



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

Gabriel Troina Maraslis

**INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GERAÇÃO DE
ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE UMA PEQUENA BACIA
COSTEIRA UTILIZANDO O MODELO SWAT**

Florianópolis

2022

Gabriel Troina Maraslis

**INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GERAÇÃO DE
ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE UMA PEQUENA BACIA
COSTEIRA UTILIZANDO O MODELO 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. Davide Franco, Dr.

Coorientadora: Profa. Patricia Kazue Uda, Dra.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra

Maraslis, Gabriel Troina
INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GERAÇÃO DE
ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE UMA PEQUENA BACIA COSTEIRA
UTILIZANDO O MODELO SWAT / Gabriel Troina Maraslis ;
orientador, Davide Franco, coorientador, Patricia Kazue
Uda, 2022.
92 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Ambiental. 2. Modelagem hidrológica. 3.
Uso e ocupação do solo. . 4. SWAT model. 5. Pequena bacia
hidrográfica costeira. I. Franco, Davide . II. Kazue Uda,
Patricia . III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Gabriel Troina Maraslis

**INFLUÊNCIA DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GERAÇÃO DE
ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE UMA PEQUENA BACIA
COSTEIRA UTILIZANDO O MODELO SWAT**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 04 de agosto de 2022, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Rodrigo de Almeida Mohedano, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina
Joao Henrique Sá, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

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

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.(a) Davide Franco, Dr.
Orientador

Florianópolis, 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Davide Franco e a Prof^a Dr^a Patricia Kazue Uda que respectivamente aceitaram me orientar e coorientar na realização deste trabalho.

Aos meus pais - Sinara e Anastas - irmã - Flora - pelo apoio, carinho, força, coragem e incentivo para seguir em frente em momentos de dificuldade.

À toda a equipe do LaHimar - Laboratório de Hidráulica Marítima (UFSC). Em especial a minha grande amiga e colega Priscilla Kern pela parceria, auxílio e disposição sempre que necessário, sem você esse trabalho não seria possível.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Rodrigo de Almeida Mohedano e ao Dr. João Henrique Sá, pela disponibilidade e pelas contribuições na melhoria deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) e dos outros programas de pós-graduação da UFSC que compartilharam seu conhecimento através das disciplinas ofertadas.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), por disponibilizar os dados de nível e chuva, sempre que solicitados.

Aos colegas Tássia Mattos Brighenti e Christian Milanez Preis pelo auxílio para utilização do modelo SWAT.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro concedido através da bolsa de mestrado.

RESUMO

A Lagoa da Conceição constitui um dos sistemas lagunares mais importantes do Brasil. O rio João Gualberto (9,92 km²) têm grande importância nesse contexto, pois é a sub-bacia de maior contribuição hidrológica de toda a bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição (BHLC). Nesse sentido, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da mudança de uso e cobertura do solo na produção de água da nesta sub-bacia por meio de simulações hidrológicas no modelo SWAT. Foram elaborados mapas de uso e ocupação do solo para diferentes cenários (2000, 2010 e 2020) através do emprego da ferramenta *google earth engine* e imagens de satélite Landsat 5 e 8, onde o índice Kappa, variou de 0,75 a 0,79, considerado “muito bom”. Para a calibração do SWAT foi utilizada uma série de vazão, gerada pelo modelo hidráulico HEC-RAS, utilizando como condições de contorno os níveis de montante e jusante do rio. A calibração do SWAT, através do SWAT CUP, apresentou resultados intermediários com KGE de 0,64, p-fator de 0,75 e r-fator de 0,92. Isto é, o modelo SWAT foi capaz de representar a produção de água (vazão) da bacia hidrográfica do rio João Gualberto. A partir de simulações para cada cenário, foram geradas curvas de permanência que deixaram evidente que os cenários mais urbanizados e com menos vegetação densa, 2020, 2010 e 2000 respectivamente, tiveram picos de vazão (Q₁₀) mais elevados e fluxos de base (Q₉₀) com vazões reduzidas. A Q₁₀ variou de 550 l/s (2000) a 644 l/s (2020) o que representa um aumento de 17%. O fluxo de base (Q₉₀) por sua vez apresentou uma redução de 14% dos anos 2000 para 2020. A Q_{média} simulada variou entre 350 l/s (2000) e 363 l/s (2020), o que representa um aumento de 4%, porém, esses valores são reflexo da alta vazão dos eventos extremos. Em termos absolutos, o aumento de vazão entre os anos de 2000 e 2020 foi, em média, de 4% (1.100 m³/dia). O volume médio diário de entrada na laguna para o cenário de 2020 é de 31.300m³. Estes resultados reforçam a importância da modelagem hidrológica e demonstram os impactos das alterações do uso e ocupação do solo na produção de água de uma pequena bacia hidrográfica. O estudo identificou que o crescimento das áreas urbanas, em detrimento da vegetação densa, tem relação com o aumento das vazões máximas, e, redução nas vazões mínimas do rio João Gualberto.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Uso e ocupação do solo. SWAT Model. Pequena bacia hidrográfica costeira

ABSTRACT

Lagoa da Conceição is one of the most important lagoon systems in Brazil. The João Gualberto River (9.92 km²) has great importance in this context, since it is the sub-basin of greatest hydrological contribution of the whole Lagoa da Conceição watershed (BHLC). In this sense, the main objective of this work was to evaluate the influence of land use and land cover change on water production in this sub-basin through hydrological simulations in the SWAT model. Land use maps were elaborated for different scenarios (2000, 2010 and 2020) by using the *google earth engine* tool and Landsat 5 and 8 satellite images, where the Kappa index ranged from 0.75 to 0.79, considered "very good". For the SWAT calibration a flow series generated by the HEC-RAS hydraulic model was used, using as boundary conditions the upstream and downstream levels of the river. The SWAT calibration, through SWAT CUP, presented intermediate results with KGE of 0.64, p-factor of 0.75 and r-factor of 0.92. That is, the SWAT model was able to represent the water production (flow) of the João Gualberto river watershed. From simulations for each scenario, permanence curves were generated that made it evident that the more urbanized and less dense vegetation scenarios, 2020, 2010 and 2000 respectively, had higher peak flows (Q10) and base flows (Q90) with reduced flows. The Q10 ranged from 550 l/s (2000) to 644 l/s (2020) which represents a 17% increase. The base flow (Q90) in turn showed a 14% reduction from 2000 to 2020. The simulated mean Q averaged between 350 l/s (2000) and 363 l/s (2020), which represents an increase of 4%, however, these values reflect the high flow rate of extreme events. In absolute terms, the increase in flow between the years 2000 and 2020 was on average 4% (1,100 m³/day). The average daily volume entering the lagoon for the 2020 scenario is 31,300m³. These results reinforce the importance of hydrological modeling and demonstrate the impacts of changes in land use and occupation on water production in a small watershed. The study identified that the growth of urban areas, at the expense of dense vegetation, is related to the increase in maximum flows and reduction in minimum flows of the João Gualberto River.

Keywords: Lagoa da Conceição. Hydrological modeling. Land use and occupation. SWAT Model, Small coastal watershed

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Gráfico de probabilidade de excedência para vazão diária por um período de 10 anos nos cenários de uso do solo.	19
Figura 2 - Classificação de modelos hidrológicos de acordo com as características dos fenômenos hidrológicos.	21
Figura 3 – Representação esquemática do ciclo hidrológico adaptado do modelo SWAT.	27
Figura 4 - Fluxograma metodológico.	40
Figura 5- Mapa de localização da área de estudo e da Bacia da Lagoa da Conceição	41
Figura 6 - Temperatura média, máxima e mínima entre os anos de 1997 e 2020	42
Figura 7 - Precipitação média acumulada e máxima diária no mês entre 1997 - 2020	43
Figura 8 - Variação da precipitação (mm/d) por ano.	44
Figura 9 - Radiação média entre os meses de 1997 e 2020	45
Figura 10 - Relação dos níveis da laguna e da seção de monitoramento para distintos regimes pluviométricos.	47
Figura 11 - Períodos de dados de nível (laguna e JG) disponíveis.	48
Figura 12 - Geometria da seção de monitoramento.	49
Figura 13 – Precipitação diária e variação dos níveis da laguna (20 min) e da seção de monitoramento no rio João Gualberto (10 min) durante o período de 27 de julho a 10 de agosto de 2011.	50
Figura 14- Mapa de elevação (A) e declividade (B) da área de estudo.	52
Figura 15 – Pedologia da área de estudo. Escala 1:50.000. Adaptado de (PMF, 2009).	54
Figura 16 - Uso e ocupação do solo para a área de estudo.	59
Figura 17 - Evolução temporal das classes de uso e ocupação do solo (%).	60
Figura 18 - Hidrograma (horário) calculado pelo modelo HEC-RAS e dados pontuais observados na seção do JG.	61
Figura 19 - Diagrama de dispersão dos dados de vazão após a calibração.	62
Figura 20 - Precipitação, níveis de montante e jusante e vazão modelada com o HEC-RAS.	63

Figura 21 – Hidrograma diário observado (HEC-RAS) e simulado com o SWAT não calibrado.	64
Figura 22 - Valores <i>p-value</i> na análise de sensibilidade global dos parâmetros.	66
Figura 23 – Sub-bacias criadas no modelo SWAT.	67
Figura 24 -Hidrograma diário dos dados simulados e observados para a bacia do JG.	68
Figura 25 - Simulação diária com o SWAT dos cenários alternativos de uso e ocupação do solo de sub-bacia do JG.	70
Figura 26 - Box-Plot das vazões médias diárias observadas na bacia do JG em cada mês da série para os três cenários de uso e ocupação do solo.	71
Figura 27 - Distribuição de frequência relativa das vazões (l/s).	72
Figura 28 - Curva de permanência para a bacia do JG nos cenários de 2000, 2010 e 2020.	73
Figura 29 - Variação percentual da vazão ultrapassada em 90% do tempo (Q90), da vazão média (Qmed) e, da vazão ultrapassada em 10% do tempo (Q10) em função do percentual da vazão, área total da bacia ocupada por vegetação densa.	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação do uso e ocupação do solo de uma bacia.....	18
Quadro 2 - Estudos realizados em pequenas bacias.....	35
Quadro 3 - Parâmetros de solo requeridos pelo SWAT.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índice Kappa e o correspondente desempenho da classificação	46
Tabela 2 - Fontes de obtenção de dados de entrada e observados no modelo SWAT51	
Tabela 3 - Classes de declividade da área de estudo	53
Tabela 4 - Tipos de solo, porcentagem de cada tipo e respectiva classificação no SWAT.....	54
Tabela 5 - Categorias de uso e ocupação do solo como entrada no modelo SWAT..	55
Tabela 6 - Sensibilidade global dos parâmetros de vazão.....	65
Tabela 7 - Parâmetros selecionados para a análise de sensibilidade e respectivos métodos de ajuste e valores iniciais de mínimos e máximos.	69
Tabela 8 – Volume de água proveniente do rio João Gualberto na Lagoa da Conceição para cada cenário	76

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas;

BHLC – Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição;

CIRAM - Centro de Informações de Recursos Ambientais de Santa Catarina;

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária;

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

HEC-RAS - Hydrological Engineering Center - River Analysis SystemI;

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia;

JG – João Gualberto;

KGE - coeficiente de Kling-Gupta;

LaHimar - Laboratório de Hidráulica Marítima (UFSC);

LC - Lagoa da Conceição;

MDT – Modelo Digital de Terreno

NSE - coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe;

PMF – Prefeitura Municipal de Florianópolis;

RV – Rio Vermelho;

SDS/SC - Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina;

SUFI-2 – Sequential Uncertainty Fitting Version 2;

SVM - Support Vector Machine;

SWAT - Soil and Water Analysis Tool;

SWAT CUP – SWAT Calibration and Uncertainty Programs;

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina;

URH – Unidade de Resposta Hidrológica;

USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1	IMPACTOS DA ALTERAÇÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO CICLO HIDROLÓGICO E CURVA DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES	17
3.2	MODELOS HIDROLÓGICOS	19
3.3	MODELOS HIDRÁULICOS.....	23
3.4	O MODELO SWAT - SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL.....	25
3.4.1	Simulação da hidrologia da bacia hidrográfica	26
3.4.2	Análise de sensibilidade e calibração	29
3.5	APLICAÇÃO DO SWAT.....	32
3.5.1	Bacias com poucos dados medidos	32
3.5.2	Pequenas bacias	34
4	METODOLOGIA	39
4.1	Área de estudo	40
4.1.1	Características climáticas	42
4.2	GERAÇÃO DOS CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO.....	45
4.3	GERAÇÃO DE DADOS DE VAZÃO USANDO O HEC-RAS	46
4.3.1	Levantamento de dados	48
4.3.2	Condições iniciais e de contorno	49
4.3.3	Calibração do modelo hidráulico	49
4.4	SWAT.....	50
4.4.1	Levantamento de dados	51
4.4.2	Dados de entrada	51

•	Precipitação e dados meteorológicos	51
•	Modelo Digital de Terreno (MDT).....	52
•	Pedologia	53
	Uso e Ocupação do Solo	55
4.4.3	Calibração e análise de sensibilidade do modelo hidrológico	56
4.5	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS SWAT	57
4.6	CURVAS DE PERMANÊNCIA	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	USO E COBERTURA DO SOLO	58
5.2	HEC-RAS	61
5.2.1	Calibração do modelo	61
5.2.2	Dados de vazão	62
5.3	SWAT.....	63
5.3.1	Desempenho do modelo não calibrado.....	63
5.3.2	Análise de sensibilidade dos parâmetros.....	64
5.3.3	Calibração do modelo	66
5.4	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS	69
5.5	INFLUÊNCIA DA EVOLUÇÃO URBANA NA PRODUÇÃO DE ÁGUA.....	72
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	77
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS PARAMETROS UTILIZADOS.....	89

1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional próximo a ambientes aquáticos é de grande preocupação devido às conseqüentes alterações na produção de escoamento e na qualidade da água dos afluentes de lagoas (TARGA *et al.*, 2014).

Áreas urbanas apresentam coeficiente de escoamento superficial elevado, e a rápida mudança de uso e ocupação do solo, ocasionada, pelo crescimento urbano de uma região tem impacto direto na produção de água da bacia (SCHWAB *et al.*, 1993). Em regiões não vegetadas, o volume precipitado alcança mais rapidamente o solo, pois não há interceptação vegetal, assim, o aumento da proporção impermeável (urbanização) em uma bacia hidrográfica gera uma intensificação das vazões máximas (DIAS *et al.*, 2015). Diversos estudos apontam que mudanças no uso/cobertura do solo afetam fortemente a hidrologia e a qualidade da água de uma bacia (AGHSAEI *et al.*, 2020; CHAUHAN; KUMAR; PALIWAL, 2020; NOBERT, 2012; OSEI *et al.*, 2019; WOLDESENBET *et al.*, 2017).

Na planície costeira do sul do Brasil, está situada, na porção centro-leste da Ilha de Santa Catarina, Florianópolis, a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição (BHLC). A Lagoa da Conceição é classificada como uma lagoa costeira, pois possui um canal, de 2.8 km, que a conecta com o mar. É o maior ambiente lagunar da Ilha de Santa Catarina e o quinto maior do estado de Santa Catarina. Localizada próxima a um mosaico de importantes ecossistemas, como estuários, lagoas, dunas e praias arenosas, parte da BHLC está localizada dentro de quatro Unidades de Conservação: Parque Natural Municipal das Dunas da Lagoa da Conceição, o Parque Natural Municipal do Maciço da Costeira, a Área Tombada da Região da Costa da Lagoa da Conceição. Ainda e o recém criado Refúgio da Vida Silvestre do Meiembipe. A BHLC é conhecida por ser uma das maiores atrações turísticas e de lazer da Ilha de Santa Catarina, destaca-se a recreação, esportes, cultura, turismo e pesca (KERN, 2019).

A população da BHLC em 1990 era de aproximadamente 12 mil habitantes. Em 2020, a bacia hidrográfica possuía 43 mil habitantes e estima-se que a população da bacia pode chegar a mais de 54 mil no ano de 2030 (MACHADO, 2019). Possuir o conhecimento sobre o comportamento sazonal e espacial dos principais parâmetros

hidrológicos e dos nutrientes da Lagoa da Conceição é fundamental para compreensão dos processos físicos e qualitativos, visando à proteção do sistema estuarino (KERN, 2019). Nas últimas décadas, o desenvolvimento urbano e o aumento na concentração demográfica da bacia, acarretaram na eutrofização, alta produtividade biológica, sobrepesca e degradação das bacias de drenagem que deságuam na laguna (MACHADO, 2019; SANTOS, 2018).

A sub-bacia do Rio João Gualberto (9,9 km²), está localizada na região norte da BHLC, sendo caracterizada por não possuir rede de coleta de esgoto sanitário e pela contaminação da água do rio por esgotos. Ademais, esta sub-bacia é de grande importância hidrológica para a Lagoa da Conceição visto que corresponde a aproximadamente 18% da área total da bacia hidrográfica, e é responsável por cerca de 24% da contribuição hidrológica descarregada na laguna após um evento de chuva (BIER, 2013). Apesar disso, a sub-bacia do João Gualberto é uma pequena bacia, em que recursos hídricos devem ser geridos de forma criteriosa, auxiliando na resolução dos conflitos gerados pelo grande crescimento populacional na região (HORN, 2018).

Preservar o ecossistema é assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, que implica na conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável. O monitoramento hidrológico é um dos fatores determinantes no processo de gestão ambiental, uma vez que propicia uma percepção sistemática e integrada da realidade ambiental (INEA, 2020).

Os modelos hidrológicos são ferramentas que permitem, através de um conjunto de dados levantados em campo e de equações físicas e matemáticas dos processos, representar, entender e simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (TUCCI; COLLISCHONN, 2003) e, especificamente, o escoamento superficial. O modelo SWAT, (*Soil and Water Assessment Tool*) foi desenvolvido em 1990 pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em parceria com a Universidade Texas A&M. O SWAT é um modelo hidrológico semi-distribuído, que possibilita prever o impacto de práticas de manejo do solo na produção de água em bacias hidrográficas complexas não instrumentadas (NEITSCH *et al.*, 2011a). Este modelo vem sendo amplamente utilizado no mundo para simulação de escoamento superficial (GASSMAN *et al.*, 2007). Segundo de Almeida Bressiani *et al.* (2015), foram

publicados 102 artigos que utilizaram o SWAT para estudar bacias brasileiras entre os anos de 1999 e 2013. Deste montante, 20% dos estudos foram conduzidos em bacias com área menor que 15 km².

Entender como as mudanças no uso do solo influenciam os padrões de variação das vazões ajuda a planejar estratégias que minimizem os efeitos indesejáveis de futuras mudanças no uso e ocupação do solo (ALANSI *et al.*, 2009). Nesse contexto, as curvas de permanência são um método de análise interessante, pois permitem visualizar facilmente o estado qualitativo e as tendências dos corpos d'água, o que pode auxiliar no planejamento e na fiscalização (FORMIGONI *et al.*, 2011). As curvas de permanência constituem uma representação simples do regime hidrológico de uma bacia hidrográfica. Sua forma e declividade expressam a variabilidade das vazões e são determinadas por características físicas, climáticas, morfológicas da e de cobertura vegetal na bacia em questão (MARTINS *et al.*, 2020).

Com o intuito de gerar conhecimento que vise a priorização de uma gestão sustentável dos recursos hídricos este estudo busca avaliar a influência da mudança de uso e cobertura do solo na produção de água da sub-bacia do rio João Gualberto, pertencente a Bacia Hidrográfica da Lagoa da Conceição (BHLC), em Florianópolis/SC. Por meio do emprego do modelo hidrológico SWAT, serão simulados três cenários. O estudo considera o uso e ocupação do solo para os anos de 2000, 2010 e 2020 e avalia o comportamento das curvas de permanência obtidas para os respectivos cenários.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da mudança de uso e cobertura do solo na produção de água da sub-bacia do rio João Gualberto da Lagoa da Conceição, em Florianópolis/SC, por meio do emprego do modelo hidrológico SWAT.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adequar o modelo distribuído de simulação aos processos hidrológicos da sub-bacia;
- Simular o escoamento para diferentes cenários de uso do solo (2000, 2010 e 2020);
- Avaliar o comportamento das curvas de permanência obtidas nas bacias por meio do modelo escolhido, para diferentes cenários de uso e cobertura do solo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 IMPACTOS DA ALTERAÇÃO DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NO CICLO HIDROLÓGICO E CURVA DE PERMANÊNCIA DE VAZÕES

A alteração das paisagens pelo homem tem levado a um aumento gradual da escassez de água e degradação de sua qualidade (AGHSAEI *et al.*, 2020; ANAND; GOSAIN; KHOSA, 2018; CHEN *et al.*, 2014; DE OLIVEIRA SERRÃO *et al.*, 2021; LE *et al.*, 2011; MAINALI; CHANG, 2018; SCANLON *et al.*, 2007).

O desenvolvimento urbano frequentemente está associado à substituição de ambientes naturais ou seminaturais por ambientes construídos, direcionando as águas pluviais e esgotos para os corpos hídricos adjacentes aos canais de drenagem (BENINI; MENDIONDO, 2015; HAUGHTON; HUNTER, 1994; SILVA *et al.*, 2014).

A urbanização tem um impacto profundo no ciclo hidrológico, com efeitos já bem estabelecidos como a redução da evapotranspiração, a redução das recargas dos aquíferos, o aumento da magnitude do pico de escoamento superficial e a deterioração da qualidade de água dos corpos hídricos (FOSTER, 1990; KONDOH; NISHIYAMA, 2000). O Quadro 1 apresenta as principais classificações sobre os impactos hidrológicos da alteração no uso e ocupação do solo de uma bacia.

Nas últimas décadas, vem crescendo o consenso de que a interação entre a água e o uso do solo deve ser abordada de forma eficaz na busca da sustentabilidade hídrica, integrando o planejamento territorial com a gestão da escala de bacias hidrográficas (AHMADI *et al.*, 2012; CHEN *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2016).

A curva de permanência é uma das análises exploratórias mais importantes na hidrologia (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015). Em estudos de vazões, permite obter a porcentagem de tempo (ou permanência) na qual um determinado valor de vazão é superado ou igualado, com base em uma série histórica de vazões medidas ou simuladas (CRUZ; TUCCI, 2008; NAGHETTINI; PINTO, 2007; TUCCI, 2012). A Curva Chave é utilizada em diversos estudos como parâmetro de resposta do escoamento e gestão de recursos hídricos da bacia. Também é aplicada no planejamento e projeto de sistemas de recursos hídricos, sendo usada como ferramenta para a outorga de direito de uso da água em alguns estados brasileiros, sendo amplamente utilizada na determinação da vazão mínima de um curso d'água

para abastecimento ou irrigação (CRUZ; TUCCI, 2008; GARBOSSA; PINHEIRO, 2015; NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Quadro 1 - Classificação do uso e ocupação do solo de uma bacia.

Classificação	Tipo	Principais impactos sobre o escoamento
Mudança de 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, aumento do escoamento superficial, redução do escoamento subterrâneo, redução da evapotranspiração. Aumento das vazões máximas e na produção de sedimentos, e deterioração da qualidade da água
	Reflorestamento para exploração sistemática	Redução do escoamento médio, impacto da construção de estradas e 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, redução da infiltração da água no solo

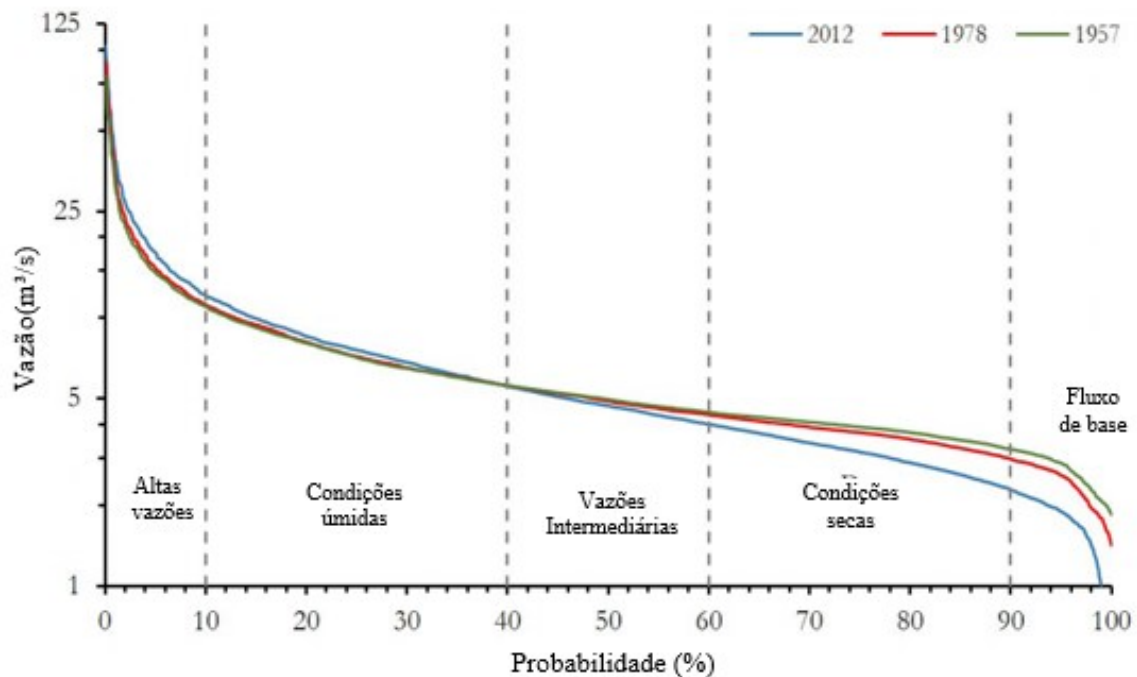
Fonte: Tucci (2005).

Blainski *et al.* (2017) identificaram como as mudanças no uso e cobertura do solo afetam o regime hidrológico da Bacia do Rio Camboriú com maior intensidade nos extremos da curva de permanência. O objetivo foi utilizar o modelo hidrológico SWAT para simular os impactos das alterações no uso e ocupação das terras da bacia hidrográfica do Rio Camboriú para os anos de 1957, 1978 e 2012.

Andréassian (2004), indica que o aumento da área florestada provoca uma diminuição da vazão de pico e um aumento nos valores da vazão de base. Essas mudanças podem ser atribuídas principalmente a mudanças na evapotranspiração, rugosidade e taxa de infiltração de água no solo.

No estudo de Blainski *et al.* (2017) foi possível observar, pela curva de permanência, que o cenário 2012 destaca-se negativamente por apresentar as maiores vazões de pico e as menores vazões em período de estiagem. Essas mudanças provavelmente estão associadas ao aumento das lavouras de arroz irrigado, desmatamento e aumento dos usos urbanos nestes anos. Essa mudança no ciclo hidrológico da bacia é uma importante constatação para o gerenciamento dos recursos hídricos, uma vez que permite observar as práticas que tendem a diminuir a disponibilidade hídrica na bacia.

Figura 1 - Gráfico de probabilidade de excedência para vazão diária por um período de 10 anos nos cenários de uso do solo.



Fonte: Blainski *et al.* (2017).

3.2 MODELOS HIDROLÓGICOS

O modelo hidrológico é uma ferramenta extremamente útil que permite, através de um conjunto de equações físicas e matemáticas dos processos, representar, entender e simular o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica (TUCCI; COLLISCHONN, 2003).

Para Cadier *et al.* (1987) a modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico, e conseqüentemente, sobre a precipitação, a

interceptação, a evapotranspiração, a infiltração e o escoamento superficial. Todos esses processos são representáveis através de métodos matemáticos. Chow, Maidment e Mays (1988) classificaram os modelos hidrológicos (Figura 2) em três grandes áreas que levam em consideração os seguintes aspectos: aleatoriedade, variação espacial e variação temporal.

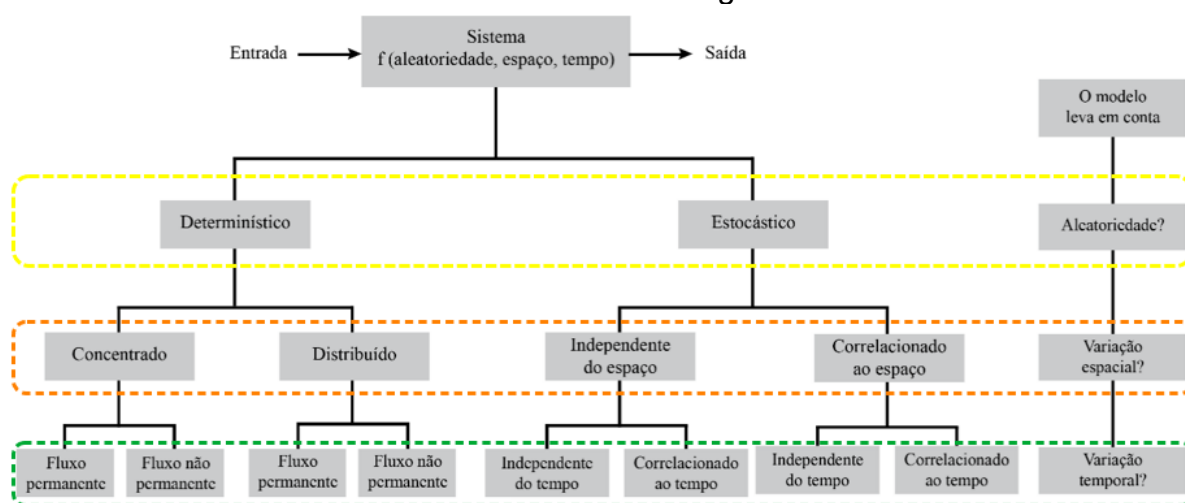
Um modelo determinístico não considera a aleatoriedade, sendo que uma dada entrada de dados produz sempre uma mesma saída (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988). Já o modelo estocástico tem saídas que são pelo menos parcialmente aleatórias. Um modelo estocástico não busca replicar um fenômeno, mas sim representar fenômenos que são estatisticamente possíveis e que ocorrem, pelo menos em parte, de maneira aleatória. Por isso, modelos estocásticos utilizam teorias de probabilidade e estatística para descrever tais fenômenos (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Um modelo pode gerar diferentes sequências de vazões (resultados) para cada simulação realizada, mesmo que os parâmetros iniciais e a vazão inicial não sejam alterados. Ainda, este modelo não pode, nem consegue, replicar a série histórica de vazão utilizada como base para o modelo. Isso ocorre quando ao menos uma das variáveis do modelo tem comportamento aleatório. Já para modelos determinísticos, os resultados são os mesmos, uma vez determinados os parâmetros iniciais. Entretanto, é possível que se obtenha amostras diferentes com mesmos parâmetros de entrada, gerando resultados randômicos (THOMPSON, 2017).

No nível médio do fluxograma, é apresentado o tratamento que um modelo hidrológico pode dar, em relação à variação espacial dos fenômenos. No modelo determinístico agregado (ou pontual), considera-se que as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada, e trata-se de uma média de ou de um ponto único sem dimensões. Por outro lado, os modelos distribuídos consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo (RENNÓ, 2003). Os modelos estocásticos se classificam em independentes ou correlacionados no espaço, de acordo com a influência que as variáveis aleatórias tenham entre elas em diferentes pontos do espaço (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

No terceiro nível do fluxograma apresentado na Figura 2 é considerada a variabilidade temporal. Os modelos determinísticos se classificam em modelos de fluxo permanente (onde a taxa de fluxo não muda com o tempo) e modelos de fluxo

não permanente. Os modelos estocásticos sempre têm saídas variáveis com o tempo. Estas se classificam como independentes do tempo ou correlacionados ao tempo. Um modelo independente do tempo representa uma sequência de eventos hidrológicos que não sofrem influências entre si, enquanto um modelo correlacionado ao tempo representa uma sequência na qual o evento seguinte sofre uma influência parcial do evento anterior e possivelmente por outros (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988).

Figura 2 - Classificação de modelos hidrológicos de acordo com as características dos fenômenos hidrológicos.



Fonte: Adaptado de CHOW; MAIDMENT; MAYS (1988).

Segundo De Paiva (2001), os modelos empíricos utilizam relações matemáticas baseadas em observações, sendo mais simples e pouco robustos, uma vez que são concebidos a partir de uma condição específica. Já segundo Rennó (2003) os modelos conceituais ou físicos, baseados em processos, são mais complexos que os empíricos e procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado. Têm, portanto, um âmbito de aplicação mais generalizado porque é possível estimar seus parâmetros para uma determinada bacia hidrográfica sem dados medidos. Ainda, permite avaliar mudanças das características das bacias através da alteração dos valores dos parâmetros, os quais podem ser avaliados através de medidas de campo (TUCCI, 2012).

Atualmente, existem diversos modelos hidrológicos, com diferentes características e fundamentações, utilizados para a estimativa de escoamento superficial em bacias hidrográficas, como o TOPMODEL, o HEC-HMS, e o SWAT.

Segundo Beven e Kirkby (1979) o TOPMODEL (*TOPographic based hydrological MODEL*) é um modelo matemático, conceitual, dinâmico e determinístico. Foi desenvolvido para bacias úmidas temperadas, tentando combinar as vantagens dos parâmetros de modelos concentrados, com os efeitos distribuídos de áreas variáveis de contribuição e escoamentos através da rede de drenagem, enquanto mantém a possibilidade de obter parâmetros diretamente através de medidas de campo na bacia em estudo.

Seu principal conceito é o déficit de armazenamento que é função de um índice de similaridade hidrológica. Este índice, chamado de índice topográfico, leva em consideração a topografia da bacia. É denominado semi-distribuído, pois somente o índice topográfico é considerado variável no espaço (KOBAYAMA; SILVA, 2007). De acordo com Franchini *et al.* (1996), o TOPMODEL é um modelo conceitual de área de contribuição variável em que os principais fatores determinantes na geração de escoamento são a topografia da bacia e uma lei exponencial negativa que relaciona a transmissividade do solo com a distância à camada impermeável. Embora conceitual, esse modelo pode ser descrito muitas vezes como 'físico' visto que seus parâmetros podem ser medidos diretamente *in situ*.

O modelo HEC-HMS (*Hydrological Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) é um modelo matemático, concentrado, empírico/conceitual e determinístico, desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos. Este modelo foi desenvolvido com objetivo de simular o processo de chuva-vazão em bacias hidrográficas rurais e urbanas (USACE, 2018). O modelo gera hidrogramas e informações referentes ao volume de deflúvio, vazão de pico e tempo de escoamento, com base nas simulações dos processos hidrológicos outros. Uma de suas vantagens é a utilização de poucos parâmetros de calibração e a combinação de vários métodos para representar os processos hidrológicos (USACE, 2018).

O HEC-HMS configura a bacia hidrográfica nos seguintes elementos hidrológicos: sub-bacia, que é uma representação física da bacia hidrográfica; trecho, que corresponde a um trecho de canal que conduz as vazões a jusante ao longo da bacia; junção, que corresponde a um nó, ou encontro de cursos d'água; fonte, utilizada para inserir vazão em um ponto do sistema; sumidouro, utilizado para retirar águas da

bacia; reservatório, para representar estruturas de reservatório; e derivação, para representar a retirada de água do canal. Os dados de entrada do modelo são função do método de cálculo escolhido dentre os disponíveis no modelo. Entretanto alguns dados requeridos pelo modelo são a área da bacia, seu percentual impermeável, o tempo de resposta, o comprimento do rio principal e a declividade (USACE, 2018).

3.3 MODELOS HIDRÁULICOS

O modelo hidrodinâmico Hydrological Engineering Center - River Analysis System (HEC-RAS), também desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos, é uma ferramenta de auxílio para: o gerenciamento e a delimitação da área de inundação de rios; análise de alterações de perfil de água inerentes às mudanças de geometria de canal; análise do transporte de sedimentos e de efeito das estruturas hidráulicas como bueiros, pontes. O modelo pode ser empregado em uma rede de canais naturais ou artificiais, sistemas dendríticos ou mesmo em um único rio (USACE, 2018). O modelo se baseia na resolução das equações de Saint-Venant uni ou bidimensionais, considerando regimes permanentes ou não permanentes.

Tem como entrada os dados geométricos das seções dos rios que compõem a bacia, dados sobre o escoamento, o controle de especificações do intervalo de tempo simulado, valores de coeficiente de Manning, entre outros. É possível ainda, adicionar dados de entrada especializados como, mapas de uso e cobertura do solo e informações do leito do canal (forma e material) para o software estimar o número de *manning* e simular o escoamento, declividade do canal. É uma ferramenta de auxílio para o gerenciamento e a delimitação da área de inundação de rios; análise de alterações de perfil de água inerentes às mudanças de geometria de canal; análise do transporte de sedimentos e de efeito das estruturas hidráulicas como bueiros, pontes (USACE, 2016).

A partir deste software podemos realizar análises envolvendo Escoamento Permanente, Não Permanente, Análise da qualidade da água e Movimento de Sedimentos, o que permite ao usuário obter informações bastante precisas em cada tipo de simulação. É amplamente utilizado para a simulação de hidrogramas de cheia, possibilitando a análise da vazão de pico e volume do hidrograma. É possível realizar

análises de manchas de inundações e inserir diferentes elementos hidráulicos, como bueiros, áreas de drenagem, pontos de deságue entre outros (ANA, 2018).

Como discutido, o modelo HEC-HMS é utilizado para modelagem hidrológica (chuva-vazão), já o modelo HEC-RAS consiste em modelo hidráulico e hidrológico. Alguns estudos como Koutroulis e Tsanis (2010) aplicam os dois modelos em conjunto para simular o pico de determinada inundação, utilizando o HEC-HMS para determinar a vazão e o HEC-RAS para determinar a propagação da onda de cheia no canal.

3.4 O MODELO SWAT - SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL

O modelo SWAT, acrônimo de *Soil and Water Assessment Tool*, foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) em parceria com a Universidade Texas A&M. O modelo foi criado no início da década de 1990 através da composição de alguns modelos, em especial SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*) e ROTO (*Routing Outputs to Outlet*). O SWAT é um modelo matemático de parâmetros semi-distribuídos desenvolvido com a finalidade de prever o impacto de práticas de manejo do solo em relação à água, sedimento e produção química agrícola em bacias hidrográficas complexas não instrumentadas. Por se tratar de um modelo físico requer dados de entrada como informações sobre o clima, propriedades do solo, topografia, vegetação e práticas de gerenciamento do uso e cobertura do solo. É um modelo contínuo que permite a simulação de longos períodos de tempo, não idealizado para simular eventos de curta duração, como cheias pontuais (NEITSCH *et al.*, 2011a).

Os modelos semi-distribuídos, como o SWAT, têm como vantagem o seu potencial de realizar simulações mais precisas do processo de escoamento superficial, muito influenciado pela inserção das variações espaciais das principais características da bacia, como clima, solo, vegetação e topografia (WIGMOSTA; VAIL; LETTENMAIER, 1994).

O SWAT permite a simulação de um número variado de processos físicos em uma bacia hidrográfica, que é dividida em sub bacias para melhorar os resultados da simulação. Os dados de entrada são ordenados nas seguintes categorias para cada sub bacia: clima, Unidades de Resposta Hidrológica (URH), áreas alagáveis, águas subterrâneas e canal de drenagem (NEITSCH *et al.*, 2011a). As URHs são áreas agrupadas dentro de uma mesma sub bacia com comportamento hidrológico homogêneo que apresentam as mesmas características de uso e ocupação do solo, tipo de solo, topografia e geologia (FLUEGEL, 1995). É possível ainda inserir reservatórios na simulação do escoamento superficial em bacias, sendo que o balanço hídrico dos reservatórios inclui, vazão, precipitação na superfície, evaporação e infiltração do fundo do reservatório (NEITSCH *et al.*, 2011a).

No SWAT, o escoamento superficial é calculado com base no escoamento em cada sub-bacia, e, em seguida, através dos canais. Uma versão modificada do método

SCS-CN (curva número) é usada para simular escoamento superficial, enquanto a Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) é usada para do cálculo da erosão e produção de sedimentos (ARNOLD *et al.*, 2012a).

A grande aplicabilidade do modelo caracteriza-o de certa forma como uma ferramenta flexível e aceita pela comunidade científica, podendo ser utilizado para simular uma variedade de situações em bacias hidrográficas. O processo de configuração do SWAT para uma determinada bacia é facilitado pelo desenvolvimento da interface GIS, a qual fornece um meio mais simples de tradução dos dados existentes em um Modelo Numérico do Terreno e mapas de uso e tipo do solo, por exemplo (GASSMAN *et al.*, 2007; TAN *et al.*, 2020).

3.4.1 Simulação da hidrologia da bacia hidrográfica

O balanço hídrico é a base de todas as estimativas do modelo, sendo dividido em duas fases principais: a fase terrestre do ciclo hidrológico e a fase de propagação no canal (FRANCO; BONUMÁ, 2017).

- Ciclo hidrológico terrestre

A fase terrestre do ciclo hidrológico controla a quantidade de água, sedimento, nutriente e descarga de pesticidas no canal principal de cada sub-bacia. Fundamenta-se na equação do balanço hídrico:

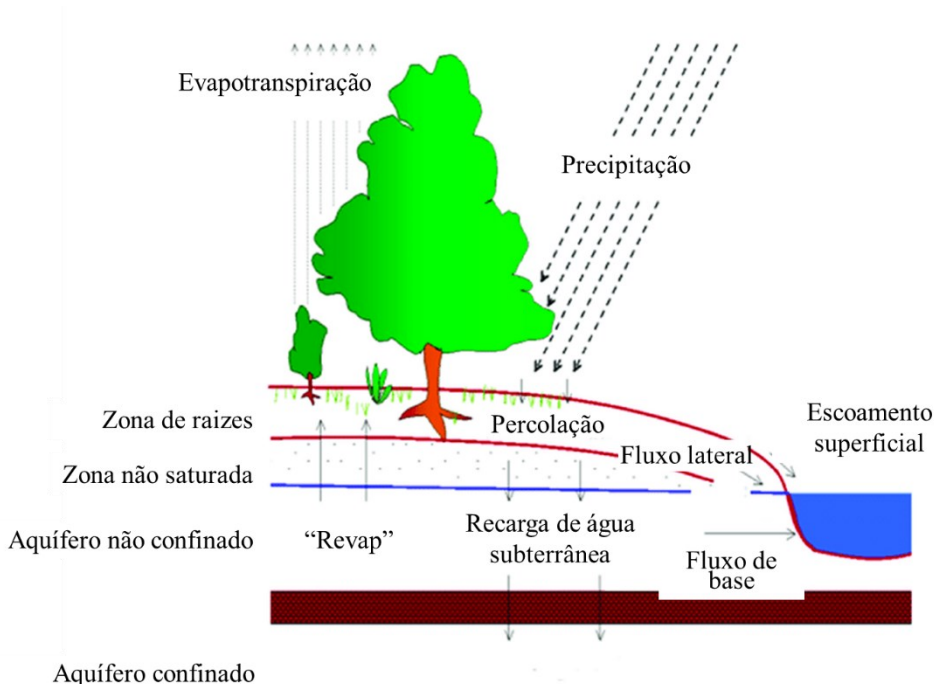
$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad \text{Eq. (1)}$$

onde SW_t é o conteúdo de água no solo, no tempo final t , em mm de água; t é o tempo, em dias; SW_0 é o conteúdo de água inicial, no dia i ; R_{day} , Q_{surf} , E_a , w_{seep} e Q_{gw} são as quantias diárias de precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, percolação e fluxo de base, respectivamente, em mm dia^{-1} .

São simulados os seguintes processos hidrológicos: interceptação, infiltração, redistribuição da água no solo, evapotranspiração, escoamentos subsuperficial e superficial, armazenamento, escoamento em canais principais e tributários e vazão de base (BONUMÁ *et al.*, 2010). A água pode se transportar de um aquífero raso para uma zona não saturada. O modelo SWAT transforma o deslocamento da água em camadas sobrepostas não saturadas, como uma função da demanda hídrica para evapotranspiração. Para evitar confusão entre a evaporação do solo e a transpiração,

este processo foi nomeado como “*revap*” (NEITSCH *et al.*, 2011a). A Figura 3 apresenta a representação esquemática da simulação hidrológica realizada pelo SWAT da fase terrestre.

Figura 3 – Representação esquemática do ciclo hidrológico adaptado do modelo SWAT.



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

No SWAT, a precipitação pode ser interceptada pelas copas das árvores ou chegar ao solo, onde pode infiltrar ou escoar superficialmente. O escoamento superficial contribui rapidamente para a vazão nos canais de drenagem, enquanto que a infiltração é mantida pelo solo e pode ser liberada pela evapotranspiração, ou percolar (NEITSCH *et al.*, 2011a). O escoamento é estimado de maneira individual para cada URH, sendo propagado para obtenção do escoamento total da bacia (NEITSCH *et al.*, 2011a). A seguir Neitsch *et al.* (2011) apresentam a maneira como os principais fenômenos, discutidos acima, são interpretados pelo SWAT.

Interceptação de copa: A água precipitada é mantida nas copas das árvores e fica disponível para a evaporação. O SWAT permite que o usuário defina os parâmetros de entrada como capacidade máxima de armazenamento das copas e índice de área foliar;

Infiltração: Penetração da água no perfil do solo com uma taxa de infiltração que diminui à medida que o solo absorve água, até atingir o ponto de saturação. Ao optar pelo método do *Curve Number* (CN), o volume de infiltração é estimado como a diferença entre a precipitação e o escoamento superficial. O método Green e Ampt modela a infiltração diretamente, no entanto, requer dados de precipitação subsidiários;

Percolação: fluxo das águas subterrâneas. O SWAT divide as águas subterrâneas em dois sistemas aquíferos: um aquífero raso e confinado que contribui para o fluxo de retorno aos córregos dentro da bacia hidrográfica e um aquífero confinado e profundo que contribui para o fluxo de retorno para córregos fora da bacia (ARNOLD; ALLEN; BERNHARDT, 1993).

Escoamento superficial: Usando quantidades diárias ou subdivididas de chuva, o SWAT simula volumes de escoamento superficial e taxas de pico de escoamento para cada URH.

Evapotranspiração: O modelo calcula a evaporação de solos e plantas separadamente. A evaporação potencial da água no solo é estimada em função da evapotranspiração potencial e do índice de área foliar (área de folhas da planta em relação à área da URH).

As variáveis climáticas requisitadas pelo SWAT incluem precipitação, temperatura mínima e máxima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. Estas variáveis podem ser inseridas como dados de entrada ou geradas durante a simulação, pelo gerador climático do modelo. O gerador climático do SWAT pode ser construído pelo usuário a partir de séries históricas de dados meteorológicos (NEITSCH *et al.*, 2011a).

- Propagação no canal

A segunda divisão é a fase de propagação no canal, que pode ser definida como a movimentação da água, sedimentos, etc. pela rede de canais da bacia hidrográfica. Na fase de propagação do canal do ciclo hidrológico o SWAT determina as cargas de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas no canal principal. As cargas são provenientes da rede de canais gerados na bacia usando uma estrutura similar ao HYMO (linguagem precisa, simples e prática desenvolvida por Williams e Hann

(1978) usualmente utilizada na modelagem hidrológica para transformar precipitação em escoamento e nos canais de drenagem) (NEITSCH *et al.*, 2011a).

3.4.2 Análise de sensibilidade e calibração

A análise de sensibilidade é uma importante ferramenta na modelagem hidrológica, sendo um instrumento fundamental para a previsão dos parâmetros que possuem maior impacto sobre as simulações hidrológicas, sedimentológicas e de qualidade da água. A análise de sensibilidade é uma etapa fundamental na compreensão da influência dos parâmetros no comportamento do modelo e tem o papel de diminuir o número de parâmetros a serem alterados quando o processo de calibração é necessário (VAN GRIENSVEN *et al.*, 2012).

Geralmente são realizados dois tipos de análise de sensibilidade: a análise local, onde os valores são alterados um de cada vez, e a análise global, que permite que todos os valores dos parâmetros sejam alterados. As duas análises, no entanto, podem produzir resultados diferentes. A sensibilidade de um parâmetro geralmente depende do valor de outros relacionados, assim, a análise local apresenta a desvantagem de não reconhecer os valores corretos de outros parâmetros, por eles estarem fixos. Já a análise de sensibilidade global necessita de inúmeras simulações. No entanto, ambas análises fornecem informações sobre a sensibilidade dos parâmetros e são etapas necessárias na calibração dos modelos (ARNOLD *et al.*, 2012a).

O método usado depende da complexidade da bacia, do modelo usado, do número de parâmetros abordados, dos objetivos do projeto, da experiência e da preferência do usuário. Os métodos variam de manual iterativo, manuais combinadas com interativos e totalmente automatizado (ARNOLD *et al.*, 2012a). O uso de ambas as técnicas, local e global, combina seus pontos fortes e pode facilitar o processo de calibração (W. VAN LIEW; G. ARNOLD; D. BOSCH, 2005).

Não existe um método de calibração absoluto; muitos métodos têm sido usados e discutido na literatura (BILONDI; ABBASPOUR; GHARAMAN, 2013).

O algoritmo SUFI-2 (*Sequential Uncertainty Fltting Version 2*) é o mais utilizado para a calibração automática do modelo SWAT. O algoritmo considera todas as fontes ao analisar a incerteza, como incerteza em variáveis de entrada, nos

modelos conceituais e incerteza em parâmetros e dados de medição. O grau em que toda incerteza é considerada é quantificada por uma medida chamada fator-P, que é a porcentagem de dados medidos limitada pela incerteza de previsão de 95% (SANTOS, 2015).

O SUFI-2 começa assumindo uma grande faixa de incerteza para os parâmetros, sendo diminuída com a iteração do algoritmo, que monitora os fatores de qualidade dos parâmetros e os atualiza a cada passo, utilizando-se de uma matriz de sensibilidade, matriz de covariância e de correlação (ABBASPOUR, 2013).

A integração do algoritmo SUFI-2 no modelo SWAT pode ser realizada a partir da utilização do software de domínio público SWAT- Calibration and Uncertainty Programs (SWAT CUP), desenvolvido por (ABBASPOUR *et al.*, 2007).

No SUFI-2 a incerteza nos parâmetros, expressa em intervalos (distribuições uniformes), é responsável por todas as fontes de incerteza, tais como incerteza nas variáveis de condução (por exemplo, precipitação), modelo conceitual, parâmetros, e dados medidos. A propagação das incertezas nos parâmetros conduz a incertezas nas variáveis de saída do modelo, que são expressas como as distribuições de probabilidade de 95%. Estas são calculadas aos níveis 2,5% e 97,5% da distribuição cumulativa de uma variável de saída gerada pela propagação das incertezas dos parâmetros, utilizando a amostragem do hipercubo latino. Isto é referido como a incerteza de predição de 95%, ou 95PPU. Estas 95PPU são os modelos de saída numa abordagem de calibração estocástica. É importante perceber que não temos um único sinal representando a saída do modelo, mas sim um envelope de boas soluções expressas pela 95PPU, geradas por certas gamas de parâmetros (ABBASPOUR, 2013).

O r-fator expressa a magnitude do intervalo de valores simulados pela razão entre as distâncias médias dos percentis 2,5 e 97,5 e o desvio padrão médio dos dados observados. Uma simulação perfeita teria 1,0 como p-fator e 0 como r-fator. A calibração pode ser considerada adequada para valores do p-fator maiores que 0,70 e valores do r-fator menores que 1,5 (ABBASPOUR, 2015). O SWAT-CUP também permite que a análise de sensibilidade seja realizada para ajudar a definir os parâmetros a serem calibrados. O SUFI-2 estima a sensibilidade dos parâmetros por análise de regressão múltipla e fornece dois valores para análise: t-stat e *p-value*. O

t-stat corresponde ao coeficiente do parâmetro dividido pelo seu desvio padrão e avalia a significância relativa de cada parâmetro. Quanto maior o valor absoluto de tStat, mais sensível é o parâmetro. O *p-value* testa a hipótese nula (H_0) de que os coeficientes são zero. Um *p-value* menor que 0,05 indica que a hipótese nula pode ser rejeitada e o parâmetro pode ser considerado sensível com intervalo de confiança de 95% (ABBASPOUR, 2015).

Duas métricas muito utilizadas para determinar os ajustes SWAT são: o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e o viés percentual (Pbias) (GUPTA *et al.*, 1999). Ao usar essas métricas, os ajustes para tráfego intenso e amostras geralmente superestimadas ou subestimadas podem ser determinados. O fluxo simulado em relação ao fluxo observado também é analisado graficamente. Para um ajuste perfeito dos dados simulados e observados, o valor de NSE deve ser igual a 1, o que quando o resultado for ≤ 0 significa que utilizar a média dos dados observados é melhor do que a simulação realizada. Algumas razões para usar este indicador são: é altamente recomendado pela American Society of Civil Engineers (ASCE); é comumente usado (é o indicador estatístico mais utilizado entre os usuários da SWAT), fornece mais informações sobre seu valor; e pesquisas mostram que NSE é a melhor função objetivo para se ajustar à linha d'água. O Percent bias (Pbias) avalia a tendência que a média dos valores simulados tem em relação aos observados. O valor ideal do Pbias é 0 (zero), valores positivos indicam uma subestimação do modelo, e valores negativos superestimação (MORIASI *et al.* 2007).

Em geral, a simulação do modelo pode ser considerada satisfatória se $NSE > 0,50$ e se $Pbias \leq + 25\%$ para vazão (MORIASI *et al.* 2007).

No entanto, o NSE não é muito sensível a outliers. Resultados mais confiáveis têm sido obtidos com o uso do coeficiente de Kling-Gupta (KGE) (WANG *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 varia de $-\infty$ a 1, um desempenho acima de 0,75 e 0,5 é considerado bom e intermediário, respectivamente. O valor ideal do coeficiente é 1 (BRIGHENTI *et al.*, 2019).

3.5 APLICAÇÃO DO SWAT

No Brasil, a aplicação do SWAT em bacias hidrográficas brasileiras iniciou em 1999, culminando em 2010 em mais de 70 publicações, entre teses, dissertações e artigos. Em 84% dos estudos modelaram vazão e sedimento, 16% incluíram a modelagem de nutrientes. As bacias hidrográficas modeladas variaram de 8,56 km² a 29.000 km² em média, e utilizam rotinas mensais na simulação, sendo que a grande maioria dos trabalhos não validou o modelo (GARBOSSA *et al.*, 2011). Bressiani *et al.* (2015), em pesquisa sobre os estudos com o SWAT publicados no Brasil entre 1999 e 2013, observou que 20% dos estudos realizados em bacias hidrográficas menores que 15 km², 72% em bacias menores que 1.000 km² e 9% em bacias maiores que 10.000 km².

3.5.1 Bacias com poucos dados medidos

Em áreas remotas, limitações no número e distribuição espacial das estações fluviométricas disponíveis podem afetar o processo de calibração. Algumas opções estão à disposição para estes locais, como a utilização da evapotranspiração por imagens de satélite para a calibração do SWAT, utilizando dados de temperatura, radiação solar, fluxo de calor e propriedades da bacia, obtidas *in-situ* ou nas imagens de satélite.

Franco e Bonumá (2017) avaliaram o uso de evapotranspiração proveniente de sensoriamento remoto na calibração do modelo SWAT, em relação às incertezas e desempenho da simulação de vazão. Diferentes estratégias de calibração foram avaliadas, considerando o uso individual e simultâneo (multivariável) de vazão e da evapotranspiração. Para esta área de estudo existem dados de vazão medidos e estimativas mensais da evapotranspiração. O estudo apresentou uma comparação entre a calibração convencional (somente com dados de vazão) e a calibração multivariável (evapotranspiração + vazão), sendo que esta última apresentou melhor desempenho da simulação de vazão, especialmente para baixas vazões e para validação em escala diária. Entretanto, a calibração multivariável não foi capaz de evidenciar diminuição nas incertezas envolvidas nas estimativas de vazão. As autoras concluíram que a calibração do modelo SWAT utilizando somente dados de evapotranspiração ainda depende da realização de mais estudos.

Além da utilização de evapotranspiração para a modelagem hidrológica em bacias hidrográficas com poucos dados disponíveis, é possível usar dados de bacias semelhantes com dados disponíveis para realizar a modelagem. Normalmente bacias hidrográficas com características semelhantes (por exemplo: solo, topografia, uso do solo, precipitação e temperatura) apresentam tratamentos hidrológicos semelhantes e, portanto, os parâmetros hidrológicos podem ser transferidos entre as mesmas pelo método da regionalização (SISAY *et al.*, 2017).

Sisay *et al.*, (2017) utilizaram um método de regionalização para prever a vazão do rio e o fluxo de pico na bacia localizada na Índia, usando dados de uma bacia semelhante à estudada. O modelo de vazão calibrado no SWAT foi considerado assertivo pelos autores, com R^2 de 0,51 e NSE de 0,61.

Da mesma forma, Jodar-Abellan *et al.*, (2019) utilizaram-se da regionalização de séries de vazão para a obtenção de vazões de outras bacias semelhantes, para a calibração e validação dos modelos de cinco bacias hidrográficas na Espanha. Com a análise de cenários, foi observado o aumento da vazão com o aumento da área urbana nas bacias estudadas.

Oduşanya, Schulz e Mehdi-Schulz (2022) utilizaram uma abordagem de regionalização para avaliar dados de evapotranspiração baseados em imagens de satélite para calibrar a vazão em bacia sem dados medidos. O método de regionalização mostrou que o uso de evapotranspiração baseado em imagens de satélite na calibração do modelo tem um impacto maior no fluxo vertical de água do que o método convencional. Ambas as metodologias foram consideradas satisfatórias para a modelagem da vazão, com métricas NSE = 0,79, R^2 = 0,81 e KGE = 0,85 para o modelo de melhor performance.

Panagopoulos *et al.* (2011) realizaram a parametrização de dados de bacias similares para a realização da modelagem hidrológica e de sedimentos, apresentando uma gama abrangente de dados de saída, adequada para demonstrar a variação temporal e espacial das perdas de nutriente para as águas superficiais, com NSE de vazão de 0,58 para a calibração, 0,51 para a validação, e NSE de sedimentos de 0,39 para a calibração e 0,46 para a validação.

3.5.2 Pequenas bacias

O Quadro 2 apresenta um resumo de alguns estudos realizados em pequenas bacias.

Quadro 2 - Estudos realizados em pequenas bacias

Autor/ano	Local	Área de drenagem (km²)	Tipo de simulação no SWAT	Principal uso do solo	Escala de tempo simulado	Principais resultados/conclusões dos autores.	Calibração e validação. Sim/não
Meurio <i>et al.</i> , 2021	País Basco	4,6	Vazão e sedimentos	Floresta	Horário e diário	Simulação satisfatória para vazão (NSEc = 0,79 e NSEv = 0,65). Simulou bem a quantidade de sedimentos, mas mal o tempo de chegada, de 1 a 2h atrasadas em relação ao observado (NSEc = 0,37 e NSEv = 0,72).	Calibração e validação - SWATCUP
Oliveira <i>et al.</i> , 2020	Aracruz, Espírito Santo	2,84	Vazão	Silvicultura	Vazão diária	Simulação satisfatória. Bons índices de calibração e validação (NSEc = 0,39 e NSEv = 0,74).	Calibração e validação - SWATCUP
Li; DeLiberty, 2020	Christina River - Delaware, EUA	57	Vazão	Urbano	Diário	Bons resultados de calibração e validação (NSEc = 0,69, NSEv = 0,79).	Calibração e validação - SWATCUP
	White Clay Creek Delaware, EUA	31	Vazão	Floresta	Diário	Bons resultados de calibração e validação (NSEc = 0,7, NSEv = 0,66).	
Brighenti <i>et al.</i> , 2019	RB10 e RB11, Santa Catarina	11 e 7	Vazão e sedimentos	Floresta	Diário	Quando KGE foi usado como função objetivo, os resultados foram mais aceitáveis na calibração simultânea (0,75 para vazão e 0,67 para sedimentos), já para NSE, os melhores valores foram na calibração sequencial (0,67 para vazão e 0,57 para sedimentos).	Calibração - SUFI-2
Baucke, Pinheiro e Kaufmann, 2019	Bacia do Ribeirão Concórdia	30,7	Vazão e sedimentos	Floresta	Mensal	O modelo simulou bem as vazões (NSEc = 0,76 e NSEv = 0,78). Para modelagem de sedimentos, obteve NSEc = 0,82 e NSEv = 0,68).	Calibração e validação - SWATCUP
Iensen; Santos, 2017	Rio Saci, Santa Catarina	0,1	Vazão	Rural	Dados diários e sub-diários	Os resultados da simulação sub-diária obtiveram tão boa performance nos testes estatísticos (NSE = 0,70) quanto a simulação diária (NSE = 0,72).	Calibração

Autor/ano	Local	Área de drenagem (km²)	Tipo de simulação no SWAT	Principal uso do solo	Escala de tempo simulado	Principais resultados/conclusões dos autores.	Calibração e validação. Sim/não
Neto <i>et al.</i> , 2017	Bacia Experimental em Iguatu, Ceará	14,74	Vazão e sedimentos	Misto	Diário	A redução da cobertura vegetal e expansão de áreas antrópicas com maior impermeabilidade do solo, além de desencadear maiores riscos de inundações na bacia hidrográfica, podem gerar diversos outros problemas ambientais, sociais e econômicos.	Calibração e validação - SWATCUP
Andrade, De Mello; Beskow, 2013	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara, Minas Gerais	32	Vazão	Rural	Diários	Nash-Sutcliffe muito bons conforme classificação de Santhi <i>et al.</i> (2001) – NSEc = 0,66 e NSEv = 0,87.	Calibração e validação
Bonumá, Rossi e Arnold, 2013	Bacia do Arroio Lino, Rio Grande do Sul	4,8	Vazão	Rural	Diário e mensal	Ótimos valores de NSE para a simulação mensal (NSEc = 0,87 e NSEv = 0,76). A simulação diária não captou os picos de vazão (NSEc = 0,56 e NSEv = 0,20).	Calibração e validação - AUTO CALIBRAÇÃO
Lelis <i>et al.</i> , 2012	Bacia Hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu	54,22	Vazão e sedimentos	Pastagem	Não informado	Valores de calibração de 0,808 para a produção de sedimentos e de 0,997 para a vazão. 0,63 para os sedimentos e de 0,85 para o escoamento para validação (NSE).	Calibração e validação
Uzeika <i>et al.</i> , 2012	Arvorezinha, RS	1,19	Vazão e sedimentos	Rural	Diário e mensal	Verificou-se que o escoamento superficial e o total, para a escala de tempo diária, foram considerados insatisfatórios (valores de NSE < 0,5). Já as mesmas simulações para as escalas mensal e anual apresentaram resultados sensivelmente melhores. Para sedimentos as simulações foram insatisfatórias.	Calibração e validação

Autor/ano	Local	Área de drenagem (km ²)	Tipo de simulação no SWAT	Principal uso do solo	Escala de tempo simulado	Principais resultados/conclusões dos autores.	Calibração e validação. Sim/não
Venzon, Pinheiro e Kaufmann (2018)	ribeirão Concórdia	30,74	Vazão	Misto	diário	A discretização das URH mostrou que não há necessidade de discriminar as sub-bacias quando o objetivo é representar os picos de vazão em uma pequena bacia. No entanto, se o objetivo é verificar os fluxos de base, o número de UAR é fundamental para uma boa representação dos processos hidrológicos	Calibração e validação

Fonte: Elaboração própria

Legenda: NSEc: eficiência de Nash-Sutcliffe da calibração; NSEv eficiência de Nash-Sutcliffe da validação; SWAT CUP: *Soil and Water Assessment Tool* Calibration and Uncertainty Programs; SUFI-2: *Sequential Uncertainty Fitting Version 2*

Como observado no Quadro 2, o modelo SWAT é amplamente utilizado em estudos para modelagem de vazão em sedimentos em bacias hidrográficas. Dentro dos estudos apresentados no quadro, a maioria realizou a calibração e validação dos dados, e entre eles, o SWAT CUP foi o método mais utilizado.

Entre os estudos apresentados no quadro, a maior parcela apresentou bacias rurais e florestais para a modelagem. Também pode ser visualizado que a maior parte dos estudos utilizou dados diários para a realização dos estudos de modelagem.

Além disso, a maioria dos estudos do Quadro 2 tem como principal objetivo a obtenção da série de vazão. Foi visualizado também, que as bacias que apresentaram bons resultados proporcionavam dados suficientes para a calibração e validação.

Entre os estudos do Quadro 2 que também trabalharam com a simulação de cenários, foi possível visualizar um aumento da vazão de pico e das possibilidades de enchente com o a substituição das áreas naturais por áreas urbanas.

4 METODOLOGIA

A Figura 4 exibe a estrutura geral desta pesquisa, através de um fluxograma contendo os passos metodológicos realizados neste trabalho.

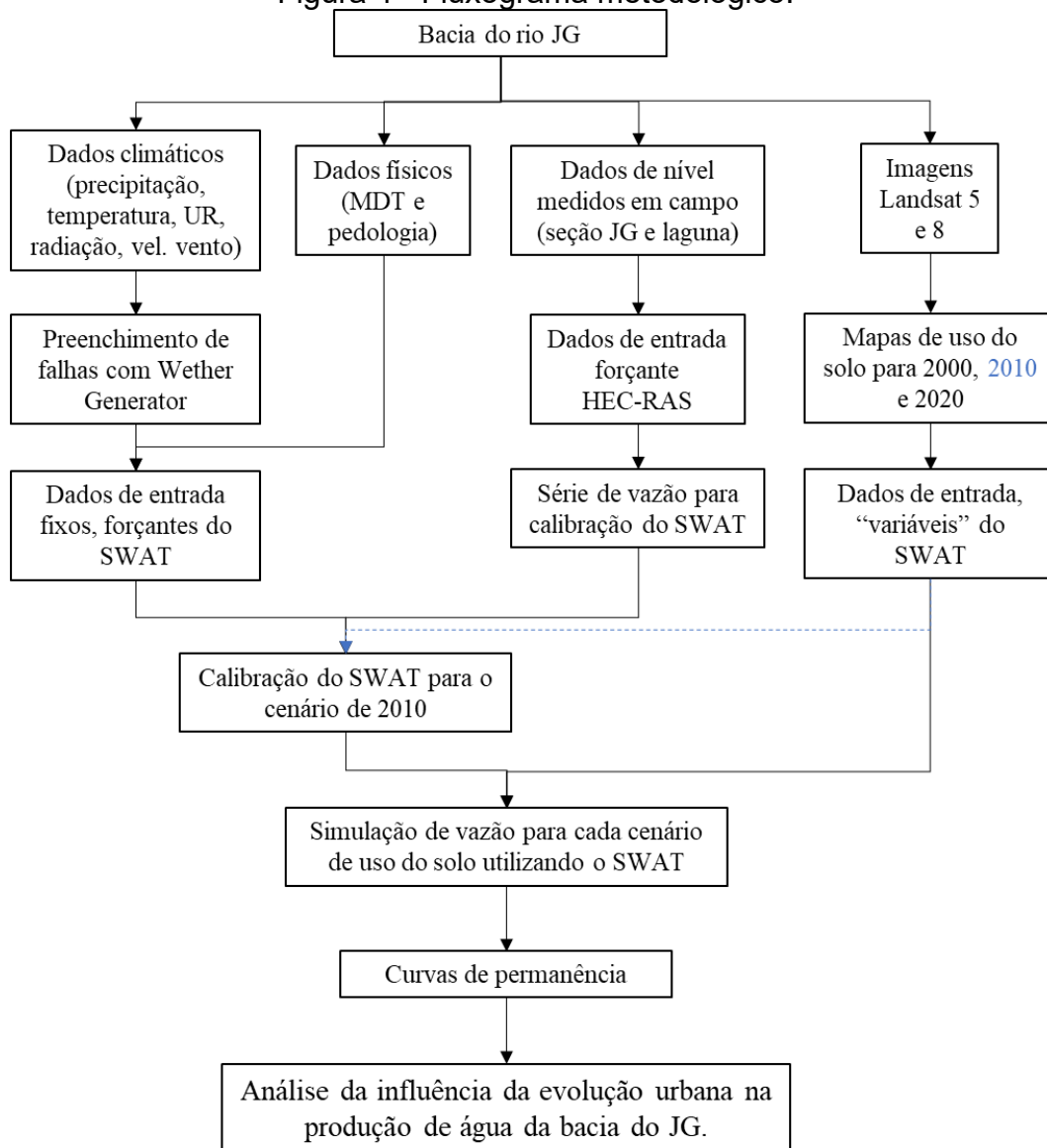
Primeiramente é apresentada uma breve descrição sobre a área de estudo, como sua localização e características fisiográficas, principais características climáticas, como dados históricos de temperatura, precipitação e radiação solar.

Os dados de entrada para o modelo SWAT foram divididos em duas categorias: fixos e variáveis. Os dados fixos são as forçantes do modelo, que correspondem aos dados climatológicos (1997 a 2020) como: precipitação diária, radiação solar, temperatura do ar mínima, máxima, média e velocidade média do vento; assim como os dados físicos da bacia, que compreendem: o Modelo Digital de Terreno (MDT) e o mapa de solos. O *Weather Generator* foi utilizado para preenchimento de falhas nos dados climatológicos. Os dados considerados como “variáveis” na modelagem são os mapas de uso e cobertura do solo da bacia do rio João Gualberto, referente aos anos de 2000, 2010 e 2020, gerados a partir de imagens Landsat 5 e 8, com 30 metros de resolução espacial. Foram utilizados os mesmos períodos de dados climatológicos na simulação do escoamento para os 3 diferentes cenários de uso e ocupação do solo.

Para realizar a calibração do SWAT foi utilizada uma série de vazão contínua, em escala diária, modelada a partir dos dados de nível monitorados em campo. Para a bacia do rio João Gualberto, há dados de nível, monitorados em campo de forma intercalada entre os anos de 2011 e 2013. No ponto onde foram feitos estes registros, há a influência de remanso, ocasionado pela baixa cota do ponto de monitoramento, pela baixa declividade do canal e pela influência dos efeitos da oscilação dos níveis da laguna. Assim, para entrar com os dados de vazão no SWAT foi utilizado o software HEC-RAS, que a partir dos níveis de montante e jusante de um canal, gera uma série de vazão corrigida do efeito do remanso.

A calibração do SWAT foi feita através do uso do SWAT-CUP, utilizando o mapa de uso e ocupação de 2010. Uma vez calibrado o SWAT, foi possível simular o escoamento superficial da bacia, para os cenários de uso e ocupação do solo dos anos de 2000, 2010 e 2020. A partir disso, foi possível avaliar a influência da evolução urbana no escoamento superficial da área de estudo por meio das curvas de permanência.

Figura 4 - Fluxograma metodológico.



Fonte: O autor.

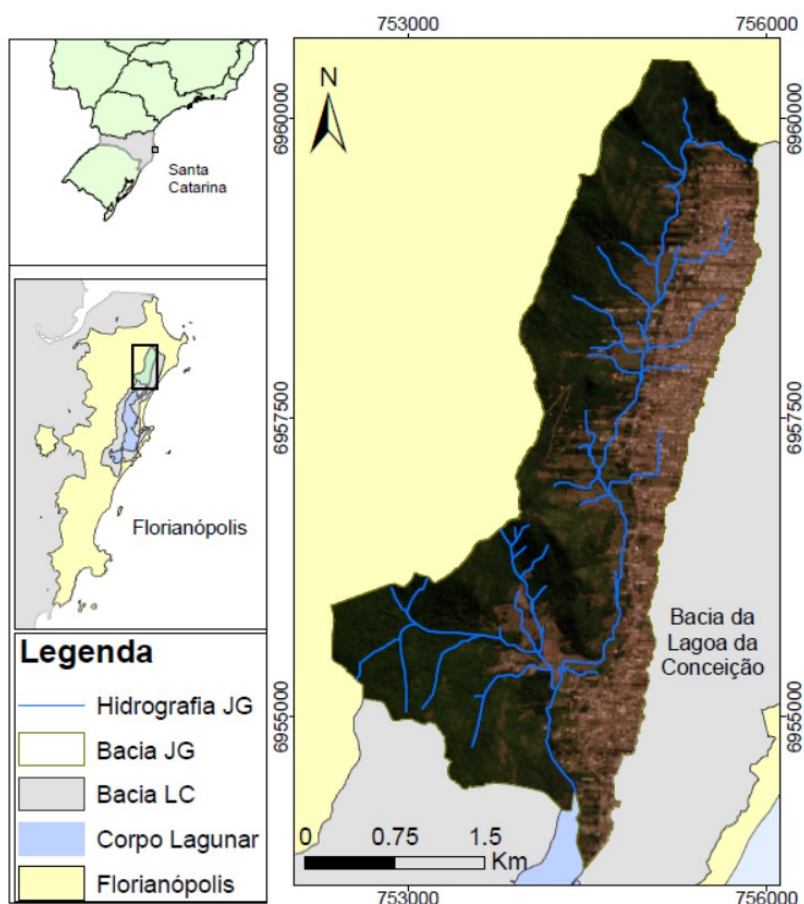
Legenda: JG: João Gualberto; MDT: Modelo Digital de Terreno; HEC-HAS: Hydrological Engineering Center - River Analysis System; SWAT: Soil and Water Assessment Tool

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a sub-bacia hidrográfica do Rio João Gualberto (9,9 km²), localizada na porção norte da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, em Florianópolis/SC. A Lagoa da Conceição é uma laguna que se estende em sentido Norte-Sul, logo atrás de depósitos arenosos, com um comprimento total de 13,5 km, largura entre 2,5 e 0,5 km e área líquida total de aproximadamente 20 km² (KERN,

2019; SILVA, 2021). A Figura 5 mostra a localização da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, e da sub-bacia do João Gualberto.

Figura 5- Mapa de localização da área de estudo e da Bacia da Lagoa da Conceição



Fonte: O autor.

Legenda: JG: João Gualberto; LC: Lagoa da Conceição

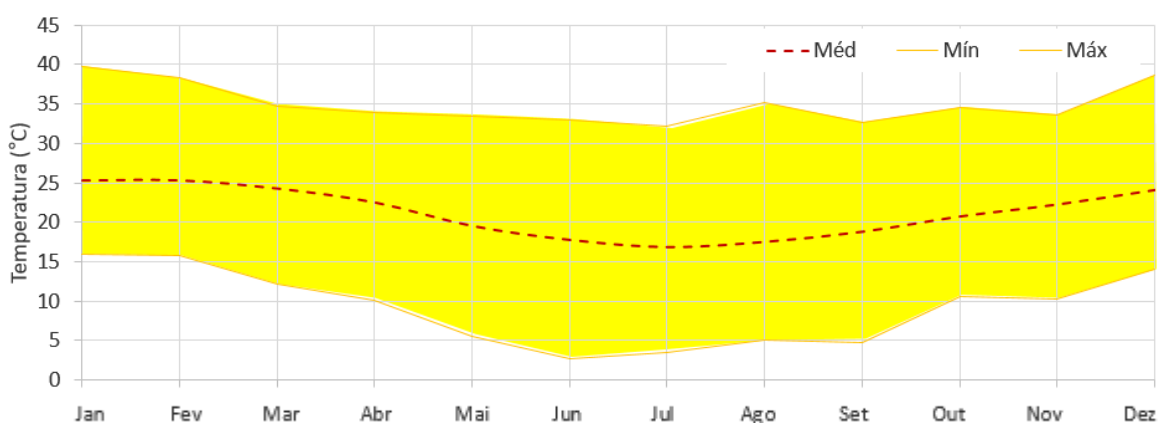
Os aportes de água doce à Lagoa da Conceição são realizados por 60 corpos hídricos, sendo o Rio João Gualberto Soares seu maior contribuinte (BIER, 2013). A laguna funciona como um ambiente de interface entre a água doce da descarga fluvial e o mar adjacente. A complexidade ecológica, a alta produtividade biológica e a importância econômica das atividades pesqueiras, esportivas e do turismo na região, bem como o conhecimento existente sobre o ambiente e sua biota desde o final do século XIX (DA SILVA et al., 1996; ODEBRECHT; CARUSO GOMES JR., 1999; PORTO FILHO, 1993; SIERRA DE LEDO; GRÉ; SORIANO-SIERRA, 1999). As sub-bacias da região norte (rio João Gualberto e rio Vermelho) são de grande importância

para a Lagoa da Conceição, sendo responsáveis por cerca de 24% da contribuição hidrológica descarregada na laguna após um evento de chuva, além de corresponderem a aproximadamente 35% da área total da Bacia (BIER, 2013). O rio João Gualberto (JG) estende-se por 7,9 km, e sua vazão caracteriza-se como o principal aporte de água doce à laguna, e sua bacia abrange 18% da área total da bacia da Lagoa da Conceição. A sub-bacia do JG possui largura média de 1,4 km, muito inferior ao comprimento do seu rio principal, além de um comprimento axial de 6,8 km, indicando uma morfometria alongada. O comprimento total de cursos d'água na bacia é de 21,5 km, conferindo em uma densidade de drenagem de 2,2 km/km², caracterizando a bacia como bem drenada.

4.1.1 Características climáticas

O clima de Florianópolis é classificado como subtropical úmido, segundo a classificação de Köppen, ou Cfa. A Figura 6 apresenta variação das temperaturas máximas, médias e mínimas para os anos entre 1997 e 2020. As temperaturas médias para os meses de verão ficam em torno de 25°C, e, para os meses de inverno ficam em torno de 17°C. Como valores extremos observou-se máxima absoluta de 39,7°C e mínima absoluta de 2,7°C.

Figura 6 - Temperatura média, máxima e mínima entre os anos de 1997 e 2020

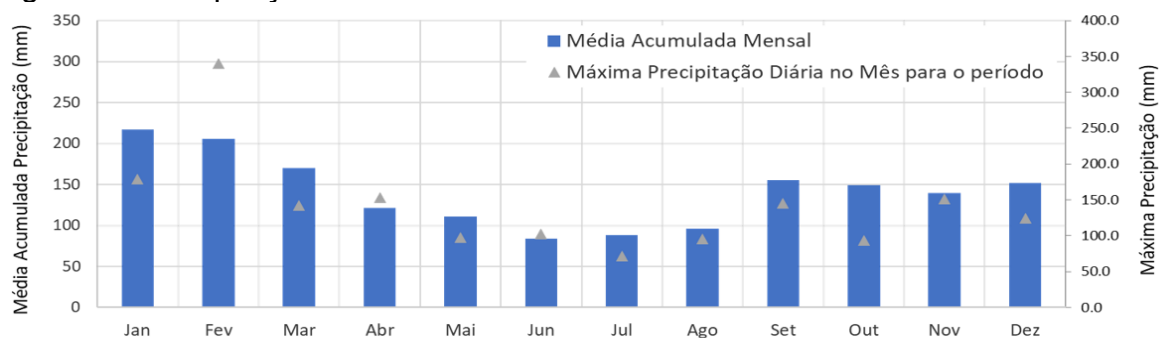


Fonte: O autor.

A precipitação varia sazonalmente, com a característica de diminuir durante os meses de inverno, com acumulados mensais inferiores a 100 mm, e com os maiores índices pluviométricos nos meses de janeiro e fevereiro, com média acumulada superior a 200 mm entre os anos de 1997 e 2000, como apresentado na

Figura 7. Observa-se que os meses de dezembro a março são os mais quentes e chuvosos.

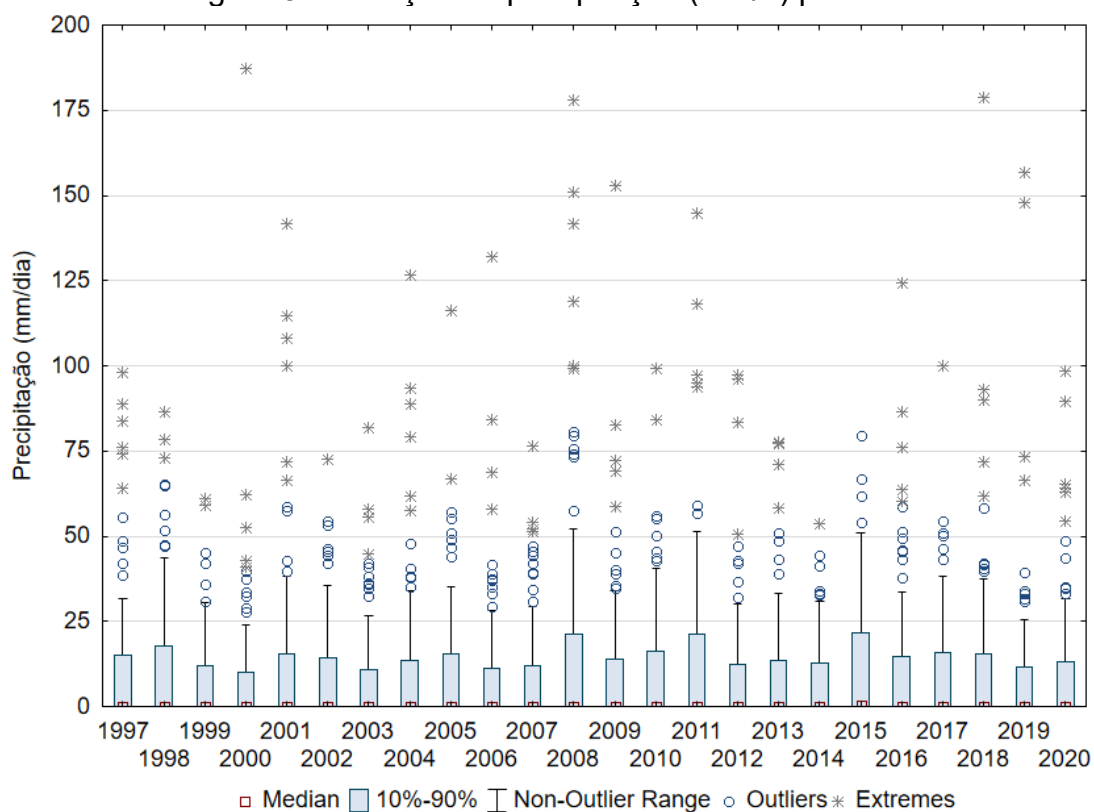
Figura 7 - Precipitação média acumulada e máxima diária no mês entre 1997 - 2020



Fonte: O autor.

A Figura 8 apresenta o gráfico *Box Plot* das precipitações (mm/dia) agrupadas por ano. O gráfico apresenta a mediana e o valor mínimo e máximo medido em cada ano. Observa-se que o regime pluvial da região sofre uma variação gradual, que se repete ao longo dos anos. Os pontos em circunferência representam os *outliers* sendo estes os pontos que estão a mais de três faixas interquartis da extremidade da caixa, definidos através de 1,5 IQR (Intervalo Interquartil). A caixa representa 90% dos valores observados. Assim, de modo geral é possível afirmar que chuvas com volumes maiores a 50mm por ano são eventos menos frequentes e extremos.

Figura 8 - Variação da precipitação (mm/d) por ano.

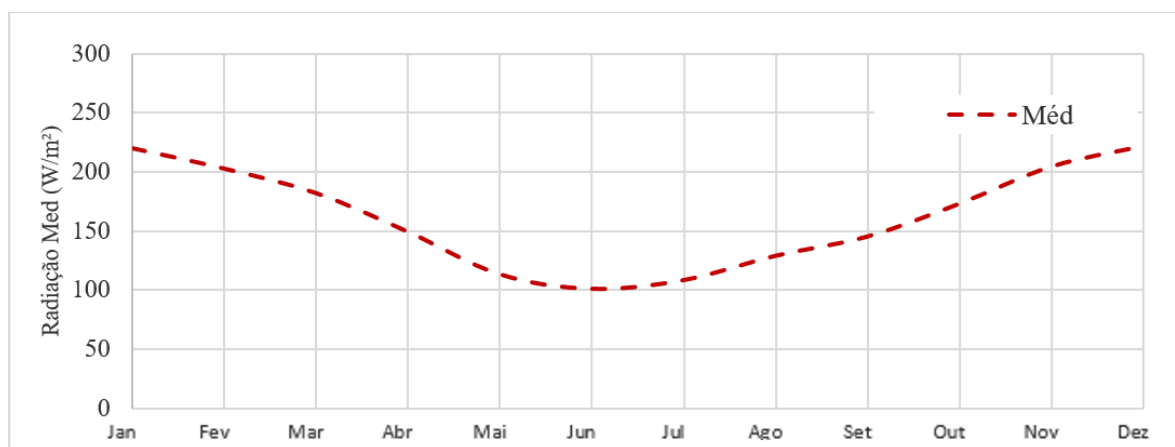


Fonte: O autor.

Para a região de Florianópolis a umidade relativa do ar é alta, com média mensal oscilando em torno de 82%. O valor médio da insolação é de 2026 horas/ano, representando 46% do total possível. A evapotranspiração média é de 1019 mm/ano, variando entre meses, 107 mm (dezembro) e 65 mm (junho) (SORIANO-SIERRA, 1998).

A Figura 9 apresenta dados de radiação disponibilizados pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), para os anos entre 1997 e 2020. É possível observar que para os meses de verão, com maior intensidade, a radiação média fica em torno de 200 W/m² enquanto nos meses de inverno fica em torno de 100 W/m². A máxima diária observada foi no mês de outubro com o valor de 854 W/m². A umidade média se mantém entre 80 e 90% ao longo do ano. O mês de julho apresenta a mínima mensal registrada na série avaliada em 27%.

Figura 9 - Radiação média entre os meses de 1997 e 2020



Fonte: O autor.

4.2 GERAÇÃO DOS CENÁRIOS DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

Para avaliar as alterações no uso e ocupação do solo na sub-bacia ao longo dos anos foram gerados mapas a partir de imagens dos satélites Landsat 5-TM e Landsat 8-OLI. Para a seleção de imagens foram considerados os anos de 2000, 2010 e 2020, por representar um período com expressivo crescimento urbano na área de estudo (MACHADO, 2019). Para os anos de 2000 e 2010, foram utilizadas imagens Landsat 5-TM, 06/10/2000 e 04/02/2010 e, para o ano de 2020, foi utilizada uma imagem Landsat 8-OLI, 31/05/2020 (Landsat 5-TM desativado em 2013). Foram utilizadas as bandas do azul, verde, vermelho e infravermelho próximo das imagens Landsat 5 e 8. As imagens Landsat 5-TM possuem 8 bits de resolução radiométrica, e, as imagens Landsat 8-OLI, possuem 16 bits. Ambas as imagens possuem resolução espacial de 30 metros. A BHLC encontra-se na órbita/ponto 219/79.

As imagens foram selecionadas sem cobertura de nuvens sobre a bacia, e, antes de seu processamento, foi aplicado o fator de escala de 0,0001 para obtenção da reflectância da superfície.

As imagens foram processadas no *Google Earth Engine*, por meio do classificador *Support Vector Machine (SVM)*, que segundo Nascimento *et al.*, (2009), é um classificador que visa a determinação de limites de decisão com o intuito de permitir a separação ótima entre as classes por meio da minimização dos erros. Este algoritmo é considerado um classificador supervisionado e não paramétrico. Para a

classificação foram considerados os seguintes usos e ocupações do solo: o tipo de uso e cobertura do solo: Vegetação Densa, Vegetação Rasteira, Urbano, Dunas e Restinga.

Após o uso do classificador SVM, foi utilizado o método estatístico da Matriz de Confusão (ou de erro) para avaliar as classificações realizadas, indicando quanto o classificador confundiu uma classe com outra. É uma matriz quadrada ($n \times n$) que possui n linhas de classes definidas versus n colunas de dados de referência. Sua diagonal principal se refere aos pixels corretamente classificados. A partir da matriz de confusão pode desenvolver-se medidas estatísticas que concluem o processo de validação.

A análise de Kappa é uma técnica multivariada discreta usada na avaliação da precisão temática e utiliza todos os elementos da matriz de confusão no seu cálculo. O coeficiente Kappa (K) é uma medida da concordância real (indicado pelos elementos diagonais da matriz de confusão) menos a concordância por chance (indicado pelo produto total da linha e coluna, que não inclui entradas não reconhecidas), ou seja, é uma medida do quanto à classificação está de acordo com os dados de referência (FONSECA, 2000).

Tabela 1 - Índice Kappa e o correspondente desempenho da classificação

Índice Kappa	Desempenho
< 0	Péssimo
0,0 < K ≤ 0,2	Ruim
0,2 < K ≤ 0,4	Razoável
0,4 < K ≤ 0,6	Bom
0,6 < K ≤ 0,8	Muito Bom
0,8 < K ≤ 1,0	Excelente

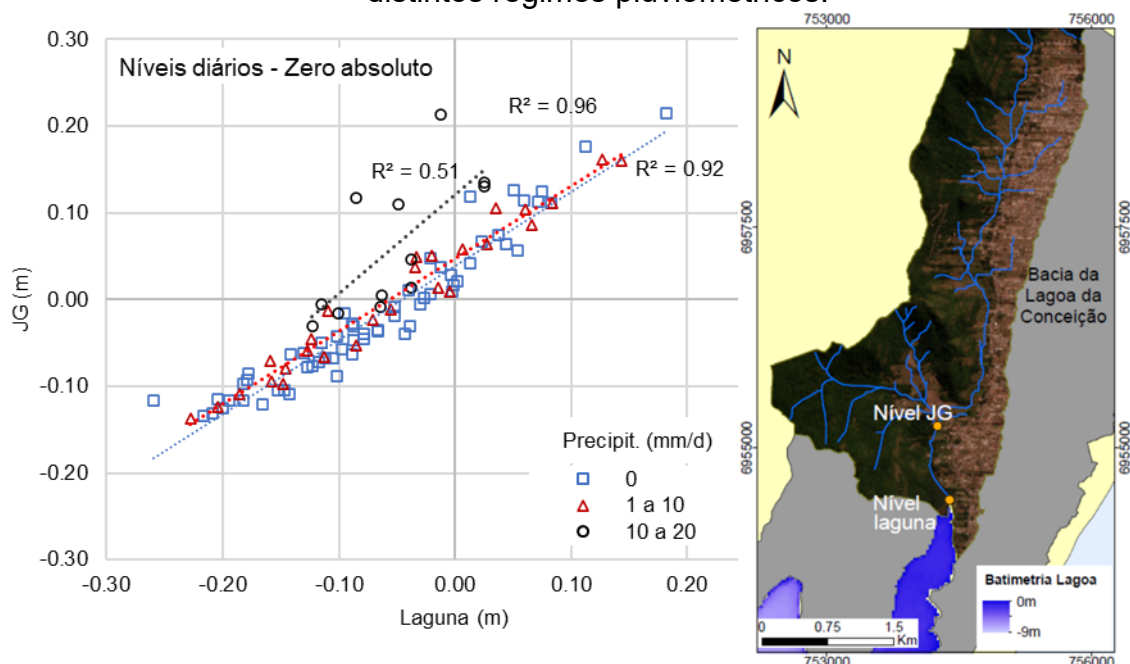
Fonte: (FONSECA, 2000).

4.3 GERAÇÃO DE DADOS DE VAZÃO USANDO O HEC-RAS

A premissa utilizada para a simulação feita no HEC-RAS é que, no trecho final da sub-bacia (região estuarina), há uma região de baixa declividade, em regime subcrítico e sujeito aos efeitos da oscilação dos níveis da laguna. Esse trecho final é controlado pelos fenômenos de jusante (laguna). Tal informação pode ser confirmada analisando a Figura 10, que apresenta a relação entre os níveis em escala diária do rio JG e da laguna para diferentes regimes pluviométricos. No gráfico é possível

observar que quando a precipitação é nula, ou pouco significativa a correlação entre os níveis é alta, com o r^2 é superior a 0.9, comprovando a influência do remanso na seção de monitoramento. A Figura 10 apresenta, também, a localização dos pontos de monitoramento de nível a montante e a jusante adotados para o modelo HEC-RAS.

Figura 10 - Relação dos níveis da laguna e da seção de monitoramento para distintos regimes pluviométricos.



Fonte: O autor.

Para o cálculo da linha d'água nesta situação, foi utilizado o módulo não permanente do modelo HEC-RAS 6.2 (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2022). Assume-se que o estuário se estende até a seção onde a oscilação dos níveis do mar (e conseqüentemente da laguna) gera elevação do perfil da linha d'água (remanso) de mais de 0,3 m.

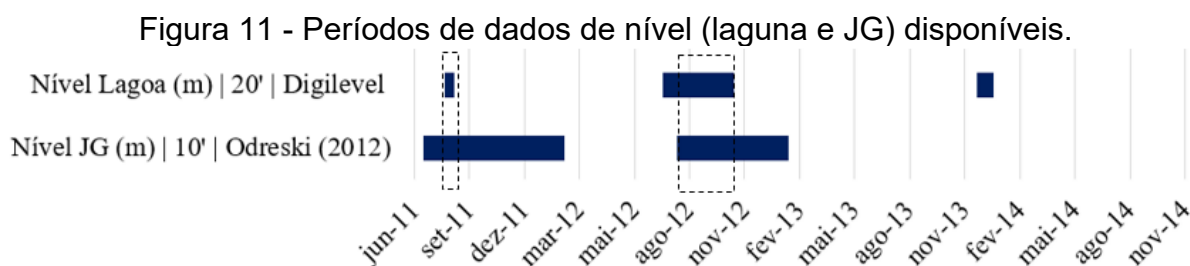
O módulo não permanente do HEC-RAS utiliza as equações completas de Saint-Venant, conservação de massa e quantidade de movimento, para representar o escoamento unidimensional. A declividade da linha de energia é representada pela equação de Manning.

4.3.1 Levantamento de dados

Na construção do modelo de simulação hidrodinâmica no HEC-RAS 6.2 foram necessárias as seguintes informações:

- Geometria: Caracterização topobatimétrica (ou das seções) da região de estudo por meio de levantamentos de campo;
- Coeficientes de Rugosidade: Para o desenvolvimento do modelo são utilizados coeficientes de perda de energia, como o coeficiente de Manning para avaliação das perdas por atrito, e coeficientes de contração e expansão.
- Condições de contorno: são condições introduzidas nos extremos dos trechos estudados, a montante e jusante do modelo, para que o modelo dê início aos cálculos da superfície da linha d'água. É possível a utilização alguns tipos diferentes de condições de contorno no HEC-RAS, elevação da superfície da água, profundidade crítica, profundidade normal (onde em geral é utilizada a declividade média do talvegue), curva chave e hidrogramas.
- Condições de Cálculo: além das informações geométricas, de escoamento, condições de contorno e coeficiente de perda de energia é necessário que sejam informados os tempos de cálculo e de obtenção de resultados.

A Figura 11 apresenta os períodos onde existem dados disponíveis de nível a montante e a jusante, monitorados em campo pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (UFSC) (LaHiMar), para rodar o modelo. Foram utilizados dois períodos de dados para gerar as séries de vazão, o primeiro 27/07/2011 a 10/08/2011 foi utilizado para a calibração e, o segundo, de 03/08/2012 a 10/11/2012, para gerar uma série de vazão utilizada para calibrar o SWAT.

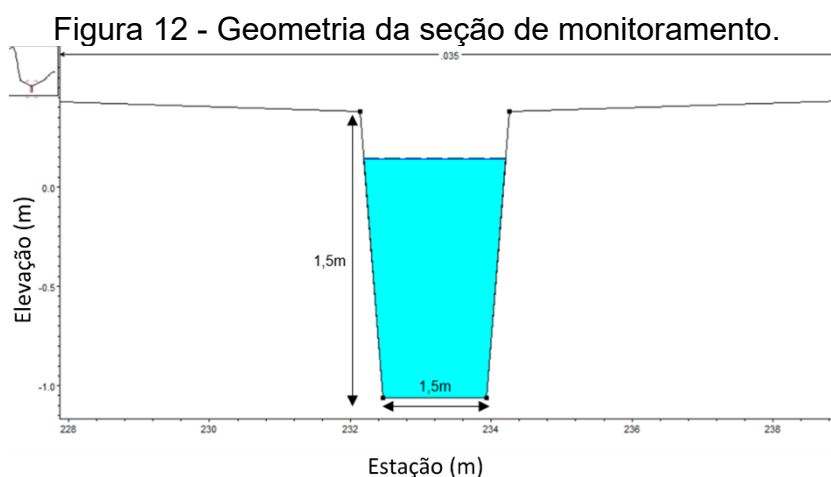


Fonte: O autor.

4.3.2 Condições iniciais e de contorno

Como condição de contorno de jusante foi utilizada a variação a cada 20 minutos do nível da laguna. Como condição de contorno de montante foram utilizados os dados de seção transversal, níveis (a cada 10 minutos) e para a calibração foram utilizados dados pontuais de vazão obtidos em campo, por Odreski (2012).

A altitude da seção transversal foi ajustada pela elevação indicada no ponto no Modelo Digital do Terreno (MDT) da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina (SDS/SC) (2010), com resolução de 1m, visto que a seção não está referenciada pelo nível do mar. A Figura 12 apresenta geometria da seção de monitoramento inserida no HEC-RAS.



Fonte: O autor.

4.3.3 Calibração do modelo hidráulico

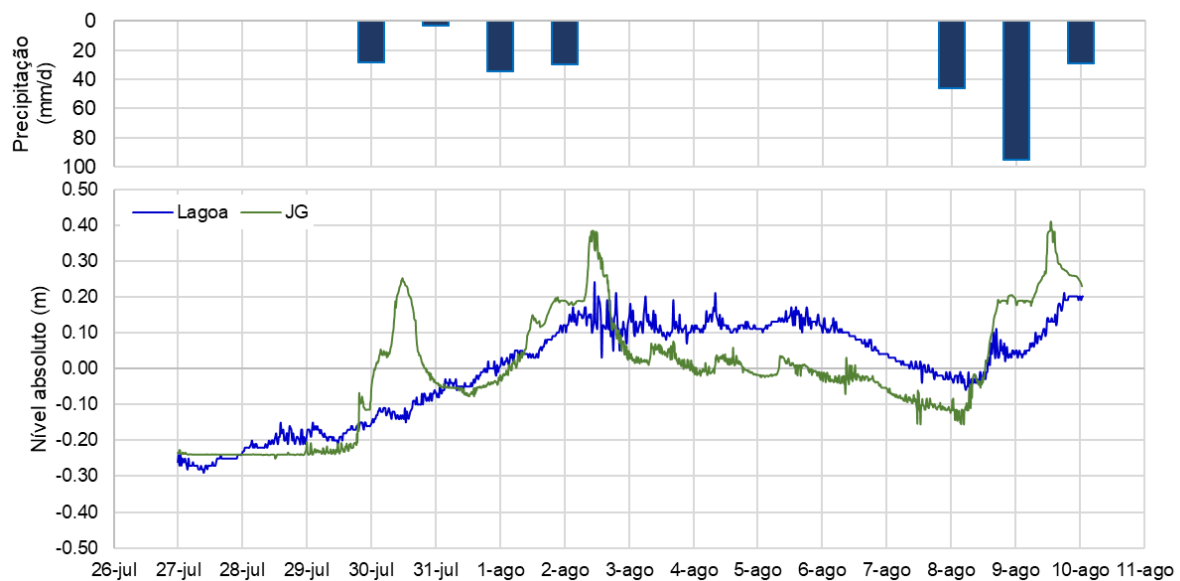
A escala espacial das simulações foi definida através da interpolação entre as seções conhecidas. Por tentativa e erro, a escala espacial foi definida até que a perda de energia fosse pequena suficiente para manter a estabilidade do modelo. No modelo, a perda de energia é referente ao atrito com as paredes/fundo do canal. Na presente modelagem, as incertezas estão relacionadas a dois dos fatores. O primeiro, ao número de Manning, que foi definido por tentativa e erro, baseado em pelo manual do HEC-RAS 6.2. O segundo é devido à falta de informações sobre a batimetria do canal. Como não foi possível amarrar os dados levantados em campo à topografia local, isso gerou imprecisões na representação do canal. Essas incertezas refletem

na propagação da onda de maré no estuário, pois, quanto mais atrito, menor a propagação da onda estuário adentro.

O passo de tempo foi de 10 minutos, o valor foi definido com base na condição de Courant. A premissa básica é que o intervalo de cálculo deve ser igual a ou menor do que o tempo que a água leva para viajar de uma seção transversal para outra. O uso de um passo de tempo (intervalo computacional) com base na condição de Courant favorece uma melhor solução numérica. A saída do modelo foi comparada com os dados de vazão pontuais observados em campo por meio de hidrogramas horários.

A Figura 13 apresenta a variação dos níveis absolutos de montante e jusante para o período de calibração, de 27/07/2011 a 10/08/2011.

Figura 13 – Precipitação diária e variação dos níveis da laguna (20 min) e da seção de monitoramento no rio João Gualberto (10 min) durante o período de 27 de julho a 10 de agosto de 2011.



Fonte: do autor

4.4 SWAT

O modelo SWAT simulou a produção de água dividindo o ciclo hidrológico em duas fases: a fase terrestre, que influencia a quantidade de água que chega aos cursos de água da bacia, e a fase de propagação de vazões pelos cursos de água. Ele utiliza, nas simulações hidrológicas, a equação do balanço hídrico Eq 1 (Item 3.4.1), conforme NEITSCH *et al.* (2011).

Para a estimativa do escoamento superficial, foi utilizado o método SCS (Curve Number), que necessita de dados de precipitação e dados da cobertura do solo, como pedologia e uso e cobertura do solo.

4.4.1 Levantamento de dados

Previamente à simulação, o SWAT exige que o usuário forneça uma série de informações sobre a bacia estudada. Como não existem estações de monitoramento de dados de climáticos instalados na área de estudo, optou-se por utilizar dados provenientes das estações da EPAGRI e Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizadas próximas à área de estudo.

A Tabela 2 apresenta, em resumo, os dados de entrada do modelo SWAT e suas principais características.

Tabela 2 - Fontes de obtenção de dados de entrada e observados no modelo SWAT

Variável	Tipo de Dado	Resolução /Frequência	Período	Fonte
Precipitação	Tabular .txt	diário	1997 - 2020	EPAGRI/CIRAM
Radiação solar e Umidade relativa	Tabular .txt	diário	1997 - 2020	EPAGRI
Temperatura	Tabular .txt	diário	1997 - 2020	INMET
MDT	raster	5 m	-	SDS/SC
Pedologia	raster	1:50.000	2009	PMF
Uso e ocupação do solo	raster	30 m	2000 - 2020	Landsat 5 e Landsat 8

Fonte: do autor

Legenda: MDT: Modelo Digital do Terreno; EPAGRI: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina; CIRAM: Centro de Informações de Recursos Ambientais de Santa Catarina; INMET: Instituto Nacional de Meteorologia; SDS/SC: Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável de Santa Catarina PMF: Prefeitura Municipal de Florianópolis.

4.4.2 Dados de entrada

- **Precipitação e dados meteorológicos**

Foram utilizados dados diários de precipitação e radiação solar, provenientes da estação da EPAGRI localizada no bairro do Itacorubi em Florianópolis, localizada aproximadamente a 15 km da bacia do João Gualberto. Para os dados de temperatura média, máxima e mínima diária utilizou-se dados do INMET, da estação localizada em

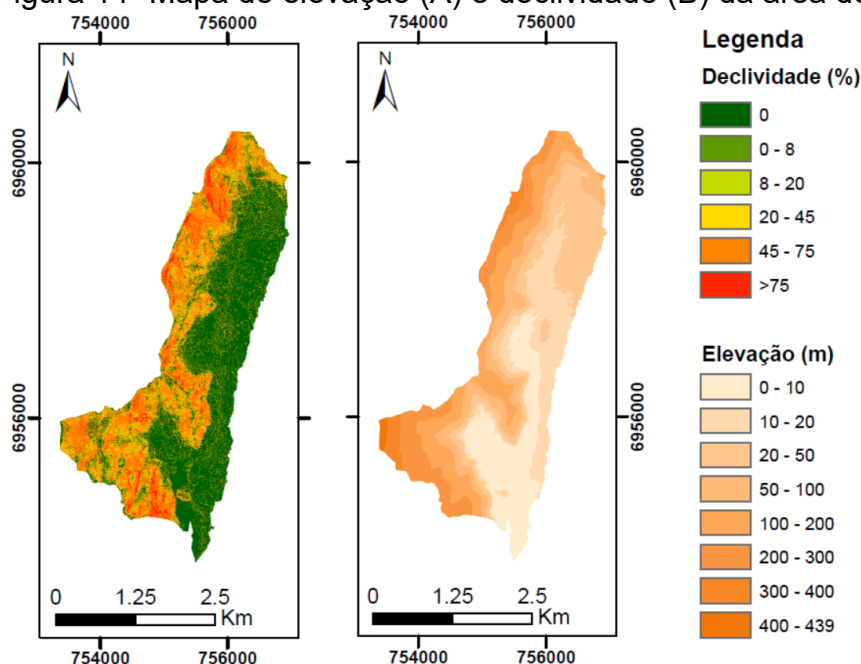
São Jose/SC, aproximadamente a 30 km da área de estudo. As séries contam com dados medidos entre 1997 e 2020.

Os dados meteorológicos foram organizados em arquivo de texto e fornecidos ao banco de dados do SWAT. Integrado ao modelo *Weather Generator* que gera informações para os períodos utilizados nas simulações. O modelo gerou uma série de dados meteorológicos para cada sub-bacia, baseado nos dados fornecidos pelo usuário (NEITSCH *et al.*, 2011b). Os dados do *Weather Generator* foram utilizados para preenchimento de falhas nos dados diários medidos, fornecidos ao modelo.

- **Modelo Digital de Terreno (MDT)**

A altimetria da bacia do rio JG apresenta, predominantemente, cotas entre 0 e 20 metros. As regiões mais elevadas estão localizadas na porção oeste da bacia do rio João Gualberto onde são encontrados topos de morro. Nesta bacia, é possível observar a rápida variação de altitude entre 1 e 439 metros na porção sul – sudoeste. A bacia do rio João Gualberto apresenta 20% de sua área classificada como suave-ondulado e 49% classificada como forte ondulado e montanhoso, apresentando encostas mais íngremes como apresentado na Figura 14.

Figura 14- Mapa de elevação (A) e declividade (B) da área de estudo.



Fonte: do autor

O MDT utilizado como entrada no SWAT tem resolução espacial de 5 metros. Originalmente, o arquivo *raster* fornecido pela SDS/SC tem resolução espacial de 1 metro, entretanto, o mesmo foi reamostrado por meio da ferramenta *aggregate*, no ArcGIS, para diminuir o tempo de processamento das operações realizadas no SWAT.

Tabela 3 - Classes de declividade da área de estudo

Declividade (%)	Classe de relevo (Embrapa, 1969)	Bacia do Rio João Gualberto	
		Área (km ²)	Área (%)
0 – 3	Plano	1,27	12,79
3 – 8	Suave - ondulado	1,94	19,50
8 – 20	Ondulado	1,61	16,19
20 – 45	Forte Ondulado	2,81	28,35
45 – 75	Montanhoso	2,05	20,64
> 75	Forte montanhoso	0,25	2,53
Total		9,93	100,00

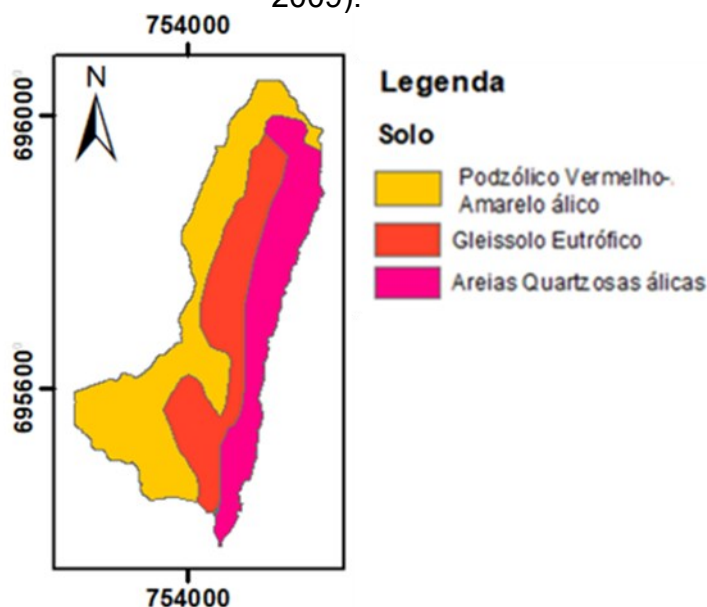
Fonte: do autor

- **Pedologia**

A área de estudo é composta por areias quartzosas álicas, predominantes na região mais plana. Cujos componentes geológicos fundamentais são os sedimentos siltico-argilosos (30%) e as areias finas quartzosas (27%). Já as encostas localizadas a oeste da bacia do rio João Gualberto apresentam o solo Podzólico vermelho-amarelado álico (43%) (Figura 15). Este tipo normalmente conta com textura argilosa, e relevo ondulado, facilitando o escoamento superficial da água (EMBRAPA, 2004).

Na porção leste da área de estudo (Figura 15) é possível encontrar a formação de dunas que são depósitos arenosos de dunas moveis, onde o vento age significativamente, não permitindo a formação do solo (PMF, 2010).

Figura 15 – Pedologia da área de estudo. Escala 1:50.000. Adaptado de (PMF, 2009).



Fonte: do autor

Para este estudo, foi utilizado um mapa com resolução de 1:50.000, disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Florianópolis, que pode ser visualizados na Figura 15. No presente estudo, as características do solo necessárias para o SWAT foram obtidos de EMBRAPA (2004). A Tabela 4 apresenta os principais tipos de solo presentes na BHLC, a porcentagem de cada tipo de solo na sub-bacia do JG e a classificação dos mesmos dentro do SWAT, segundo de Almeida Bressiani *et al.*, (2015).

Tabela 4 - Tipos de solo, porcentagem de cada tipo e respectiva classificação no SWAT.

Solos Bacia JG - PMF	JG (%)	Solos do estado de Santa Catarina – Embrapa (2004)
Podzólico Vermelho-Amarelo álico	42,8	PVa18 - Podzólico Vermelho-Amarelo Álico latossólico A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical perúmida, relevo suave ondulado.
Gleissolo Eutrófico	30,1	Glei Pouco Húmico Distrófico Tb, textura argilosa, fase floresta tropical perenífolia de várzea, relevo plano - HGPd1
Areias Quartzosas álicas	27,0	Areias Quartzosas Marinhas Álicas e Distróficas A moderado e proeminente

Fonte: (PMF, 2010), (DE ALMEIDA BRESSIANI *et al.*, 2015)

Os parâmetros físicos do solo utilizados no SWAT são provenientes de EMBRAPA, 2004. Segundo Malutta (2012) os dados tabulares de solos requeridos pelo modelo SWAT são divididos em duas partes, como apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros de solo requeridos pelo SWAT

Parâmetros do tipo de solo	Parâmetros da camada do solo
a. Nome do solo;	f. Profundidade da camada (SOL_Z);
b. Número de camadas (NLAYERS);	g. Densidade do solo seco na camada (SOL_BD);
c. Grupo hidrológico do solo (HYDGRP);	h. Capacidade de água disponível na camada (SOL_AWC);
d. Profundidade máxima da raiz no solo (SOL_ZMX);	i. Carbono orgânico (SOL_CBN);
e. Porosidade do solo (ANION_EXCL).	j. Condutividade hidráulica saturada da camada (SOL_K);
	k. Porcentagem de argila (CLAY);
	l. Porcentagem de silte (SILT);
	m. Porcentagem de areia (SAND);
	n. Porcentagem de rocha (ROCK);
	o. Albedo;
	p. Fator de erodibilidade da camada (k).

Fonte: adaptado de (ARNOLD *et al.*, 2012b)

Uso e Ocupação do Solo

O SWAT requer dados de uso e ocupação do solo e do solo para determinar a área e os parâmetros hidrológicos de cada unidade de resposta hidrológica simulada dentro de cada sub-bacia. Segundo Preis (2019) os tipos de uso do solo padrão do modelo, contam com um banco de dados de 127 categorias que buscam representar padrões urbanos, de vegetação natural e de diversas classes de cultivo como milho, soja, feijão e assim por diante. Estas classes têm base em usos do solo nos Estados Unidos. Entretanto, estudos em outras partes do mundo normalmente utilizam esse padrão, pois sua construção é de grande complexidade. A Tabela 5 apresenta para cada tipo de uso do solo encontrado na bacia do rio Joao Gualberto a categoria correspondente no banco de dados do SWAT adotada.

Tabela 5 - Categorias de uso e ocupação do solo como entrada no modelo SWAT

Classificação JG	Descrição	Classificação no SWAT
Vegetação densa	Mata Atlântica secundária	Forest- Evergreen (FRSE)
Vegetação rasteira	Áreas descampadas e pequenos arbustos	Pasture (PAST)

Classificação JG	Descrição	Classificação no SWAT
Área urbanizada	Áreas edificadas de baixa, média ou alta densidade	Residential (URBN)
Restinga	Inclui vegetação de restinga e áreas com vegetação queimada	Range-Brush (RNGB)
Corpos d'água	Todas as classes de água	Water (WATR)
Dunas	Inclui áreas de dunas e áreas de areia exposta	Range-Grasses (RNGE)

Fonte: do autor

4.4.3 Calibração e análise de sensibilidade do modelo hidrológico

Para simulação de cenários climáticos e de mudanças de uso do solo o modelo deve ser calibrado e validado usando dados espacialmente bem distribuídos e uma série de vazões suficientemente representativa em relação aos períodos secos e úmidos (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016). Para a realização da calibração foi utilizada uma série de vazões, em escala diária, de 03/08/2012 a 10/11/2012, gerada pelo HEC-RAS. Devido à baixa disponibilidade de dados, não foi realizada a validação do modelo.

Como no início da simulação ocorrem incertezas associadas ao desconhecimento das condições hidrológicas iniciais, especialmente a à condição de umidade inicial do solo, recomenda-se a utilização de 2 a 3 anos de para aquecimento do SWAT "*warm up*" (ABBASPOUR, 2013). Neste sentido, os anos de 2007 a 2009 foram utilizados para *warm-up* do SWAT.

Optou-se pela utilização do algoritmo SUFI-2, no SWAT-CUP, para realizar a calibração modelo. Como função objetivo, foi utilizado a função KGE, uma vez que o NSE não é muito sensível a outliers e resultados mais confiáveis têm sido obtidos com o uso do KGE (WANG *et al.*, 2016). O KGE apresenta uma tendencia de gerar picos de escoamento subestimados, entretanto menos severa que quando se utiliza a função objetivo NSE. O KGE varia de $-\infty$ a 1, e um desempenho acima de 0,75 e 0,5 é considerado bom e intermediário, respectivamente. O valor ideal do coeficiente é um. 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, 2013)

Antes de iniciar o processo de calibração foram selecionados os 20 parâmetros apresentados no Apêndice A para a realização da análise de

sensibilidade. Estes parâmetros foram selecionados com base na literatura (ABBASPOUR *et al.*, 2007; GITHUI; SELLE; THAYALAKUMARAN, 2012; BRESSIANI, 2016). O ranking de sensibilidade foi definido pela avaliação de dois coeficientes: o índice *t-stat*; e o teste de hipótese do *p-value* (teste de Student). O índice *t-stat* é a melhor escolha para o modelador entender a magnitude da sensibilidade, enquanto o *p-value* é melhor para definir quais parâmetros são mais sensíveis (BRIGHENTI *et al.*, 2019). Foi realizada uma iteração de 500 simulações no SWAT-CUP com estes parâmetros utilizando as sub-bacias adotadas para o modelo. Foi realizada a análise de sensibilidade global disponível no SWAT-CUP para avaliar e selecionar os parâmetros para calibração.

4.5 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS SWAT

A simulação de cenários foi realizada utilizando os dados de entrada de maneira contínua no SWAT, isto é, foram variados apenas os mapas de uso e ocupação do solo para cada simulação de cenários, igualmente como as simulações realizadas por Busico *et al.*, (2020) e Oliveira *et al.*, (2020). Os cenários foram utilizados para observar a influência na mudança de uso e cobertura do solo na produção de água da bacia do rio João Gualberto. Portanto, cada cenário conta com exatamente os mesmos dados de entrada para todos os parâmetros do SWAT, indicados na Tabela 2, a única distinção entre eles é o tipo de uso e cobertura do solo. Utilizou-se um período de *warm-up* com dados medidos entre 2007 e 2009.

4.6 CURVAS DE PERMANÊNCIA

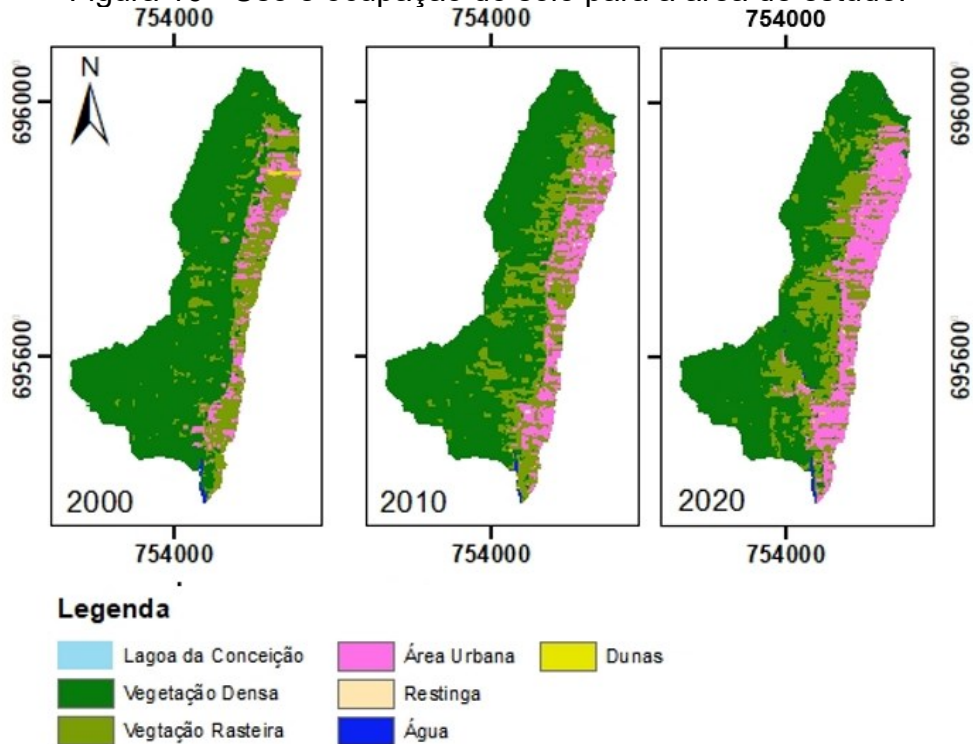
Para cada cenário simulado na bacia do JG foram gerados 3 anos de dados diários de vazão (janeiro/2010 a dezembro/2012), este período representa a série histórica de precipitação, como apresentados na Figura 8. Para cada cenário esses dados foram organizados para a frequência de excedência, e a partir disso, foram geradas as curvas de permanência. A curva de permanência, demonstrou a relação entre a magnitude e a frequência das vazões diárias na bacia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 USO E COBERTURA DO SOLO

A Figura 16 apresenta o uso e ocupação do solo para os cenários descritos, é possível verificar o grande crescimento urbano da região. Além disso, é possível notar que a medida que os anos passaram as áreas classificadas como vegetação densa deram lugar para ocupação urbana e vegetação rasteira. A relação entre o aumento de áreas de vegetação rasteira e urbana em detrimento de áreas de vegetação densa pode ser observado em diversos locais, como apresentado por Benini; Mendiondo, (2015); Dos Santos Targa *et al.*, (2014) e Segnor; Spinelli, (2020). Pode-se observar o adensamento populacional na região oeste da bacia, única região da bacia onde é permitido a ocupação, as áreas onde a vegetação densa é predominante são áreas de preservação permanente (APP). As conversões de espaços naturais em áreas urbanas, sem o devido planejamento, monitoramento e fiscalização por parte de autoridades e da sociedade civil urbanizada, geram impactos negativos ao meio ambiente como: assoreamento e poluição dos cursos d'água, redução da vegetação densa, impermeabilização do solo e drenagem pluvial deficitária que provocam alagamentos entre outros (DAMAME; LONGO; DE OLIVEIRA, 2019).

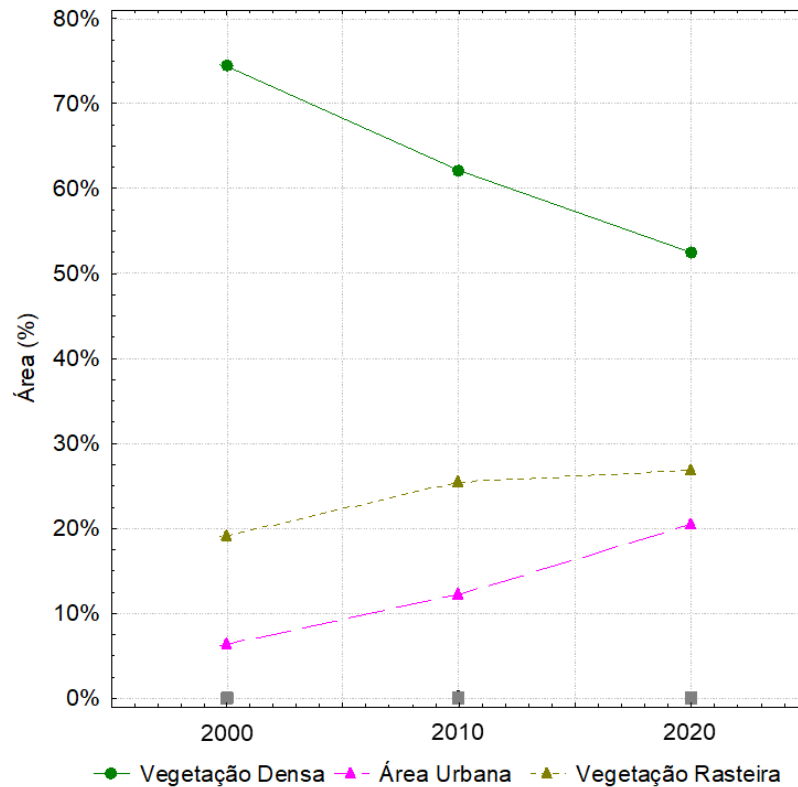
Figura 16 - Uso e ocupação do solo para a área de estudo.



Fonte: do autor

Na Figura 17 é possível observar a porcentagem referente a evolução do uso e ocupação do solo para cada classe dentro da área de estudo para os três cenários apresentados na Figura 16. É possível observar evolução da área urbana onde a porcentagem de ocupação urbana em 2000 era de 6% e em 2020 de 21%. Destaca-se também a diminuição de 22% na área de vegetação densa, o que em termos de área equivalem a 2,17km². As classes restinga, dunas e água apresentam área insignificante em relação a área de estudo.

Figura 17 - Evolução temporal das classes de uso e ocupação do solo (%).



Ano/Usado	Veg. densa		Veg. Rasteira		Urbano	
	%	km ²	%	km ²	%	km ²
2000	74%	7.38	19%	1.91	6%	0.63
2010	62%	6.16	25%	2.53	12%	1.21
2020	52%	5.20	27%	2.66	21%	2.04

Fonte: do autor

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 (BLÖSCHL *et al.*, 2019; GHAFARI *et al.*, 2010; ZHANG *et al.*, 2017). Segundo Neves (2017), o desenvolvimento histórico das feições e padrões atuais de uso e ocupação do solo na área do Lagoa da Conceição foi orientado por uma transição entre as atividades rurais e urbanas, até a quase extinção da agricultura no ano de 2010, e com a ocupação urbana ocorrendo em grande parte da bacia da Lagoa da Conceição, inclusive na área de estudo.

A concordância global calculada pela matriz de confusão foi de 81,1%, 81,3% e 83,0% para os anos de 2000, 2010 e 2020, respectivamente. O classificador se comportou muito bem para as classes florestas. O índice Kappa, este variou de 0,75 a 0,79, equivalente ao desempenho “muito bom”.

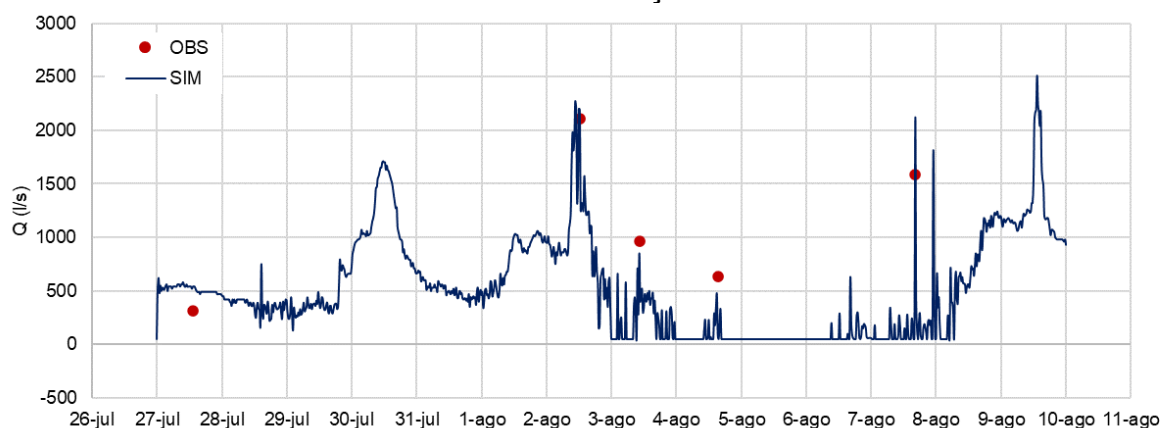
5.2 HEC-RAS

5.2.1 Calibração do modelo

O resultado do n calibrado para o trecho do rio JG simulado foi de 0,035. Valor considerado normal para rios de planície com características semelhantes (PAIVA, 2009; PORTO, 2006). Por meio de uma análise de sensibilidade apenas variando o n , foi observado que a diminuição do n gera um aumento da penetração da laguna dentro do canal, porém somente variações maiores que 0,005 é que se tornam significativas na penetração da laguna.

Como fluxo de base foi adotado, com base em medidas realizadas em campo em períodos de seca, o valor de 50l/s. Para realizar a calibração foi utilizado o hidrograma de saída em escala horária. A Figura 18 apresenta os valores de vazão calculados pelo modelo e os medidos na seção.

Figura 18 - Hidrograma (horário) calculado pelo modelo HEC-RAS e dados pontuais observados na seção do JG.

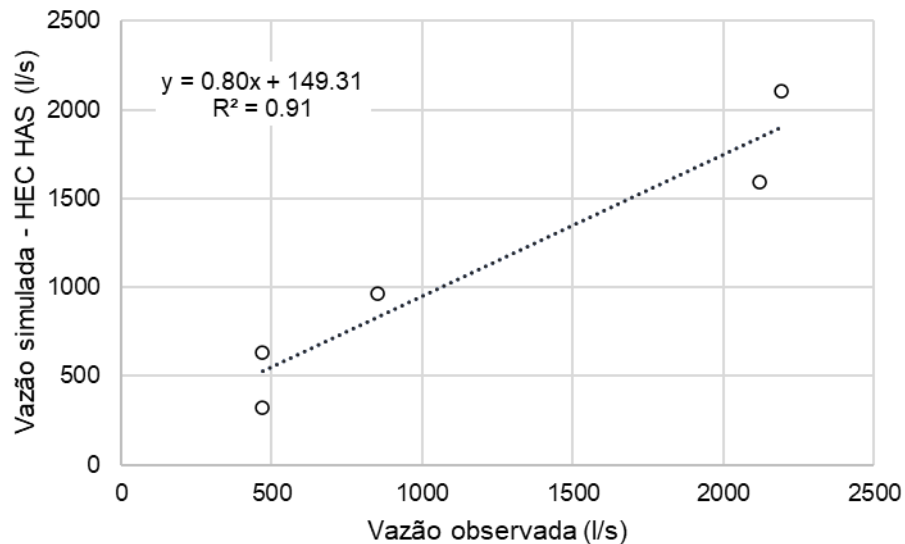


Fonte: do autor

A análise da diferença entre as vazões pontuais observadas e as modeladas constata o bom resultado da calibragem. Apesar da escassez de dados medidos em campo, a forte correlação positiva ($R^2 = 0,91$), apresentado na Figura 19, indica a precisão das predições realizadas com o modelo. Assim, é possível afirmar que o

modelo é capaz de reduzir as incertezas inerentes a representação simplificada de um sistema real e complexo.

Figura 19 - Diagrama de dispersão dos dados de vazão após a calibração.

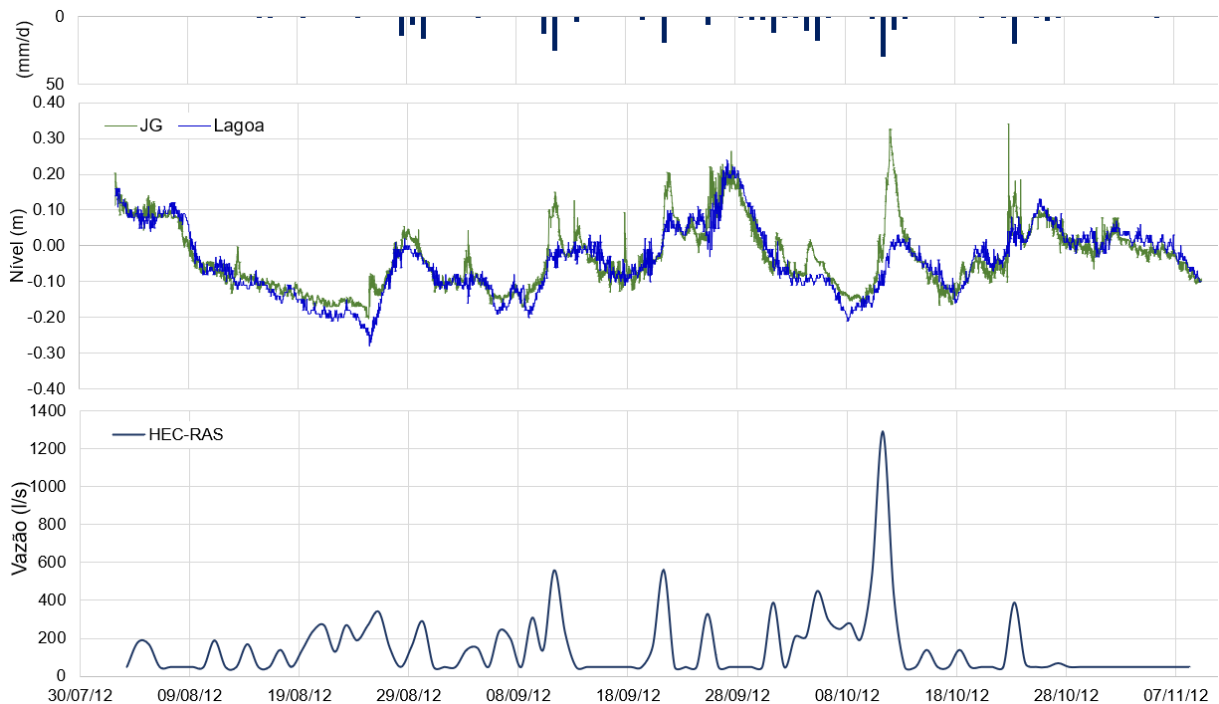


Fonte: O autor.

5.2.2 Dados de vazão

A simulação hidrodinâmica foi realizada com passo de tempo de 10 minutos, mas os resultados somente puderam ser comparados com dados de vazão diários modelados com o SWAT, por tanto para a série de calibração a ser utilizada pelo SWAT foi utilizado o hidrograma de saída diário. A Figura 20 apresenta os valores de precipitação diária, níveis de montante e jusante, vazão calculados pelo modelo. Apesar dos dados de chuva não serem da mesma bacia hidrográfica, é possível aferir pela Figura 20 que os dados são capazes de representar os processos hidrológicos que ocorrem dentro da bacia do JG, visto que quando ocorre um evento de chuva é possível verificar o aumento no nível do JG. O nível da laguna por sua vez sofre influência tanto do nível do mar quanto da chuva. O maior evento de chuva, 29.4mm no dia 11/10/2012, corresponde ao maior pico de vazão, 1290 l/s.

Figura 20 - Precipitação, níveis de montante e jusante e vazão modelada com o HEC-RAS.



Fonte: do autor

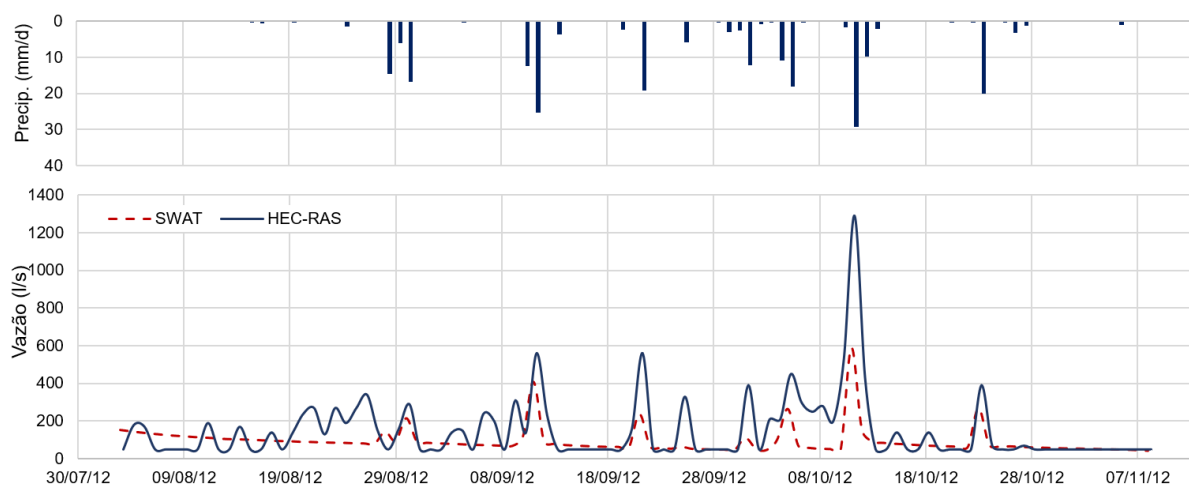
5.3 SWAT

5.3.1 Desempenho do modelo não calibrado

Segundo Abbaspour (2013), no início do processo de calibração é importante realizar uma simulação para identificar eventuais discrepâncias nos dados de entrada do modelo. Para isso, utilizou-se o SWAT CUP e algoritmo SUFI-2 e função objetivo KGE, realizou-se uma simulação para o período de 2007 a 2012, com os três primeiros anos servindo de *warm-up* do modelo e sem a variação de nenhum parâmetro. O desempenho estatístico do modelo não calibrado foi considerado como não satisfatório uma vez que apresentou KGE de 0,28 ($< 0,5$), o p-fator de 0,15 ($< 0,7$) e r-fator de 0,00.

A partir da Figura 21 é possível observar que o modelo não calibrado subestima as vazões extremas, o que também foi constatado em estudos similares como Martins *et al.* (2020) e Pereira *et al.* (2016)

Figura 21 – Hidrograma diário observado (HEC-RAS) e simulado com o SWAT não calibrado.



Fonte: do autor

5.3.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros

O SUFI-2 estima a sensibilidade dos parâmetros por análise de regressão múltipla e fornece dois valores para análise: t -stat e p -value. Como discutido por Abbaspour *et al.* (2007), quanto maior o t -stat, em valores absolutos, e menor o p -value, mais sensível é o parâmetro. Um p -value menor que 0,05 indica que a hipótese nula pode ser rejeitada e o parâmetro pode ser considerado sensível com intervalo de confiança de 95%, sendo o p -value a principal estatística a ser avaliada.

A sensibilidade global dos parâmetros referentes à variável vazão foi calculada no SWAT-CUP a partir de alterações nos seus valores gerando mudanças na função objetivo. Foram considerados parâmetros utilizados para a calibração por diversos autores como BRESSIANI, 2016; BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016; PREIS, 2019. A descrição de cada um dos parâmetros selecionados para a análise de sensibilidade pode ser consultada no Apêndice A.

A Tabela 6 apresenta 20 parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade global, onde apenas ESCO (fator de compensação de evaporação do solo) e GW_DELAY (atraso de água subterrânea) apresentaram p -value < 0,05. Os parâmetros SURLAG (coeficiente de atraso de escoamento superficial) e CN2 (Número da curva para a condição de umidade do solo II) apresentaram valores baixos de p -fator e altos valores absolutos de t -stat, portanto também foram considerados sensíveis. Assim, os parâmetros abaixo da linha vermelha da Tabela 6 foram

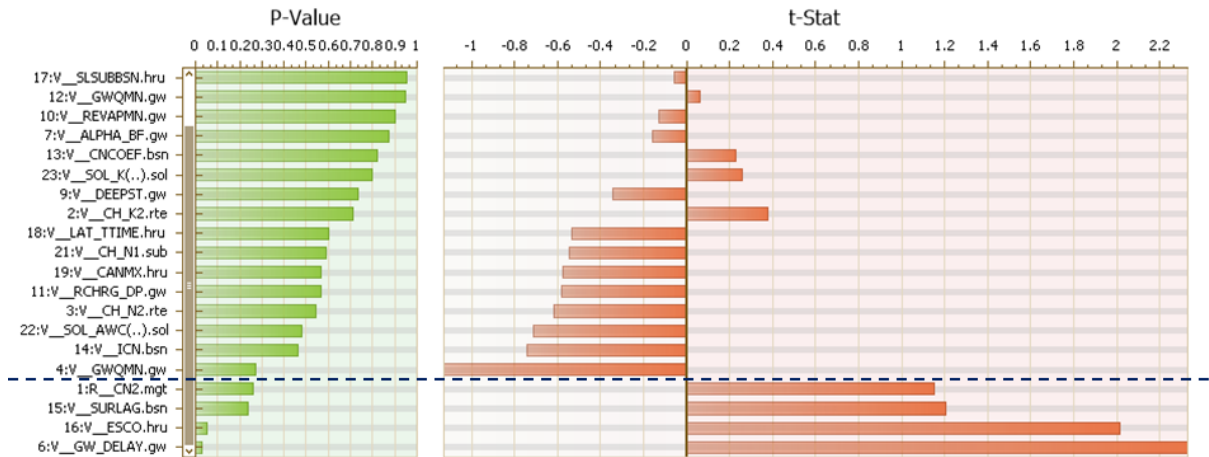
considerados como sensíveis e utilizados para a calibração do modelo. A Figura 22 apresenta os mesmos resultados em forma de gráfico, para uma melhor visualização.

Tabela 6 - Sensibilidade global dos parâmetros de vazão

Nome do parâmetro	método de ajuste	mínimo	máximo	t-stat	<i>P-value</i>
20:V__OV_N.hru	substituir	0.01	1	-0.02	0.98
8:V__SHALLST.gw	substituir	0	50000	0.03	0.98
5:V__GW_REVAP.gw	substituir	0.02	0.2	0.05	0.96
17:V__SLSUBBSN.hru	substituir	10	150	-0.05	0.96
12:V__GWQMN.gw	substituir	0	5000	0.06	0.95
10:V__REVAPMN.gw	substituir	0	500	-0.13	0.90
7:V__ALPHA_BF.gw	substituir	0	1	-0.16	0.87
13:V__CNCOEF.bsn	substituir	0.5	2	0.23	0.82
23:V__SOL_K(..).sol	substituir	0	2000	0.26	0.80
9:V__DEEPST.gw	substituir	0	50000	-0.34	0.74
2:V__CH_K2.rte	substituir	-0.01	500	0.38	0.71
18:V__LAT_TTIME.hru	substituir	0	180	-0.53	0.60
21:V__CH_N1.sub	substituir	0.01	30	-0.54	0.59
19:V__CANMX.hru	substituir	0	100	-0.58	0.57
11:V__RCHRG_DP.gw	substituir	0	1	-0.58	0.56
3:V__CH_N2.rte	substituir	-0.01	0.3	-0.61	0.54
22:V__SOL_AWC(..).sol	substituir	0	1	-0.71	0.48
14:V__ICN.bsn	substituir	0	1	-0.74	0.46
4:V__GWQMN.gw	substituir	0	5000	-1.13	0.27
1:R__CN2.mgt	relativo	-0.4	0.4	1.15	0.26
15:V__SURLAG.bsn	substituir	0.01	24	1.20	0.24
16:V__ESCO.hru	substituir	0.001	1.5	2.01	0.05
6:V__GW_DELAY.gw	substituir	0	500	2.33	0.03

Fonte: do autor

Figura 22 - Valores *p-value* na análise de sensibilidade global dos parâmetros.

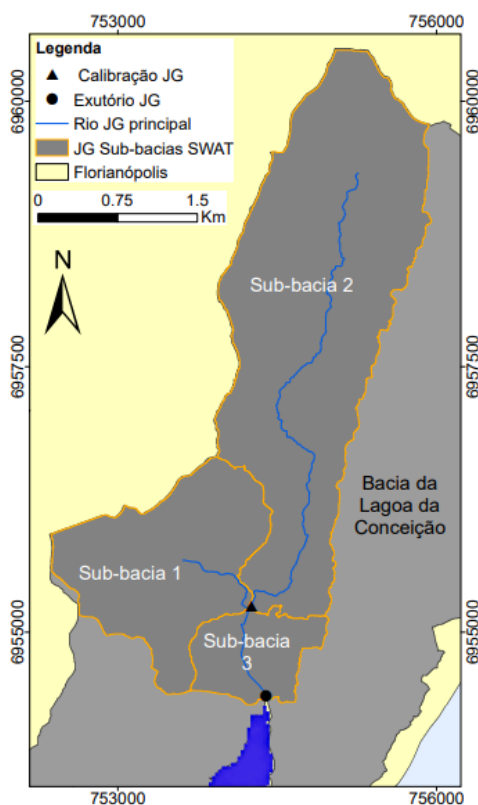


Fonte: do autor

5.3.3 Calibração do modelo

A calibração do modelo SWAT foi realizada a partir dos dados de vazão simulados e calibrados no HEC-RAS. A Figura 23 apresenta as sub-bacias geradas pelo SWAT, a partir do MDT e do rio principal, onde é possível observar a sub-bacia 2, utilizada para a calibração do modelo. As URH foram geradas pelo SWAT a partir das sub-bacias, para o uso e ocupação do ano 2000, 2010 e 2020 respectivamente foram criadas 28, 31 e 34 URH respectivamente. White; Chaubey, (2005) investigaram a capacidade de previsão de vazão em múltiplas sub-bacias e distribuições de URH. Os resultados indicaram uma falha em rejeitar a hipótese nula sugerindo assim que diferentes distribuições de URH não apresentam diferenças significativas nas vazões.

Figura 23 – Sub-bacias criadas no modelo SWAT.



JG: João Gualberto

Fonte: do autor

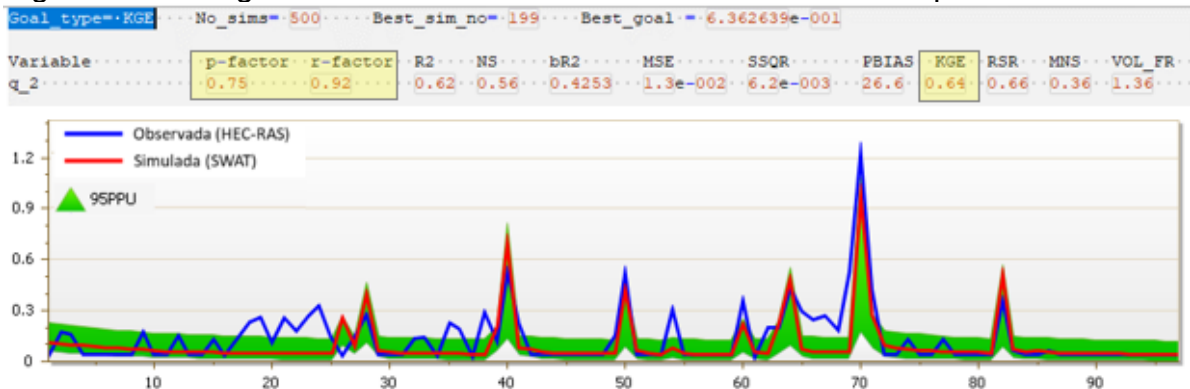
A análise de desempenho do modelo não calibrado foi levada em consideração para o processo de calibração, uma vez que quando faltam dados nas observações, o desempenho de um modelo não calibrado é um indicador importante do bom desempenho do modelo (PETERSON, 1999). Neste sentido, Abbaspour *et al.* (2019) argumenta que o principal objetivo para o qual o modelo SWAT foi concebido foi o de modelar bacias hidrográficas rurais com poucos dados medidos

O processo de calibração foi realizado com diversas simulações considerando os parâmetros selecionados durante a análise de sensibilidade, para verificar a resposta do modelo foram realizadas 50 iterações para cada simulação, ao final, com os quatro parâmetros selecionado, foi realizada uma simulação com 500 iterações. A Tabela 7 apresenta, para cada parâmetro, os valores mínimos e máximos utilizados para a calibração do modelo, assim como o valor calibrado.

A calibração foi realizada considerando a função objetivo KGE. A Figura 24 apresenta o histograma de dados observados (HEC-RAS) em comparação com a

melhor simulação para os parâmetros selecionados no SWAT CUP após 500 iterações, assim como o 95PPU. Também é possível observar o desempenho do $KGE = 0,64$ ($>0,5$), considerado como um valor intermediário. Para o p-fator e o r-fator, a calibração apresentou valores de 0,75 ($>0,7$) e 0,92 ($<1,5$) respectivamente, considerados como resultados satisfatórios.

Figura 24 - Hidrograma diário dos dados simulados e observados para a bacia do JG.



Fonte: do autor

Segundo (BRIGHENTI; BONUMÁ; CHAFFE, 2016) a eficiência do modelo SWAT depende da escala espacial e do período de calibração. Para simulação de cenários climáticos e de mudanças de uso do solo o modelo deve ser calibrado e validado usando dados espacialmente bem distribuídos e uma série de vazões suficientemente representativa em relação aos períodos secos e úmidos. A calibração do presente estudo apresentou bons resultados estatísticos, entretanto foi realizada para um curto período de 97 dias, onde são representados períodos com e sem precipitação, entretanto não considera longos períodos secos e úmidos. A Tabela 7 apresenta os valores calibrados, máximo e mínimo para cada um dos parâmetros selecionados, assim como o método de ajuste empregado na calibração.

Tabela 7 - Parâmetros selecionados para a análise de sensibilidade e respectivos métodos de ajuste e valores iniciais de mínimos e máximos.

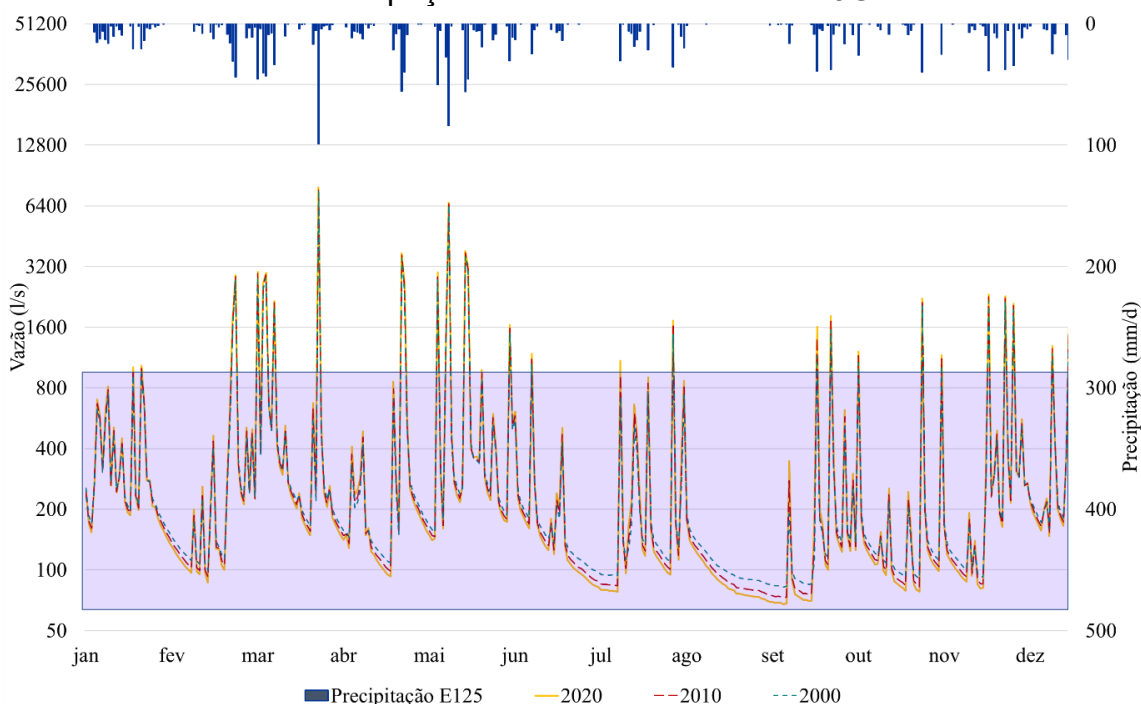
Parâmetro	Valor Calibrado	Valor inicial mínimo	Valor inicial máximo	Método de ajuste
CN2	0.1926	-4	4	Relativo
ESCO	1.1447	0,001	1,5	Substituir
GW_DELAY	493.50	0,001	500	Substituir
SURLAG	-0.09620	-0,1	0,1	Relativo

Fonte: do autor

5.4 SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS

A Figura 25 apresenta os valores médios diários de escoamento superficial para cada cenário (2000, 2010, 2020) simulado na bacia do rio João Gualberto. Observa-se que os três cenários não apresentaram grandes diferenças, em alguns pontos ocorre a sobreposição das linhas simuladas. A maior diferença entre os cenários é observada no fluxo de base. O modelo seguiu um comportamento padrão em função dos eventos de precipitação. Elevadas chuvas retornaram as maiores vazões, com as vazões para o cenário 2020 superiores, para o cenário 2010 intermediárias e o para o cenário de 2000 as menores vazões. O maior evento de chuva da série ocorreu no dia 26 de março, 99,1 mm, e esse evento resultou em uma vazão de 7.892 l/s, 7.820 l/s e 7.622 l/s em 2020, 2010 e 2000 respectivamente. É possível verificar que, como já discutido, as precipitações acumuladas diárias, em sua maioria, encontram-se entre 0 e 25 mm, tais eventos resultam em vazões entre 60 l/s e 1000 l/s, como destacado na Figura 25, que apresenta dados de um ano de chuva (2010) e o comportamento da vazão para cada um dos três cenários analisados.

Figura 25 - Simulação diária com o SWAT dos cenários alternativos de uso e ocupação do solo de sub-bacia do JG.



Fonte: do autor

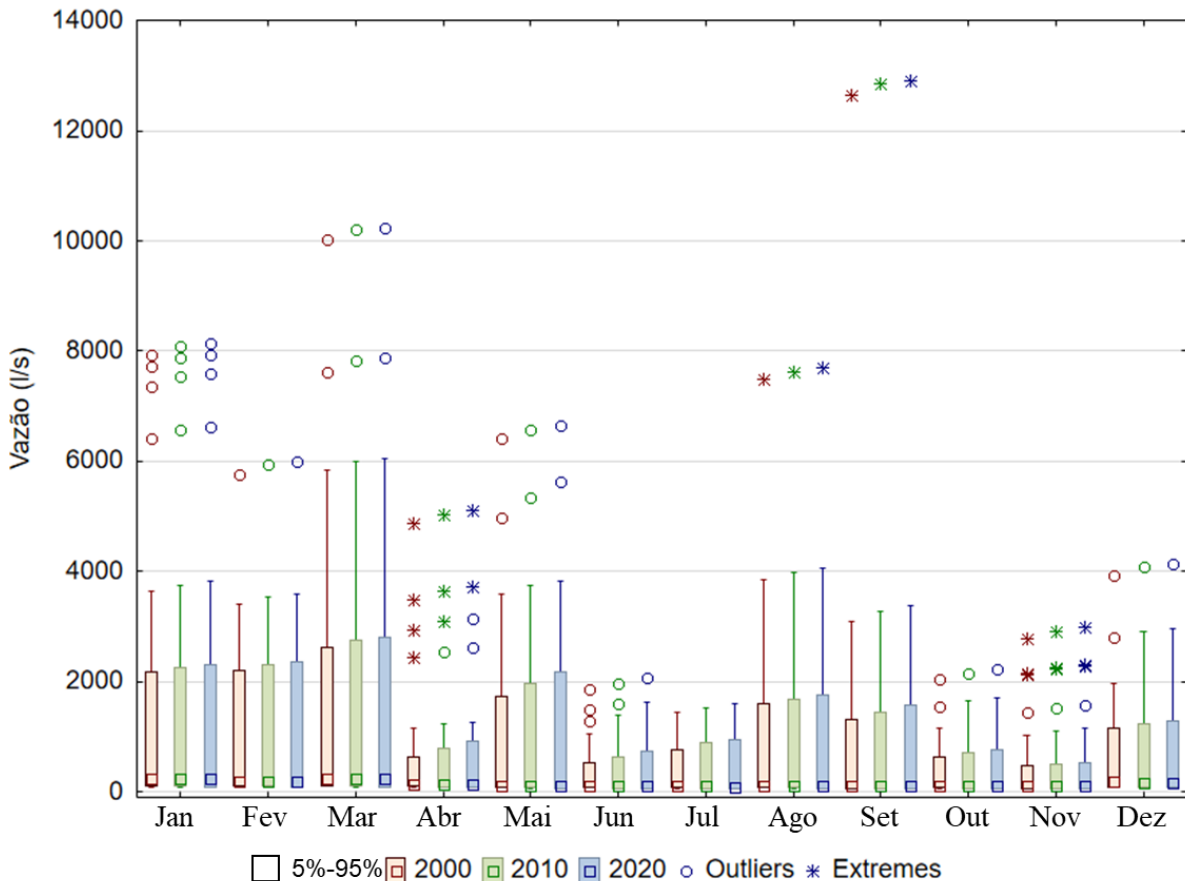
Para as épocas de seca as vazões simuladas considerando cenário 2000, com maior presença de vegetação densa, foram ligeiramente superiores às demais. Isto ocorre geralmente em bacias hidrográficas, pois em épocas sem precipitação o fluxo base é o principal mantenedor de vazões e bacias sob a influência de florestas tendem a apresentar maiores taxas de infiltração como observado por Benini; Mendiondo (2015)

A umidade antecedente e a permeabilidade do solo são os principais elementos influenciadores da infiltração de água no solo. A vegetação densa melhora esses parâmetros, contribuindo para uma maior infiltração e, conseqüentemente, redução do escoamento superficial, bem como na geração e transporte de sedimentos e nutrientes para os cursos d'água (ZHOU *et al.*, 2017). Em virtude desses fatores associados com os macroporos e da elevada quantidade de matéria orgânica em solos de mata nativa as taxas de infiltração nestas são maiores quando comparadas com as correspondentes a vegetação rasteira (DE AP BACELLAR, 2005).

O gráfico *Box-Plot* (Figura 26) apresenta as vazões médias diárias observadas na bacia, para cada mês da série simulada (01/01/2010 – 31/12/2013)

para cada cenário. O *Box-Plot* é um gráfico estatístico que representa a distribuição de um conjunto de dados baseando-se em alguns parâmetros: mediana, 1º e 3º quartil, mínimos e máximos, para que se possa identificar os valores atípicos (*outliers*) e extremos na série. Para a série do JG, levando em conta a distribuição da maioria dos dados, 5%-95% (caixa retangular), e os limites dos quartis (linha vertical), foi considerado que valores maiores que 2 m³/s são eventos extremos. Ainda, é possível observar que os meses de janeiro, fevereiro e março apresentam os maiores valores de vazão da série, que representa os meses mais chuvosos na região.

Figura 26 - Box-Plot das vazões médias diárias observadas na bacia do JG em cada mês da série para os três cenários de uso e ocupação do solo.

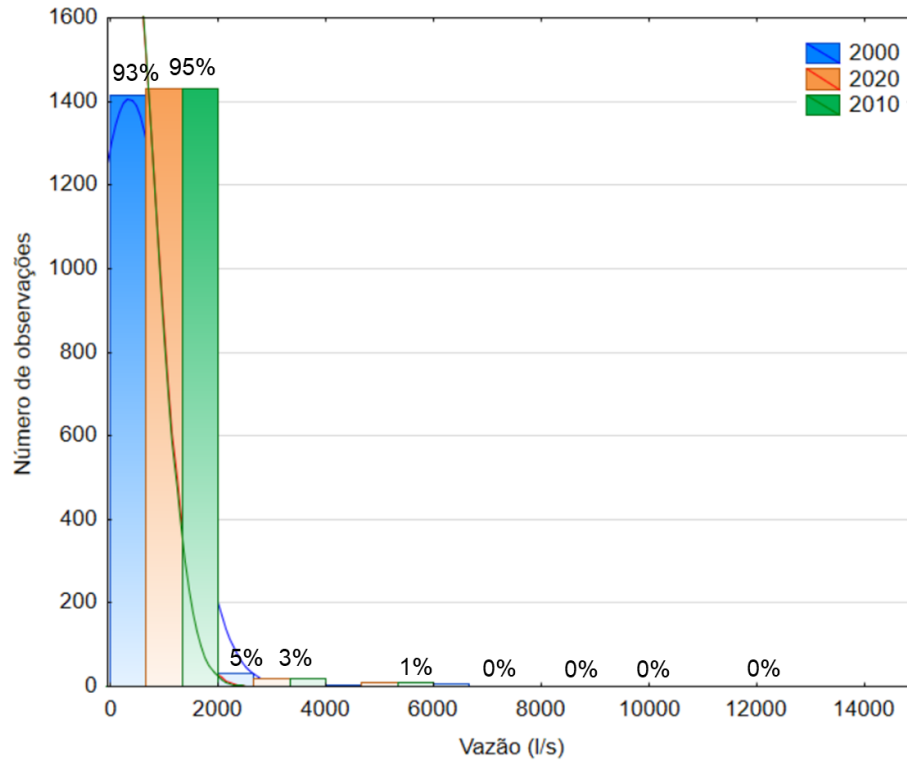


Fonte: do autor

Tal análise pode ser confirmada analisando a Figura 27 que apresenta o histograma com distribuição das frequências relativas das vazões, aqui é possível verificar que

para todos os cenários 95% do número de observações apresenta vazão inferior a 95% (abaixo de 2000 l/s).

Figura 27 - Distribuição de frequência relativa das vazões (l/s).



Fonte: do autor

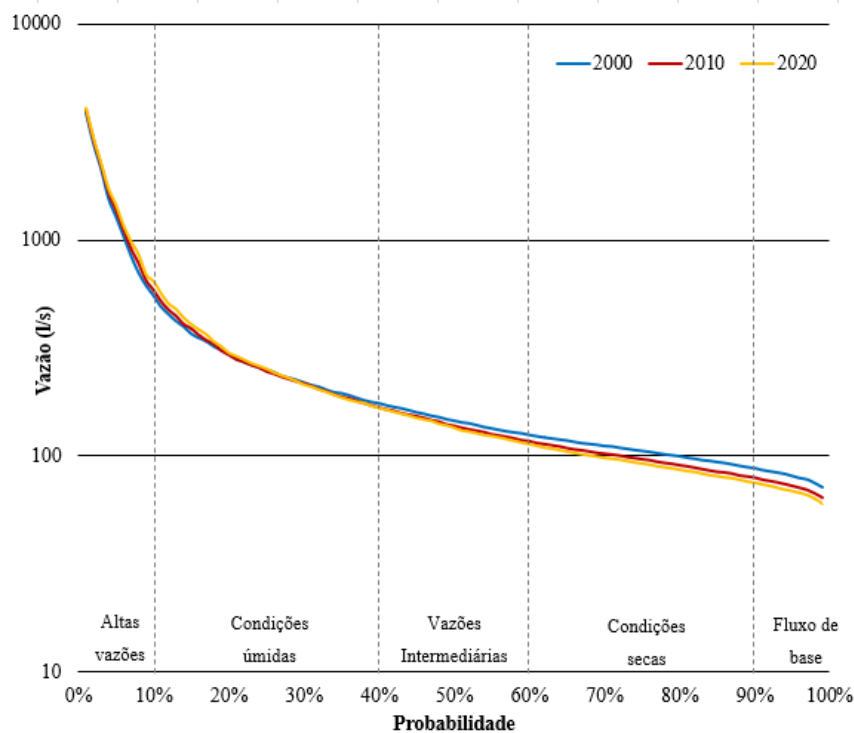
5.5 INFLUÊNCIA DA EVOLUÇÃO URBANA NA PRODUÇÃO DE ÁGUA

Segundo Almeida et al. (2020) o modelo SWAT foi eficiente para simular o impacto da mudança de uso e ocupação do solo para diferentes cenários. Andréassian (2004) indica que o aumento da área florestada causa uma diminuição do pico máximo de fluxo, e um aumento nos valores de descarga do fluxo de base. A evolução do uso do solo (2000 – 2020) na bacia do JG teve como consequência um aumento da área urbana, da área de vegetação rasteira e diminuição da área de vegetação densa. Essas mudanças refletiram na curva de permanência, na Figura 28 é possível observar que os cenários que apresentam respectivamente maior percentagem de vegetação densa e menor de vegetação rasteiram e áreas urbanas (2000 > 2010 > 2020) apresentam maiores valores de fluxo de base para períodos

com condições intermediárias e de seca. Já para as condições úmidas e de altas vazões, apresenta a figura demonstra uma inversão nas curvas de permanência para os cenários, onde picos de vazão mais elevados são observados para os cenários com menos vegetação densa e maior presença de vegetação rasteira e área urbana (2020 > 2010 > 2000).

Os resultados podem ser atribuídos à menor taxa de recarga dos aquíferos rasos em solo exposto, acredita-se que dessa forma o aporte de água subterrânea aos rios é reduzido após o cessamento das chuvas, gerando desuniformidade no regime hidrológico e elevado escoamento superficial em eventos de precipitação. Os resultados para condições secas apresentaram um comportamento de vazão esperado, comparado com Blainski *et al.*, (2017), que relacionou o aumento de áreas urbanas e campestres com maiores vazões de pico e menores vazões em períodos de estiagem.

Figura 28 - Curva de permanência para a bacia do JG nos cenários de 2000, 2010 e 2020.

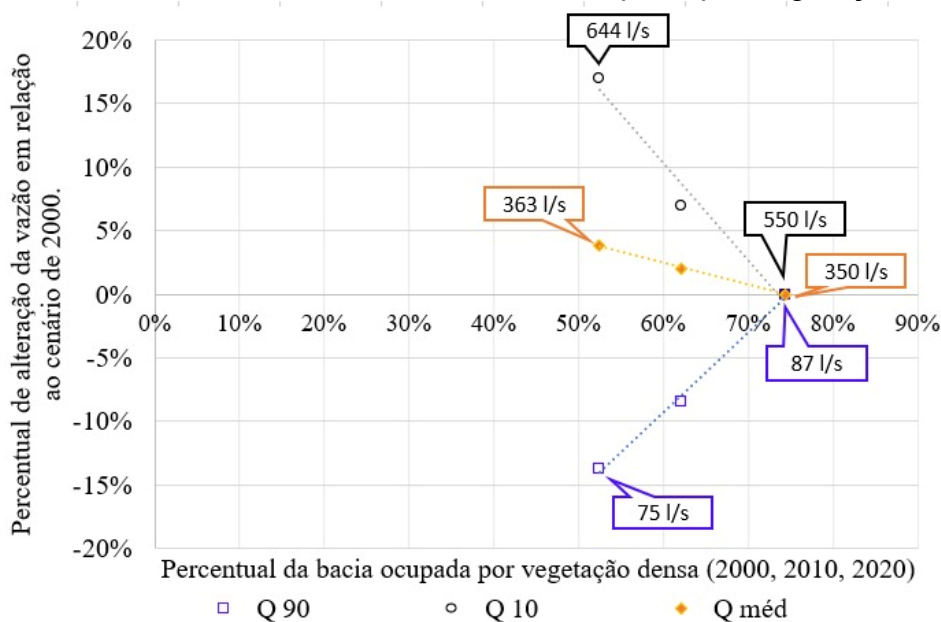


Fonte: do autor

Por meio da simulação de cenários (2000, 2010 e 2020) é possível avaliar o comportamento da $Q_{\text{média}}$, Q_{90} e Q_{10} ao longo dos anos, considerando os diferentes usos da terra. A Figura 29 mostra a variação das vazões simuladas em cada cenário de uso e ocupação do solo como resultado do desmatamento na bacia hidrográfica em comparação com o cenário de uso do solo em 2000. Como já discutido, a porcentagem de vegetação densa na bacia do JG caiu de 74% (2000) para 62% (2010) e atualmente (2020) a bacia conta com apenas 52% de vegetação densa.

A Figura 29 mostra uma tendência de aumento das vazões de pico (Q_{10}) simuladas com desmatamento, ou seja, o avanço das áreas urbanizadas e de vegetação rasteira sobre a vegetação densa. A Q_{10} variou de 550 l/s (2000) a 644 l/s (2020) o que representa um aumento de 17%. O fluxo de base (Q_{90}) por sua vez apresentou uma redução de 14% dos anos 2000 para 2020. Essas diferenças, em termos de volume, são mínimas, porém, ao avaliar a Figura 28, e Figura 25 fica claro que a bacia está sofrendo com a diminuição das vazões na maior parte do ano, devido a redução do fluxo de base, e com a elevação das vazões que ocasionam inundações em eventos de chuva intensa. A $Q_{\text{média}}$ simulada variou entre 350 l/s (2000) e 363 l/s (2020), o que representa um aumento de 4%, porém, esses valores são reflexo da alta vazão dos eventos extremos. Embora haja uma tendência matemática de $Q_{\text{média}}$ diminuir devido à arborização, a variação é pequena. No entanto, tendências de reduções mais expressivas de $Q_{\text{média}}$ com a arborização foram evidenciadas em diversos estudos baseados na coleta de dados de vazões médias, em diversas bacias do mundo tais como Bosch; Hewlett, (1982); Cecílio; Pimentel; Zanetti, (2019); Li *et al.*, (2017); Nóbrega, (2014); Oliveira *et al.*, (2020).

Figura 29 - Variação percentual da vazão ultrapassada em 90% do tempo (Q90), da vazão média (Qmed) e, da vazão ultrapassada em 10% do tempo (Q10) em função do percentual da vazão, área total da bacia ocupada por vegetação densa.



Fonte: O autor.

Os efeitos da expansão urbana podem ser mais bem estudados em pequenas bacias, que apresentam uma resposta significativa aos componentes hidrológicos. Uma pequena bacia hidrográfica (<1 km²) responde mais fortemente à mudança de uso e ocupação do solo do que uma grande bacia hidrográfica (>100 km²) que possui muitos processos complexos interagindo entre si (COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003; OLIVEIRA *et al.*, 2020). Samal; Gedam, (2021) verificaram que o nível da sub-bacia em Upper Bhima, no sul da Índia, tem uma significativa relação positiva entre a expansão urbana, o escoamento superficial e vazão hídrica, assim como uma relação negativa com vazão de base e vazão lateral.

A redução do fluxo de base nas bacias hidrográficas refletem na situação de escassez hídrica, que atinge diversos biomas no planeta (VELDKAMP *et al.*, 2016). No Brasil, a Mata Atlântica também enfrenta escassez de água devido ao desmatamento, poluição e crescimento populacional (ALVARENGA *et al.*, 2016). Para reverter esse quadro, uma das ações viáveis é o manejo efetivo das bacias hidrográficas, que muitas vezes passa por mudanças de uso do solo visando à recomposição e manutenção da cobertura vegetal adequada (CECÍLIO; PIMENTEL; ZANETTI, 2019).

A análise realizada aqui leva em consideração apenas as alterações no uso e ocupação do solo, visto que a série de chuva para os três cenários foi a mesma. Em termos de volumes, a vazão diária para o cenário de 2020 é maior que para o de 2010 que por sua vez é maior que o de 2000. Conforme apresentado na Tabela 8, a percentagem de área urbana em 2000 era de 6%, enquanto que em 2020 era de 21%. O aumento de vazão entre os anos de 2000 e 2020 foi, em média, de 4% (1.100 m³/dia). O volume médio diário de entrada na laguna atualmente é de 31.300 m³. Como é possível observar, os meses de janeiro, fevereiro e março tem médias mensais maiores para os 3 cenários, o que está relacionado ao maior índice pluviométrico para este período na região.

Tabela 8 – Volume de água proveniente do rio João Gualberto na Lagoa da Conceição para cada cenário

Mês	2000	2010	2020	Diferença 2000-2020	
	Q (10 ³ m ³ /dia)			10 ³ m ³ /d	%
Janeiro	50	51	51	1.0	2%
Fevereiro	38	39	39	1.3	3%
Março	54	55	56	1.8	3%
Abril	25	26	26	1.0	4%
Mai	33	34	35	1.9	6%
Junho	17	18	18	1.1	6%
Julho	17	18	18	1.4	8%
Agosto	32	32	33	1.1	3%
Setembro	31	32	33	1.5	5%
Outubro	17	17	18	0.6	4%
Novembro	18	19	19	0.4	2%
Dezembro	29	30	30	0.8	3%
Média	30.2	30.8	31.3	1.1	4%

Fonte: O autor.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados deste trabalho mostraram que o modelo SWAT foi capaz de representar de forma intermediária a produção de água (vazão) da bacia hidrográfica do rio João Gualberto. Após uma análise de sensibilidade foram selecionados os parâmetros CN2, GW_DELAY, SURLAG e ESCO para a calibração com KGE de 0,64, p-fator de 0,75 e r-fator de 0,92.

Os mapas de uso e ocupação de solo para os cenários de 2000, 2010 e 2020, se comportaram muito bem para as classes florestais segundo o classificador SVM, já o índice Kappa, variou de 0,75 a 0,79 entre os cenários, equivalente ao desempenho “muito bom”. Como resultado foi possível observar a evolução na diminuição da classe vegetação densa de 74% para 52% entre os anos de 2000 e 2020 assim como o aumento de área urbana de cerca de 6% para 21% no mesmo período.

Essa mudança de uso e ocupação do solo teve impacto na produção de água da bacia, onde os cenários 2000, 2010 e 2020 tiveram picos de vazão mais elevados e fluxos de base menores respectivamente. Essa observação fica evidente quando se observa condições de seca e do fluxo de base das curvas de permanência, onde a vazão mais elevada do fluxo de base para os cenários mais vegetados e menos urbanizados fica explícita. Já para condições húmidas e de altas vazões, a curva sofre uma inversão e os cenários mais urbanizados e com menos vegetação densa apresentam valores mais elevados de vazão.

Foi possível constatar uma tendência de aumento das vazões de pico (Q_{10}) simuladas com desmatamento, ou seja, o avanço das áreas urbanizadas e de vegetação rasteira sobre a vegetação densa. A Q_{10} variou de 550 l/s (2000) a 644 l/s (2020) o que representa um aumento de 17%. O fluxo de base (Q_{90}) por sua vez apresentou uma redução de 14% dos anos 2000 para 2020. Essas diferenças, em termos de volume, são mínimas, porém a bacia está sofrendo com a diminuição das vazões na maior parte do ano, devido a redução do fluxo de base, e com a elevação das vazões que ocasionam inundações em eventos de chuva intensa. A $Q_{médica}$ simulada variou entre 350 l/s (2000) e 363 l/s (2020), o que representa um aumento de 4%, porém, esses valores são reflexo da alta vazão dos eventos extremos.

Em termos absolutos, o aumento de vazão entre os anos de 2000 e 2020 foi, em média, de 4% (1.100 m³/dia). O volume médio diário de entrada na laguna para o cenário de 2020 é de 31.300m³. Como é possível observar, os meses de janeiro, fevereiro e março tem médias mensais maiores para os 3 cenários, o que está relacionado ao maior índice pluviométrico para este período na região.

Os resultados obtidos por este estudo demonstram a importância da modelagem hidrológica e do uso e ocupação do solo para a produção de água de uma pequena bacia hidrográfica. Este estudo identificou que o crescimento das áreas urbanas em detrimento da vegetação densa tem relação com o aumento das vazões máximas e redução nas vazões mínimas do rio João Gualberto.

As incertezas relacionadas ao presente estudo são a escassez de dados monitorados em campo dentro da bacia hidrográfica de interesse. A BHLC tem um regime pluviométrico diferente de outras regiões de Florianópolis devido a presença da laguna que é um corpo hídrico grande e de relevo acentuado no seu entorno. Portanto a utilização de dados meteorológicos medidos em outros locais da região pode não ser fieis a realidade de eventos hidrológicos desta bacia. Pelo fato de que a bacia hidrográfica do rio JG ser pequena o tempo de resposta a eventos hidrológicos é rápido, por isso a importância do monitoramento contínuo de vazão na bacia em uma escala temporal adequada é fundamental para reduzir as incertezas.

Por fim, para futuros estudos na bacia hidrográfica do rio João Gualberto, recomenda-se a utilização de dados de vazão medidos em campo por um período longo que contemple uma série de vazões suficientemente representativa em relação aos períodos secos e úmidos, assim como a medição de dados de precipitação, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa na própria bacia.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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 2012. **SWAT calibration and uncertainty program—A user manual**, 2013.

ABBASPOUR, K. C. et al. Global soil, landuse, evapotranspiration, historical and future weather databases for SWAT Applications. **Scientific Data**, v. 6, n. 1, p. 1–11, 2019.

AGHSAEI, H. et al. Effects of dynamic land use/land cover change on water resources and sediment yield in the Anzali wetland catchment, Gilan, Iran. **Science of the Total Environment**, v. 712, 2020.

AHMADI, A. et al. Integrated Planning of Land Use and Water Allocation on a Watershed Scale Considering Social and Water Quality Issues. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 138, n. 6, p. 671–681, 2012.

ALANSI, A. W. et al. The effect of development and land use change on rainfall-runoff and runoff-sediment relationships under humid tropical condition: Case study of Bernam watershed Malaysia. **European Journal of Scientific Research**, v. 31, n. 1, 2009.

ALMEIDA, R. A. et al. APPLICABILITY OF THE SWAT HYDROLOGICAL MODEL IN THE MUCURI RIVER BASIN land use scenarios , Land-use changes promote significant variations in streamflow regimes , and hydrological models allow studying their impacts . Based on this approach , this study . v. 4430, p. 631–644, 2020.

ALVARENGA, L. A. et al. Assessment of land cover change on the hydrology of a Brazilian headwater watershed using the Distributed Hydrology-Soil-Vegetation Model. **Catena**, v. 143, 2016.

ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual**. Brasília Agência Nacional das Águas, , 2018.

ANAND, J.; GOSAIN, A. K.; KHOSA, R. Prediction of land use changes based on Land Change Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. **Science of The Total Environment**, v. 644, p. 503–519, 2018.

ANDRADE, M. A.; MELLO, C. R. DE; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, 2013.

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. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, 2012a.

ARNOLD, J. G. et al. CHAPTER 1 - SWAT Input Data: Overview. **SWAT Input/Output File Documentation**, 2012b.

ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. **Journal of Hydrology**, v. 142, n. 1, p. 47–69, 1993.

B. BONUMÁ, N.; G. ROSSI, C.; G. ARNOLD, J. Hydrology Evaluation of the Soil and Water Assessment Tool Considering Measurement Uncertainty for a Small Watershed in Southern Brazil. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 29, n. 2, p. 189–200, 2013.

BAUCKE, A. S.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. CONTRIBUIÇÃO HIDROSSEDIMENTOLÓGICA DAS ESTRADAS RURAIS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS COM PEQUENAS E MÉDIAS PROPRIEDADES. **Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)**, n. 53, p. 13–32, 2019.

BENINI, R. DE M.; MENDIONDO, E. M. Urbanização e Impactos no Ciclo Hidrológico na Bacia do Mineirinho. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 211–222, jun. 2015.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base phys. **Hydrological Sciences Journal**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979.

BIER, F. B. **Caracterização morfométrica e hidrológica da bacia hidrográfica da Lagoa da Conceição, Florianópolis – SC**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2013.

BILONDI, M. P.; ABBASPOUR, K. C.; GHAHRAMAN, B. Application of Three Different Calibration-Uncertainty Analysis Methods in a Semi-Distributed Rainfall-Runoff Model Application. **Middle-East Journal of Scientific Research**, v. 15, n. 9, p. 1255–1263, set. 2013.

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

BLÖSCHL, G. et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective. **Hydrological Sciences Journal**, v. 64, n. 10, p. 1141–1158, 2019.

BONUMÁ, N. B. et al. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. **IX Encontro**

Nacional de Engenharia de Sedimentos, p. 1–17, 2010.

BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. **A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration**. *Journal of Hydrology*, 1982.

BRESSIANI, D. D. A. **Coping with hydrological risks through flooding risk index , complex watershed modeling , different calibration techniques , and ensemble streamflow forecasting Corrected Final Version**. [s.l.: s.n.].

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, 2015.

BRIGHENTI, T. M. et al. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the swat model. *Ecological Engineering*, v. 127, n. May 2018, p. 103–113, 2019.

BRIGHENTI, T. M.; BONUMÁ, N. B.; CHAFFE, P. L. B. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica catarinense. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 21, n. 1, 2016.

BUSICO, G. et al. Evaluating SWAT model performance, considering different soils data input, to quantify actual and future runoff susceptibility in a highly urbanized basin. *Journal of Environmental Management*, v. 266, 15 jul. 2020.

CADIER, E. et al. **Avaliação dos estudos referentes aos recursos hídricos das pequenas bacias do Nordeste brasileiro**. Anais do VII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. *Anais...*1987.

CECÍLIO, R. A.; PIMENTEL, S. M.; ZANETTI, S. S. Modeling the influence of forest cover on streamflows by different approaches. *Catena*, v. 178, p. 49–58, 2019.

CHAUHAN, N.; KUMAR, V.; PALIWAL, R. Quantifying the impacts of decadal landuse change on the water balance components using soil and water assessment tool in Ghaggar river basin. *SN Applied Sciences*, v. 2, n. 11, 2020.

CHEN, C. F. et al. Application of the SUSTAIN model to a watershed-scale case for water quality management. *Water (Switzerland)*, v. 6, n. 12, p. 3575–3589, 2014.

CHOW, V. TE; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hidrology**. [s.l.] McGraw-Hill, 1988.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. [s.l.: s.n.].

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal*

of **Hydrology**, v. 283, n. 1–4, 2003.

CRUZ, J.; TUCCI, C. Estimativa da Disponibilidade Hídrica Através da Curva de Permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 1, 2008.

DA SILVA, M. R. et al. Metal contamination in surface sediments of mangroves, lagoons and southern bay in florianopolis island. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 17, n. 10, p. 1035–1046, 1996.

DAMAME, D. B.; LONGO, R. M.; DE OLIVEIRA, E. D. Impactos ambientais pelo uso e ocupação do solo em sub bacias hidrográficas de Campinas, São Paulo, Brasil. **Acta Brasiliensis**, v. 3, n. 1, p. 1–7, 2019.

DE ALMEIDA BRESSIANI, D. et al. 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. 9–35, maio 2015.

DE AP BACELLAR, L. O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas. **Geo. br**, v. 1, p. 1–39, 2005.

DE OLIVEIRA SERRÃO, E. A. et al. Large-Scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 21, n. 1, p. 23–35, 2021.

DE PAIVA, J. B. D.; DE PAIVA, E. M. C. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. [s.l.] ABRH, 2001.

DIAS, R. H. S. et al. Influência do uso e ocupação do solo no escoamento superficial na cidade de Ji-Paraná-RO, Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 05, p. 1493–1508, 2015.

DOS R. PEREIRA, D. et al. Hydrological simulation in a basin of typical tropical climate and soil using the SWAT model part I: Calibration and validation tests. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 7, p. 14–37, 2016.

EMBRAPA. **Solos do estado de Santa Catarina**. [s.l.: s.n.]. v. 46

FLUEGEL, W. A. **Hydrological response units (HRUs) to preserve basin heterogeneity in hydrological modelling using PRMS/MMS - case study in the Brol basin, Germany**. IAHS-AISH Publication. **Anais...**1995.

FONSECA, L. M. G. **Processamento digital de imagens**. São José dos Campos: INPE, 2000.

FORMIGONI, Y. et al. Análise Crítica da Curva de Permanência de Qualidade da Água Com Base em Dados Históricos. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1–14, 2011.

FOSTER, S. S. D. Impacts of urbanization on groundwater. **Hydrological processes and water management in urban areas. Lectures and papers**,

UNESCO/IHP symposium, Duisburg, Lelystad, Amsterdam, and Rotterdam, 1988, 1990.

FRANCHINI, M. et al. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 175, n. 1–4, 1996.

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.

GARBOSSA, L. H. P. et al. The use and results of the Soil and Water Assessment Tool in Brazil: A review from 1999 until 2010. **International SWAT Conference & Workshops**, 2011.

GARBOSSA, L. H. P.; PINHEIRO, A. Vazões de referência para gestão de bacias hidrográficas rurais e urbanas sem monitoramento. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 12, n. 1, p. 43–52, 2015.

GASSMAN, P. W. 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.

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

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, 20 out. 2009.

HAUGHTON, G.; HUNTER, C. Sustainable Cities. London. **Regional Studies Association**, 1994.

HORN, L. **Determinação da curva -chave do rio João Gualberto – Florianópolis, SC**. [s.l: s.n.].

IENSEN, I. R. R.; DOS SANTOS, I. Simulação sub-diária e diária de escoamento com o modelo SWAT em pequena bacia experimental. **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 8, 2017.

INEA. **Gestão da Qualidade das Águas**. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/MegaDropDown/Monitoramento/Qualidadedaagua/index.htm&lang=PT-BR>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

JODAR-ABELLAN, A. et al. Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain). **Science of the Total Environment**, v. 657, p. 1578–1591, 2019.

KERN, P. **Estimativa de fluxos na interface sedimento-água em diferentes regiões de uma laguna subtropical: Lagoa da Conceição – Florianópolis/SC**Dissertação. [s.l: s.n.].

KOBIYAMA, M.; SILVA, R. Estudo Comparativo de Três Formulações do TOPMODEL na Bacia do Rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, 2007.

KONDOH, A.; NISHIYAMA, J. **Changes in hydrological cycle due to urbanization in the suburb of Tokyo Metropolitan area, Japan**. Advances in Space Research. **Anais...**2000.

KOUTROULIS, A. G.; TSANIS, I. K. A method for estimating flash flood peak discharge in a poorly gauged basin: Case study for the 13-14 January 1994 flood, Giofiros basin, Crete, Greece. **Journal of Hydrology**, v. 385, n. 1–4, 2010.

LE, C. et al. Remote sensing of phycocyanin pigment in highly turbid inland waters in Lake Taihu, China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 23, p. 8253–8269, dez. 2011.

LELIS, T. A. et al. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 623–634, mar. 2012.

LI, Q. et al. Forest cover change and water yield in large forested watersheds: A global synthetic assessment. **Ecohydrology**, v. 10, n. 4, 2017.

LI, Y.; DELIBERTY, T. Assessment of Urban Streamflow in Historical Wet and Dry Years Using SWAT across Northwestern Delaware. **Environmental Processes**, v. 7, n. 2, p. 597–614, 2020.

MACHADO, M. A. Avaliação da influência do crescimento populacional na balneabilidade da Lagoa da Conceição, Florianópolis-SC. 2019.

MAINALI, J.; CHANG, H. Landscape and anthropogenic factors affecting spatial patterns of water quality trends in a large river basin, South Korea. **Journal of Hydrology**, v. 564, p. 26–40, set. 2018.

MALUTTA, S. Estudo hidrossedimentológico da bacia hidrográfica do Rio Negrinho-SC com o modelo SWAT. 2012.

MARTINS, L. L. et al. Calibração hidrológica do modelo SWAT em bacia hidrográfica caracterizada pela expansão do cultivo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 576–594, 2020.

MEAURIO, M. et al. Long-term and event-scale sub-daily streamflow and sediment simulation in a small forested catchment. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 5, p. 862–873, 2021.

NAGHETTINI, M. .; PINTO, É. J. D. A. **Hidrologia estatística**. CPRM ed. [s.l: s.n.].

NASCIMENTO, R. F. F. et al. O algoritmo Support Vector Machines (SVM):

avaliação da separação ótima de classes em imagens CCD-CBERS-2. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 14, p. 2079–2086, 2009.

NEITSCH, S. . et al. **Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation**. Springer R ed. [s.l: s.n.].

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

NETO, J. R. DE A. et al. Impacto da antropização de uma bacia semiárida sobre os fluxos de água e sedimentos usando o modelo SWAT. **Anais do CongVol. 5 : Congestas 201 resso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 5, p. 496–505, 2017.

NEVES, J. Uso da terra e urbanização dos ambientes costeiros na ilha de Santa Catarina, SC, Brasil. 2017.

NOBERT, J. Hydrological Response of Watershed Systems to Land Use/Cover Change. A Case of Wami River Basin. **The Open Hydrology Journal**, v. 6, n. 1, 2012.

NÓBREGA, R. S. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. spe, 2014.

ODEBRECHT, C.; CARUSO GOMES JR., F. **Hidrografia e matéria particulada em suspensão na Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. FlorianópolisNEMAR - CCB - UFSC, , 1999.

ODUSANYA, A. E.; SCHULZ, K.; MEHDI-SCHULZ, B. Using a regionalisation approach to evaluate streamflow simulated by an ecohydrological model calibrated with global land surface evaporation from remote sensing. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 40, p. 101042, 2022.

OLIVEIRA, L. T. et al. Hydrological simulation of a small forested catchment under different land use and forest management. **IForest**, v. 13, n. 4, p. 301–308, 1 ago. 2020.

OSEI, M. A. et al. The impact of climate and land-use changes on the hydrological processes of Owabi catchment from SWAT analysis. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 25, p. 100620, 2019.

PAIVA, R. C. D. DE. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias estudo de caso: bacia do rio Solimões**. Dissertação de mestrado.—Porto Alegre.: UFRGS, 2009.

PANAGOPOULOS, Y. et al. SWAT parameterization for the identification of critical diffuse pollution source areas under data limitations. **Ecological Modelling**, v. 222, n. 19, p. 3500–3512, 2011.

PETERSON, J. R. HYDROLOGIC CALIBRATION OF THE SWAT MODEL IN A WATERSHED CONTAINING FRAGIPAN SOILS ' for the two basins , respectively . Srinivasan and lower than measured flows . Bingner (1996) also The large number of nonpoint source pollution each with certain streng. v. 34, n. 3, p. 531–544, 1999.

PMF. **Plano Municipal Integrado De Saneamento Básico - Produto 2 - Diagnóstico da caracterização física.** [s.l: s.n.]. v. 1

PORTO FILHO, É. **Sedimentometria e algumas considerações sobre a biogeoquímica dos sedimentos de fundo da Lagoa da Conceição, Ilha de Santa Catarina.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 1993.

PORTO, R. DE M. **Hidráulica Básica.** 4. ed. São Carlos: EESC/USP, 2006.

PREIS, C. M. **Impacto hidrológico das alterações previstas de uso do solo para a bacia hidrográfica do Rio Itajaí simulado com o SWAT.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográfica.** [s.l: s.n.].

SAMAL, D. R.; GEDAM, S. Assessing the impacts of land use and land cover change on water resources in the Upper Bhima river basin, India. **Environmental Challenges**, v. 5, 2021.

SANTOS, J. Y. G. **Análise espaço-temporal de processos hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Tapacurá (Pernambuco, Brasil).** [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2015.

SANTOS, V. **Disposição de efluentes tratados em uma lagoa de evapoinfiltração.** [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

SCANLON, B. R. et al. Global impacts of conversions from natural to agricultural ecosystems on water resources: Quantity versus quality. **Water Resources Research**, v. 43, n. 3, 2007.

SCHWAB, G. O. et al. **Soil and Water Conservation Engineering.** [s.l: s.n.].

SEGNOR, C. R.; SPINELLI, J. A hidrologia de Chapecó/SC: alterações nas bacias hidrográficas urbanas a partir do processo de urbanização do município. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 24, p. e56, 2020.

SIERRA DE LEDO, B.; GRÉ, J. C. R.; SORIANO-SIERRA, E. J. Produção pesqueira, estressores naturais e antropogênicos na Lagoa da Conceição, Santa Catarina, Brasil. **O ecossistema da Lagoa da Conceição. Florianópolis: SDM/FEPEMA**, p. 359–370, 1999.

SILVA, G. C. DA et al. Avaliação Da Degradação Ambiental Na Microbacia Do Córrego Mineirinho, São Carlos-SP. **V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**,

p. 1–8, 2014.

SILVA, V. E. C. **ANÁLISE HIDRODINÂMICA E BIOGEOQUÍMICA DE UMA LAGUNA COSTEIRA SUBTROPICAL EM BACIA HIDROGRÁFICA URBANIZADA: LAGOA DA CONCEIÇÃO, FLORIANÓPOLIS, SANTA CATARINA.** [s.l.] UFSC, 2021.

SISAY, E. et al. Hydrological modelling of ungauged urban watershed using SWAT model. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 3, n. 2, p. 693–702, 2017.

SORIANO-SIERRA, E. **Ecologia e gerenciamento do manguezal de Itacorubí.** Florianópolis: [s.n.].

TAN, M. L. et al. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. **Advances in Water Resources**, p. 103662, 2020.

TARGA, M. DOS S. et al. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente e Agua**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

THOMPSON, S. A. **Hydrology for water management.** [s.l.] CRC Press, 2017.

TUCCI, C.; COLLISCHONN, W. Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 27–39, 2003.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** [s.l.: s.n.].

USACE. HEC-RAS Hydraulic Reference Manual. **US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center**, n. February, 2016.

USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS.** [s.l.: s.n.].

UZEIKA, T. et al. Use of the swat model for hydro-sedimentologic simulation in a small rural watershed. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 2, p. 557–565, mar. 2012.

VAN GRIENSVEN, A. et al. Critical review of SWAT applications in the upper Nile basin countries. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 9, p. 3371–3381, set. 2012.

VELDKAMP, T. I. E. et al. Towards a global water scarcity risk assessment framework: Incorporation of probability distributions and hydro-climatic variability. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 2, 2016.

VENZON, P. T.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Hydrological simulation uncertainties in small basins through the SWAT model. **RBRH**, v. 23, n. 0, nov. 2018.

W. VAN LIEW, M.; G. ARNOLD, J.; D. BOSCH, D. PROBLEMS AND POTENTIAL OF AUTOCALIBRATING A HYDROLOGIC MODEL. **Transactions of the ASAE**, v. 48, n. 3, p. 1025–1040, 2005.

WANG, G. et al. Integrated watershed management: evolution, development and emerging trends. **Journal of Forestry Research**, v. 27, n. 5, p. 967–994, 2016.

WHITE, K. L.; CHAUBEY, I. Influence of Hydrologic Response Unit (HRU) distribution on SWAT model flow and sediment predictions. **Proceedings of the 3rd Conference on Watershed Management to Meet Water Quality Standards and Emerging TMDL**, v. 2005, n. 701, p. 283–289, 2005.

WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research**, v. 30, n. 6, p. 1665–1679, jun. 1994.

WILLIAMS, J. R.; HANN, R. W. **Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality restraints**. [s.l.] Texas Water Resources Institute, 1978.

WOLDESENBET, T. A. et al. Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. **Science of the Total Environment**, v. 575, p. 724–741, 2017.

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.

ZHOU, Y. et al. Hydrological and environmental controls of the stream nitrate concentration and flux in a small agricultural watershed. **Journal of Hydrology**, v. 545, 2017.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO DOS PARAMETROS UTILIZADOS

A tabela abaixo apresenta uma descrição dos parâmetros utilizados para a calibração do modelo SWAT através do SWAT CUP com a aplicação do Sufi-2 e função objetivo KGE.

Nome do Parâmetro	Descrição do parâmetro
OV_N.hru	O valor "n" do homem para o fluxo terrestre
SHALLST.gw	Profundidade inicial da água no aquífero pouco profundo (mm)
GW_REVAP.gw	Coefficiente de "revap" das águas subterrâneas
SLSUBBSN.hru	Comprimento médio do talude
GWQMN.gw	Profundidade de retenção de água no aquífero pouco profundo necessária para que o fluxo de retorno ocorra (mm)
REVAPMN.gw	Profundidade do limiar de água no aquífero pouco profundo para que ocorra uma "revap" (mm)
ALPHA_BF.gw	Factor alfa Baseflow (dias)
CNCOEF.bsn	Coefficiente do número da curva ET da planta
SOL_K(..).sol	Condutividade hidráulica saturada
DEEPST.gw	Profundidade inicial da água no aquífero profundo (mm)
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica eficaz no aluvião do canal principal
LAT_TTIME.hru	Tempo de viagem de fluxo lateral
CH_N1.sub	O valor "n" de Manning para os canais tributários
CANMX.hru	Armazenamento máximo da copa das árvores
RCHRG_DP.gw	Fração de percolação profunda do aquífero.
CH_N2.rte	O valor "n" de Manning para o canal principal
SOL_AWC(..).sol	Capacidade de água disponível da camada do solo
GWQMN.gw	Profundidade de retenção de água no aquífero pouco profundo necessária para que o fluxo de retorno ocorra (mm)
CN2.mgt	SCS número da curva de escoamento f
SURLAG.bsn	Tempo de atraso de escoamento superficial
ESCO.hru	Opção de simulação de fluxo de saída
GW_DELAY.gw	Atraso nas águas subterrâneas (dias)