados dados observados de estações localizadas em uma mesma bacia hidrográfica. Neste sentido, a calibração do modelo foi realizada em seis etapas com dados de vazão de 13 diferentes estações fluviométricas espalhadas pela bacia hidrográfica. As demais 6 estações fluviométricas foram utilizadas para validação cruzada, que consiste em avaliar a eficiência do modelo nas sub-bacias correspondentes a estas estações utilizando os parâmetros calibrados. A Figura 8 apresenta as sub-bacias e estações fluviométricas utilizadas em cada etapa de calibração e na validação cruzada. Na ausência de dados observados no exutório, algumas sub-bacias foram calibradas considerando dados observados em uma estação fluviométrica localizada a montante. No Apêndice B é apresentada a relação entre a subestação utilizada e a sub-bacia correspondente no modelo.

Antes de iniciar o processo de calibração foram indicados os 17 parâmetros apresentados no Apêndice D para a realização da análise de sensibilidade. Estes parâmetros foram selecionados com base na literatura (ABBASPOUR et al., 2007; GITHUI; SELLE; THAYALAKUMARAN, 2012; ZHANG et al., 2015; BRESSIANI, 2016). Foi realizada a análise de sensibilidade global disponível no SUFI-2 para avaliar e selecionar os parâmetros para calibração.

O parâmetro Alpha_BF, que corresponde à constante de recessão de escoamento de base – uma medida direta da resposta do escoamento subsuperficial à mudanças na recarga – foi calculado com o auxílio do *software Baseflow Program*, disponível no *website* do SWAT.

Figura 8 – Sub-bacias e estações fluviométricas utilizadas em cada etapa de calibração.



4 RESULTADOS

4.1 EVOLUÇÃO DO USO DO SOLO

A distribuição espacial dos mapas de uso do solo dos anos de 1990, 2000, 2010 e 2015 podem ser visualizados na Figura 9, enquanto a Tabela 12 apresenta a área total de cada tipo de uso do solo nos diferentes anos avaliados e as taxas de variação média por ano entre cada mapa.

Tabela 12 – Evolução do uso e ocupação do solo nos anos de 1990, 2000, 2010 e 2015.

	Área (km²)				**Taxa de variação**	**Taxa de variação**	**Taxa de variação**
Uso	**1990**	**2000**	**2010**	**2015**	**1990-2000**	**2000-2010**	**2010-2015**
Floresta	9.982	9.841	9.607	9.401	-0,14%aa	-0,24%aa	-0,43%aa
Silvicultura	170	192	830	1.115	1,29%aa	33,23%aa	6,87%aa
Pastagem	1.343	1.562	1.037	1.225	1,63%aa	-3,36%aa	3,63%aa
Agricultura	3.138	2.985	3.050	2.755	-0,49%aa	0,22%aa	-1,93%aa
Infraestrutura Urbana	159	211	260	287	3,27%aa	2,32%aa	2,08%aa

Observa-se que, entre os anos de 1990 e 2015, as áreas de agricultura e pastagem apresentaram oscilação entre aumento e redução. Contudo, quando analisados os mapas do início e final do período, ambos os usos do solo apresentaram uma redução da área. Somente formação florestal apresentou redução em todos os anos analisados, com a taxa de variação crescendo entre cada período. Infraestrutura urbana e silvicultura apresentaram crescimento em todo o período analisado. Destaca-se a silvicultura, que apresentou as maiores taxas de crescimento, chegando a 33,23% ao ano entre 2000 e 2010.

Conforme dados avaliados no TerrSet ao comparar os mapas de 1990 e 2015, é possível observar que a maior parte da área florestal perdida na bacia hidrográfica do rio Itajaí foi para a silvicultura, que também cresceu a partir de áreas de agricultura e pastagem. Observa-se também que o crescimento de infraestrutura urbana se dividiu majoritariamente entre áreas de formação florestal e agricultura. Estas informações podem ser visualizadas na Figura 10, que apresenta gráficos de origem das alterações de área de cada tipo de uso do solo.

Figura 9 – Mapas de uso e ocupação do solo dos anos de 1990, 2000, 2010 e 2015.

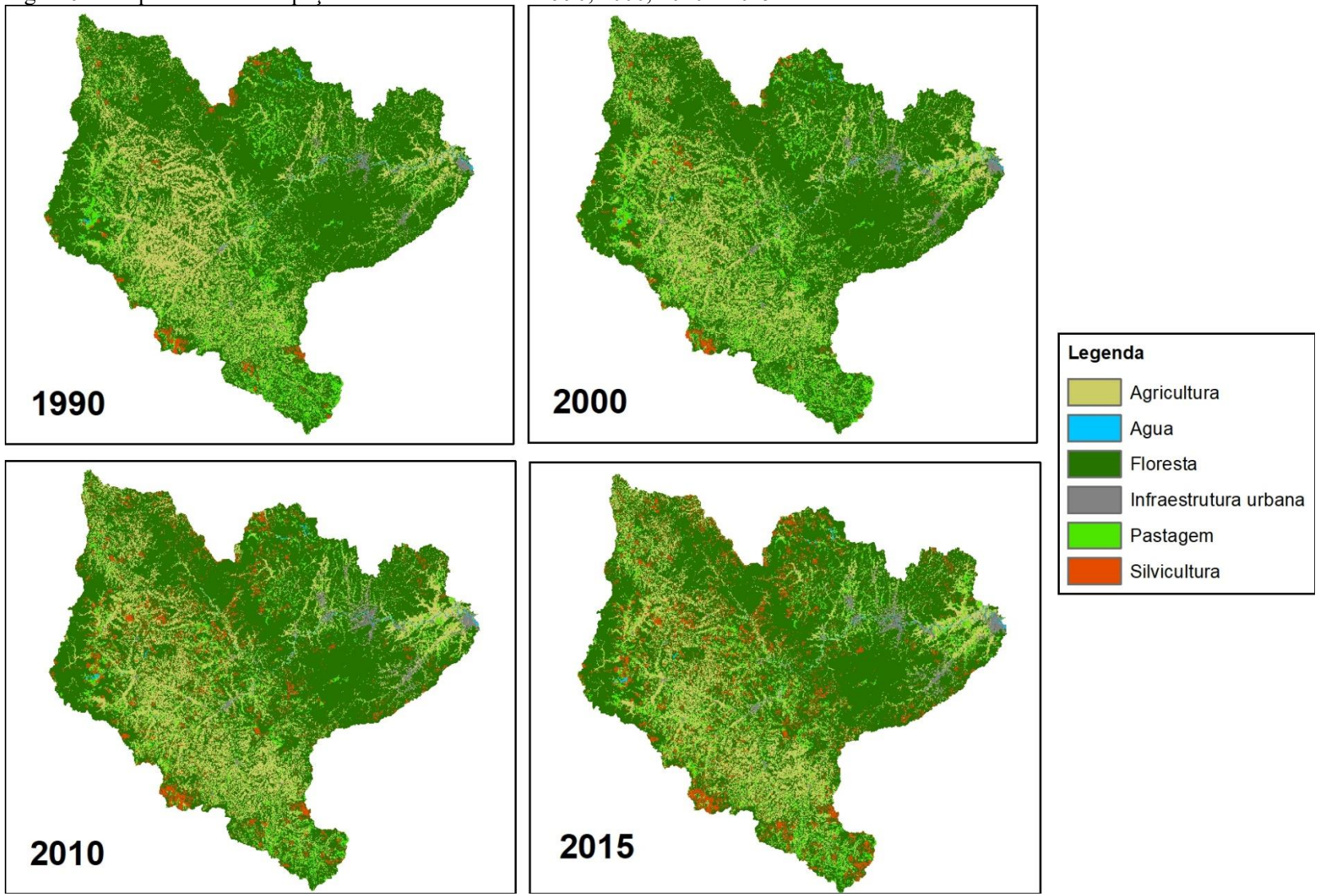
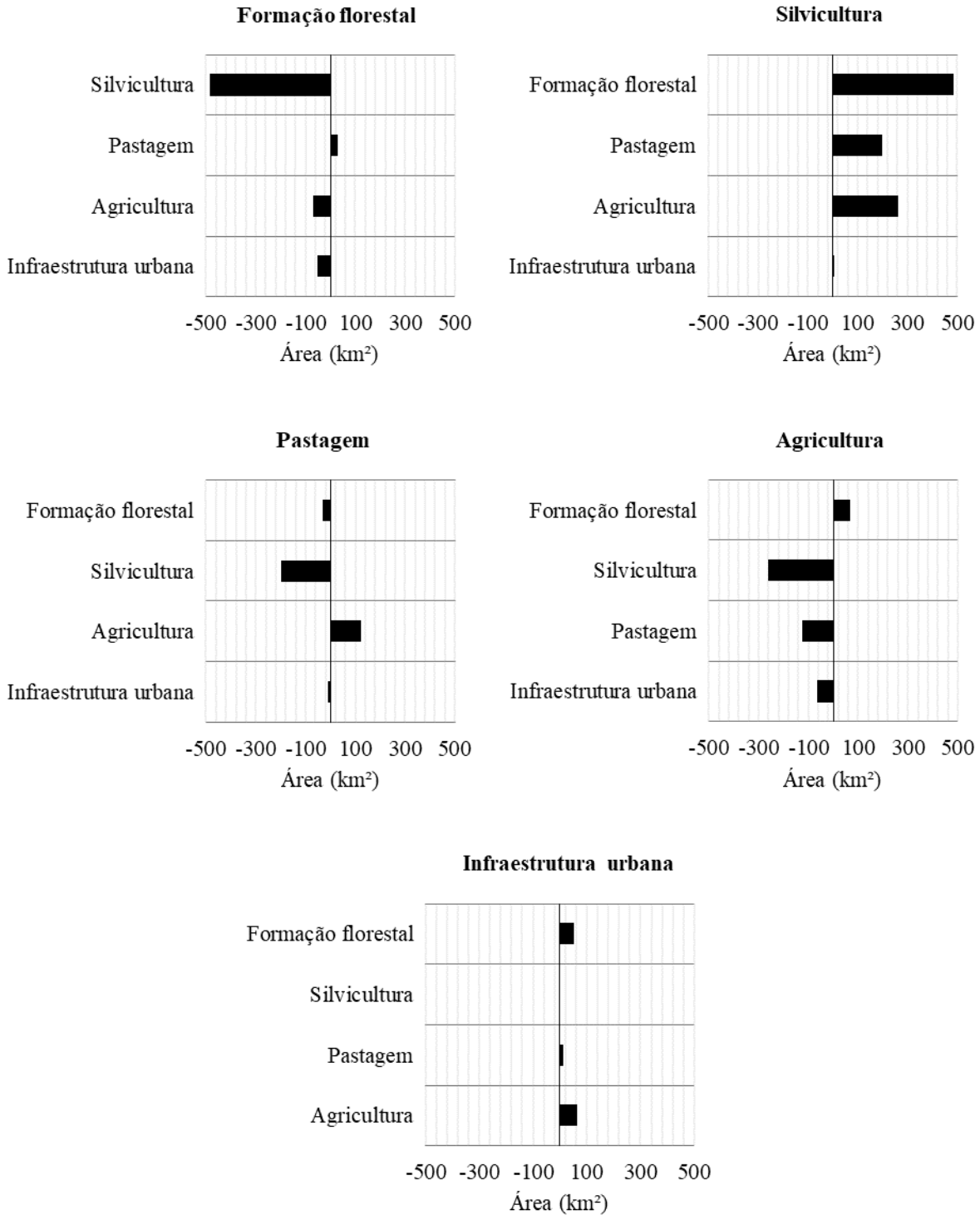


Figura 10 – Alterações ocorridas entre 1990 e 2015 para cada tipo de uso do solo.



4.1.1 Projeção para 2027

4.1.1.1 Calibração do modelo no TerrSet

Para a determinação das transações potenciais de uso do solo, foram fornecidos ao LCM os mapas de 2000 e 2010. Foram utilizados como *drivers* mapas de declividade, de elevação, hidrografia e rodovias. Após a calibração e a geração dos mapas de transição, foi indicado ao LCM as áreas onde se encontram Unidades de Conservação, locais onde a formação florestal não poderá ter redução de área.

Para realizar a validação do modelo, foi solicitado ao LCM que fosse gerado um mapa de 2015, que foi posteriormente comparado com o mapa de 2015 obtido junto ao MapBiomas. Conforme apresentado na Tabela 13, considerando apenas a área total de cada tipo de uso do solo, o modelo apresentou bons resultados. As maiores diferenças ocorreram para pastagem e agricultura, sendo de 7,1% e 6,8% respectivamente.

Tabela 13 – Comparação geral das áreas de cada tipo de uso do solo entre o mapa simulado e o mapa observado.

	Área (km²)		
Uso	**Mapa do MapBiomas**	**Mapa simulado pelo Terrset**	**Variação (%)**
Formação florestal	9.401	9.085	-3,4%
Silvicultura	1.115	1.158	3,8%
Pastagem	1.225	1.312	7,1%
Agricultura	2.755	2.941	6,8%
Infraestrutura urbana	287	290	1,0%

Ao realizar uma análise geral do mapa simulado, avaliando a sobreposição de cada pixel entre os dois mapas, obteve-se uma precisão global de 82,8%, e um coeficiente de Kappa de 0,69, que indica uma simulação satisfatória conforme escala proposta por Landis & Kosch (1977).

4.1.1.2 Simulação para 2027

Após a calibração do LCM, foi gerado o mapa de uso e ocupação do solo de 2027. Conforme observado na Tabela 14, caso os padrões de mudanças no uso e ocupação do solo não se alterem, poderá haver um acréscimo de 42,6% na área total de silvicultura, com relação ao ano de 2015, ultrapassando a área total de pastagem. A área de formação florestal terá uma

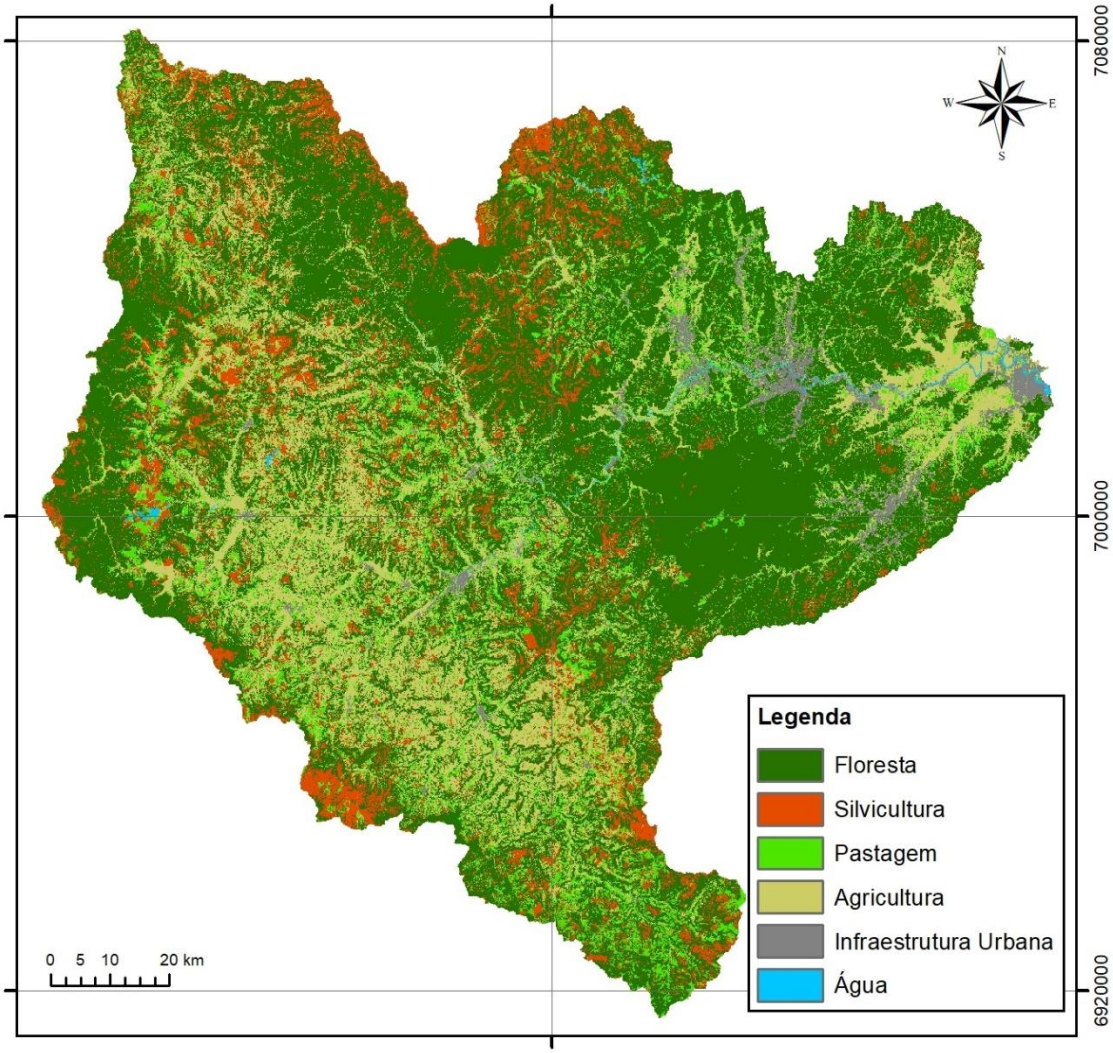
redução de 10,2%. Observa-se que a taxa de crescimento anual de silvicultura identificada pelo TerrSet é semelhante à taxa apresentada no PERH, que é de 3,74% ao ano. A Figura 11 apresenta o mapa de uso do solo de 2027. Observa-se que, em 2027, apenas 55% da área total da bacia será ocupada por florestas naturais. Em 1990, este valor era de 67%.

Tabela 14 – Comparação das áreas de cada tipo de uso e ocupação do solo entre os anos de 2015 e 2027.

	Área (km²)*			
Uso	**2015**	**2027**	**Variação total (%)**	**Taxa de variação por ano (%)**
Formação florestal	9.085	8.157	-10,2%	-0,9%aa
Silvicultura	1.158	1.651	42,6%	3,5%aa
Pastagem	1.312	1.509	15,0%	1,3%aa
Agricultura	2.941	3.135	6,6%	0,5%aa
Infraestrutura urbana	290	332	14,5%	1,2%aa

*foram comparadas as áreas dos mapas gerados pelo TerrSet dos anos de 2015 e 2027.

Figura 11 – Mapa de uso e ocupação do solo simulado para o ano de 2027.



Os resultados indicam uma forte tendência de crescimento da silvicultura na bacia hidrográfica do rio Itajaí, de 42,6%. Observa-se também que a maior parte das áreas de crescimento da silvicultura tem como origem áreas de formação florestal. As áreas destinadas à pastagem e à agricultura apresentam oscilações ao longo do tempo. No entanto, é previsto que até o ano de 2027 ocorra um crescimento de 23,2% e 13,8% das áreas de pastagem e agricultura, respectivamente.

4.2 SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA COM O SWAT

4.2.1 Desempenho do modelo não calibrado

Antes do início do processo de calibração, foi realizada uma simulação do modelo não calibrado, com o objetivo de identificar se o modelo fornece resultados coerentes. Esta etapa é importante para identificar eventuais discrepâncias nos dados de entrada do modelo. Esta simulação foi realizada para o período de 1997 a 2004, com os três primeiros anos servindo de *warm-up* do modelo.

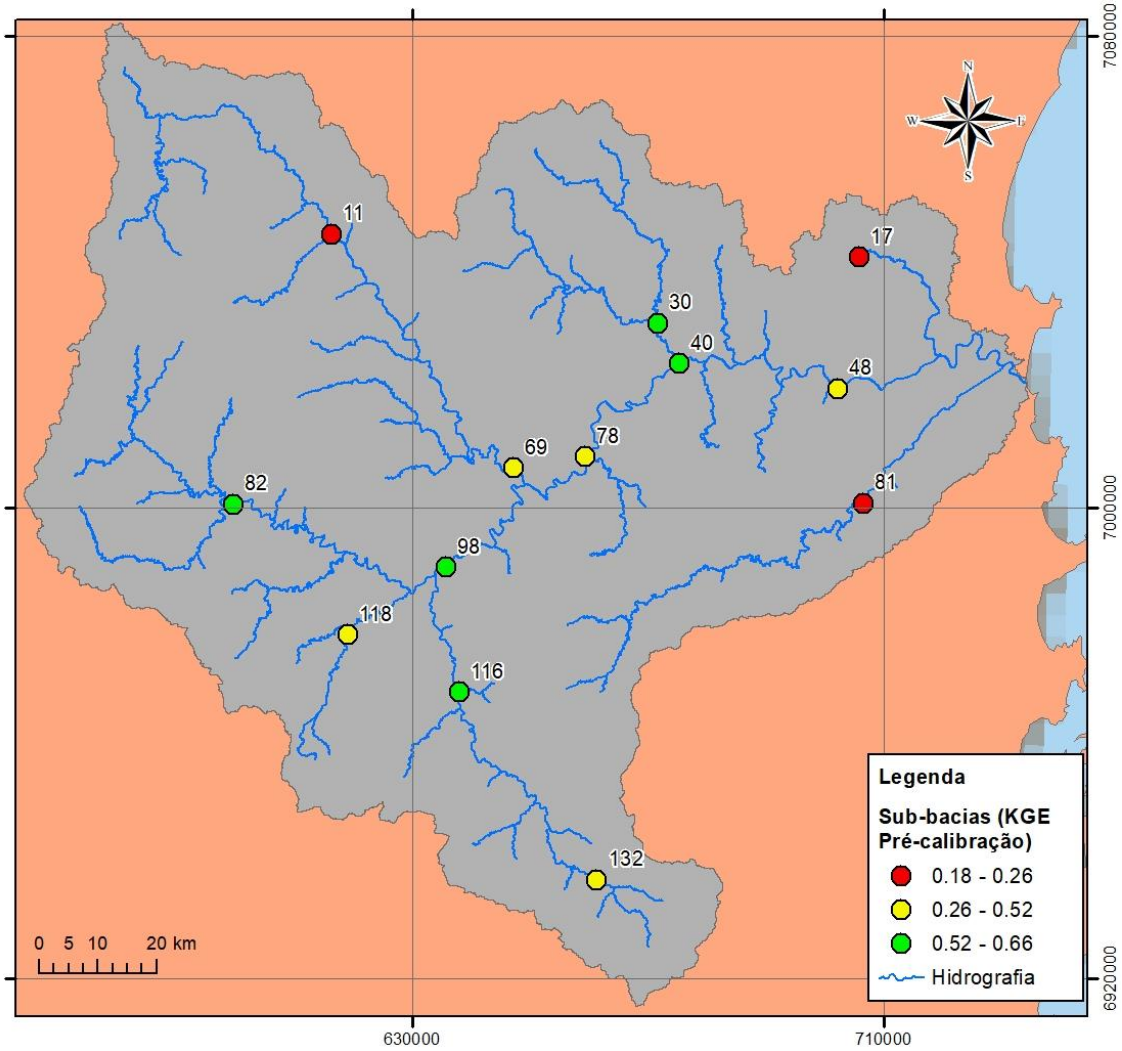
A partir dos dados apresentados na Tabela 15, é possível observar que o modelo não calibrado superestimou a vazão de saída na maior parte das sub-bacias, apresentando um β médio de 1,37. O modelo também apresentou dificuldade em identificar a variabilidade dos dados de vazão em algumas sub-bacias. Por outro lado, na maior parte das sub-bacias o coeficiente de correlação *r* apresentou bons resultados.

Estes dados refletiram no baixo KGE médio encontrado, de 0,47. Na sub-bacia 48, que se encontra mais a jusante no modelo, o KGE foi de 0,50, valor considerado ruim. A Figura 12 apresenta a distribuição espacial do KGE obtido pelo modelo não calibrado.

Tabela 15 – Desempenho geral e coeficiente KGE do modelo não calibrado.

Sub-bacia	Área (km²)	Vazão específica média observada (m³/h/km²)	Vazão específica média simulada (m³/h/km²)	r	α	β	KGE
17	158	84,60	130,98	0,77	1,45	1,55	0,25
118	308	111,33	96,28	0,69	0,57	0,86	0,45
132	429	83,26	98,79	0,73	0,66	1,19	0,52
81	1.209	68,06	102,69	0,83	1,51	1,51	0,26
11	1.424	60,09	108,42	0,86	0,89	1,80	0,18
30	1.429	81,14	109,21	0,90	1,23	1,35	0,57
82	1.559	94,73	117,49	0,79	0,75	1,24	0,59
116	1.635	72,51	97,37	0,89	0,93	1,34	0,63
69	3.324	61,45	95,44	0,88	0,96	1,55	0,43
98	5.049	82,05	103,58	0,88	0,82	1,26	0,66
78	8.951	66,80	99,69	0,90	0,94	1,49	0,49
40	11.216	71,90	101,08	0,90	0,94	1,41	0,58
48	12.133	78,37	102,00	0,72	1,29	1,30	0,50
			Média	**0,82**	**0,99**	**1,37**	**0,47**

Figura 12 – Desempenho do modelo não calibrado, conforme o KGE obtido em cada sub-bacia.

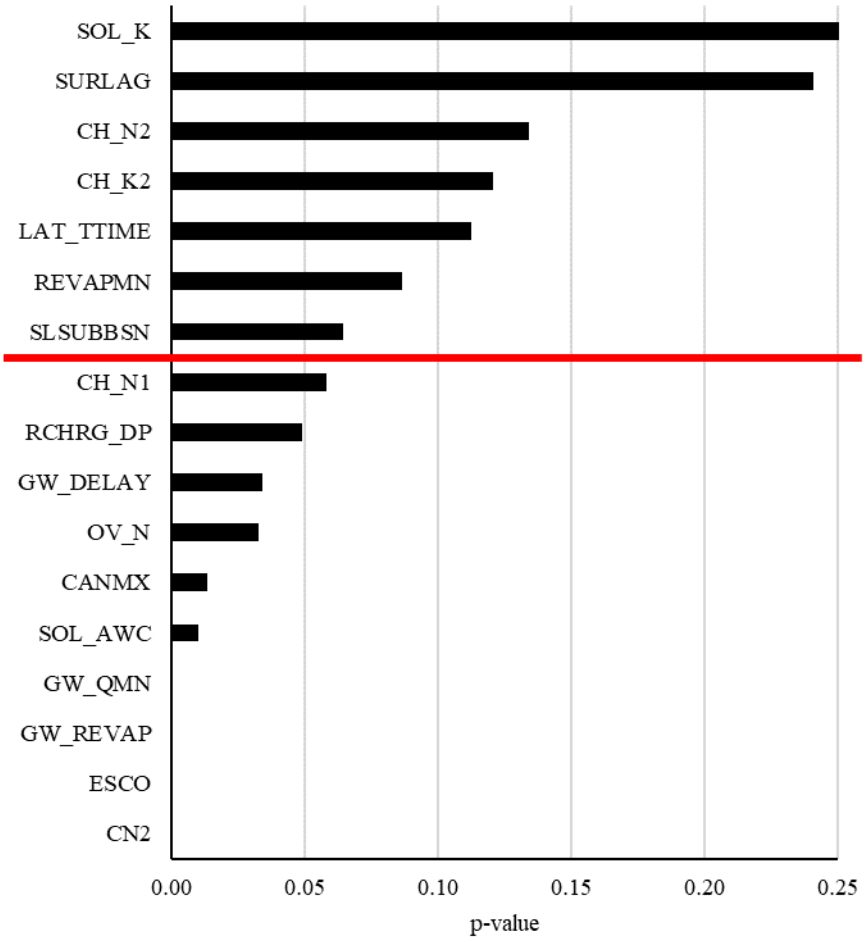


4.2.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros

Antes do início do processo de calibração do modelo, foi realizada a análise de sensibilidade dos 17 parâmetros apresentados no Apêndice D. Foi realizada uma iteração de 500 simulações no SWAT-CUP com estes parâmetros utilizando as sub-bacias da etapa 1 do processo de calibração. A Figura 13 apresenta o valor *p-value* para cada parâmetro, de acordo com a análise de sensibilidade global realizada no SWAT-CUP. Para a realização da calibração do modelo, foram selecionados os 10 parâmetros mais sensíveis, considerando que quanto mais próximo de 0 o *p-value*, maior é a sensibilidade.

O parâmetro mais sensível foi o CN2, que corresponde ao *Curve Number*, e influencia diretamente na quantidade de água precipitada que contribui para o escoamento superficial. Os outros dois parâmetros mais sensíveis, ESCO e GW_REVAP, influenciam diretamente no processo de evapotranspiração na bacia.

Figura 13 – Valores *p-value* na análise de sensibilidade global dos parâmetros. Os que se encontram abaixo da linha vermelha foram selecionados para a calibração.



4.2.3 Calibração, validação cruzada e validação do modelo

Os processos de calibração, validação cruzada e de validação do modelo foram realizados com dados de vazão das 19 estações fluviométricas apresentadas no item 3.4.2. A calibração utilizou dados de 13 sub-bacias compreendendo o período de 2000 a 2004, totalizando 5 anos de dados. Os dados das demais 6 sub-bacias foram utilizados para o processo de validação cruzada, considerando o mesmo período de dados da calibração. A validação utilizou dados de 2005 e 2006 de todas as 19 sub-bacias. Os anos de 1997 a 1999 foram utilizados para *warm-up* do modelo durante a calibração e a validação cruzada. Para a validação, o período de *warm-up* foi de 2002 a 2004.

O processo de calibração foi realizado em 6 etapas. Para a primeira etapa foram necessárias 4 iterações no SWAT-CUP. As etapas 2, 3 e 4 foram calibradas com 2 iterações cada. Para as etapas 5 e 6 foi necessária apenas 1 iteração. Todas as iterações foram realizadas com 500 simulacões. A Tabela 16 apresenta, para cada parâmetro, os valores mínimos e máximos iniciais utilizados na primeira iteração de cada etapa. Os melhores valores obtidos para cada sub-bacia podem ser visualizados no Apêndice E.

Tabela 16 – Parâmetros selecionados para a análise de sensibilidade e respectivos métodos de ajuste e valores iniciais mínimos e máximos.

Parâmetro	**Valor inicial mínimo**	**Valor inicial máximo**	**Método de ajuste**
CN2	-0,4	0,4	Relativo
ESCO	0,001	1	Substituir
GW_REVAP	0,02	2	Substituir
GW_QMN	-1000	100	Adição
SOL_AWC	-0,4	0,4	Relativo
CANMX	0	25	Substituir
OV_N	-0,4	0,4	Relativo
GW_DELAY	0,001	100	Substituir
RCHRG_DP	0,01	0,75	Substituir
CH_N1	-0,3	0,3	Relativo

A Tabela 17 e a Tabela 18 apresentam o desempenho geral e o coeficiente KGE obtidos na calibração e na validação cruzada, respectivamente. A Figura 14 apresenta a distribuição espacial do KGE obtido pelo modelo calibrado e a localização de empreendimentos hidrelétricos na bacia.

Da Figura 15 à Figura 17 são apresentados os hidrogramas observados e simulados das sub-bacias 98, 69 e 40, que correspondem a pontos localizados no exutório de importantes sub-bacias da bacia do rio Itajaí. Na Figura 18, apresenta-se o hidrograma da sub-bacia 48, que corresponde ao ponto de calibração mais a jusante na bacia do rio Itajaí.

Para as sub-bacias 98, 69 e 40, observa-se que o hidrograma com os dados simulados acompanha o hidrograma com os dados observados, incluindo os picos mínimos e máximos. Na sub-bacia 48, no entanto, o modelo apresentou dificuldades em simular os picos mínimos, principalmente no ano de 2003, quando houve uma precipitação total de 1150 mm, cerca de 30% abaixo da média histórica, que é de aproximadamente 1600 mm. É importante destacar que a montante da sub-bacia 48 se localiza a PCH Salto Weissbach, no rio Itajaí-Açu, cuja influência possivelmente afetou o desempenho do modelo. A presença de barragens não foi

considerada neste estudo, principalmente em função da dificuldade de obtenção de dados de operação.

Figura 14 – Desempenho do modelo calibrado e da validação cruzada, conforme o KGE obtido em cada sub-bacia, e localização de empreendimentos hidrelétricos.

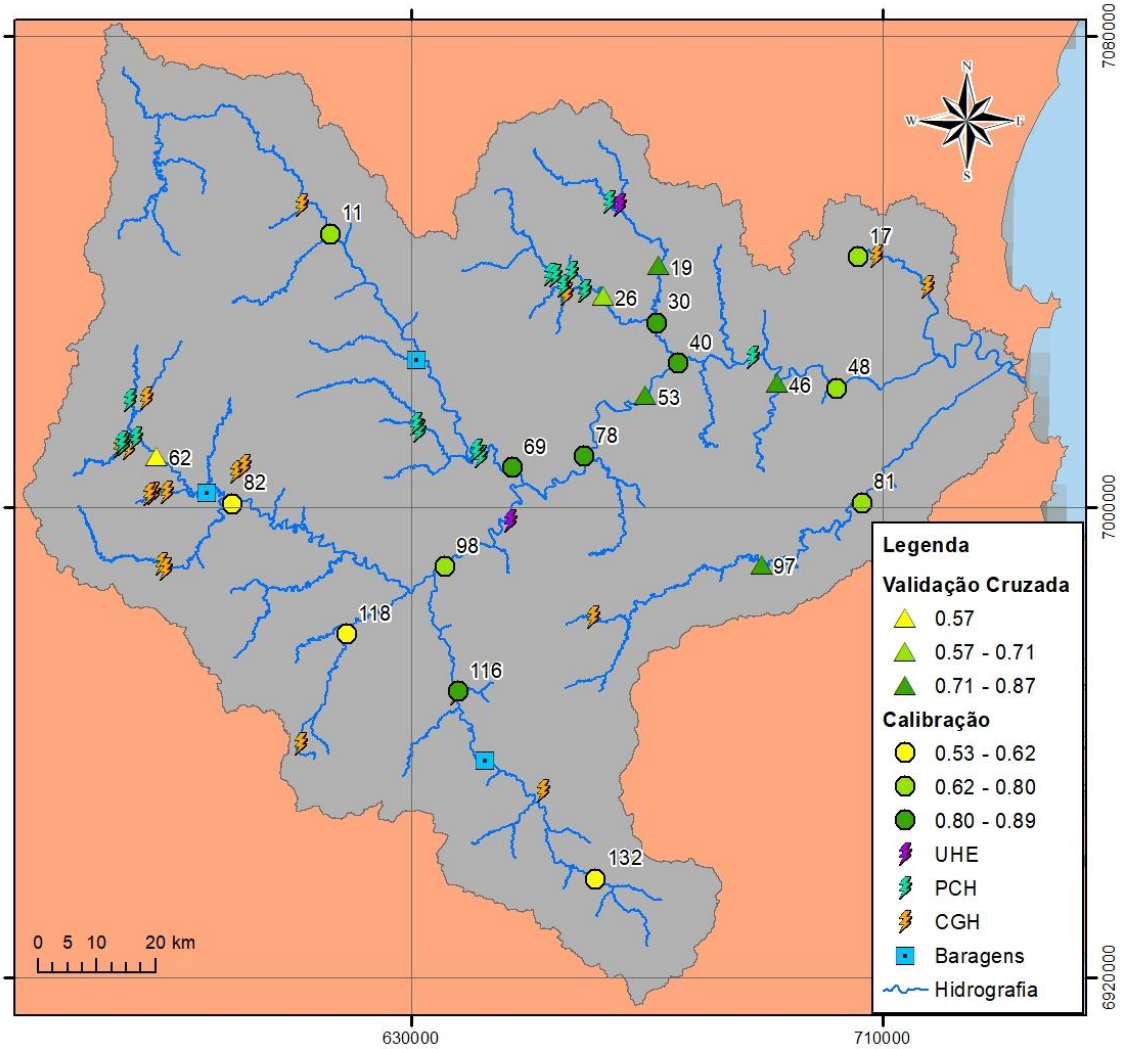


Tabela 17 – Desempenho geral e coeficiente KGE da calibração do modelo.

Sub-bacia	Área (km²)	Vazão específica média observada (m³/h/km²)	Vazão específica média simulada (m³/h/km²)	r	α	β	KGE
17	158	84,60	81,70	0,79	1,04	0,97	0,78
118	308	111,33	91,86	0,72	0,67	0,83	0,53
132	429	83,26	82,34	0,68	0,74	0,99	0,59
81	1.209	68,06	71,71	0,80	1,02	1,05	0,79
11	1.424	60,09	68,45	0,90	0,84	1,14	0,76
30	1.429	81,14	82,48	0,87	1,02	1,02	0,87
82	1.559	94,73	102,88	0,77	0,70	1,09	0,62
116	1.635	72,51	73,82	0,90	0,96	1,02	0,89
69	3.324	61,45	63,62	0,90	0,89	1,04	0,85
98	5.049	82,05	81,64	0,91	0,82	1,00	0,80
78	8.951	66,80	72,71	0,93	0,91	1,09	0,85
40	11.216	71,90	74,12	0,94	0,89	1,03	0,88
48	12.133	78,37	75,68	0,77	1,16	0,97	0,71
			Média	**0,84**	**0,90**	**1,02**	**0,76**

Tabela 18 – Desempenho geral e coeficiente KGE da validação cruzada do modelo.

Sub-bacia	Área (km²)	Vazão específica média observada (m³/h/km²)	Vazão específica média simulada (m³/h/km²)	r	α	β	KGE
19	535	91,82	87,97	0,84	1,03	0,96	0,83
62	643	91,97	105,88	0,76	0,68	1,15	0,57
26	718	75,05	87,43	0,77	1,03	1,16	0,71
97	791	68,15	68,15	0,84	0,90	1,00	0,81
53	9.669	68,57	72,91	0,94	0,91	1,06	0,87
46	11.880	78,65	75,19	0,91	0,86	0,96	0,83
			Média	**0,84**	**0,90**	**1,05**	**0,77**

Figura 15 – Hidrogramas mensais dos dados simulados e observados para a sub-bacia 98.

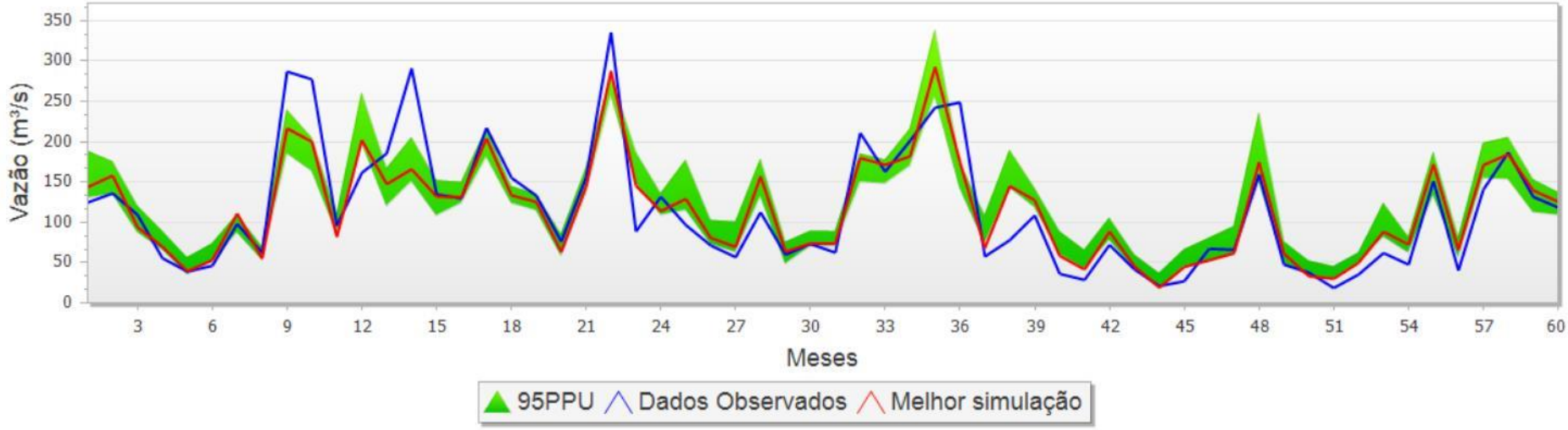


Figura 16 – Hidrogramas mensais dos dados simulados e observados para a sub-bacia 69.

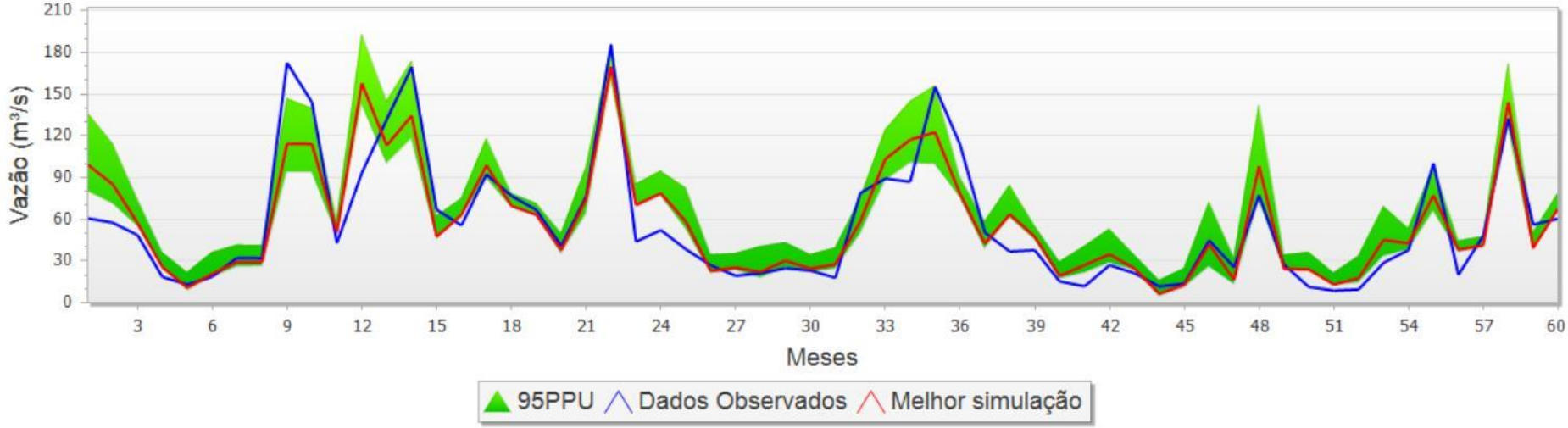


Figura 17 – Hidrogramas mensais dos dados simulados e observados para a sub-bacia 40.

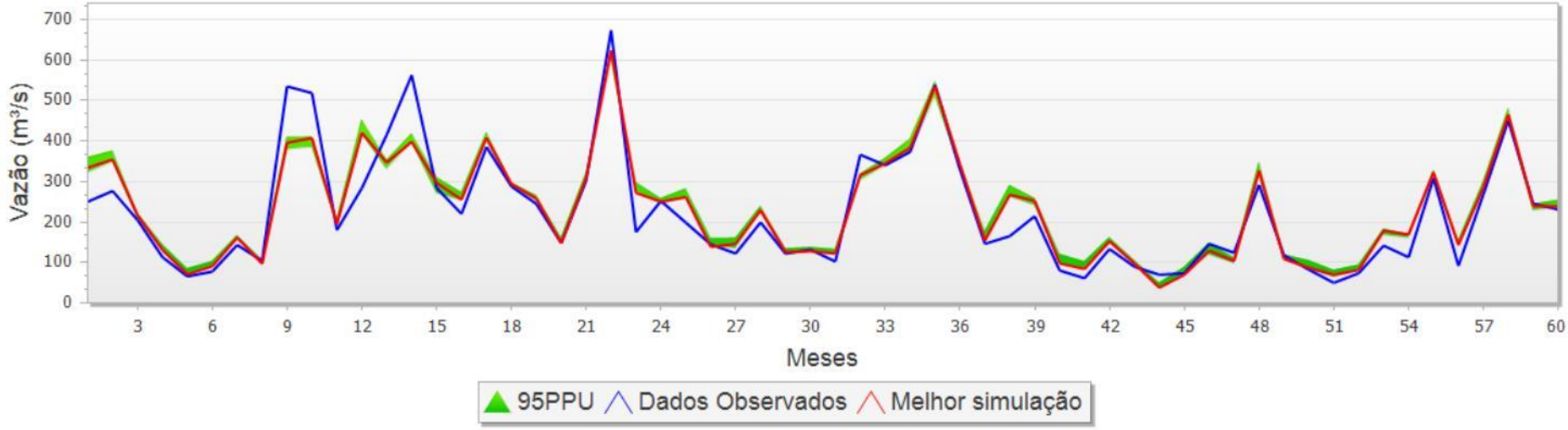
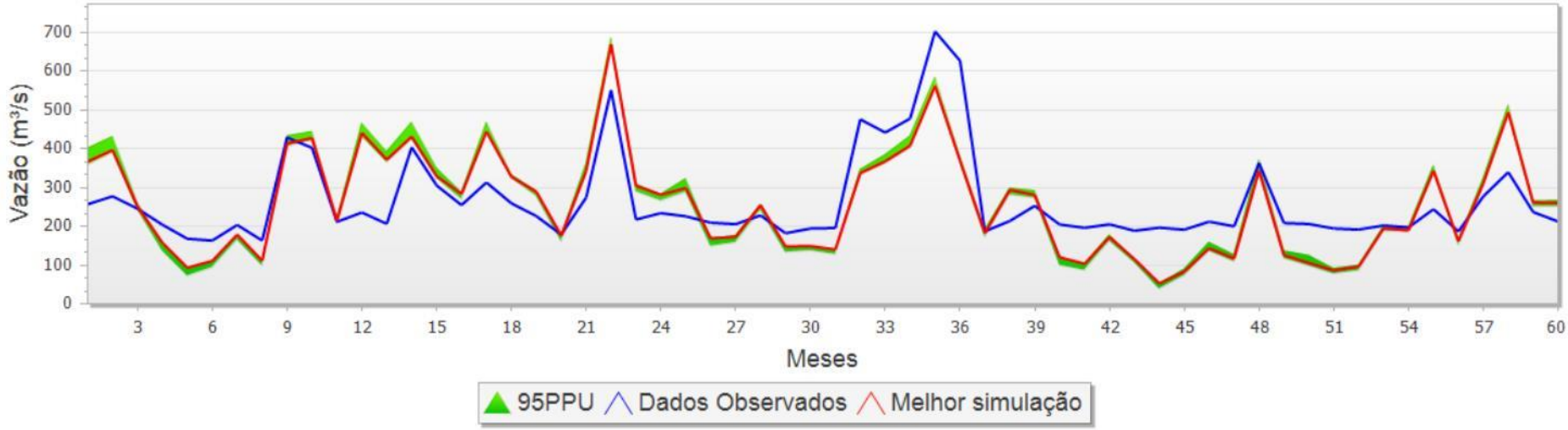


Figura 18 – Hidrogramas mensais dos dados simulados e observados para a sub-bacia 48.



Observa-se que, em relação ao modelo não calibrado, houve significativa melhora na previsão das vazões médias das sub-bacias, com um β médio de 1,02. O coeficiente de correlação linear aumentou de 0,82 no modelo não calibrado para 0,84 no modelo calibrado, apresentando uma leve melhora. Apesar do α médio ter diminuído em relação ao modelo não calibrado, observa-se o valor encontra-se próximo de 1 na maior parte das sub-bacias.

O KGE médio encontrado foi de 0,76, indicando uma calibração satisfatória do modelo. Observa-se que os piores resultados se concentram nas sub-bacias com área de drenagem inferior a 1.500 km², onde o modelo apresentou dificuldade em obter uma boa correlação entre os dados observados e simulados e em simular a variabilidade das vazões.

A validação cruzada confirmou os bons resultados obtidos na calibração, apresentando um KGE médio de 0,77, e valores de *r*, α e β próximos aos encontrados na calibração.

A validação apresentou um KGE médio de 0,63, conforme apresentado na Tabela 19 e na Figura 19, resultado considerado satisfatório. É possível identificar que a presença dos empreendimentos hidrelétricos pode ter prejudicado o desempenho do modelo em algumas sub-bacias, como por exemplo a 26 e a 62. A presença de barragens não foi considerada neste estudo, principalmente em função da dificuldade de obtenção de dados de operação. Observa-se que o modelo apresentou bons resultados médios de correlação e de variabilidade das vazões. No entanto, o modelo apresentou uma tendência de superestimar as vazões médias, apresentando um β maior do que 1 em algumas sub-bacias.

O pior resultado foi observado na sub-bacia 17, que apresentou KGE de -0,40. Observa-se que este resultado ruim teve como origem principal a dificuldade do modelo em simular a variabilidade dos dados da sub-bacia (α=2,27), o que prejudicou diretamente a correlação entre os dados simulados e observados. Uma das possíveis causas deste resultado é a falta de dados pluviométricos observados dentro da sub-bacia. É possível também que os dados de vazão observada para os anos de 2005 e 2006 – anos correspondentes ao período de validação – sejam inconsistentes. Conforme pode ser observado no gráfico da Figura 20, de 2000 a 2004 os dados de vazão respondiam aos dados da estação pluviométrica mais próxima à sub-bacia. Quando havia aumento da precipitação, a vazão também aumentava. No entanto, a partir de 2005, esta resposta não foi observada para os dados de vazão. É importante destacar também que há dados de vazão observada na sub-bacia 17 apenas para o período de janeiro de 2005 a julho de 2006, totalizando 19 meses de dados.

Tabela 19 – Desempenho geral e coeficiente KGE da validação do modelo para cada sub-bacia.

Sub-bacia	Área (km²)	Vazão específica média observada (m³/h/km²)	Vazão específica média simulada (m³/h/km²)	r	α	β	KGE
17	158	51,58	77,19	0,29	2,10	1,50	-0,40
118	308	61,69	82,98	0,96	1,19	1,35	0,60
132	429	57,29	84,10	0,91	1,10	1,47	0,51
19	535	82,45	63,49	0,95	0,76	0,77	0,66
62	643	51,31	90,81	0,88	1,21	1,77	0,19
26	718	69,75	39,59	0,84	0,56	0,57	0,36
97	791	51,21	59,61	0,90	1,00	1,16	0,81
81	1.209	56,31	55,85	0,88	0,87	0,99	0,82
11	1.424	35,77	53,77	0,92	1,09	1,50	0,48
30	1.429	66,41	53,62	0,92	0,73	0,81	0,66
82	1.559	84,21	90,23	0,88	0,79	1,07	0,75
116	1.635	62,97	77,50	0,89	0,91	1,23	0,73
69	3.324	43,96	48,17	0,88	0,79	1,10	0,74
98	5.049	59,91	73,76	0,94	0,93	1,23	0,75
78	8.951	47,39	62,05	0,94	0,94	1,31	0,68
53	9.669	54,01	62,11	0,92	0,94	1,15	0,82
40	11.216	55,84	66,05	0,94	0,84	1,18	0,75
46	11.880	72,52	62,36	0,91	0,75	0,86	0,70
48	12.133	76,79	86,35	0,87	1,67	1,12	0,30
			Média*	**0,91**	**0,95**	**1,15**	**0,63**

* Os valores médios foram calculados desconsiderando os resultados da sub-bacia 17.

Figura 19 – Desempenho do modelo validado, conforme o KGE obtido em cada sub-bacia, e localização de empreendimentos hidrelétricos.

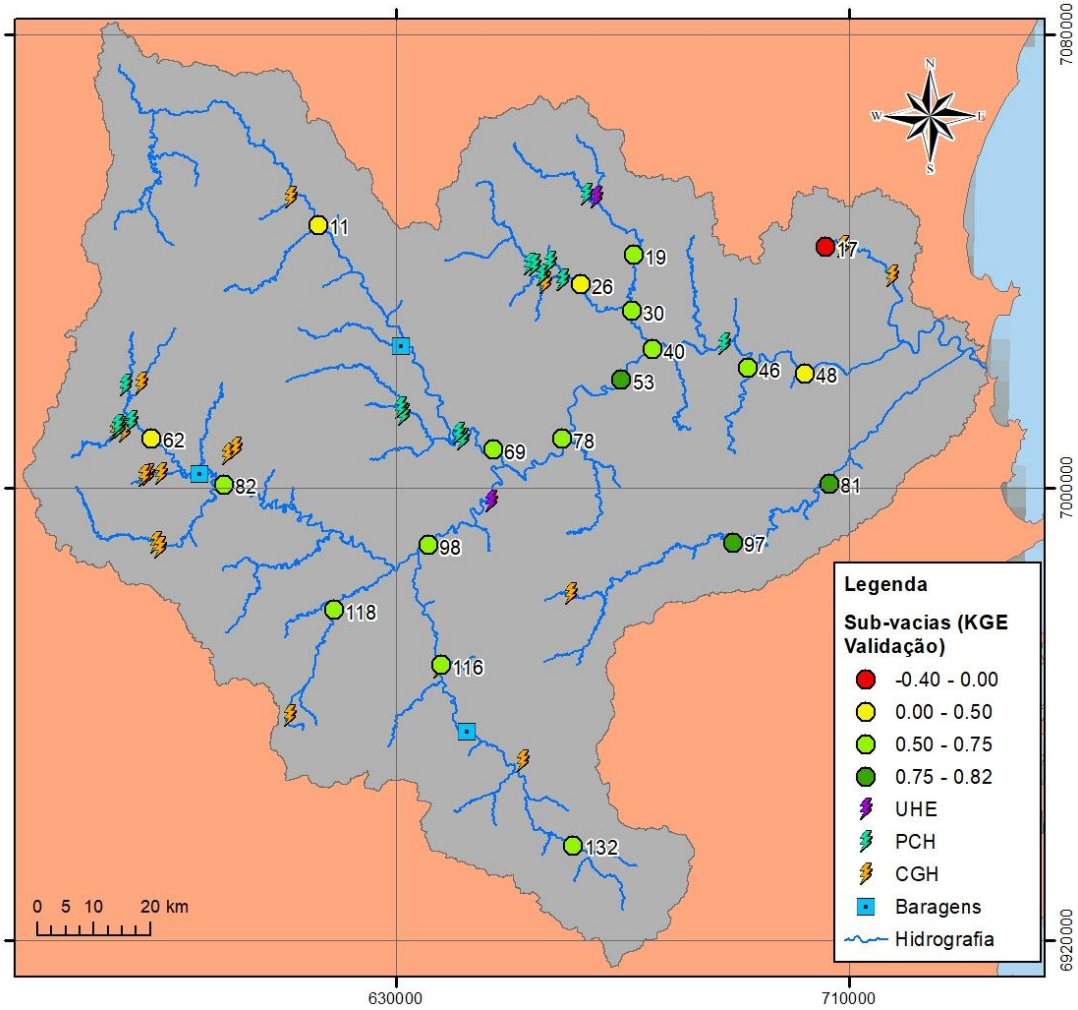
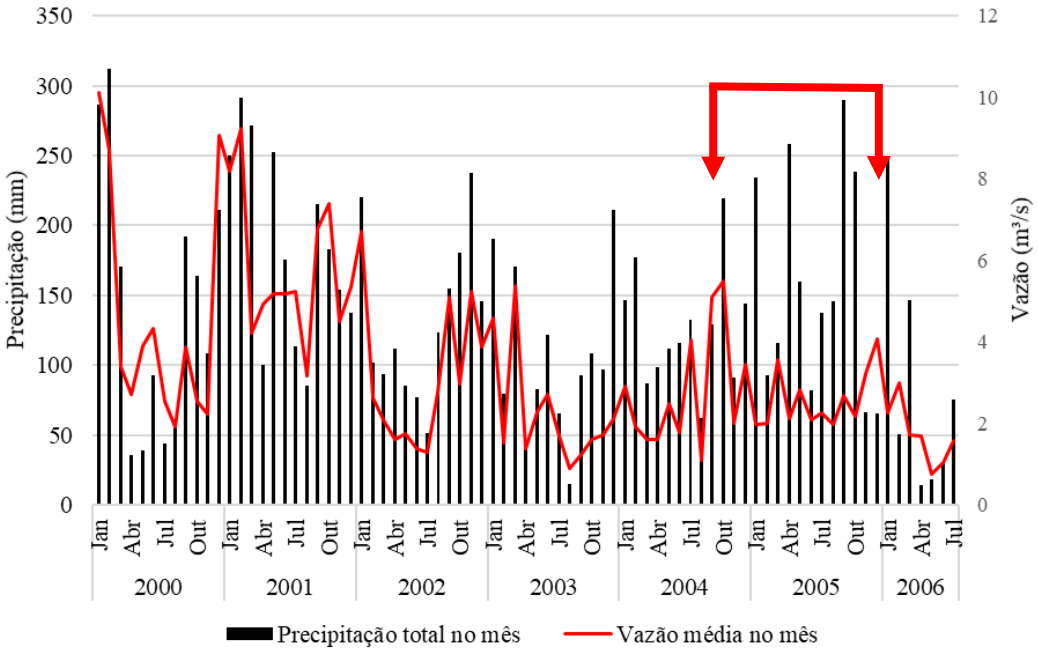


Figura 20 – Dados de precipitação e de vazão na sub-bacia 17, com indicação do possível período inconsistente.



Ao comparar o desempenho do modelo não calibrado com o calibrado e validado (Tabela 20), observa-se que houve significativa melhora nos resultados das simulações. O valor médio de β, que representa a relação entre a média das vazões simuladas e a média das vazões observadas, passou de 1,37 no modelo não calibrado para 1,02 no modelo calibrado. Houve também uma melhora na correlação e na variabilidade dos dados em relação ao modelo não calibrado. A validação apresentou resultados com qualidade inferior na simulação das vazões médias, principalmente em função dos resultados ruins obtidos em sub-bacias com possível influência de empreendimentos hidrelétricos.

Tabela 20 – Comparação do desempenho geral do modelo na pré-calibração, na calibração e na validação.

	Modelo não calibrado				Modelo calibrado				Validação			
Sub-bacia	**r**	**α**	**β**	**KGE**	**r**	**α**	**β**	**KGE**	**r**	**α**	**β**	**KGE**
17	0,77	1,45	1,55	0,25	0,79	1,04	0,97	0,78	0,29	2,10	1,50	-0,40
118	0,69	0,57	0,86	0,45	0,72	0,67	0,83	0,53	0,96	1,19	1,35	0,60
132	0,73	0,66	1,19	0,52	0,68	0,74	0,99	0,59	0,91	1,10	1,47	0,51
19*									0,95	0,76	0,77	0,66
62*									0,88	1,21	1,77	0,19
26*									0,84	0,56	0,57	0,36
97*									0,90	1,00	1,16	0,81
81	0,83	1,51	1,51	0,26	0,80	1,02	1,05	0,79	0,88	0,87	0,99	0,82
11	0,86	0,89	1,80	0,18	0,90	0,84	1,14	0,76	0,92	1,09	1,50	0,48
30	0,90	1,23	1,35	0,57	0,87	1,02	1,02	0,87	0,92	0,73	0,81	0,66
82	0,79	0,75	1,24	0,59	0,77	0,70	1,09	0,62	0,88	0,79	1,07	0,75
116	0,89	0,93	1,34	0,63	0,90	0,96	1,02	0,89	0,89	0,91	1,23	0,73
69	0,88	0,96	1,55	0,43	0,90	0,89	1,04	0,85	0,88	0,79	1,10	0,74
98	0,88	0,82	1,26	0,66	0,91	0,82	1,00	0,80	0,94	0,93	1,23	0,75
78	0,90	0,94	1,49	0,49	0,93	0,91	1,09	0,85	0,94	0,94	1,31	0,68
53*									0,92	0,94	1,15	0,82
40	0,90	0,94	1,41	0,58	0,94	0,89	1,03	0,88	0,94	0,84	1,18	0,75
46*									0,91	0,75	0,86	0,70
48	0,72	1,29	1,30	0,50	0,77	1,16	0,97	0,71	0,87	1,67	1,12	0,30
Média	**0,82**	**0,99**	**1,37**	**0,47**	**0,84**	**0,90**	**1,02**	**0,76**	**0,91**	**0,95**	**1,15**	**0,63**

* Sub-bacias utilizadas somente para validação cruzada e validação.

4.2.4 Simulação do cenário com uso do solo de 2027

Após a finalização dos processos de calibração e validação, foi realizada uma simulação do modelo com o mapa de uso e ocupação do solo de 2027, mantendo idênticas todas as demais condições utilizadas no período de calibração, com dados pluviométricos de 1997 a 2004. Os três primeiros anos foram utilizados para *warm-up* do modelo.

Como houve alteração nas características de uso do solo, o SWAT gerou uma nova configuração de HRUs no modelo, resultando em um total de 6.167 HRUs. Com o mapa de uso e ocupação do solo de 2000, o número de HRUs era de 5.868. Conforme apresentado na Tabela 21, a maior alteração ocorreu nas áreas destinadas à silvicultura, que apresentaram um crescimento de 758,29% entre os anos de 2000 e 2027, passando a ocupar mais de 10% da área total da bacia hidrográfica.

Tabela 21 – Comparação das áreas de cada tipo de uso e ocupação do solo entre os anos de 2000 e 2027.

	Área (km²)				
Uso	**2000**	**% total**	**2027**	**% total**	**Variação (%)**
Formação florestal	9.841	66,53%	8.157	55,17%	-17,12%
Silvicultura	192	1,30%	1.651	11,17%	758,29%
Pastagem	1.562	10,56%	1.509	10,21%	-3,39%
Agricultura	2.985	20,18%	3.135	21,21%	5,02%
Infraestrutura urbana	211	1,43%	332	2,25%	57,11%

Os dados obtidos no exutório da bacia hidrográfica demonstram que houve uma alteração irrelevante nas vazões média e máxima absoluta em função do novo cenário de uso e ocupação do solo, conforme apresentado na Tabela 22. Foram identificadas maiores alterações na vazão mínima absoluta do período, que sofreu uma redução de 5,0%. As vazões de referência Q_{90}, Q_{95} e Q_{98} reduziram, respectivamente, 4,1%, 1,2% e 1,1%. Destaca-se, no entanto, que a realização de testes estatísticos de hipóteses, com α igual a 0,05, indica que não há diferença entre os valores encontrados nos dois cenários avaliados.

Tabela 22 – Comparação das vazões média, máxima e mínima simuladas para os dois cenários avaliados no exutório da bacia.

	Cenário de uso do solo		
Vazão (período de 2000 a 2004)	**2000**	**2027**	**Variação (%)**
Vazão média (m^3/s)	309,3	308,9	-0,1%
Vazão máxima (m^3/s)	807,9	809,6	0,2%
Vazão mínima (m^3/s)	71,7	68,1	-5,0%
Q_{90} (m^3/s)	139,4	133,7	-4,1%
Q_{95} (m^3/s)	124,4	122,9	-1,2%
Q_{98} (m^3/s)	101,4	100,2	-1,1%

Ao analisar o balanço hídrico da bacia hidrográfica, observa-se que há um pequeno aumento na evapotranspiração e um aumento no escoamento superficial na ordem de 4%. Há uma redução que chega a 5% na quantidade de água percolada e de água subterrânea que contribui para os cursos d`água. Estas alterações podem ser justificadas pelo aumento da área de silvicultura na bacia hidrográfica. Conforme estudo realizado por Martins e Rosa (2019) em uma bacia hidrográfica com características climáticas semelhantes às encontradas na bacia do rio Itajaí, áreas de silvicultura apresentam maiores taxas de evapotranspiração do que qualquer outro tipo de uso do solo, incluindo florestas naturais. Além disso, por apresentarem alta taxa de crescimento, as espécies de árvores utilizadas na silvicultura possuem um alto consumo de água, o que pode justificar a redução identificada na quantidade de água percolada e consequente redução do escoamento subsuperficial. O escoamento superficial aumenta em função da redução de interceptação da água da chuva em áreas de silvicultura, em comparação a áreas com florestas naturais, principalmente porque estas apresentam maior área foliar.

As sub-bacias 5, 58, 63, 119 e 120, cujas localizações são apresentadas na Figura 21, são as que apresentaram as maiores reduções de vazões mínimas, chegando a -28,1% na sub-bacia 120, conforme apresentado na Tabela 24. As vazões de referência também apresentaram forte redução, variando de -0,4 a -23,3%. Em todas estas sub-bacias houve alteração significativa no uso e ocupação do solo. Na sub-bacia 120, por exemplo, a silvicultura passou a ocupar 56,12% de toda a área. Assim como foi observado nos dados gerais da bacia hidrográfica do rio Itajaí, a percolação e o escoamento subsuperficial apresentaram redução significativa nestas sub-bacias, chegando a -26,0% na sub-bacia 5.

Tabela 23 – Comparação do balanço hídrico simulado entre os dois cenários de uso do solo.

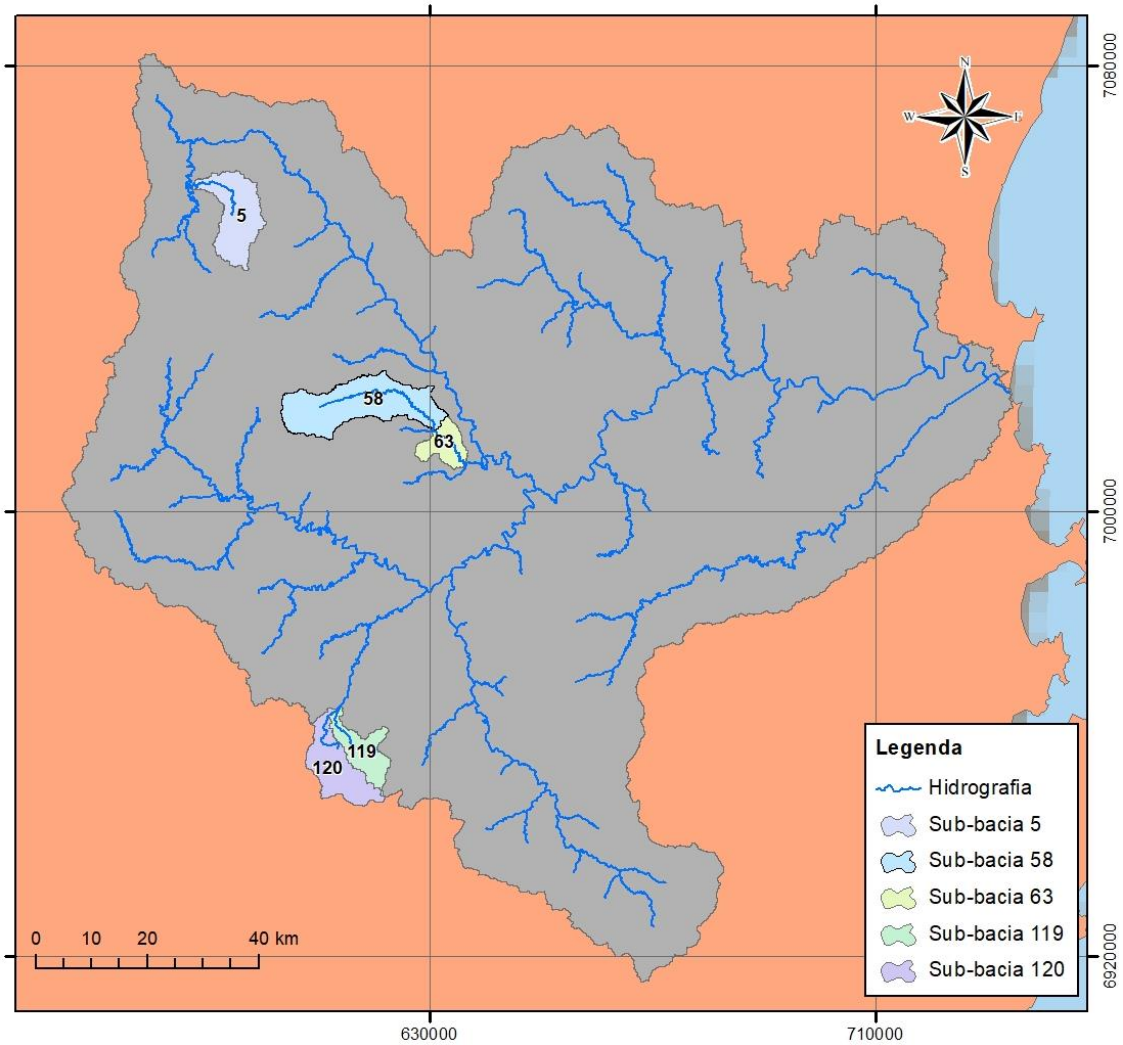
		Uso do solo – 2000					Uso do solo – 2027					Variação (%)				
Ano	**P (mm)**	**Q sup (mm)**	**Q lat (mm)**	**Q sub (mm)**	**Perc (mm)**	**ET (mm)**	**Q sup (mm)**	**Q sub (mm)**	**Perc (mm)**	**Q lat (mm)**	**ET (mm)**	**Q sup**	**Q sub**	**Perc**	**Q lat**	**ET**
2000	1622	331	65	155	354	837	345	147	339	64	838	4,2%	-5,2%	-4,3%	-1,1%	0,1%
2001	1822	395	90	258	499	864	413	247	481	89	864	4,5%	-4,3%	-3,6%	-1,1%	0,1%
2002	1635	308	72	213	423	822	321	205	410	71	822	4,3%	-3,7%	-3,1%	-1,0%	-0,1%
2003	1248	190	47	94	202	801	197	90	192	47	806	3,7%	-5,1%	-5,1%	-1,2%	0,6%
2004	1364	249	61	158	331	744	259	149	318	60	746	4,1%	-5,1%	-3,8%	-1,0%	0,4%

P = Precipitação; Q sup = Escoamento superficial; Q sub = Contribuição da água subterrânea no rio; Perc = Percolação; Q lat = Escoamento lateral; ET = Evapotranspiração

Tabela 24 – Alterações observadas nas sub-bacias que apresentaram maiores reduções de vazão com o cenário de 2027.

	Área de silvicultura		Alteração entre 2000 e 2027							
Sub-bacia	**2000**	**2027**	**Vazão mínima**	**Q_{90}**	**Q_{95}**	**Q_{98}**	**Percolação**	**ET**	**Qsup**	**Qsub**
5	1,39%	17,82%	-14,1%	-0,4%	-2,0%	-7,3%	-13,2%	-0,4%	7,1%	-26,0%
58	2,1%	14,5%	-15,1%	-7,6%	-11,8%	-14,4%	-9,3%	0,1%	3,4%	-9,2%
63	0,8%	12,4%	-14,9%	-6,9%	-12,9%	-14,4%	-14,5	-0,9%	13,8%	-14,4%
119	3,07%	29,23%	-24,6%	-11,5%	-23,3%	-20,1%	-13,5%	4,5%	0,2%	-13,4%
120	33,86%	56,12%	-28,1%	-7,9%	-13,4%	-21,8%	-12,6%	3,6%	0,0%	-12,5%

Figura 21 – Localização das sub-bacias 5, 58, 63, 119 e 120.



5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O principal objetivo deste trabalho foi analisar a influência das alterações de uso e ocupação do solo no regime de vazões da bacia hidrográfica do rio Itajaí. Esta análise foi realizada por meio de simulações no modelo SWAT. A calibração e a validação do modelo apresentaram resultados satisfatórios, com KGE médio de 0,76 para a calibração e de 0,63 para a validação. O modelo calibrado apresentou bons resultados de simulação das médias de vazões, da variabilidade de vazões e na correlação entre dados observados e simulados. Observou-se que a presença de empreendimentos hidrelétricos e dados inconsistentes prejudicaram o desempenho do modelo em algumas sub-bacias, principalmente as que se localizam nas cabeceiras.

O cenário inicial simulado pelo modelo utilizou o mapa de uso e ocupação do solo do ano 2000. Para a simulação do cenário futuro, foi selecionado o ano de 2027, baseado em projeções do Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina. O mapa de uso e ocupação do solo de 2027 foi simulado com o auxílio do *software* TerrSet, antigo IDRISI. Conforme os dados obtidos no mapa de 2027, as principais alterações de uso e ocupação do solo ocorrerão nas áreas de formação florestal e de silvicultura. No ano 2000, formação florestal e silvicultura ocupavam, respectivamente, 66,53% e 1,30% da área total da bacia. Em 2027, prevê-se que estes percentuais passarão para 55,17% para formação florestal, e 11,17% para silvicultura. A taxa de crescimento anual da área de silvicultura identificada pelo TerrSet entre os anos de 2015 e 2027 é de 3,5% ao ano, valor muito semelhante ao estimado pelo PERH, que é de 3,74% ao ano.

A simulação no SWAT com o cenário de uso e ocupação do solo de 2027 mostrou que a alteração nas vazões médias e máximas absolutas mensais da bacia será irrelevante. No entanto, foram identificadas alterações nas vazões mínimas absolutas da bacia, que representam os períodos mais críticos na gestão dos recursos hídricos. No exutório da bacia, o modelo identificou uma redução de 5,0% na vazão mínima absoluta. As vazões de referência Q_{95} e Q_{98}, utilizadas no PERH para o cálculo dos balanços hídricos nas bacias hidrográficas de Santa Catarina, apresentaram redução na ordem de 1% em 2027.

No balanço hídrico calculado pelo modelo observaram-se reduções anuais de água percolada e de escoamento subsuperficial na bacia que chegaram a 5%. Houve ainda aumento de escoamento superficial na ordem de 4%, e de evapotranspiração, que chegou a um pequeno aumento de 0,6. Estas alterações podem ser justificadas pelo aumento da área de silvicultura na

bacia hidrográfica, que aumentam as taxas de evapotranspiração, consomem água em função do seu rápido crescimento, e reduzem a área foliar, quando comparado com florestas naturais.

Em sub-bacias onde houve aumento significativo na área de silvicultura, as reduções de vazões mínimas e de percolação foram ainda mais acentuadas. Na sub-bacia 120, por exemplo, que se localiza na cabeceira do rio Trombudo, a vazão mínima absoluta reduziu 28,1%, a vazão de referência Q_{98} reduziu 21,8%, e a percolação anual média reduziu 12,6%.

Como consequência da redução das taxas de percolação de água na bacia, há diminuição da recarga dos aquíferos subterrâneos, que correspondem à principal fonte de água dos rios durante estiagens. Este fato torna-se ainda mais preocupante ao considerar que, conforme o próprio PERH, são escassas as informações confiáveis e sistematizadas sobre os recursos hídricos subterrâneos no estado.

O PERH, conforme descrito neste estudo, calculou as vazões de referência por meio de equações de regionalização de vazões. Os resultados obtidos pelo PERH diferem dos obtidos pelo modelo, conforme apresentado na Tabela 26. A vazão Q_{98}, por exemplo, que foi utilizada no PERH para calcular o balanço hídrico na bacia, apresentou um valor 47,53% maior no modelo.

Tabela 25 – Comparação entre as vazões de referência apresentadas no PERH e as obtidas no modelo SWAT, considerando o período de 2000 a 2004 e o uso do solo de 2000.

Vazão de referência	**Valor apresentado no PERH (m^3/s)**	**Valor obtido pelo modelo (m^3/s)**	**Variação**
Vazão média	490,69	309,29	-36,97%
Q_{90}	127,58	139,40	9,26%
Q_{95}	98,14	124,40	26,76%
Q_{98}	68,7	101,35	47,53%

Por fim, os resultados obtidos por este estudo demonstram a importância da modelagem hidrológica e da consideração de aspectos de uso e ocupação do solo para o planejamento adequado dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica. Este estudo identificou que na bacia hidrográfica do rio Itajaí há um grande potencial de crescimento de áreas de silvicultura e de redução de áreas de floresta natural. Este cenário poderá provocar reduções na recarga de aquíferos rasos, além de redução nas vazões mínimas e aumento das vazões máximas dos cursos d'água superficial.

Para futuros estudos na bacia hidrográfica do rio Itajaí, recomenda-se acoplar um modelo de águas subterrâneas a modelagem hidrológica, como por exemplo o MODFLOW, que possui interface disponível para modelagem integrada com o SWAT. Recomenda-se, ainda,

indicar ao modelo as áreas onde há rizicultura na bacia, por tratar-se de um uso agrícola que consome um grande volume de água.

Destaca-se ainda a importância de um monitoramento adequado de dados pluviométricos e fluviométricos para ter dados de qualidade e em frequência necessária para elaborar modelos mais fidedignos, de modo a embasar a tomada de decisão de forma mais consistente.

Com relação ao PERH, recomenda-se que seja priorizada a modelagem hidrológica a fim de confrontar dados obtidos por meio das equações de regionalização de vazões. Além disso, é essencial que o planejamento do uso de recursos hídricos considere também o planejamento de uso e ocupação do solo pois, conforme este e outros estudos ao redor do mundo já indicaram, alterações de uso do solo podem alterar o regime de vazões de uma bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, n. 2–4, p. 413–430, 2007.

ABBASPOUR, K. C. SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs- A User Manual. **User Manual**, p. 100p, 2015.

ABBASPOUR, K. C. et al. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 524, p. 733–752, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2013. **Revista de Administração**, v. 48, p. 432, 2013.

AGUEJDAD, R.; HOUET, T.; HUBERT-MOY, L. Spatial Validation of Land Use Change Models Using Multiple Assessment Techniques: A Case Study of Transition Potential Models. **Environmental Modeling and Assessment**, v. 22, n. 6, p. 591–606, 2017.

ANDRÉASSIAN, V. Waters and forests: From historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, v. 291, n. 1–2, p. 1–27, 2004.

ARNOLD, J. G. et al. Swat: Model Use, Calibration, and Validation. **Asabe**, v. 55, n. 4, p. 1491–1508, 2012.

BLAINSKI, É. et al. Simulação de cenários de uso do solo na bacia hidrográfica do rio Araranguá utilizando a técnica da modelagem hidrológica. **Agropecuária Catarinense**, v. 24, n. 1, p. 65–70, 2011.

BLAINSKI, É. et al. Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. **RBRH**, v. 22, 2017.

BOSCH, J.M. AND HEWLETT, J. D. The influence of forests and forest clearfelling on water supplies have long been a cause for concern and resulted in the initiation of the first catchment experiment in 1909 at Wagon Wheel " Gap in Colorado , U . S . A . The catchment experiment has sinc. **Journal of Hydrology**, v. 55, p. 3–23, 1982.

BRANDÃO, V. S. **Infiltração De Água Em Solos Sujeitos a Encrostamento**. 2003. Universidade Federal de Viçosa, 2003.

BRASIL. Lei nº 9.433, 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. 1º da Lei nº 8.001, de 13. 1997.

BRESSIANI, D. D. A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index , complex watershed modeling , different calibration techniques , and ensemble streamflow forecasting**. 2016. Universidade de São Paulo, 2016.

BRESSIANI, D. de A. et al. A review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1–27, 2015.

BRUIJNZEEL, L. A. **Hydrological functions of tropical forests: Not seeing the soil for the trees?** [s.l: s.n.]v. 104

BUYTAERT, W. et al. Human impact on the hydrology of the Andean páramos. **Earth-Science Reviews**, v. 79, n. 1–2, p. 53–72, 2006.

CARAM, R. D. O. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**. 2010. Universidade de São Paulo, 2010.

CHRISTOFOLETTI, A. **GEOMORFOLOGIA FLUVIAL**. São Paulo/SP: Editora Edgard Blucher Ltda, 1981.

COLLISCHONN, W. **Simulação Hidrológica de Grandes Bacias**. 2001. UFRGS, 2001.

DUDGEON, D. et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. **Biological Reviews**, v. 81, n. 02, p. 163, 12 maio 2006.

EASTMAN, J. R. **TerrSet Manual**. Worcester/MA: Clark University, 2016.

EGLER, M. **Gerenciamento integrado de recursos hídricos no Estado do Rio de Janeiro: Ensaio de indicador para o estabelecimento da avaliação das relações entre qualidade da água e cobertura vegetal.** 2012. 2012. 333 f. Tese (Doutorado) - Curso de Planejamento Enegético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

EGLER, M. et al. Influence of agricultural land-use and pesticides on benthic macroinvertebrate assemblages in an agricultural river basin in southeast Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 3, p. 437–443, ago. 2012.

EMBRAPA. **Solos do estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 185–201, 2002.

FRANCO, A. C. L.; BONUMÁ, N. B. Multi-variable SWAT model calibration with remotely sensed evapotranspiration and observed flow. **Rbrh**, v. 22, n. 0, 2017.

GHAFFARI, G. et al. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood Basin, Northwest Iran. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 7, p. 892–903, 2010.

GITHUI, F.; SELLE, B.; THAYALAKUMARAN, T. Recharge estimation using remotely sensed evapotranspiration in an irrigated catchment in southeast Australia. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 9, p. 1379–1389, 2012.

GUPTA, H. V. et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009.

HEISTERMANN, M.; KNEIS, D. Benchmarking quantitative precipitation estimation by conceptual rainfall-runoff modeling. **Water Resources Research**, v. 47, n. 6, p. 1–23, 2011.

HER, Y.; FRANKENBERGER, J.; CHAUBEY, I. Threshold Effects in HRU Definition ofthe Soil and Water Assessment Tool. **Transactions of the ASABE**, n. April, p. 367–378, 2015.

HIBBERT, A. R. Forest treatment effects on water yield. In: International Symposium on Forestry Hydrology, Oxford. **Anais**... Oxford: 1967.

JHA, M. et al. Effect of watershed subdivision on swat flow, sediment, and nutrient predictions. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 3, p. 811–825, 2004.

KLING, H.; FUCHS, M.; PAULIN, M. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, v. 424–425, p. 264–277, 2012.

KOBIYAMA, M. et al. **Curso de Capacitação em Hidrologia e Hidrometria para Conservação de Mananciais**. [s.l: s.n.].

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–174, 1977. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/2529310 .>.

LENHART, T. et al. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 27, n. 9–10, p. 645–654, 2002.

MALMQVIST, B.; RUNDLE, S. Threats to the running water ecosystems of the world. **Environmental Conservation**, v. 29, n. 02, p. 134–153, 21 jun. 2002.

MAPBIOMAS. **MapBiomas General "Handbook"**. Collection ed. [s.l: s.n.]

MARTINS, A. P.; ROSA, R. Uso De Dados Do Sensor Modis/Aqua E Do Algoritmo Sebal Para Estimativa Da Evapotranspiração Real Na Bacia Do Rio Paranaíba. **Caderno de Geografia**, v. 29, p. 351–367, 2019.

MUKUNDAN, R.; RADCLIFFE, D. E.; RISSE, L. M. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flow and sediment. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 65, n. 2, p. 92–104, 2010.

NEITSCH, S. . et al. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009. **Texas Water Resources Institute**, p. 1–647, 2011.

OEURNG, C.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. Assessment of hydrology , sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. **Journal of Hydrology**, v. 401, n. 3–4, p. 145–153, 2011.

OZTURK, D. Urban growth simulation of Atakum (Samsun, Turkey) using cellular automata-Markov chain and Multi-layer Perceptron-Markov chain models. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 5918–5950, 2015.

P. W. GASSMAN et al. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 4, p. 1211–1250, 2007.

PATIL, S. D.; STIEGLITZ, M. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. **Journal of Hydrology**, v. 525, p. 409–417, 2015.

PEREIRA, D. dos R. et al. Impacts of deforestation on water balance components of a watershed on the Brazilian east coast. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, n. 38, p. 1350–1358, 2014.

RODRIGUES, E. L. et al. Impact of changes in land use in the flow of the Pará River Basin, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 70–76, 2015.

RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; LINHARES, C. Is the forest conversion to pasture affecting the hydrological response of Amazonian catchments? Signals in the Ji-Paraná Basin. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 10, p. 1254–1269, 2010.

SANG, L. et al. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, n. 3–4, p. 938–943, 2011.

SANTANA, D. P. **Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas**. 1. ed. Sete Lagoas/MG: EMBRAPA, 2003.

SARTORI, A.; GENOVEZ, A. M.; LOMBARDI NETO, F. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos Parte 2 : Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 19–29, 2005.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1569, 2006.

SDM. **- Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Bacias Hidrográficas do Estado de Santa Catarina: Diagnóstico Geral.** Florianópolis: Instituto CEPA, 1997.

SDS. - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável. Plano Estadual de Recursos Hídricos de Santa Catarina. 2018.

TIBEBE, D.; BEWKET, W. SURFACE RUNOFF AND SOIL EROSION ESTIMATION USING THE SWAT MODEL IN THE KELETA WATERSHED , ETHIOPIA. **Land Degradation & Development**, n. 22, p. 551–564, 2011.

TRANCOSO, R.; CARNEIRO FILHO, A.; TOMASELLA, J. Amazônia, desflorestamento e água: A interação entre a floresta tropical e a maior bacia hidrográfica do planeta. **Ciência Hoje**, v. 40, n. 239, p. 30–37, 2007.

TUCCI, C.; CLARKE, R. Impactos das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.

TUCCI, C. E. M. et al. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2014.

ULLRICH, A.; VOLK, M. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. **Agricultural Water Management**, n. 96, p. 1207–1217, 2009.

VAN GRIENSVEN, A. et al. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. **Journal of Hydrology**, v. 324, n. 1–4, p. 10–23, 2006.

VIEIRA, A. S.; BLAINSKI, É.; RICCE, W. S. Cálculo da evapotranspiração potencial utilizando SWAT para a bacia do Rio Itajaí, SC. In: Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia, Maceió. **Anais**... Maceió: 2018.

WAGNER, P. D. et al. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. **Journal of Hydrology**, v. 464–465, p. 388–400, 2012.

WANG, S. et al. Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. **Hydrological Processes**, n. 22, p. 2502–2510, 2008.

WU, H.; CHEN, B. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol methods. **Ecological Engineering**, v. 76, p. 110–121, 2015.

XUE, F. et al. Evaluating the impact of spatial variability of precipitation on streamflow simulation using a SWAT model. **Water Policy**, v. 21, n. 1, p. 178–196, 2019.

YANG, J. et al. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. **Journal of Hydrology**, v. 358, n. 1–2, p. 1–23, 2008.

ZHANG, J. et al. The comparative study of multi-site uncertainty evaluation method based on SWAT model. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 13, p. 2994–3009, 2015.

ZHANG, L. et al. Analysis of streamflow responses to climate variability and land use change in the Loess Plateau region of China. **Catena**, v. 154, p. 1–11, 2017.

ZHU, Z. et al. Approach for evaluating inundation risks in urban drainage systems. **Science of the Total Environment**, v. 553, p. 1–12, 2016.

APÊNDICE A – Estações pluviométricas

Estações pluviométricas utilizadas no SWAT.

ID	Código da estação	Coordenada X	Coordenada Y	Nome da estação
P1	2649001	669.763	7.019.062	Warnow
P2	2649002	681.998	7.041.054	Pomerode
P3	2649008	672.051	7.041.193	Arrozeira
P4	2649010	690.850	7.034.274	Itoupava Central
P5	2649017	651.189	7.043.675	Doutor Pedrinho
P6	2649058	616.393	7.046.258	Barra do Prata
P7	2650022	599.688	7.072.985	Iracema
P8	2650023	584.565	7.047.618	Nova Cultura
P9	2749001	646.783	7.007.165	Ibirama
P10	2749002	637.426	6.968.493	Ituporanga
P11	2749005	639.865	7.009.460	Nova Bremen Dalbergia
P12	2749006	604.929	6.984.322	Pouso Redondo
P13	2749007	659.690	6.931.656	Lomba Alta
P14	2749013	621.726	6.980.845	Trombudo Central
P15	2749016	660.684	7.008.101	Neisse Central
P16	2749017	643.229	6.957.346	Barragem Sul
P17	2749039	635.679	6.989.563	Rio do Sul - Novo
P18	2749045	689.185	6.989.971	Botuvera-Montante
P19	2749046	665.217	6.975.908	Salseiro
P20	2750014	596.156	7.002.118	Barragem Oeste
P21	2750021	573.329	6.997.842	Cabeceira Ribeirão Caetano
P22	183-Itajaí – EE_Epagri	723.640	7.018.680	-

Coordenadas UTM em SIRGAS 2000 22S

Estações pluviométricas localizadas dentro da bacia hidrográfica do rio Itajaí, porém não utilizadas no SWAT.

Código da estação	Coordenada X	Coordenada Y	Nome da estação
2648001	714.486	7.020.594	Ilhota-Jusante
2648002	705.909	7.042.904	Luiz Alves
2649003	662.047	7.036.893	Benedito Novo
2649004	671.915	7.031.222	Timbó Novo
2649005	671.794	7.022.359	Indaial
2649007	691.642	7.020.964	Blumenau (PCD)
2649009	691.558	7.015.424	Garcia
2649053	619.137	7.020.753	Witmarsum
2649061	632.080	7.023.947	Barragem Norte
2649065	651.413	7.062.507	Barra do Avencal
2748000	706.211	7.000.783	Brusque (PCD)
2749000	658.700	7.008.127	Apiuna - Régua Nova
2749003	600.113	7.000.979	Taió
2749033	661.172	6.969.313	Vidal Ramos
2749037	660.749	6.937.182	Saltinho
2749041	615.662	6.967.608	Agrolândia

Coordenadas UTM em SIRGAS 2000 22S

Estações pluviométricas levantadas localizadas fora da bacia hidrográfica do rio Itajaí.

Código da estação	Coordenada X	Coordenada Y	Nome da estação
2750012	555.806	6.975.192	Ponte do rio Antinhas
2748002	704.572	6.980.151	Nova Trento
2750010	552.618	6.995.610	Ponte Alta do Norte
2750022	553.846	7.000.069	Ponte Alta do Norte - CIFSUL
2650015	570.544	7.045.455	Residência Fuck (Lajeadinho)
2648020	727.197	7.060.086	Itapocu
2648028	716.339	7.072.843	Ponte SC-301
2649013	670.280	7.076.241	Corupá
2649055	642.299	7.077.080	Corredeira
2649064	666.450	7.077.865	Rio Novo
2650000	570.752	7.083.079	Salto Canoinhas
2649056	607.063	7.087.015	Itaiópolis
2650032	557.393	7.017.033	Santa Cecília
2849021	638.634	6.901.221	Urubici
2749012	684.872	6.901.817	Divisa de Anitápolis
2749027	684.034	6.911.361	Anitápolis
2748018	703.738	6.912.042	São Bonifácio
2749031	620.175	6.923.912	Vila Canoas
2749035	602.490	6.929.615	Bocaina do Sul
2749009	613.383	6.935.057	Rio Bonito
2749020	696.274	6.937.548	Rancho Queimado
2750011	560.262	6.960.029	Ponte Alta do Sul
2749034	668.903	6.956.133	Leoberto Leal

Coordenadas UTM em SIRGAS 2000 22S

APÊNDICE B – Estações fluviométricas

Estações fluviométricas utilizadas para os processos de calibração e de validação do modelo

ID	Código	Número da sub-bacia correspondente no SWAT	Coordenada X	Coordenada Y	Curso d'água	Área de contribuição (km²)
F1	83880000	17	705.909	7.042.904	Rio Luiz Alves	158
F2	83069900	118	671.915	7.031.222	Rio Trombudo	308
F3	83105000	132	599.121	7.000.987	Rio Itajaí do Sul	429
F4	83675000	19	637.426	6.968.493	Rio dos Cedros	535
F5	83029900	62	646.783	7.007.165	Rio Itajaí do Oeste	643
F6	83660000	26	635.679	6.989.563	Rio Benedito	718
F7	83892998	97	659.706	7.009.222	Rio Itajaí-Mirim	791
F8	83900000	81	669.763	7.019.062	Rio Itajaí-Mirim	1.209
F9	83345000	11	674.805	7.024.534	Rio Itajaí do Norte	1.424
F10	83677000	30	691.642	7.020.964	Rio Benedito	1.429
F11	83050000	82	702.550	7.019.684	Rio Itajaí do Oeste	1.559
F12	83250000	116	618.735	6.978.658	Rio Itajaí do Sul	1.635
F13	83440000	69	661.735	6.937.169	Rio Itajaí do Norte	3.324
F14	83300200	98	672.051	7.041.193	Rio Itajaí-Açu	5.049
F15	83500000	78	587.280	7.008.830	Rio Itajaí-Açu	8.951
F16	83520000	53	663.027	7.035.772	Rio Itajaí-Açu	9.669
F17	83690000	40	689.185	6.989.971	Rio Itajaí-Açu	11.216
F18	83800002	46	706.211	7.000.783	Rio Itajaí-Açu	11.880
F19	83840000	48	616.393	7.046.258	Rio Itajaí-Açu	12.133

Coordenadas UTM em SIRGAS 2000 22S

APÊNDICE C – Estações meteorológicas

Estações meteorológicas utilizadas.

ID	Código	Coordenada X	Coordenada Y	Município	Órgão responsável
M1	86948	722.073	7.016.927	Itajaí	INMET
M2	86946	671.940	7.021.890	Indaial	INMET
M3	86944	584.784	7.020.142	Rio do Campo	INMET
M4	86957	633.707	6.966.438	Ituporanga	INMET

Coordenadas UTM em SIRGAS 2000 22S

APÊNDICE D – Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade

CN2: CN (Curve Number) para condição de umidade II. O CN é função da permeabilidade do solo, cobertura e condições antecedentes de umidade. O CN pode ser atualizado para as operações de crescimento e colheita. Em áreas urbanas, o modelo ajusta o CN de modo a refletir as condições de impermeabilidade.

SOL_AWC: Capacidade de água disponível para a camada de solo (mm H2O/mm solo). A capacidade de água disponível para as plantas é calculada pela subtração da fração de água existente no ponto de murcha permanente da quantidade de água presente na capacidade de campo.

ESCO: Fator de compensação de evaporação no solo. Este coeficiente permite ao usuário modificar a distribuição de profundidade utilizada para encontrar demanda de evaporação do solo, que influencia para o efeito de capilaridade.

GWQMN: Profundidade limite do aquífero raso para ocorrência de escoamento de retorno (mm H2O). O escoamento de água subsuperficial para o canal só é possível quando o nível d'água no aqüífero raso é igual ou superior ao GWQMN.

GW_REVAP: Coeficiente de evaporação da água subterrânea que se move para a zona de raízes.

REVAPMN: Nível d'água limite do aquífero para ocorrência de evaporação ou percolação (mm H2O). Movimento da água do aquífero raso para a zona de raízes só é possível quando o nível de água do aquífero raso é igual ou superior a REVAPMN.

CANMX: Volume máximo do armazenamento de copa quando o dossel está totalmente desenvolvido (mm H2O).

CH_K2: Condutividade hidráulica efetiva do canal aluvial principal (mm/h).

CH_N1: Coeficiente de Manning para os canais tributários.

CH_N2: Coeficiente de Manning para o canal principal.

GW_DELAY: Tempo de atraso da recarga de aquífero. Representa o tempo entre o momento em que a água passa do perfil de solo e chega no aquífero raso.

LAT_TTIME: Tempo de duração do escoamento lateral (dias).

OV_N: Coeficiente de Manning para o escoamento superficial.

RCHRG_DP: Fração de água percolada da zona de raízes para o aquífero profundo.

SLSUBBASIN: Distância em que o escoamento laminar é a forma dominante de escoamento superficial. É o comprimento médio de rampa em que o escoamento superficial começa a concentrar e formar linhas de fluxo bem definidas.

SOL_K: Condutividade hidráulica saturada da camada de solo (mm/h).

SURLAG: Coeficiente de atraso do escoamento superficial até o canal principal (dia).

APÊNDICE E – Valores calibrados para cada parâmetro e respectivo método de ajuste

Sub-bacia	Parâmetro	Método de ajuste	Valor calibrado
11	CN2	Relativo	0,09
	ESCO	Substituir	0,21
	GW_REVAP	Substituir	0.19
	GW_QMN	Adição	-243.44
	SOL_AWC	Relativo	-0,05
	CANMX	Substituir	8
	OV_N	Relativo	-0.12
	GW_DELAY	Substituir	50.74
	RCHRG_DP	Substituir	0.33
	CH_N1	Relativo	-0.36
17	CN2	Relativo	-0.01
	ESCO	Substituir	0.72
	GW_REVAP	Substituir	0.16
	GW_QMN	Adição	32.63
	SOL_AWC	Relativo	0.63
	CANMX	Substituir	16.75
	OV_N	Relativo	0.37
	GW_DELAY	Substituir	80.35
	RCHRG_DP	Substituir	0.35
	CH_N1	Relativo	-0.08
30	CN2	Relativo	-0.01
	ESCO	Substituir	0.64
	GW_REVAP	Substituir	0.13
	GW_QMN	Adição	-449.75
	SOL_AWC	Relativo	0.20
	CANMX	Substituir	9.48
	OV_N	Relativo	0.03
	GW_DELAY	Substituir	28.79
	RCHRG_DP	Substituir	0.66
	CH_N1	Relativo	0.42

Sub-bacia	Parâmetro	Método de ajuste	Valor calibrado
40	CN2	Relativo	-0.25
	ESCO	Substituir	0.86
	GW_REVAP	Substituir	0.17
	GW_QMN	Adição	46.10
	SOL_AWC	Relativo	0.06
	CANMX	Substituir	8.88
	OV_N	Relativo	-0.19
	GW_DELAY	Substituir	1.10
	RCHRG_DP	Substituir	0.01
	CH_N1	Relativo	0.02
48	CN2	Relativo	-0.33
	ESCO	Substituir	0.71
	GW_REVAP	Substituir	0.06
	GW_QMN	Adição	-972.50
	SOL_AWC	Relativo	0.29
	CANMX	Substituir	5.58
	OV_N	Relativo	0.09
	GW_DELAY	Substituir	92.70
	RCHRG_DP	Substituir	0.73
	CH_N1	Relativo	-0.12
69	CN2	Relativo	0.12
	ESCO	Substituir	0.19
	GW_REVAP	Substituir	0.03
	GW_QMN	Adição	-497.48
	SOL_AWC	Relativo	-0.02
	CANMX	Substituir	3.10
	OV_N	Relativo	0.12
	GW_DELAY	Substituir	54.63
	RCHRG_DP	Substituir	0.21
	CH_N1	Relativo	0.38

Sub-bacia	Parâmetro	Método de ajuste	Valor calibrado
78	CN2	Relativo	-0.03
	ESCO	Substituir	0.02
	GW_REVAP	Substituir	0.15
	GW_QMN	Adição	-187.10
	SOL_AWC	Relativo	-0.19
	CANMX	Substituir	15.33
	OV_N	Relativo	-0.39
	GW_DELAY	Substituir	3.30
	RCHRG_DP	Substituir	0.03
	CH_N1	Relativo	-0.09
81	CN2	Relativo	-0.12
	ESCO	Substituir	0.46
	GW_REVAP	Substituir	0.06
	GW_QMN	Adição	108.98
	SOL_AWC	Relativo	0.17
	CANMX	Substituir	2.01
	OV_N	Relativo	-0.06
	GW_DELAY	Substituir	72.68
	RCHRG_DP	Substituir	0.35
	CH_N1	Relativo	-0.13
82	CN2	Relativo	0.07
	ESCO	Substituir	0.73
	GW_REVAP	Substituir	0.14
	GW_QMN	Adição	-288.79
	SOL_AWC	Relativo	-0.04
	CANMX	Substituir	5.45
	OV_N	Relativo	0.05
	GW_DELAY	Substituir	83.70
	RCHRG_DP	Substituir	0.63
	CH_N1	Relativo	-0.01

Sub-bacia	Parâmetro	Método de ajuste	Valor calibrado
98	CN2	Relativo	-0.25
	ESCO	Substituir	0.86
	GW_REVAP	Substituir	0.17
	GW_QMN	Adição	46.10
	SOL_AWC	Relativo	0.06
	CANMX	Substituir	8.88
	OV_N	Relativo	-0.19
	GW_DELAY	Substituir	1.10
	RCHRG_DP	Substituir	0.01
	CH_N1	Relativo	0.02
116	CN2	Relativo	0.09
	ESCO	Substituir	0.32
	GW_REVAP	Substituir	0.19
	GW_QMN	Adição	-723.85
	SOL_AWC	Relativo	-0.08
	CANMX	Substituir	36.54
	OV_N	Relativo	0.01
	GW_DELAY	Substituir	10.52
	RCHRG_DP	Substituir	0.38
	CH_N1	Relativo	0.03
118	CN2	Relativo	0.1
	ESCO	Substituir	0.9
	GW_REVAP	Substituir	0.18
	GW_QMN	Adição	-600
	SOL_AWC	Relativo	0.15
	CANMX	Substituir	8.88
	OV_N	Relativo	-0.19
	GW_DELAY	Substituir	1.10
	RCHRG_DP	Substituir	0.01
	CH_N1	Relativo	0.02

Sub-bacia	Parâmetro	Método de ajuste	Valor calibrado
132	CN2	Relativo	0.16
	ESCO	Substituir	0.46
	GW_REVAP	Substituir	0.05
	GW_QMN	Adição	-452.04
	SOL_AWC	Relativo	-0.17
	CANMX	Substituir	18.35
	OV_N	Relativo	0.26
	GW_DELAY	Substituir	62.78
	RCHRG_DP	Substituir	0.52
	CH_N1	Relativo	-0.21