

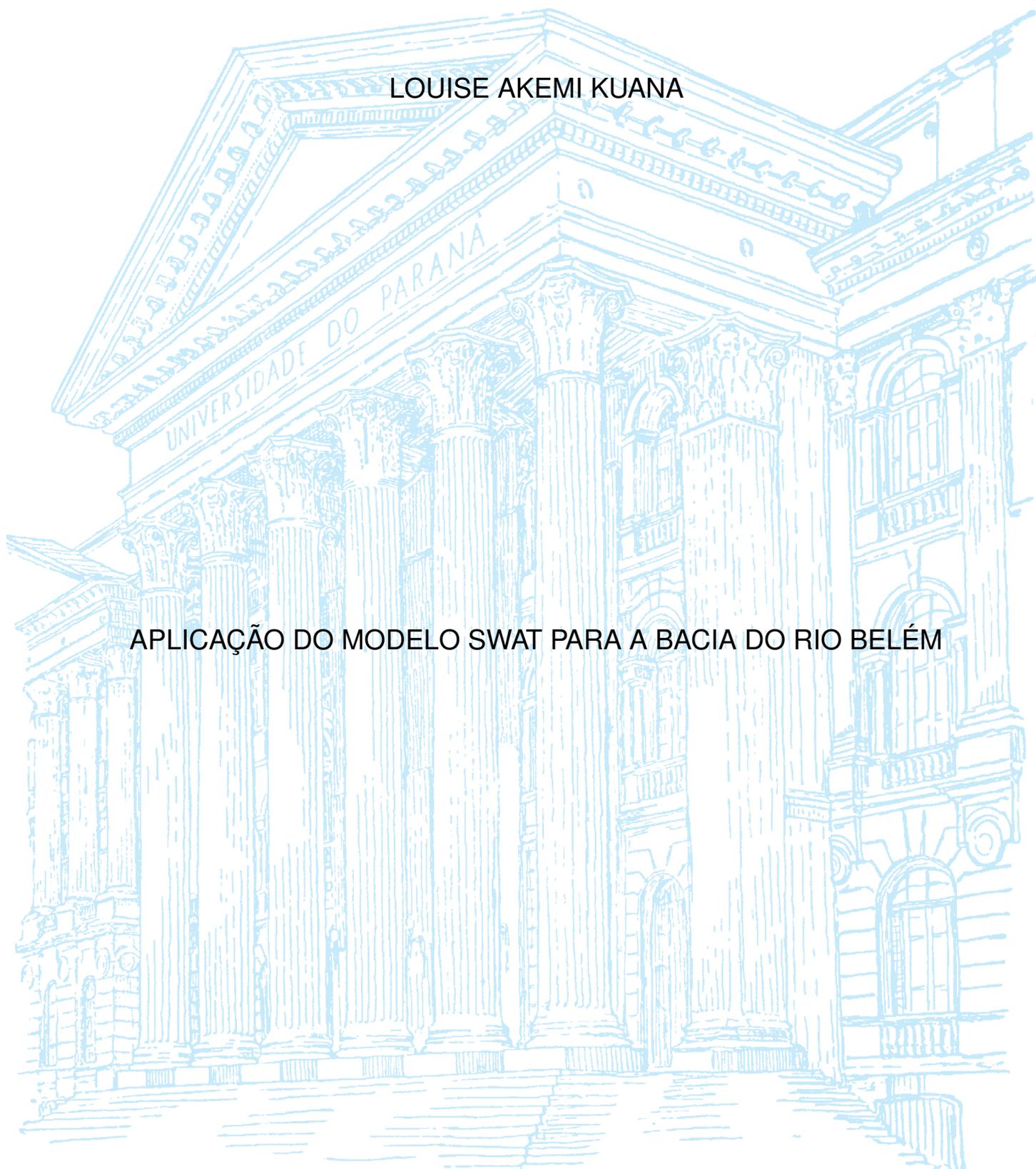
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LOUISE AKEMI KUANA

APLICAÇÃO DO MODELO SWAT PARA A BACIA DO RIO BELÉM

CURITIBA

2019



LOUISE AKEMI KUANA

APLICAÇÃO DO MODELO SWAT PARA A BACIA DO RIO BELÉM

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Paraná, apresentado como requisito parcial para a obtenção de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Emílio Graciliano Ferreira Mercuri

CURITIBA

2019

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

Aos meus pais e meu irmão, pelo amor, paciência, apoio e incentivo incondicional. A presença e a educação que vocês me deram foram fundamentais, sem vocês não concluiria esta importante fase da minha vida.

Ao meu namorado, Eduardo Salmoria Fantin, que sempre esteve ao meu lado e por compreender minha dedicação ao projeto de pesquisa.

Ao professor Emílio, pela oportunidade, orientação, apoio e confiança na elaboração deste trabalho.

À Laís Carneiro, por compartilhar seus conhecimentos, pelas sugestões e pela disposição em me ajudar.

Aos meus orientadores do Kumon, Clenir e Flávio de Carvalho, por terem me ensinado o método do Kumon, o qual me auxiliou a melhorar os meus estudos, a ser mais autodidata e confiante.

RESUMO

Localizado em Curitiba, o rio Belém faz parte da formação do município que o envolveu durante a expansão da cidade com o avanço rápido da urbanização. Embora o rio Belém tenha tido um papel economicamente relevante durante a formação da cidade, este muitas vezes é conhecido pelos seus problemas com enchentes e de poluição. O presente trabalho visa produzir um modelo hidrológico capaz de gerir não só os processos naturais como também os efeitos das atividades antropogênicas no balanço hídrico com objetivo de compreender melhor os processos do ciclo hidrológico e a situação atual dos recursos hídricos da bacia do rio Belém. O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é capaz de gerir uma gama diversa de parâmetros, para a sua operação são necessários: dados espaciais do modelo digital do terreno, uso e ocupação do solo, tipos e propriedades do solo e meteorológicos. O procedimento aplicado na análise de sensibilidade, calibração e a validação comparou a vazão simulada do modelo com a série observada empregando o algoritmo SUFI2 presente no SWAT-CUP 2019. Infelizmente, o modelo após a calibração manteve um desempenho insatisfatório. Os resultados mostram que as estruturas urbanas têm um papel relevante quando se trata do aumento do volume de água e dos picos de vazão em eventos extremos de precipitação. O desempenho do modelo também indica que os dados de entrada e de vazão observada devem ser revisados e melhorados para, assim, aprimorar o modelo conceitual.

Palavras-chave: Balanço hidrológico, Modelo SWAT, Urbanização.

ABSTRACT

Located in Curitiba, the Belém River is part of the formation of the city that involved it during its expansion with the fast pace of urbanization. Although the Belém river has played an economically relevant role during the city's growth, it is commonly known for floods and pollution issues. This work aims to create a hydrological model capable of managing not only the natural processes, but also the effects of anthropogenic activities in the water balance with the goal of better understanding the mechanism of the hydrological cycle and the current situation of the hydrous resources of Belém river basin. The hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is capable of handling a great range of parameters, whereas for its operation are necessary: spatial data of the digital terrain model, land use and occupation, soil types as well as soil and weather properties. The procedure applied for sensitivity analysis, calibration and validation compared the simulated flow rate of the model with the observed data series, employing the SWAT-CUP 2019 SUFI2 algorithm. Unfortunately, the model after the calibration kept an unsatisfactory performance. The results showed that the urban structures have a relevant role when it comes to the rise of the water volume and flow rate peaks in extreme events of rainfall. The model performance also indicates that the input data and observed flow rate should be reviewed and improved for a development on the model.

Keywords: Water balance, SWAT model, Urbanization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo hidrológico considerado pelo SWAT. Fonte: Adaptado de Dile (2018).	6
Figura 2 – Esta Figura ilustra que um único valor de parâmetro (mostrado por um ponto) leva a uma resposta de modelo único (mostrado em a), enquanto a propagação da incerteza em um parâmetro (mostrado por uma linha) leva ao 95PPU ilustrado em b pela região sombreada. À medida que a incerteza do parâmetro aumenta (mostrado em c), a incerteza de saída também aumenta. Fonte: Abbaspour et al. (2007).	13
Figura 3 – Localização da bacia hidrográfica do rio Belém.	14
Figura 4 – Hidrografia do Alto Iguaçu dividida em 30 sub-bacias.	15
Figura 5 – Diagrama Unifilar Sistema de Macrodrenagem da Bacia do Rio Belém. Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA (2012 apud PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017e).	16
Figura 6 – Trechos do rio Belém que mantiveram o curso natural e as seções em que foram submersas, retificadas e canalizadas a céu aberto. Fonte: Gallarza et al. (2011).	17
Figura 7 – Pontos de alagamentos que ocorreram entre 2005 e 2010 em Curitiba.	18
Figura 8 – Ilustração de como a água importada pode vir a entrar no ciclo hidrológico de uma bacia.	19
Figura 9 – Mananciais fontes do Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba (SAIC). Fonte: COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (2013).	20
Figura 10 – Densidade de poços artesianos na Região Metropolitana de Curitiba. Fonte: SUDERHSA e SANEPAR (2007).	21
Figura 11 – Unidades aquíferas do estado da Região Metropolitana de Curitiba.	21
Figura 12 – Mapa do Modelo Digital de Elevação da bacia do rio Belém.	24
Figura 13 – Mapa da hidrografia da bacia do rio Belém.	25
Figura 14 – Mapa de sub-bacias da bacia do rio Belém.	26
Figura 15 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia rio do Belém.	27
Figura 16 – Mapa de tipos de solo para a bacia do rio Belém.	28
Figura 17 – Localização das estações meteorológicas e fluviométricas presentes dentro da bacia.	31
Figura 18 – Dados de precipitação da estação do Prado Velho-UCP, do <i>Global Weather</i> 497, 494 e 491, do SIMEPAR e do INMET são apresentados na parte superior e na inferior é a vazão medida pela estação do Prado Velho-UCP.	32

Figura 19 – Dados de precipitação média da estação do Prado Velho-UCP, do <i>Global Weather</i> 497, 494 e 491, do SIMEPAR e do INMET são apresentados na parte superior e na inferior é a vazão medida pela estação do Prado Velho-UCP.	33
Figura 20 – Mapa de pontos amostrados no Parque São Lourenço.	37
Figura 21 – Mapa de pontos amostrados no Passeio Público.	38
Figura 22 – Mapa das divisões em sub-bacias do modelo SWAT para a bacia do rio Belém.	44
Figura 23 – Gráfico dos dados estimados de volume de água perdida no sistema distribuidor de água municipal e percentual dessas perdas, volume estimado per capita de esgoto não coletado e não tratado e o percentual de esgoto coletado e tratado.	45
Figura 24 – Projeção da população em cada parcela de bairro pertencente as sub-bacias do rio Belém.	46
Figura 25 – Volume estimado de esgoto não coletado e não tratado para as sub-bacias do rio Belém.	47
Figura 26 – Volume estimado de água perdida para as sub-bacias do rio Belém.	47
Figura 27 – Comparação da vazão simulada em escala diária para os diferentes cenários e a vazão observada para o período de 2000 a 2002.	48
Figura 28 – Balanço hídrico simulado pelo modelo SWAT para o período de 2000 a 2013.	49
Figura 29 – Balanço hídrico médio anual do modelo simulado de 2000 a 2013.	50
Figura 30 – Comparação da altura do nível da água do lençol freático simulado com a estimada.	51
Figura 31 – Comparação da evapotranspiração simulada com a estimada.	51
Figura 32 – Indicação da área da bacia em que foi realizada a calibração.	52
Figura 33 – Comparação da sensibilidade local com a global.	53
Figura 34 – Representação esquemática da recarga e descarga dos aquíferos: (A) canal principal sendo recarregado pelo aquífero; (B) canal recarregando o aquífero; (C) perda de fluxo para o aquífero alto; (D) sistema de fluxo contínuo através do canal. Fonte: (ARNOLD et al.,).	55
Figura 35 – Calibração da vazão simulada para o ano de 2000 a 2004.	57
Figura 36 – Validação da vazão simulada para o ano de 2009.	58
Figura 37 – Validação da vazão simulada para o ano de 2012 e 2013.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3 – Índice de perdas no sistema distribuidor do município de Curitiba. Fonte: Prefeitura Municipal de Curitiba (2017f).	22
Tabela 4 – Uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Belém.	27
Tabela 4 – Uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Belém.	28
Tabela 5 – Tipos de solo da área de estudo agrupados.	29
Tabela 6 – Características físicas do solo.	29
Tabela 7 – Parâmetros das características físicas das classes de cada solo. Fonte: Cunha et al. (2011).	30
Tabela 8 – Estações meteorológicas utilizadas.	31
Tabela 9 – Estações fluviométricas utilizadas pelo modelo	32
Tabela 10 – Parâmetros de entrada para o Gerador Climático	33
Tabela 10 – Parâmetros de entrada para o Gerador Climático	34
Tabela 11 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica 491 <i>Global Weather</i>	34
Tabela 12 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica 494 <i>Global Weather</i>	34
Tabela 12 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica 494 <i>Global Weather</i>	35
Tabela 13 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica 497 <i>Global Weather</i>	35
Tabela 14 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica INMET.	35
Tabela 14 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica INMET.	36
Tabela 15 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica SIMEPAR.	36
Tabela 16 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica Prado Velho - UCP.	36
Tabela 17 – Características dos reservatórios do Parque São Lourenço e do Passeio Público	38
Tabela 18 – Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade do modelo.	42
Tabela 19 – Dados estimados de volume de água perdida no sistema distribuidor de água municipal e percentual dessas perdas, volume estimado per capita de esgoto não coletado e não tratado e o percentual de esgoto coletado e tratado,	45
Tabela 19 – Dados estimados de volume de água perdida no sistema distribuidor de água municipal e percentual dessas perdas, volume estimado per capita de esgoto não coletado e não tratado e o percentual de esgoto coletado e tratado,	46

Tabela 20 – Comparação da sensibilidade local com a global.	52
Tabela 21 – Sensibilidade dos parâmetros selecionados para a calibração e o intervalo utilizado para a calibração.	54

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional das Águas
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CCE	<i>Competitive Complex Evolution</i>
CN	Número de Curva
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IPPUC	Instituto de Pesquisas e Planejamento Urbano do Paraná
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
HRUs	Unidade de Resposta Hidrológica
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano
GLUE	<i>Generalized Likelihood Uncertainty Estimation</i>
MCMC	<i>Markov Chain Monte Carlo</i>
MDE	Modelo Digital do Elevação
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCEP	<i>The National Centers for Environmental Prediction</i>
NGA	<i>National Geospatial-Intelligence Agency</i>
NSE	Eficiência Nash Sutcliffe
ParaSol	<i>Parameter Solution</i>

RCE	Rede Pública de Coleta de Esgoto	
SAIC	Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba	
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento	
SCE-UA	<i>Shuffle Complex</i>	
SIG	Sistemas de Informação Geográficas	
SUFI2	<i>Sequential Uncertainty Fitting</i>	
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>	
SRTM	<i>Shuttle Radar Tomography Mission</i>	
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>	
WGEN	<i>Weather Generator</i>	
PCPMM	Precipitação média	(mm)
PCPSTD	Desvio da precipitação	(mm)
PCPD	Número de dias de precipitação	
RAINHHMX	Precipitação máxima de 0,5 hora	(mm)
SOLARAV	Valor diário da energia solar	(MJm ² dia ⁻¹)
TMPMX	Temperatura máxima	(°C)
TMPMN	Temperatura mínima	(°C)
TMPSTDMX	Desvio da temperatura máxima	(°C)
TMPSTDMN	Desvio da temperatura mínima	(°C)

USDA-ARS	<i>United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service</i>	
USGS	<i>United States Geological Survey</i>	
WDAV	Velocidade do vento	(m/s)
DEWPT	Temperatura do ponto de orvalho	(°C)
PR_1	Probabilidade de dias de chuva seguido de dias de seca	(%)
PR_2	Probabilidade de dias de chuva seguido de dias de chuva	(%)
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima	

SÍMBOLOS

SW_t	Conteúdo final de água no solo	(mm)
SW_0	Conteúdo inicial de água no solo	(mm)
SW_t	Conteúdo final de água no solo	(mm)
t	Tempo em dias	(dias)
R_{day}	Precipitação	(mm)
Q_{surf}	Escoamento superficial	(mm)
E_a	Evapotranspiração	(mm)
ω_{seep}	Água que entra na zona de aeração do perfil do solo	(mm)
Q_{gw}	Fluxo de retorno que ocorrem no dia	(mm)
$PRECIP$	Precipitação total que caiu durante um período de tempo	(mm)
ΔSW_{t-0}	Diferença do conteúdo de água final e inicial dentro de um certo período de tempo	(mm)
ET	Evapotranspiração real dentro de um certo período de tempo	(mm)
$WYLD$	Quantidade de água líquida que sai da sub-bacia e que contribui para o fluxo do rio	(mm)
$LATQ$	Contribuição do escoamento lateral	(mm)
GWQ	Contribuição das águas subterrâneas	(mm)
$TLOSS$	Água perdida por transmissão nos canais tributários através do leito do rio	(mm)

λE	Densidade do fluxo de calor latente em	(MJ m ² d ⁻¹)
E	Variação da taxa de evapotranspiração	(mm d ⁻¹)
Δ	Inclinação da curva de pressão de saturação de vapor	
H_{net}	Radiação líquida	(MJ m ⁻² d ⁻¹)
G	Densidade do fluxo de calor no solo	(MJ m ⁻² d ⁻¹)
ρ_{air}	Densidade do ar	(kg m ⁻³)
c_p	Calor específico do ar	(MJkg ⁻¹ °C ⁻¹)
e_z^0	Pressão de vapor de saturação do ar	(kPa)
e_z	Pressão de vapor de água para a altura Z	(kPa)
r_a	Resistência aerodinâmica	(s m ⁻¹)
γ	Constante psicrométrica	(kPa °C ⁻¹)
r_c	Resistência superficial de cobertura das plantas	(s m ⁻¹)
Q_{surf}	Escoamento acumulado ou o excesso de precipitação	(mm)
R_{day}	Intensidade da precipitação	(mm)
I_a	Abstração superficial	(mm)
S	Parâmetro de retenção	(mm)
y_i^{obs}	Vazão observada	(m/s)
y_i^{sim}	Vazão simulada	(m/s)
y_{med}^{obs}	Média da vazão observada	(m/s)

q_{pico}	Taxa de escoamento de pico	$(m^3 s^{-1})$
C	Coeficiente de escoamento	
i	Intensidade da precipitação	$(mm h^{-1})$
$Area$	Área da sub-bacia	(km^2)
t_{ov}	Tempo de concentração para escoamento superficial	(h)
t_{ch}	Tempo de concentração para o escoamento do canal	(h)
R_{tc}	Quantidade de precipitação que caiu durante o tempo de concentração	$(mm H_2O)$
r	Taxa média de crescimento anual da população	(%)
P_t	População final	(hab.)
P_o	População no começo do período considerado	(hab.)
n	Número de anos no período	(anos)
ΔS	Nível do lençol freático	(mm)
Q	Vazão	(mm)

SUMÁRIO

	Lista de ilustrações	
	Lista de tabelas	
	Sumário	
1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Organização do Documento	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1	Modelo Hidrológico SWAT	5
3.1.1	Metodologia do SWAT	5
3.1.2	Evapotranspiração	7
3.1.3	Escoamento superficial	8
3.2	Calibração, validação e verificação	10
3.2.1	SWAT-CUP	11
4	ÁREA DE ESTUDO	14
4.1	Localização da área de estudo	14
4.2	Caracterização da área de estudo	14
4.2.1	Histórico de inundações em Curitiba na bacia do rio Belém	17
4.2.2	Água importada e explotada da bacia	19
5	MATERIAIS E MÉTODOS	23
5.1	Programas	23
5.2	Dados de entrada do modelo SWAT	23
5.2.1	Modelo Digital de Elevação	24
5.2.2	Hidrografia	25
5.2.3	Sub-bacias da bacia do rio Belém	26
5.2.4	Uso e ocupação do solo	26
5.2.5	Propriedades do solo	28
5.2.6	Dados meteorológicos e fluviométricos	30
5.2.7	Preenchedor de Falhas	33
5.3	Reservatórios	37
5.4	Água importada	38
5.4.1	Estimativa do volume de águas residuais	39

5.4.2	Estimativa do volume de água perdida	40
5.5	Desempenho do modelo	40
5.6	Análise de sensibilidade, calibração e validação do modelo . . .	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
7	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O ciclo da água, ou hidrológico, descreve o percurso da água na terra, no oceano e na atmosfera. O ciclo hidrológico é um conjunto de processos que incluem a evaporação da água proveniente da superfície de rios, lagos e oceanos, a precipitação formada pela condensação do vapor d'água na atmosfera, a água precipitada distribuída em fluxo superficial, em água interceptada, armazenada temporariamente em depressões da superfície, infiltrada e armazenada no solo (SERRANO, 1997; KARTERAKIS; SINGH; GUERGACHI, 2007).

O ciclo hidrológico pode mudar naturalmente com a alteração do uso e ocupação do solo, o tempo e a água em suas várias formas. Contudo, atividades antropogênicas, como por exemplo: mineração de águas subterrâneas, construção de barragens, irrigação, desmatamento, drenagem de áreas úmidas e a urbanização, podem impactar significativamente o ciclo hidrológico de uma região (GORNITZ C. ROSENZWEIG, 1997; PAUL, 2014).

Compreender os processos hidrológicos é fundamental para avaliar as condições atuais e as tendências futuras da disponibilidade de recursos hídricos. Tais processos podem ser quantificados com a ajuda de equações de balanço de água, que por sua vez são influenciadas pelos fatores climáticos, topográficos, ocupação e uso do solo, e propriedades do solo. Considerando a importância e a complexidade do ciclo da água, sua compreensão adequada é essencial, e portanto, modelos hidrológicos têm sido amplamente utilizados e extensivamente testados para uma grande variedade de escalas de bacias hidrográficas e condições ambientais em todo o mundo (GASSMAN et al., 2007b; SHAWUL; ALAMIREW; DINKA, 2013).

Os rios representam um processo de transporte importante no ciclo hidrológico. São fontes de água renovável sendo fundamentais para a vida dos seres humanos, da fauna e da flora (SHIKLOMANOV, 1998). Além disso, têm grande papel social, econômico, cultural e histórico para a humanidade. Em seu curso muitas vezes é possível encontrar atividades de lazer, agrícolas e industriais, criação animal, turismo, usinas elétricas e a captação de água para consumo humano (ASSAD, 2013).

Dessa forma, o desenvolvimento das cidades, geralmente, está relacionado com a presença dos rios. A grande São Paulo, por exemplo, foi estabelecida entre três volumosos rios, conhecidos como rio Tietê, rio Pinheiros e rio Tamanduateí, para crescer e se desenvolver (GOUVEIA, 2016). O surgimento do município de Curitiba não foi muito diferente. As primeiras ocupações se assentaram em territórios próximos dos rios Ivo e Belém (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017a; PREFEITURA

MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017e). Atualmente, existem a bacia do rio Iguaçu e outras cinco sub-bacias do rio Iguaçu em Curitiba, são elas: a sub-bacia do rio Atuba, do rio Barigui, do rio Belém, do rio Passaúna e do Ribeirão dos Padilhas.

A área de estudo, bacia do rio Belém, está localizada dentro da área de abrangência da unidade aquífera Guabirota, que por sua vez está situada na cidade de Curitiba e estende-se para outros municípios da região Metropolitana de Curitiba (SURDERHSA; COBRAPE, 2010). Dentro da unidade aquífera estão instalados poços artesianos que são utilizados principalmente para abastecimento de condomínios, hospitais e serviços em geral, abastecendo uma população próxima de 172.800 habitantes (FILHO; HINDI; LUCENA, 2002). A zona metropolitana e industrial de Curitiba tornam o aquífero livre do Guabirota susceptível à contaminação. Outra forma que põem em risco a qualidade da água do aquífero é a contaminação por meio do rio Belém, já que esse apresenta atualmente o maior índice de poluição hídrica dentre os rios que atravessam a cidade. Destacam-se como principais causas da baixa qualidade da água do rio Belém: deficiência de esgotamento sanitário, resíduos sólidos e ocupações desordenadas e irregulares (IAP, 2009; ONO, 2018; INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ et al., 2015).

A bacia do rio Belém abrange áreas intensamente urbanizadas do centro da cidade, ocupadas por residências, comércios e serviços. As infraestruturas urbanas instaladas nesses locais possivelmente podem estar relacionadas com a diminuição de áreas permeáveis, e conseqüentemente com o aumento do escoamento superficial e a rapidez com que a vazão do rio responde aos eventos extremos, ocasionando inundações, erosões e assoreamentos de terra. Embora o município de Curitiba não sofra com grandes desastres a Defesa Civil de Curitiba em conjunto com o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) registram dados pontuais de alagamentos. A partir desses dados é possível avaliar os prejuízos ocasionados por fortes pancadas de chuvas e aprimorar as ações de proteção e prevenção (LOHMANN, 2013; PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017e).

Considerando que a região já sofre com a ocorrência de eventos naturais extremos, e que esses por sua vez podem acontecer com maior frequência e intensidade devido aos impactos das ações humanas na ocupação irregular de áreas ribeirinhas somando-se com possíveis alterações que as mudanças climáticas podem acarretar para a região de Curitiba, tornam-se necessários estudos na bacia do rio Belém, posto que é uma área de importância econômica, ambiental e social, de modo a oferecer parâmetros e argumentos para discussões de projetos de incentivo para melhorar a qualidade de vida da população que vive em seu entorno e para a preservação ambiental da bacia.

2 OBJETIVOS

O trabalho possui como objetivo principal compreender os processos do ciclo hidrológico e estimar o balanço hídrico da bacia do rio Belém utilizando o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT). O objetivo específico deste trabalho é calibrar a vazão simulada para representar os dados da estação fluviométrica Prado Velho para os anos de 2000 a 2013.

2.1 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo é a introdução, onde são apresentados: a motivação e exposição do problema, proposta e contribuição do trabalho. No segundo capítulo descreve-se os objetivos da pesquisa. No capítulo terceiro tem-se a revisão bibliográfica do modelo hidrológico SWAT. No quarto capítulo são apresentadas as características da área de estudo e tem-se uma análise sobre as atividades antropogênicas que podem estar afetando o ciclo hidrológico do local. Em seguida, no capítulo cinco há o detalhamento dos materiais e métodos que foram utilizados. O capítulo sete apresenta os resultados e discussões. No último capítulo tem-se a conclusão do trabalho.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aumento contínuo da concentração da população nas cidades é uma tendência em muitos países da América Latina, e isso implica em mudanças significativas do material local e nos fluxos de energia, acompanhado por alterações das condições da superfície, fluxo natural da água, sedimentos, substâncias químicas, etc (LEE, 2000; WEI; WANG; WANG, 2018). A contínua substituição das áreas verdes pelas áreas urbanas é capaz de influenciar na infiltração e na evapotranspiração, e assim, perturbar seriamente os recursos hídricos, seja quantitativamente quanto qualitativamente (BRAUD; FLETCHER; ANDRIEU, 2013; LEE, 2000; MCGRANE, 2016).

O entendimento dos processos do ciclo hidrológico se torna mais complexo quando associados as atividades antropogênicas, já que as paisagens urbanas são mais heterogêneas e estão relacionadas com o aumento das áreas impermeáveis e das infraestruturas, tais como: sistema de drenagem, sistema de abastecimento e distribuição de água, serviços de saneamento básico e outros.

A modelagem é uma representação simplificada do sistema do mundo real que auxilia no entendimento dos processos reais (SHARMA; SOROOSHIAN; WHEATER, 2008). Os modelos hidrológicos são considerados uma ferramenta importante e necessária para o gerenciamento de recursos hídricos e ambientais (DEVIA; GANASRI; DWARAKISH, 2015). Estes modelos buscam quantificar, por meio de um conjunto de equações matemáticas, os efeitos dos fluxos resultantes de diferentes padrões de precipitação em conjunto com outros processos físicos (VALLAM; QIN; YU, 2014).

Por mais sofisticados que esses modelos hidrológicos sejam ainda existem limitações e incertezas. De acordo com Kolbjorn, Xu e Gottschalk (2005) os modelos hidrológicos possuem 4 fontes importantes de incertezas: incertezas nos dados de entrada (precipitação e temperatura), incertezas nos dados usados na calibração (vazão), incertezas nos parâmetros do modelo e as incertezas do modelo. Os dois primeiros erros dependem da qualidade dos dados coletados e os dois últimos são específicos do modelo.

Segundo Moreira (2005), cada modelo possui as suas particularidades e diferentes modelos são classificados sob diferentes aspectos, sendo eles de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrado ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

3.1 MODELO HIDROLÓGICO SWAT

O modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) foi criado no início da década de 1990 pelo Dr. Jeff Arnold para o USDA-ARS (*United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service*). O modelo é computacionalmente eficiente, sendo capaz de realizar simulações contínuas por longos períodos de tempo de pequenas a grandes bacias hidrográficas. O SWAT está capacitado para gerir um grande número de informações permitindo a conexão entre diferentes processos físicos a serem simulados em uma bacia (NEITSCH et al., 2011).

O modelo pode realizar simulações em escala anual, mensal e diário simulando os processos sequencialmente dentro do sistema físico, o que o caracteriza como um modelo contínuo (TIM, 1996; ARNOLD et al., 2011). A resolução espacial utilizada pelo modelo é a Unidade de Resposta Hidrológica (HRU, sigla em inglês). O modelo possui duas opções de distribuição de HRUs: HRUs múltiplas ou a opção *Dominant Land Use and Soil* HRU.

As HRUs múltiplas são normalmente definidas pelo uso do solo, tipo de solo e declividade em uma determinada bacia, com base nos limites definidos pelo usuário para cada categoria. O usuário pode controlar o número de HRUs que são geradas pelo modelo variando os limites. O limite de cada categoria controla a área de terra permitida para um determinado uso do solo, tipo de solo ou declividade dentro de uma sub-bacia (KALCIC; CHAUBEY; FRANKENBERGER, 2015). Alternativamente, a opção *Dominant Land Use and Soil* permite que uma bacia hidrográfica seja subdividida apenas em sub-bacias que são caracterizadas pelo uso dominante do solo, tipo de solo e manejo (GASSMAN et al., 2007a). Dentre as classificações citadas anteriormente os parâmetros podem variar espacialmente no sistema físico, caracterizando o SWAT como um modelo distribuído (MACHADO, 2002).

3.1.1 METODOLOGIA DO SWAT

A simulação hidrológica na bacia pode ser dividida em duas fases. Conforme Arnold et al. (2011) a primeira é conhecida como fase terrestre do ciclo hidrológico: essa fase controla a quantidade de água, sedimentos, nutrientes e pesticidas em cada sub-bacia, conforme mostrado na Figura 1. A segunda fase pode ser definida como a movimentação da água, sedimentos, etc., através da rede de canais da bacia hidrográfica para a sua saída.

A determinação do balanço hídrico é fundamental para estimar de forma quantitativa os processos do ciclo hidrológico, e portanto, o modelo utiliza a equação do

balanço de água que é apresentado como:

$$SW_f = SW_i + \sum_{i=1}^t (P_{dia} - Q_{sup} - ET - \omega_{vad} - Q_{gw}). \quad (3.1)$$

Onde SW_f é o conteúdo final de água no solo, SW_i é o conteúdo inicial de água no solo e t , P_{dia} , Q_{sup} , ET , ω_{vad} e Q_{gw} são as quantidades de precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração, água que entra na zona de aeração do perfil do solo e fluxo de retorno que ocorrem no dia i em unidades de mmH₂O.

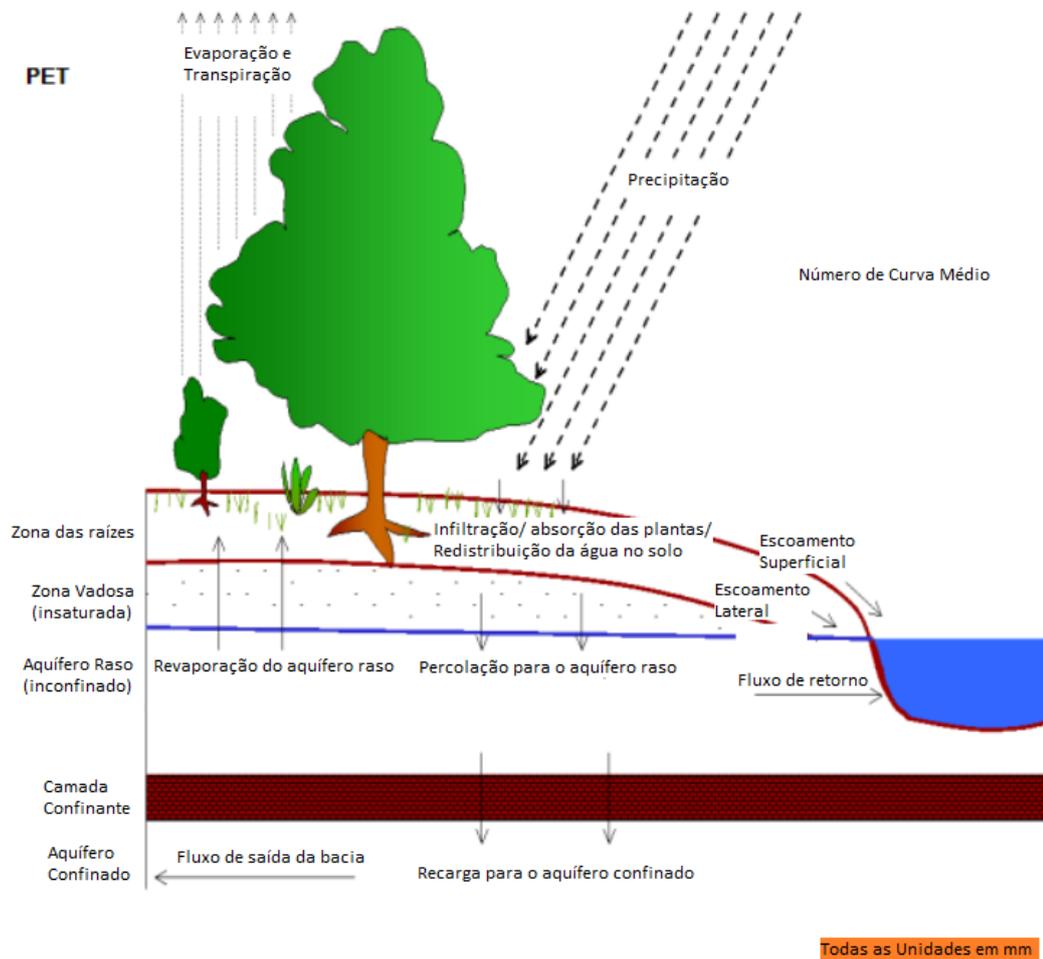


Figura 1 – Ciclo hidrológico considerado pelo SWAT. Fonte: Adaptado de Dile (2018).

A equação (3.1) pode ser reescrita utilizando as variáveis de saída do modelo:

$$PRECIP = \Delta SW_{f-i} + ET + WYLD, \quad (3.2)$$

onde $PRECIP$ é a quantidade total de precipitação, ΔSW_{f-i} é a diferença do conteúdo de água final e inicial, ET é a evapotranspiração real e $WYLD$ é a quantidade de água

líquida que sai da sub-bacia e que contribui para o fluxo do rio durante um período de tempo t em unidades de mmH_2O . O parâmetro $WYLD$ representado na equação (3.2) também pode ser expresso como:

$$WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - \text{abstrações dos lagos}, \quad (3.3)$$

sendo $SURQ$ a contribuição do escoamento superficial, $LATQ$ a contribuição do escoamento lateral, GWQ a contribuição das águas subterrâneas, $TLOSS$ e *abstrações dos lagos* são a água perdida por transmissão nos canais tributários através do leito do rio e as abstrações dos lagos.

3.1.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO

A evapotranspiração inclui todos os processos pelos quais a água presente na superfície da Terra é convertida em vapor d'água. Ela inclui os processos de evaporação de copa das plantas, transpiração, sublimação e evaporação do solo (NEITSCH et al., 2011).

Segundo Neitsch et al. (2011) e Serrano (1997), estima-se que 60% da precipitação que cai sobre os continentes é evapotranspirada. Visto que uma vasta quantidade de água é perdida por meio da evapotranspiração é de vital importância implementar equações que simulem esse processo no sistema hidrológico. Thornthwaite (1948 apud ARNOLD et al., 2011) apresentou o primeiro conceito de evapotranspiração potencial como a taxa de evapotranspiração que ocorreria em uma grande área completamente e uniformemente coberta com vegetação em crescimento, que tem acesso a um suprimento ilimitado de água no solo e que não está exposta a efeitos de mudanças microclimáticas. Conforme Arnold et al. (2011), foram incorporados ao modelo SWAT três métodos diferentes que foram desenvolvidos para se estimar a Evapotranspiração Potencial. São eles: o método de Penman-Monteith, método de Priestley-Taylor e o método de Hargreaves. O método de Penman-Monteith necessita de parâmetros de radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar. O método de Priestley-Taylor requer parâmetros de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar. Já o método de Hargreaves emprega apenas a temperatura do ar. Este estudo utilizou o método de Penman-Monteith, o qual estima PET, por meio de

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{net} - G) + \rho_{air} C_p \frac{[e_s^0 - e_z]}{r_a}}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})}, \quad (3.4)$$

onde λE é a densidade do fluxo de calor latente em $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$, Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor d'água de saturação, H_{net} é a radiação líquida em $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$,

G é a densidade do fluxo de calor no solo em $\text{MJm}^{-2} \text{d}^{-1}$, ρ_{air} é a densidade do ar em kgm^{-3} , c_p é o calor específico do ar em $\text{MJkg}^{-1} \text{°C}^{-1}$, e_z^0 é a pressão de vapor de saturação do ar em kPa, e_z é a pressão de vapor de água para a altura z em kPa, r_a é a resistência aerodinâmica em s m^{-1} , γ é a constante psicrométrica em kPa °C^{-1} e r_c é a resistência superficial de cobertura das plantas em sm^{-1} .

3.1.3 ESCOAMENTO SUPERFICIAL

O escoamento superficial e o fluxo de água no canal principal são gerados após uma complexa interação entre diferentes processos hidrológicos (SERRANO, 1997). Quando a intensidade da precipitação que chega na superfície da Terra é menor que a taxa de infiltração do solo, toda a água é infiltrada no solo. À medida que a precipitação continua o aumento da umidade no solo diminui a capacidade de armazenamento de água no solo, e conseqüentemente diminui a taxa de infiltração. Com a continuação da precipitação, o excesso de água forma poças de água sobre depressões naturais e a água começa a se mover como um fluxo superficial, o qual depende das características topográficas e do excesso de água sobre as depressões disponíveis, para descarregar em rios, lagos, lagoas até oceanos (ARNOLD et al., 2011; SERRANO, 1997).

O modelo SWAT utiliza o método do *Soil Conservation Service* (SCS) também conhecido como número de curva (CN, sigla em inglês). O método do CN foi desenvolvido para determinar o escoamento superficial direto. Os valores do CN estão associados à constituição geológica da área da bacia hidrográfica e ao tipo de cobertura e/ou uso do solo (SUDERHSA, 2002a).

A equação empírica da curva SCS é resultado de 20 anos de estudos envolvendo relações de precipitações e escoamentos de pequenas bacias hidrográficas rurais em todos os Estados Unidos da América (ARNOLD et al., 2011), é a

$$Q_{sup} = \begin{cases} 0 & , \text{para } P_{dia} < I_a \\ \frac{(P_{dia} - I_a)^2}{(P_{dia} - I_a + S)} & , \text{para } P_{dia} > I_a \end{cases} \quad (3.5)$$

Na equação (3.5), Q_{sup} é o escoamento acumulado ou o excesso de precipitação, P_{dia} a intensidade da precipitação, I_a é a abstração superficial (armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento) e S é o armazenamento da bacia, com todas as unidades em $\text{mm H}_2\text{O}$. A equação (3.5) considera que o escoamento superficial só ocorre se a intensidade da precipitação do dia for maior que a abstração superficial inicial.

O parâmetro de retenção S representado na equação 3.5 varia espacialmente devido às mudanças do uso do solo, solo, manejo, declividade e temporariamente com a variação de conteúdo de água no solo (ARNOLD et al., 2011). O parâmetro de

retenção é definido como:

$$S = 25,4 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right), \quad (3.6)$$

onde CN é o *Curve Number* para o dia. As abstrações iniciais, I_a , são comumente aproximadas como $0,2S$ e a equação (3.5) pode ser reescrita como

$$Q_{sup} = \frac{(P_{dia} - 0,2S)^2}{(P_{dia} + 0,8S)}. \quad (3.7)$$

Segundo Arnold et al. (2011) SCS define 3 condições diferentes de umidade. CN_1 corresponde à situação em que o solo está seco, CN_2 à situação de umidade média em que os solos apresentam a umidade da capacidade de campo e CN_3 à situação em que o solo está saturado. CN_1 e CN_3 podem ser calculados como

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + e^{2,533 - 0,0636(100 - CN_2)}}, \quad e \quad (3.8)$$

$$CN_3 = CN_2 e^{0,00673(100 - CN_2)}. \quad (3.9)$$

Os parâmetros CN_1 e CN_3 dependem de CN_2 , contudo o SWAT utiliza valores típicos das curvas (CN_2) com declividade de 5% que são apresentados em detalhes na documentação teórica do SWAT escrita por Arnold et al. (2011). Para declividades diferentes de 5% o SWAT utiliza uma equação ajustada desenvolvida por Williams (1995):

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} [1 - 2e^{-13,86slp}] + CN_2. \quad (3.10)$$

A taxa de escoamento de pico é o máximo escoamento que pode ocorrer em um dado evento de precipitação. O método utilizado para calcular essa taxa, mostrado na equação (3.11), assume que se a precipitação inicia no tempo $t = 0$ e continua indefinidamente, a taxa de escoamento aumentará até o tempo de concentração, $t = t_{conc}$, quando toda a área da sub-bacia está contribuindo para o escoamento de saída. Desta forma, a máxima resultante será

$$q_{pico} = \frac{CiArea}{3,6}. \quad (3.11)$$

Sendo C o coeficiente de escoamento, i a intensidade da precipitação (mmh^{-1}), $Area$ a área da sub-bacia (km^2) e 3,6 é um fator de conversão de unidade. O tempo de concentração é calculado pela equação

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch}, \quad (3.12)$$

onde t_{ov} é o tempo de concentração para escoamento superficial (h) e t_{ch} é o tempo de concentração para o escoamento do canal (h). O coeficiente de escoamento e a intensidade de precipitação podem ser calculadas utilizando as equações

$$C = \frac{Q_{sup}}{P_{dia}}, e \quad (3.13)$$

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}}. \quad (3.14)$$

Sendo que R_{tc} é a quantidade de precipitação que caiu durante o tempo de concentração ($\text{mm H}_2\text{O}$).

3.2 CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E VERIFICAÇÃO

Conforme Arnold et al. (2012), o primeiro passo para a realização da calibração e validação é a determinação dos parâmetros mais sensíveis para a bacia ou sub-bacia. O SWAT possui 26 parâmetros distintos para o escoamento superficial, mais de 30 para desintegração do solo e 41 para a qualidade da água, que podem ser utilizados para calibração (SHIVHARE; DIKSHIT; DWIVEDI, 2018). O usuário pode determinar os parâmetros mais sensíveis com base nos seus conhecimentos ou com a ajuda de análises de sensibilidade.

O segundo passo é a calibração propriamente dita, onde os valores dos parâmetros são cuidadosamente selecionados e a saída do modelo é comparada com os valores dos dados observados para o mesmo período de tempo. A etapa final é a validação para a variável de interesse (vazão, sedimentos, etc.).

A calibração consiste em aperfeiçoar as informações inseridas dentro do modelo e adaptar os parâmetros no contexto específico da bacia hidrográfica. Esse processo pode ser feito manualmente ou semi-automaticamente. Nessa etapa é realizada a consistência dos dados de saída do modelo com os dados observados, e em seguida identifica-se os parâmetros a serem modificados para que a simulação se aproxime dos dados observados (BACHMANN, 2015).

Segundo Shivhare, Dikshit e Dwivedi (2018), a validação envolve a aplicação do modelo calibrado sem nenhuma alteração para outro período de dados observados que não foi utilizado no processo da calibração (KUWAJIMA, 2012).

Uma vez realizados esses passos o modelo estará pronto para ser aplicado em diversos estudos de simulação sobre qualidade da água, sedimentação, estudo de áreas vulneráveis a inundações e enchentes e entre outros. O método escolhido para a realização da calibração e da validação foi o semi-automático por meio do SWAT-CUP.

3.2.1 SWAT-CUP

O SWAT-CUP é capaz de realizar análises de sensibilidade dos parâmetros, calibração, validação e análise de incerteza do modelo SWAT. Por meio do SWAT-CUP é possível procedimentos do *Sequential Uncertainty Fitting* (SUFI2), *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation* (GLUE), *Parameter Solution* (ParaSol) e *Markov Chain Monte Carlo* (MCMC) (ABBASPOUR, 2015).

O método PSO desenvolvido por Dr. Eberhart e Dr. Kennedy em 1995 é uma técnica de otimização estocástica inspirado pelo comportamento social de aves e peixes. O PSO possui similaridades com as técnicas de computação evolutiva como os algoritmos genéticos. O PSO é um método fácil de ser implementado, além de necessitar de poucos parâmetros para ser ajustado.

O método GLUE (Beven e Binley (1992)) é um procedimento simples e requer poucas premissas quando utilizado em aplicações práticas. O GLUE supõe que não existe um único conjunto de parâmetros capaz de otimizar os critérios de adequação. O método foi baseado em estimação de pesos ou probabilidades associadas para diferentes conjuntos de parâmetros baseados no uso de uma medida subjetiva de verossimilhança para derivar a saída de dados (KUWAJIMA, 2012).

O método PARASOL desenvolvido por Van Griensven e Meixner agrega as funções objetivas ¹ em um critério global de otimização e minimiza essas funções objetivas ou um critério de otimização global usando o algoritmo *Shuffle Complex* (SCE-UA). O SCE-UA é um método de busca global para minimizar uma única função objetiva, usando o algoritmo *Competitive Complex Evolution* (CCE). Outro método é MCMC, o qual utiliza métodos estatísticos e densidade de probabilidade para eleger, testar, rejeitar conjuntos de parâmetros para adequação da função objetiva.

O procedimento escolhido foi o SUFI2 (Abbaspour (2015)). Nesse método as incertezas dos parâmetros são levadas em consideração para todas as possíveis origens: modelo conceitual, parâmetros e valores observados. Segundo Abbaspour (2015) a melhor forma de se realizar a calibração de um modelo é utilizando o método

¹ As funções objetivas são funções que apresentam o critério de avaliação do modelo.

"estocástico" o qual se diferencia do "determinístico" pelas seguintes razões: o método "determinístico" busca encontrar valores de um conjunto único de parâmetros para alcançar a melhor simulação, mas nem sempre isso é verdade podem existir outros conjuntos de parâmetros capazes de resultar em uma boa simulação dependendo do procedimento escolhido para a calibração. Por outro lado, o método "estocástico" é uma alternativa para se determinar erros e incertezas do modelo, por meio deste busca-se alcançar o melhor intervalo entre os valores dos parâmetros escolhidos. A calibração ocorre através da seleção de intervalos de valores dos parâmetros que são testados a cada interação a fim de estreitar este intervalo até um intervalo de confiança (KUWAJIMA, 2012). A propagação das incertezas dos parâmetros de entrada conduz para as incertezas das variáveis de saída do modelo, as quais são expressas como 95PPU. Esses 95PPUs são as saídas do modelo em uma abordagem de calibração estocástica, é importante perceber que o modelo não busca um único valor para cada parâmetro, mas em vez disso intervalos de cada parâmetro que resultam em boas soluções que são expressas por 95PPU ² (ABBASPOUR et al., 2007). O 95PPU é calculado através dos níveis de 2,5% e 97,5% de distribuição cumulativa de uma variável de saída, que é obtida pela amostragem *Latin Hypercube* ³, rejeitando 5% das simulações insatisfatórias.

Abbaspour et al. (2007) explica o conceito por trás da análise de incerteza do algoritmo SUFI-2, o qual é representado graficamente na Figura 2. A comparação dos dados medidos ao lado do 95PPU pode ser bastante revelador em relação à escolha dos intervalos de incerteza dos parâmetros. Por exemplo, se a situação mostrada na Figura 2 em d ocorre, então o intervalo de parâmetros deve ser mudado em uma direção apropriada, e se o intervalo da incerteza do parâmetro já corresponde aos limites de valores fisicamente significativos, então o modelo conceitual deve ser reexaminado (ABBASPOUR et al., 2007).

A maneira de quantificar a eficiência da calibração é utilizando o fator-P e o fator-R. Ambas são análises estatísticas: o fator-P corresponde a porcentagem de dados resultantes da calibração que foram envolvidos pelo 95PPU e o fator-R é a espessura do 95PPU. O valor do fator-P varia entre 0 e 100% e o valor do fator-R varia entre 0 e ∞ , Abbaspour (2015) sugere que o valor de fator-P fique acima de 70% e o fator-R próximo a 0.

² 95PPU é uma sigla para *Percent Prediction Uncertainty* o que corresponde um intervalo de confiança de 95%.

³ *Latin Hypercube* é um método estatístico para gerar uma amostra quase aleatória de valores de parâmetros a partir de uma distribuição multidimensional.

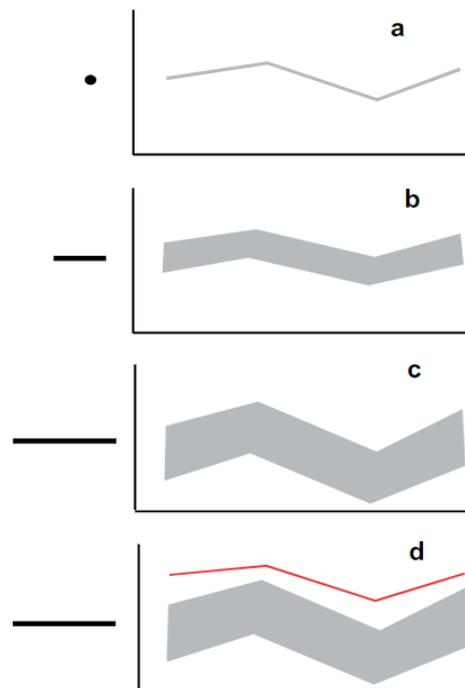


Figura 2 – Esta Figura ilustra que um único valor de parâmetro (mostrado por um ponto) leva a uma resposta de modelo único (mostrado em a), enquanto a propagação da incerteza em um parâmetro (mostrado por uma linha) leva ao 95PPU ilustrado em b pela região sombreada. À medida que a incerteza do parâmetro aumenta (mostrado em c), a incerteza de saída também aumenta. Fonte:Abbaspour et al. (2007).

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é a bacia hidrográfica do rio Belém, situada entre as coordenadas de latitude sul $25^{\circ}20' 56,76''$ e $25^{\circ}30' 59,76''$ e a longitude oeste $49^{\circ}18' 1,08''$ e $49^{\circ}12' 24,12''$, conforme mostrado na Figura 3. A bacia abrange uma área territorial de 88 km^2 equivalente a 20% da área total do município de Curitiba, e a extensão do rio é de 17,13 km (SUDERHSA, 2002b; PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017b).

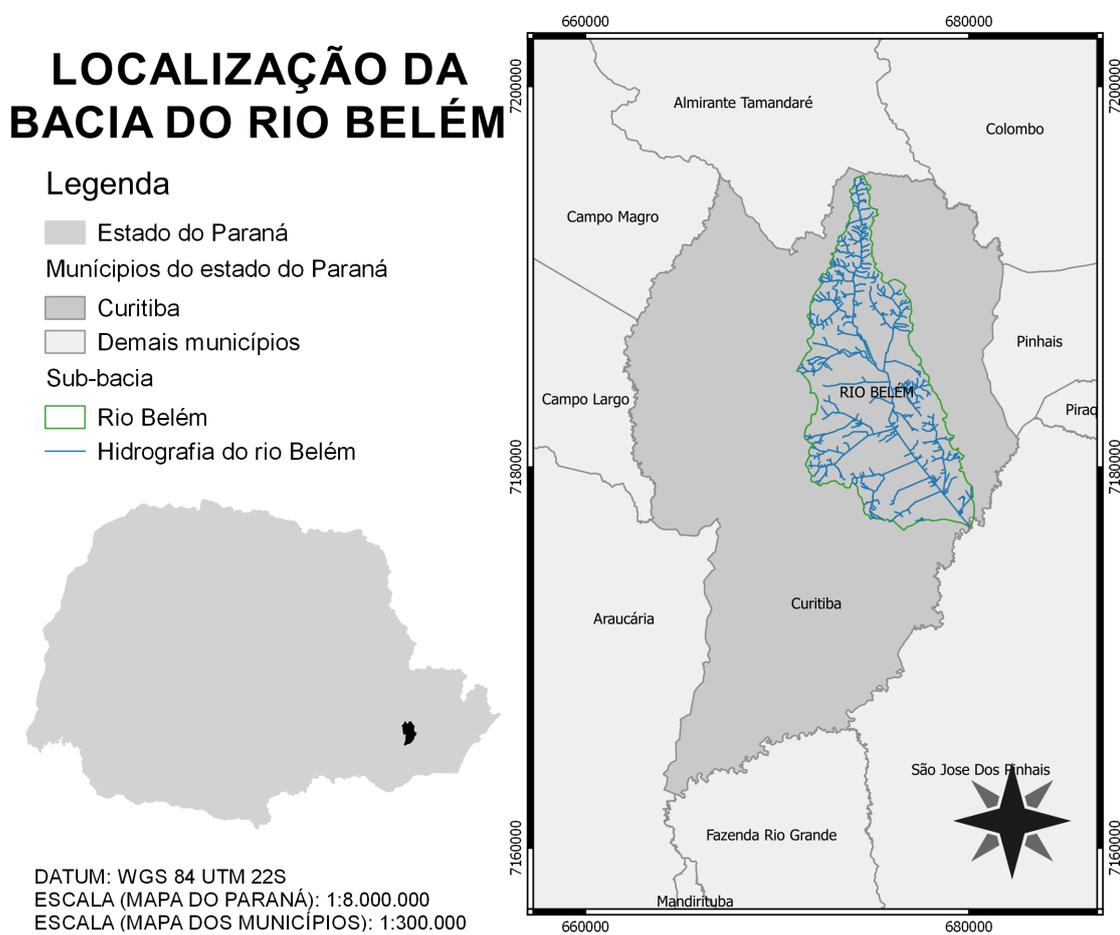


Figura 3 – Localização da bacia hidrográfica do rio Belém.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Curitiba é considerada uma grande metrópole com 1.908.359 habitantes e IDHM de 0,823 (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2019). O município possui 6 sub-bacias que contribuem para a bacia do Alto Iguaçu, como se pode observar na Figura 4. A sub-bacia do rio Barigui é a maior em extensão na região do município

e a sub-bacia rio Belém é a segunda maior, mais de 60% da população de Curitiba está concentrada nessas duas sub-bacias (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017d).

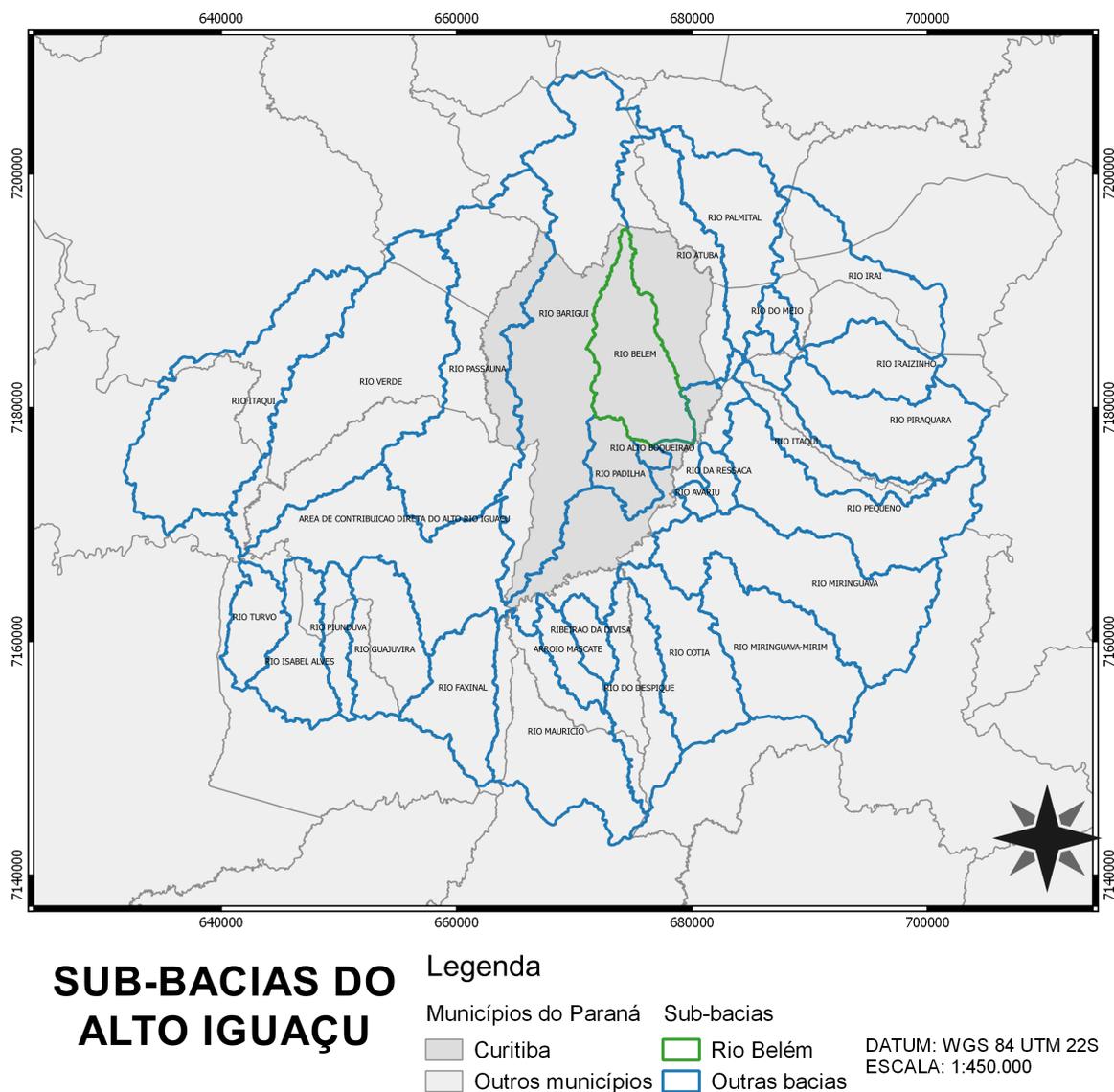


Figura 4 – Hidrografia do Alto Iguaçu dividida em 30 sub-bacias.

O rio Belém atravessa a cidade de Curitiba de norte a sul; a nascente encontra-se no bairro Cachoeira e a sua foz no Boqueirão. Ao todo, a bacia do rio Belém abrange 38 bairros; entre eles estão o centro e outros bairros importantes que somados abrigam aproximadamente 30% da população. O rio possui 46 afluentes, sendo que muitos deles levam os nomes das ruas que o margeiam conforme indicado na Figura 5. Os principais afluentes são: o rio Bigorrião, que passa na Rua Fernando Moreira, rio Ivo, rio Água Verde, rio Juvevê, rio Vila Guairá e rio Areiãozinho (SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE DE CURITIBA, 2019b).

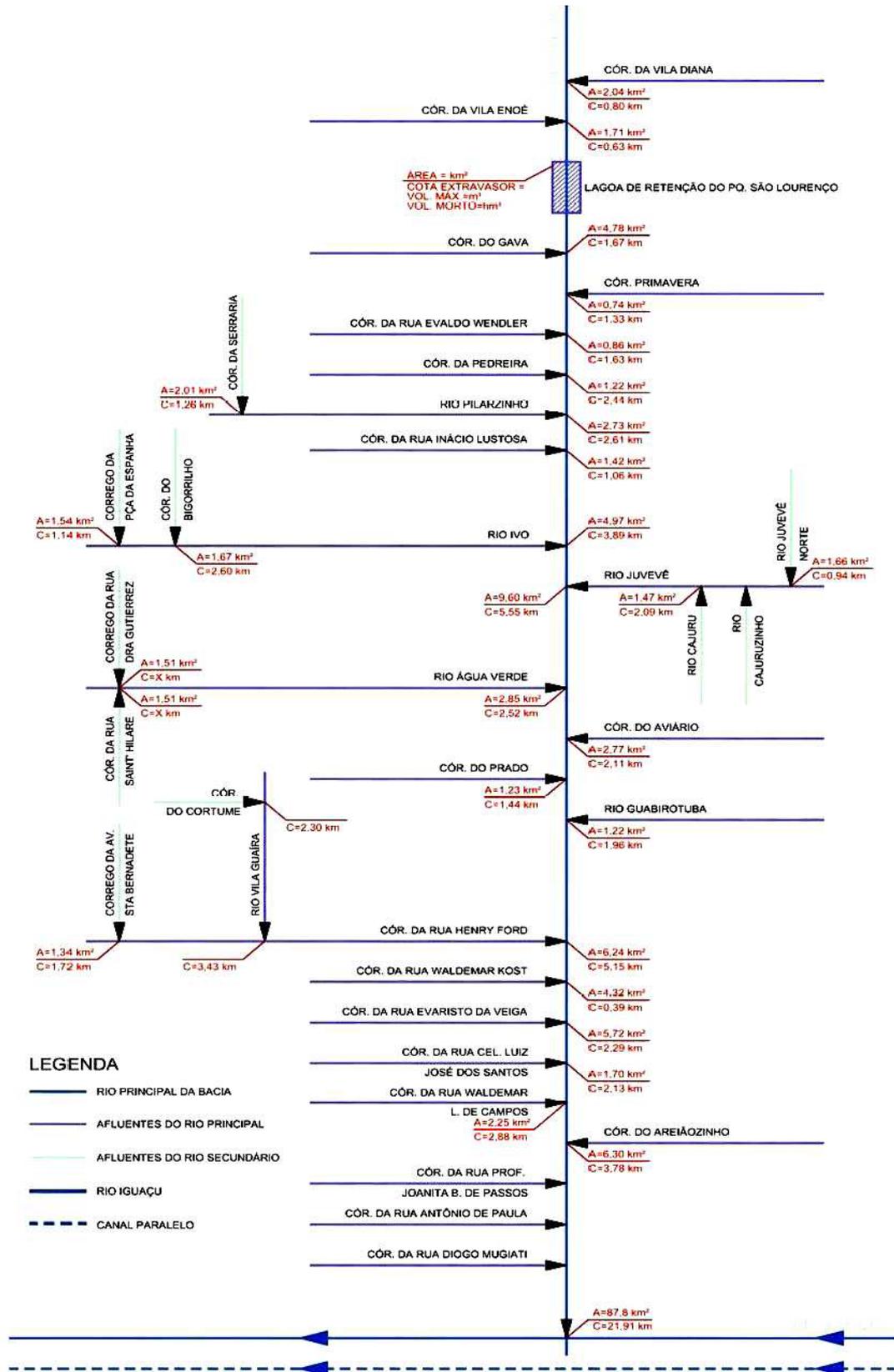


Figura 5 – Diagrama Unifilar Sistema de Macrodrenagem da Bacia do Rio Belém. Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA (2012 apud PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017e).

Em virtude do desenvolvimento e do crescimento urbano a bacia esteve sujeita à impermeabilização do solo, e a desmatamentos, ocupações irregulares, canalizações e retificações, presença de resíduos e saneamento precário (SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE DE CURITIBA, 2019b; GALLARZA et al., 2011; BOLLMANN; EDWIGES, 2008).

4.2.1 HISTÓRICO DE INUNDAÇÕES EM CURITIBA NA BACIA DO RIO BELÉM

Curitiba foi fundada no dia 29 de março de 1693. As primeiras ocupações no território estavam inseridas nas proximidades dos rios Ivo e Belém. Motivadas pela procura e exploração do ouro, avançaram sobre as áreas alagadiças das várzeas desses e de outros rios que cortam e margeiam a cidade (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017a; PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017e).

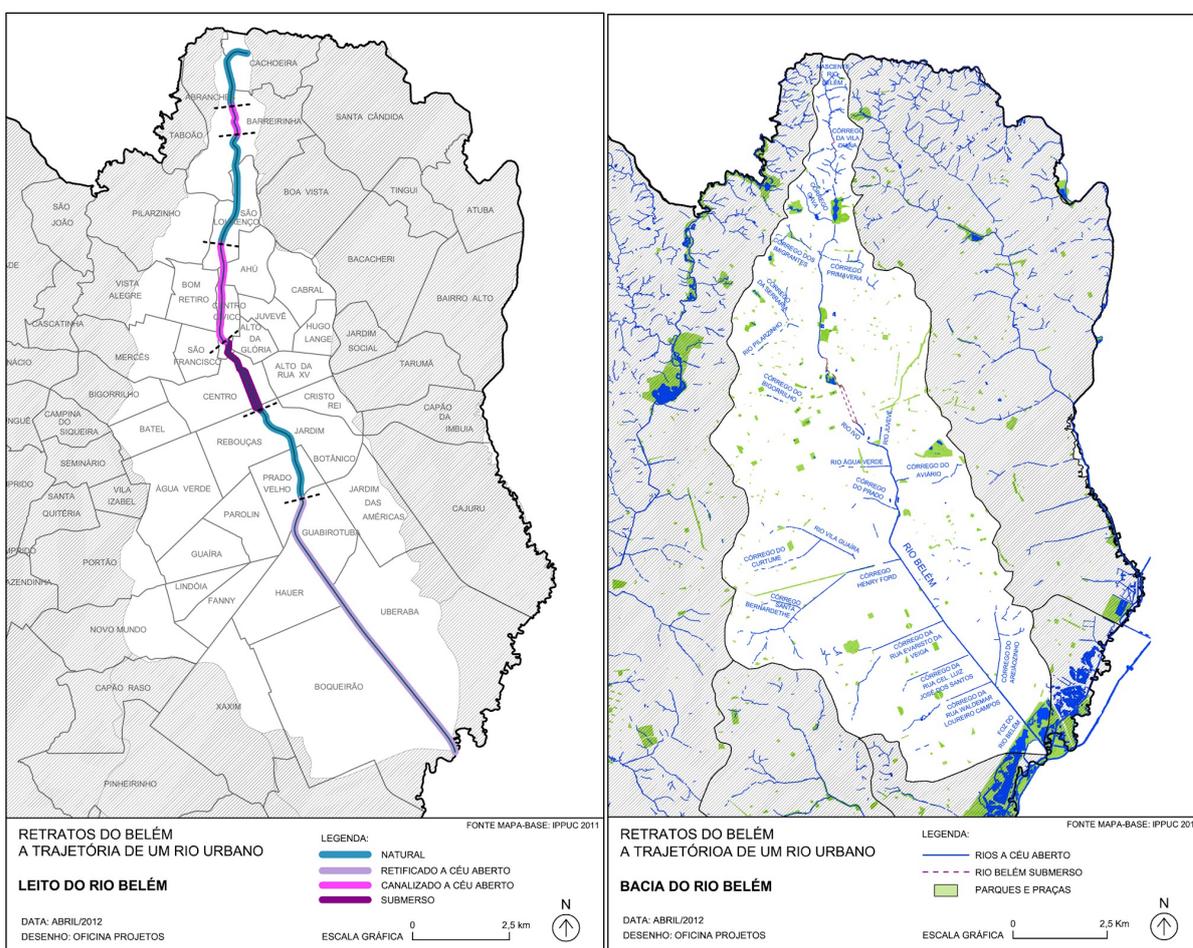


Figura 6 – Trechos do rio Belém que mantiveram o curso natural e as seções em que foram submersas, retificadas e canalizadas a céu aberto. Fonte: Gallarza et al. (2011).

Os primeiros registros históricos de inundações em Curitiba datam no início do século XX, sendo as áreas centrais da cidade as mais afetadas, em vista disso

foram realizadas diversas obras para conter essas inundações, buscando diminuir os prejuízos materiais e humanos (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017c).

As principais obras da bacia incluem o Parque São Lourenço, o Bosque do Papa, o Passeio Público e o Jardim Botânico. Ainda existem áreas de preservação, de recreação e de lazer para a comunidade que também podem ser destacadas: a Ópera de Arame, a Pedreira Paulo Leminski, a Universidade Livre do Meio Ambiente – UNILIVRE e o Bosque do Alemão (BOLLMANN; EDWIGES, 2008; IPPUC; COHAB-CURITIBA, 2010; PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017d). Tais obras transformam áreas alagadiças em espaços de lazer, contribuem para a redução do risco de inundações e para a conservação de algumas espécies de plantas, peixes, répteis, aves e mamíferos (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017e; GALLARZA et al., 2011; SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE DE CURITIBA, 2019a).

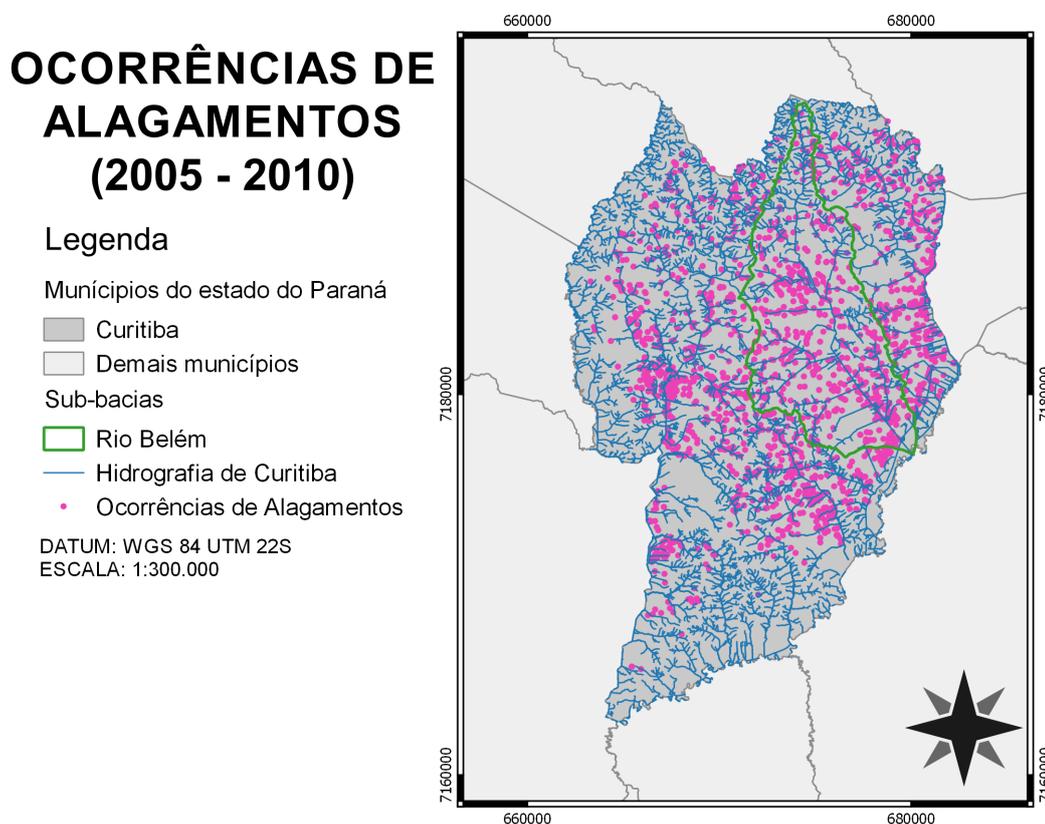


Figura 7 – Pontos de alagamentos que ocorreram entre 2005 e 2010 em Curitiba.

Outras obras que também alteraram a paisagem da cidade foram a canalização e a retificação, as quais foram construídas para diminuir as inundações, a intensidade do odor e os riscos de contaminação, essas obras foram implantadas em diversos trechos do rio Belém e de seus afluentes, conforme mostrado na Figura 6 (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017c).

Os problemas das inundações permanecem até os dias atuais afetando as

comunidades de diversas maneiras possíveis, na Figura 7 são indicados os pontos de alagamentos que foram datados com a parceria da Defesa Civil de Curitiba em conjunto com o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) no período de 2005 e 2010, cedidos gentilmente pelo Dr. Marciel Lohmann.

4.2.2 ÁGUA IMPORTADA E EXPLOTADA DA BACIA

O ciclo hidrológico urbano considera duas fontes que fornecem água para a bacia hidrológica, o abastecimento de água municipal e a precipitação. A água do sistema de abastecimento municipal é, geralmente, importada de fora da área da bacia hidrográfica e por vezes pode entrar no ciclo hidrológico de uma bacia por meio da água perdida por vazamentos e efluentes não tratados de origem residencial, comercial, industrial e outras, que por ventura deságuam no rio (MARSALEK et al., 2006). A Figura 8 apresenta de forma ilustrativa como a água importada pode entrar no ciclo hidrológico da bacia do rio Belém.

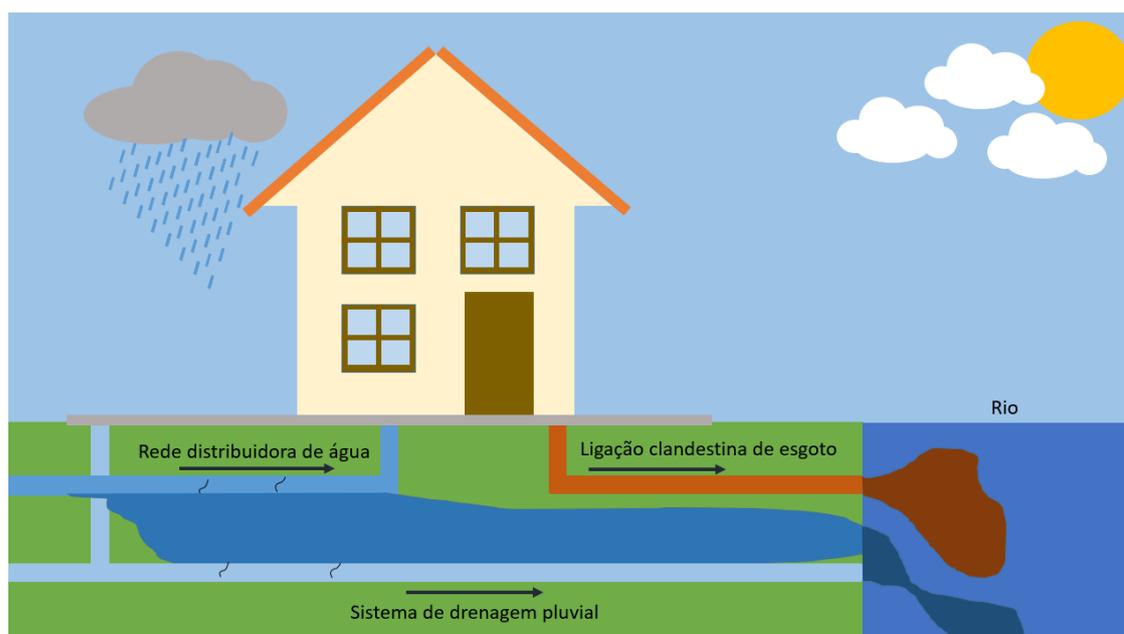


Figura 8 – Ilustração de como a água importada pode vir a entrar no ciclo hidrológico de uma bacia.

O sistema de abastecimento de água de Curitiba é denominado Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba (SAIC), que atende, além da capital, também os municípios de: São José dos Pinhais, Fazenda Rio Grande, Araucária, Campo Magro, Almirante Tamandaré, Colombo, Campina Grande do Sul, Quatro Barras, Pinhais e Piraquara (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2017f). Dentre os mananciais superficiais que o SAIC utiliza para realizar a captação de água somente um se encontra no território de Curitiba, localizado na sub-bacia do rio Passaúna, como pode ser observado na Figura 9.

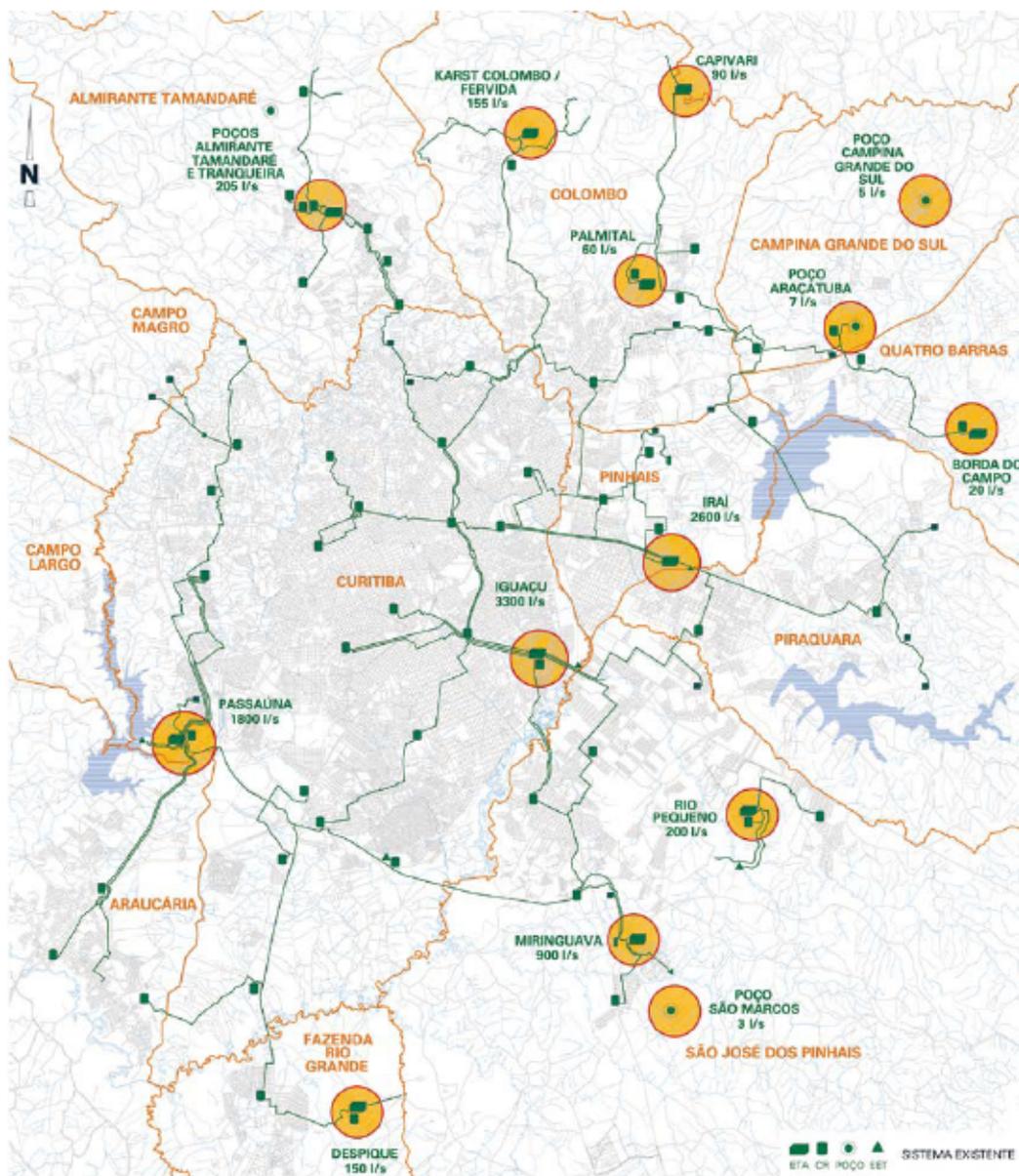


Figura 9 – Mananciais fontes do Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba (SAIC). Fonte: COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (2013).

Os mananciais subterrâneos da concessionária do município também se encontram fora dos limites de Curitiba. A instalação de poços artesianos tem sido uma opção viável economicamente para o abastecimento de água de condomínios, hospitais e serviços particulares em geral na região, como se pode observar na Figura 10, mais de 400.000 habitantes são abastecidos diariamente pelos sistemas aquíferos Cárstico, Cristalino e Guabirotuba, conforme é mostrado na Figura 11 (PAULISTA et al., 2016).

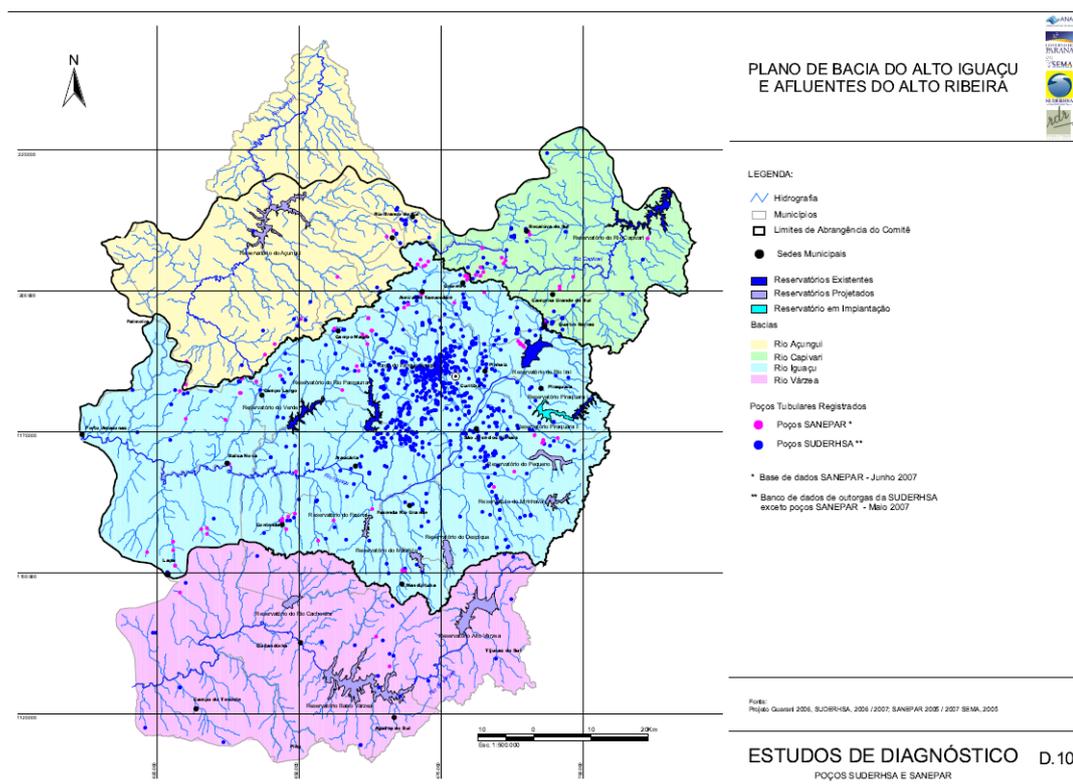


Figura 10 – Densidade de poços artesanais na Região Metropolitana de Curitiba. Fonte: SUDERHSA e SANEPAR (2007).

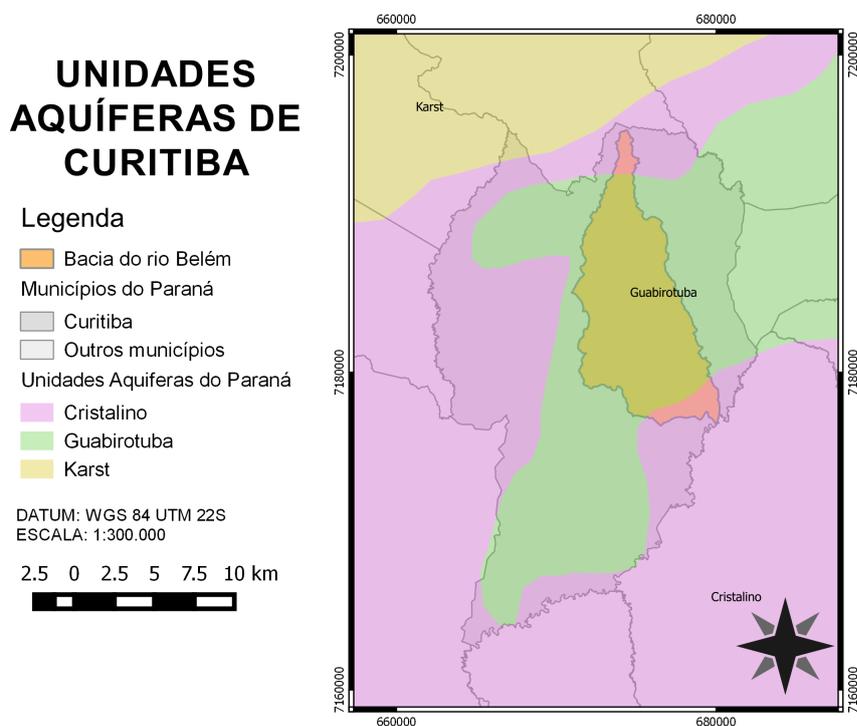


Figura 11 – Unidades aquíferas do estado da Região Metropolitana de Curitiba.

O volume de produção anual do aquífero Cárstico é da ordem de 9.028.153 m³/ano, sendo capaz de abastecer uma população de 185.515 habitantes, sendo que dentre esses aproximadamente 84.000 habitam em Curitiba. O aquífero Cristalino abastece uma população de 76.000 habitantes e produz um volume anual na ordem de 5.733.234 m³/ano. Já o aquífero Guabitoruba é capaz de abastecer uma população de 178.800 habitantes ao explorar um volume de água na ordem de 12.600.000 m³/ano (FILHO; HINDI; LUCENA, 2002).

O plano municipal de abastecimento de água realizado pela Prefeitura Municipal de Curitiba (2017f) revelou o índice de perdas da rede distribuidora de Curitiba para o período de 2005 a 2014 que é mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Índice de perdas no sistema distribuidor do município de Curitiba. Fonte: Prefeitura Municipal de Curitiba (2017f).

Ano de Referência	Perdas no sistema distribuidor (%)
2005	44,63
2006	44,51
2007	41,12
2008	38,78
2009	39,24
2010	38,77
2011	40,43
2012	40,41
2013	39,66
2014	39,10

A Rede Pública de Coleta de Esgoto (RCE) de Curitiba atende 90,52% dos imóveis, sendo que destes somente 65% estão interligados de forma correta ao sistema. São consideradas ligações irregulares: não estar ligado a rede de esgoto existente da Concessionária; ligação das águas de chuva na rede de esgoto predial ou na rede coletora de esgotos da Concessionária; uso de sistemas alternativos (fossas, sumidouros, etc) quando existir rede coletora de esgotos da Concessionária; rede de esgoto predial conectada nas galerias de águas pluviais ou nos rios e córregos; e entre outros (PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA, 2013).

As análises das amostras do relatório de monitoramento da qualidade da água para os rios do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba no período de 2005 a 2009 divulgado pelo IAP (2009), apontam que o rio Belém está "poluído" a "muito poluído". Como conclusão das análises há a presença de alto teor de coliformes fecais e matéria orgânica e baixa concentração de oxigênio dissolvido, indicando que a bacia do rio Belém é afetada pelas ações humanas e pelo desenvolvimento urbano.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a aplicação da metodologia seguiu-se os seguintes passos:

1. Coleta dos dados de entrada para o modelo SWAT. O modelo requer dados meteorológicos, como: precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar. Outros dados necessários são: o modelo digital de elevação (MDE), dados de uso e ocupação do solo e propriedades do solo;
2. Coleta de dado de vazão medida dentro da bacia do rio Belém, que é um dado fundamental para a realização da calibração e validação do modelo hidrológico;
3. Campanha para coleta de dados dos reservatórios do Passeio Público e do Parque São Lourenço;
4. Estimativa da água importada para a bacia do rio Belém a partir dos dados coletados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS);
5. Implementação dos dados de entrada no modelo SWAT e simulação da vazão;
6. Análise de sensibilidade dos parâmetros, calibração e validação do modelo utilizando o SWAT-CUP.

5.1 PROGRAMAS

Os programas utilizados foram:

- SWAT Weather Database;
- QGIS 2.6.1;
- SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) versão 2012;
- SWAT-CUP 2019 v5.2.1.1.

5.2 DADOS DE ENTRADA DO MODELO SWAT

Como dito anteriormente o modelo SWAT requer uma grande quantidade de dados que se relacionam com as características físicas da bacia (BINO, 2009). Nesta seção serão apresentados os dados de entrada que foram coletados.

5.2.1 MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO

O processo de simulação do modelo se inicia com a inserção do Modelo Digital de Elevação (MDE), que é apresentado na Figura 12. Esse passo é muito importante para o reconhecimento das características topográficas da bacia.

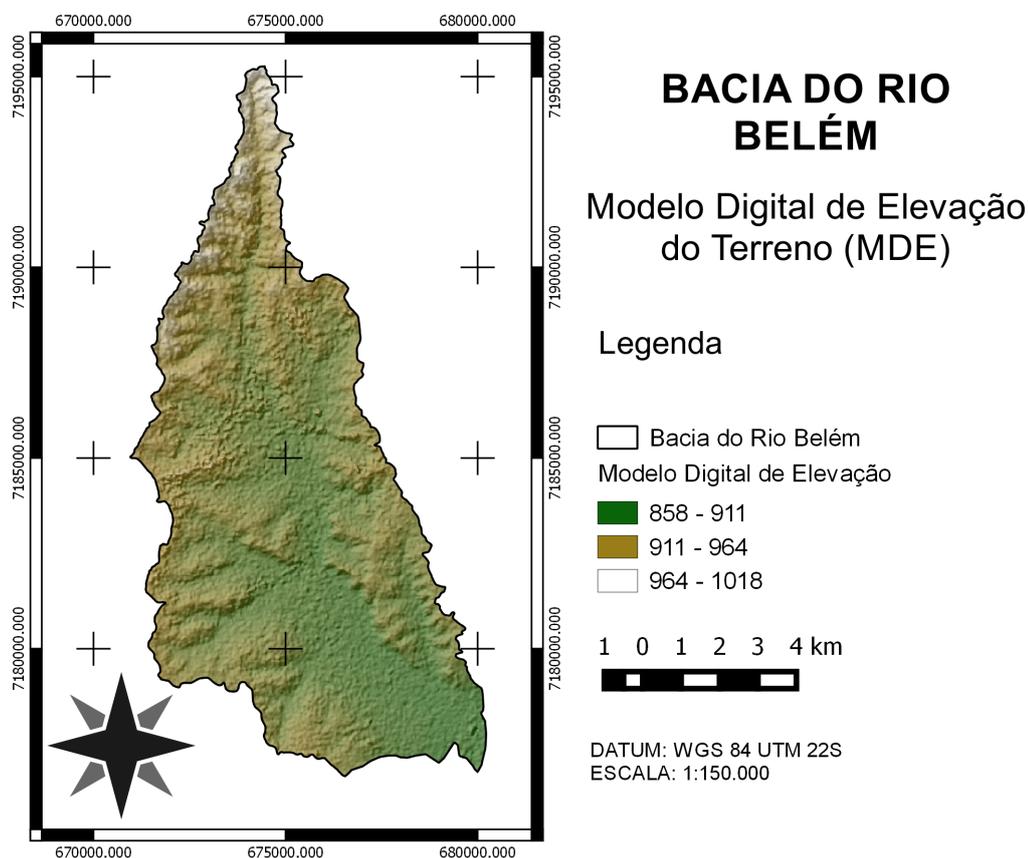


Figura 12 – Mapa do Modelo Digital de Elevação da bacia do rio Belém.

O MDE foi elaborado pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM, sigla em inglês). A SRTM foi um projeto internacional realizado com a parceria da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) para criar o primeiro conjunto global de elevações de terra (EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER, 2017). Os dados coletados na missão são distribuídos em resoluções espaciais de 30 metros e 90 metros pelo *EROS Data Center*, que por sua vez é controlado pelo *United States Geological Survey* (USGS).

O modelo ilustrado na Figura 12 possui uma resolução de 30 metros e a partir dele observa-se que a área de estudo apresenta uma altitude maior na região norte podendo chegar a 1.018 metros e na região sul uma altitude menor próxima de 858 metros.

Em seguida, são definidos os fluxos de entrada e de saída do modelo que podem ser gerados com a ajuda de uma rede hidrográfica ou apenas com o uso do MDE. Como o rio Belém passou por alterações ao longo da urbanização e conseqüentemente, o seu curso natural já não é mais o mesmo optou-se por utilizar a hidrografia nesse passo.

5.2.2 HIDROGRAFIA

A Figura 13 apresenta a hidrografia da bacia do rio Belém, que foi gerada pela SUDERHSA a partir da restituição aerofotogramétrica nas áreas rurais (1:10.000) e a partir de dados de projetos existentes (PARANA CIDADE e IPPUC) nas áreas urbanas (1:2.000) (INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ, 2002).

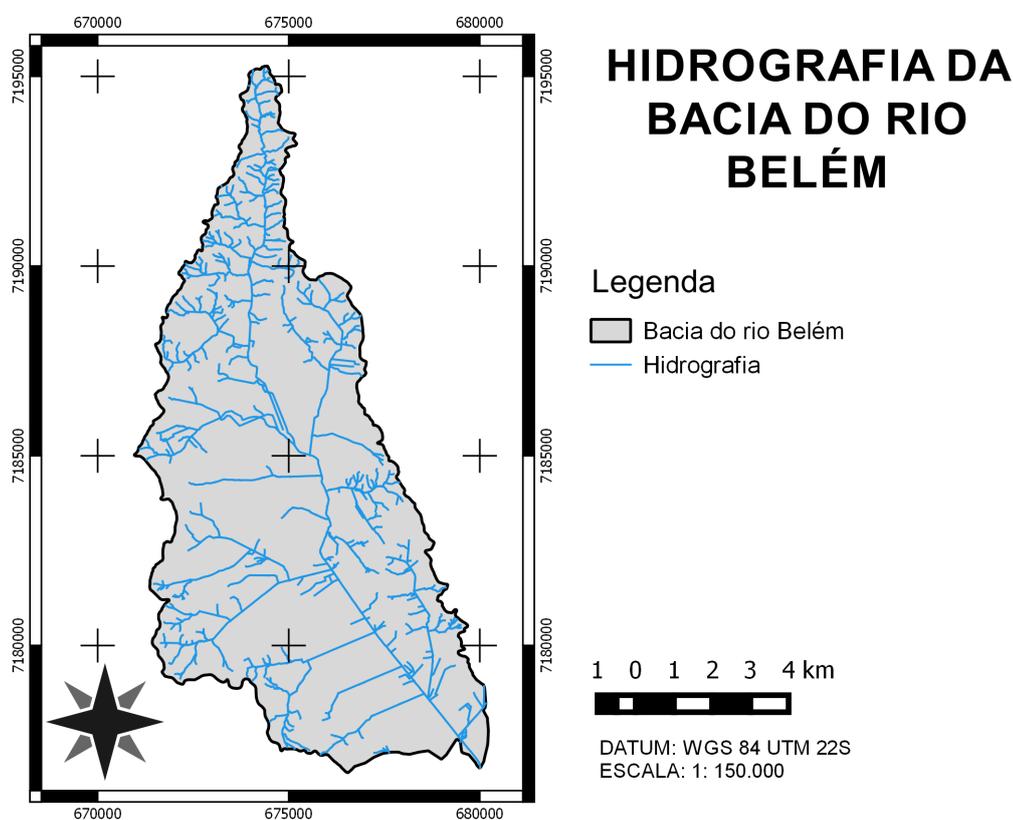


Figura 13 – Mapa da hidrografia da bacia do rio Belém.

Durante a criação dos fluxos é possível alterar o seu grau de detalhamento. O aumento desse detalhamento resultará numa quantidade maior de sub-bacias geradas pelo modelo. O grau de detalhamento foi definido com ajuda da hidrografia presente na Figura 13.

Em seguida, após a criação das linhas de corrente com a ajuda da hidrografia, são definidos manualmente os pontos de saída e de reservatórios e automaticamente

os pontos de entrada pelo QSWAT. Posteriormente são delineadas as sub-bacias.

5.2.3 SUB-BACIAS DA BACIA DO RIO BELÉM

As sub-bacias são formadas segundo as variações topográficas do relevo, a partir do MDE (BINO, 2009). No momento em que são delineadas as sub-bacias o SWAT permite que o usuário realize a junção das sub-bacias manualmente, caso o usuário deseje. Nesse passo foi realizada a fusão de algumas sub-bacias e ao percorrer do processo usou-se como referência as sub-bacias produzidas pelo Instituto de Pesquisas e Planejamento Urbano do Paraná (IPPUC), como é ilustrado na Figura 14.

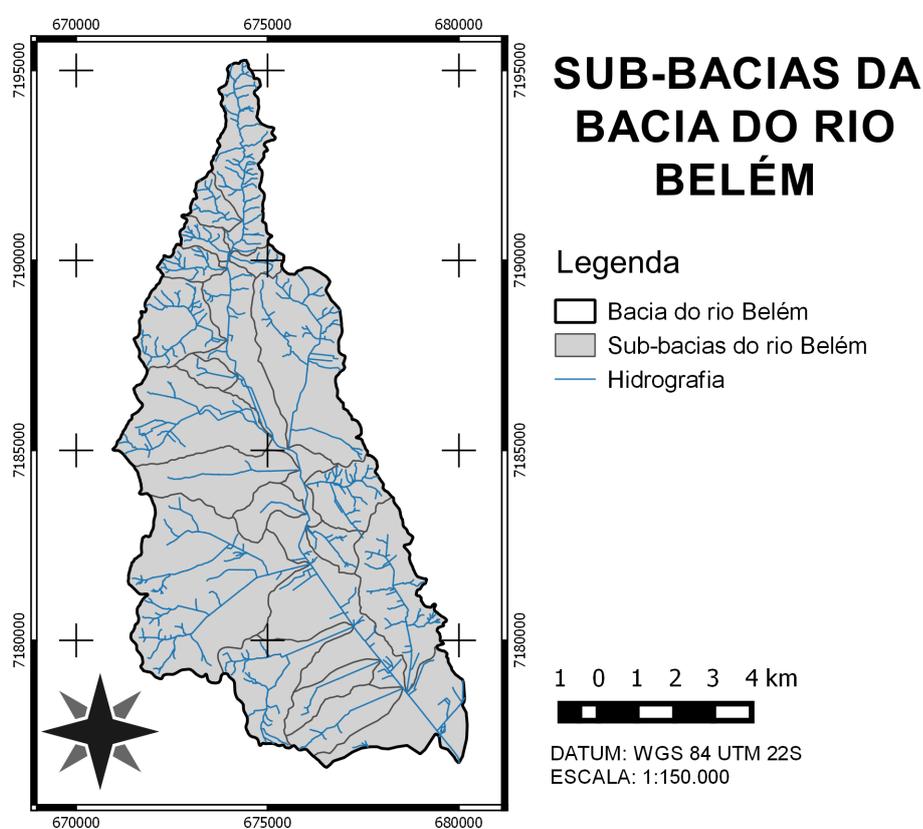


Figura 14 – Mapa de sub-bacias da bacia do rio Belém.

Continuando, depois do delineamento das sub-bacias é preciso definir como serão as Unidades de Respostas Hidrológicas (*HRUs*, sigla em inglês). Para tanto é necessária a inserção de dados do uso e ocupação do solo e propriedades do solo.

5.2.4 USO E OCUPAÇÃO DO SOLO

A Figura 15 ilustra a distribuição espacial do uso e ocupação do solo na bacia do rio Belém. O mapa de uso e ocupação do solo utilizado foi gerado pela SUDERHSA

a partir de técnicas de sensoriamento remoto e interpretação das fotografias aéreas digitais ortorretificadas (ortofotos) de junho de 2000 (INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ, 2002).

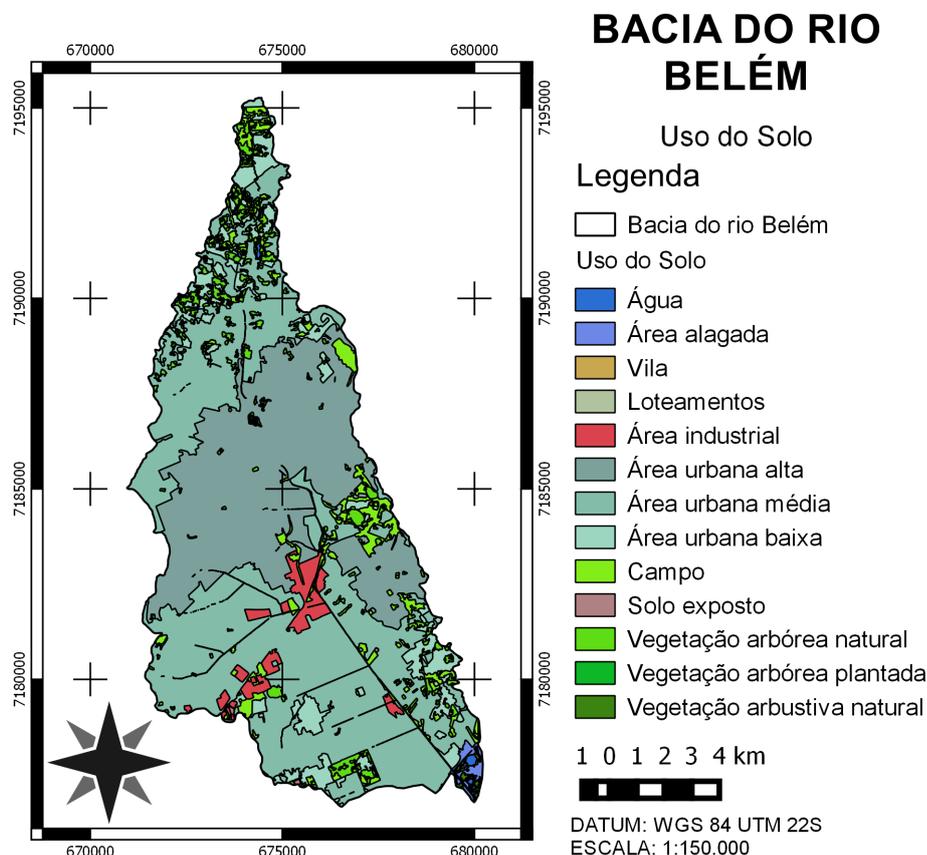


Figura 15 – Mapa de uso e ocupação do solo na bacia rio do Belém.

Na Tabela 4 são descritas as áreas para cada classe apresentada na legenda da Figura 15 e os percentuais que cada uma ocupa na bacia do rio Belém, como também as suas classificações do modelo SWAT.

Tabela 4 – Uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Belém.

Uso/Cobertura do Solo	Classificação - SWAT	Área (km ²)	Fração (%)
Água	<i>Water (WATR)</i>	0,50	0,57
Área Alagada	<i>Wetlands-nonforested (WETN)</i>	0,64	0,73
Área Industrial	<i>Industrial (UIDU)</i>	2,32	2,65
Área Urbana Alta	<i>Residential-High Density (URHD)</i>	26,99	30,81
Área Urbana Baixa	<i>Residential-Low Density (URLD)</i>	7,23	8,26
Área Urbana Média	<i>Residential-Med/Low Density (URML)</i>	41,45	47,31
Campo	<i>Pasture (PAST)</i>	4,52	5,16
Loteamentos	<i>Residential-Low Density (URLD)</i>	0,01	0,01
Solo Exposto	<i>Pasture (PAST)</i>	0,05	0,05
Vegetação Arbórea Natural	<i>Forest-evergreen (FRSE)</i>	3,69	4,21
Vegetação Arbórea Plantada	<i>Forest-evergreen (FRSE)</i>	0,01	0,01

Tabela 4 – Uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Belém.

Uso/Cobertura do Solo	Classificação - SWAT	Área (km ²)	Fração (%)
Vegetação Arbustiva Natural	<i>Range-Grasses</i> (RNGE)	0,20	0,23
Vila	<i>Residential-Low Density</i> (URLD)	0,02	0,02

5.2.5 PROPRIEDADES DO SOLO

Em virtude da área de estudo ser muito urbanizada e apresentar um extensa área de solo de baixa permeabilidade devido às ações humanas não foram encontrados mapas sobre os tipos de solo presentes na área de estudo. Portanto, o mapa de tipos de solo apresentado na Figura 16 foi gerado a partir de uma correlação do mapa da geotecnia da bacia do Alto Iguaçu e o mapa de solos da bacia do rio Verde. A bacia do rio Verde também é uma das sub-bacias que fazem parte da bacia do Alto Iguaçu como pode ser observado na Figura 4.

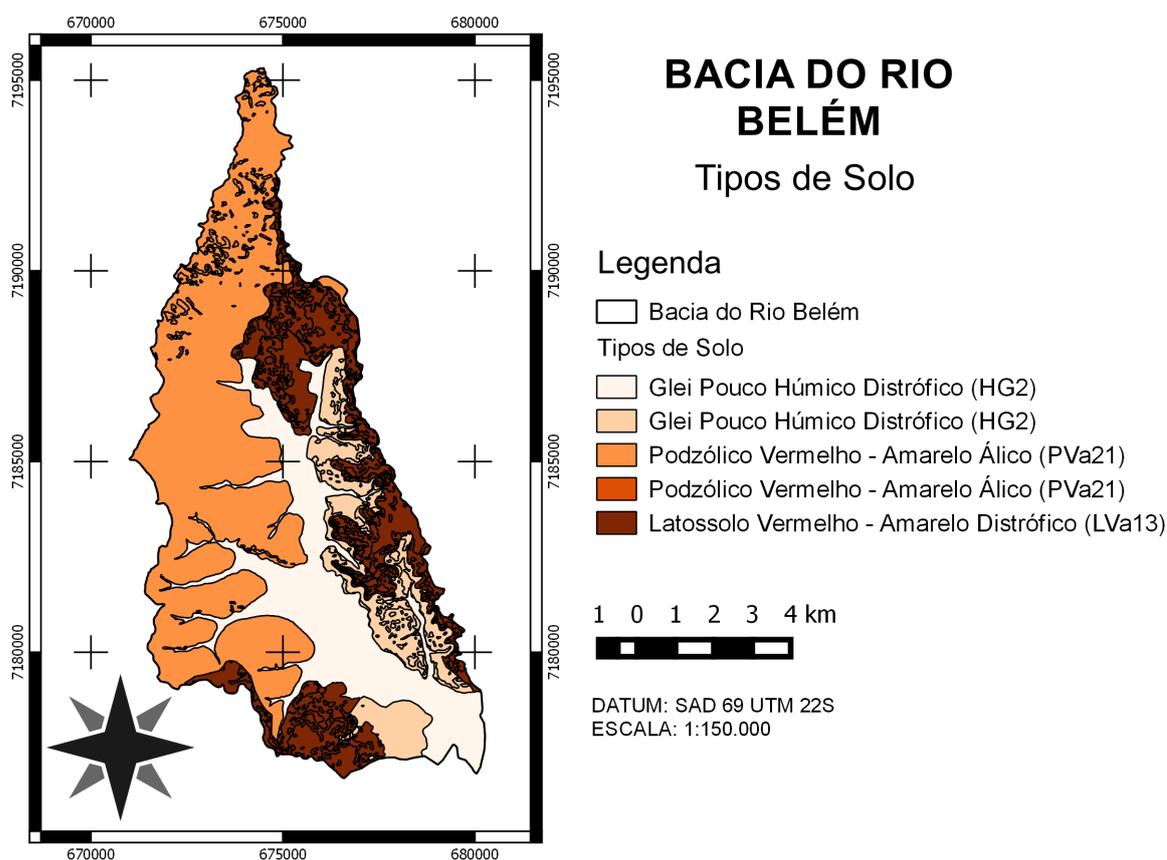


Figura 16 – Mapa de tipos de solo para a bacia do rio Belém.

O mapa da geotecnia foi produzido pela SUDERHSA no ano de 2000 por meio dos cruzamentos da geologia, solos e declividade na escala 1:20.000 (INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ, 2002). Já o mapa de solos do rio Verde foi cedido gentilmente pelo Projeto do Rio Verde (CUNHA et al., 2011). Primeiro, fez-se a associação da

geotecnia das bacias do rio Belém e do rio Verde. Ambas as bacias possuíam as mesmas classes de unidade de terreno. Em seguida, para as áreas que possuíam geotecnias iguais em ambas as bacias adotou-se o mesmo tipo de solo da bacia do rio Verde para a bacia do rio Belém.

Na Tabela 5 são descritas as áreas de cada classe apresentada na legenda da Figura 16 com as suas respectivas áreas e percentuais na bacia do rio Belém.

Tabela 5 – Tipos de solo da área de estudo agrupados.

Tipo de Solo	Solo	Área (km ²)	Fração (%)
Gleí Pouco Húmico Distrófico	HG2	29,41	33,61
Podzólico Vermelho - Amarelo Álico	PVa21	38,83	44,38
Latossolo Vermelho - Amarelo Distrófico	LVa13	19,25	22,01
Total		87,49	100,00

O SWAT requer alguns parâmetros de propriedade física dos solos. Na Tabela 6 são representados os parâmetros necessários para a simulação do modelo e que foram resumidos por Baldissera (2005). Os valores dos parâmetros são exibidos na Tabela 7.

Tabela 6 – Características físicas do solo.

Sigla	Descrição	Unidade
SNAM	Classificação do solo (nome dados a cada classe)	
NLAYERS	Número layers de informação (números de horizontes) -	
HYDGRP	Grupo de mínima saturação hidráulica	A, B, C e D
SOL_ZMX	Profundidade máxima de solo que a raiz alcança	mm
ANION_EXCL	Fração de porosidade do solo	fração
SOL_CRK	Volume potencial máximo do perfil de solo composto por fissuras como uma fração do volume total do solo	m ³ /m ³
SOL_Z	Profundidade de cada horizonte	mm
SOL_BD	Densidade do solo	g/cm
SOL_AWC	Capacidade de água do solo	mm/mm
SOL_K	Condutividade hidráulica saturada	mm/hr
SOL_CBN	Conteúdo de carbono orgânico do solo	% peso solo
CLAY	Porcentagem de argila no solo	% peso solo
SILT	Porcentagem de silte no solo	% peso solo
SAND	Porcentagem de areia no solo	% peso solo
ROCK	Porcentagem de cascalho no solo	% volume
SOL_ALB	Albedo do solo	fração
USLE_K	Erodibilidade do solo	0.013 ton m ² hr/m ³ ton cm
SOL_EC	Condutividade elétrica	dS/m

Tabela 7 – Parâmetros das características físicas das classes de cada solo. Fonte: Cunha et al. (2011).

SNAM	HG2	LVa13	PVa21	SNAM	HG2	LVa13	PVa21
NLAYERS	2,00	4,00	2,00	USLE_K2	0,33	0,20	0,20
HYDGRP	B	B	B	SOL_EC2	0,00	0,00	0,00
SOL_ZMX	500,00	280,00	600,00	SOL_Z3	0,00	130,00	0,00
ANION_EXCL	0,39	0,38	0,32	SOL_BD3	0,00	1,70	0,00
SOL_CRK	0,50	0,50	0,50	SOL_AWC3	0,00	0,13	0,00
SOL_Z1	200,00	40,00	200,00	SOL_K3	0,00	16,60	0,00
SOL_BD1	1,40	1,50	1,70	SOL_CBN3	0,00	0,33	0,00
SOL_AWC1	0,16	0,18	0,25	CLAY3	0,00	54,00	0,00
SOL_K1	14,13	19,00	53,00	SILT3	0,00	14,00	0,00
SOL_CBN1	1,90	2,86	0,95	SAND3	0,00	32,00	0,00
CLAY1	30,00	50,00	23,00	ROCK3	0,00	0,00	0,00
SILT1	43,00	14,00	14,00	SOL_ALB3	0,00	0,15	0,00
SAND1	27,00	36,00	63,00	USLE_K3	0,00	0,22	0,00
ROCK1	0,00	0,00	0,00	SOL_EC3	0,00	0,00	0,00
SOL_ALB1	0,15	0,15	0,15	SOL_Z4	0,00	280,00	0,00
USLE_K1	0,26	0,16	0,19	SOL_BD4	0,00	1,60	0,00
SOL_EC1	0,00	0,00	0,00	SOL_AWC4	0,00	0,11	0,00
SOL_Z2	500,00	80,00	600,00	SOL_K4	0,00	13,20	0,00
SOL_BD2	1,50	1,70	1,70	SOL_VBN4	0,00	0,14	0,00
SOL_AWC2	0,20	0,14	0,20	CLAY4	0,00	66,00	0,00
SOL_K2	19,01	17,20	31,18	SILT4	0,00	9,00	0,00
SOL_CBN2	0,30	1,05	0,52	SAND4	0,00	25,00	0,00
CLAY2	23,00	52,00	36,00	ROCK4	0,00	0,00	0,00
SILT2	41,00	15,00	13,00	SOL_ALB4	0,00	0,15	0,00
SAND2	36,00	33,00	51,00	USLE_K4	0,00	0,19	0,00
ROCK2	0,00	0,00	0,00	SOL_EC4	0,00	0,00	0,00
SOL_ALB2	0,15	0,08	0,15				

5.2.6 DADOS METEOROLÓGICOS E FLUVIOMÉTRICOS

Na Figura 17 estão ilustradas as estações meteorológicas e fluviométricas que se encontram dentro da bacia do rio Belém. Os dados meteorológicos coletados foram: precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa do ar. As estações meteorológicas utilizadas foram obtidas junto ao Instituto Tecnológico SIMEPAR, Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) para a estação do INMET, *The National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) para as estações do *Global Weather*, Agência Nacional das Águas - ANA para a estação do Prado Velho - UCP o período encontrado foi de 1979 a 2016. As localizações, períodos de dados disponíveis, altitude, latitude e longitude estão dispostos na Tabela 8. As estações da *Global Weather* não estão localizadas dentro da bacia do rio Belém, por isso não aparecem no mapa da Figura 17.

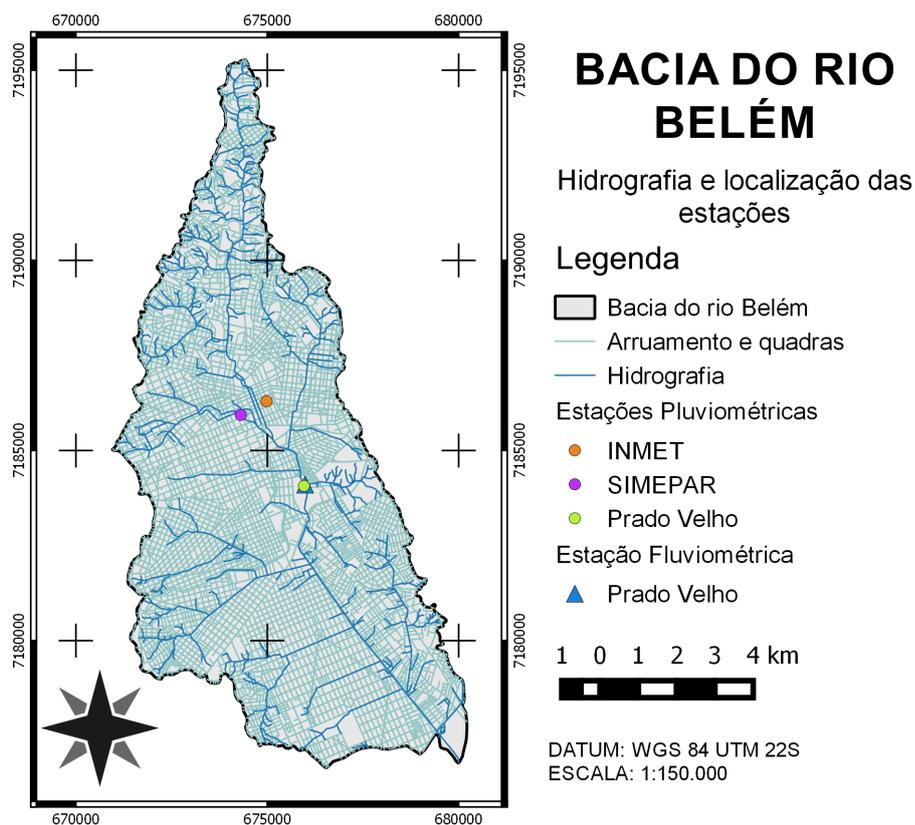


Figura 17 – Localização das estações meteorológicas e fluviométricas presentes dentro da bacia.

Tabela 8 – Estações meteorológicas utilizadas.

Código	Estação	Latitude	Longitude	Altitude	Período disponível
254-491	Global weather 1	-25°26' 49,20"	-49°03' 46,80"	908,00	1979 a 2014
254-497	Global weather 2	-25°26' 49,20"	-49°41' 16,80"	909,00	1979 a 2014
254-494	Global weather 3	-25°26' 49,20"	-49°22' 30,00"	920,00	1979 a 2014
2549131	INMET	-25°25' 48,00"	-49°15' 36,00"	923,50	1992 a 2016
2549101	SIMEPAR	-25°26' 00,00"	-49°16' 00,00"	930,00	1998 a 2016
2549075	Prado Velho - UCP	-25°27' 00,00"	-49°15' 00,00"	884,00	1982 a 2013

Utilizou-se os mesmos dados climáticos da estação do SIMEPAR para a estação pluviométrica do Prado Velho - UCP. Já a estação climática do INMET não possuía dados de radiação solar, e esses foram complementados pela estação do SIMEPAR.

Foi encontrada apenas uma estação fluviométrica, a qual foi fornecida pela Agência Nacional das Águas - ANA para a estação do Prado Velho - UCP. Na Tabela 9 estão descritos a altitude, período de dados disponíveis, latitude e longitude.

Tabela 9 – Estações fluviométricas utilizadas pelo modelo

Código	Estação	Latitude	Longitude	Altitude	Período disponível
65011400	Prado Velho - UCP	-25°26' 56,40"	-49°14' 56,40"	880,00	1982 a 2013

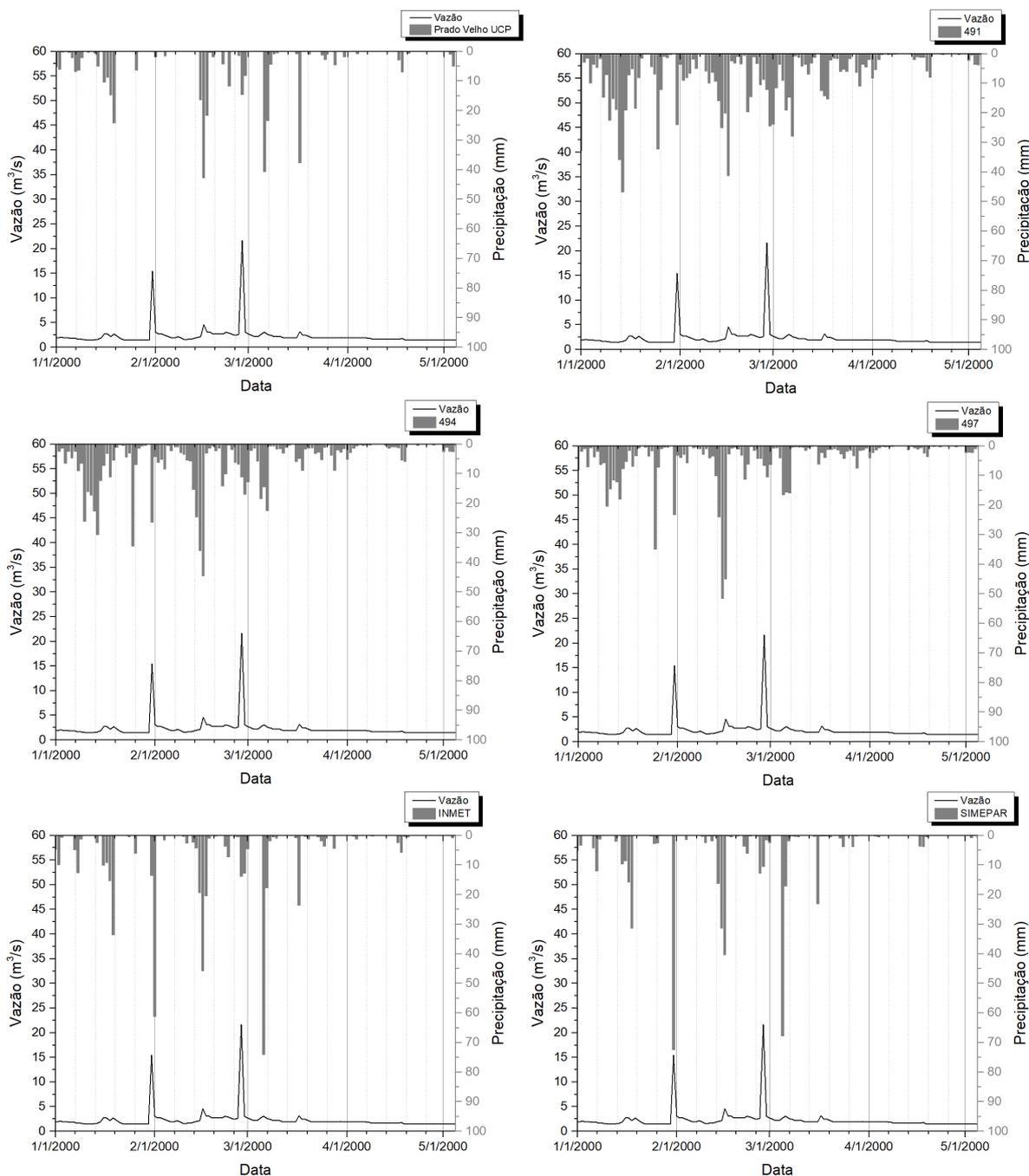


Figura 18 – Dados de precipitação da estação do Prado Velho-UCP, do *Global Weather* 497, 494 e 491, do SIMEPAR e do INMET são apresentados na parte superior e na inferior é a vazão medida pela estação do Prado Velho-UCP.

A partir da análise visual de gráficos, como por exemplo: hidrogramas e hietogra-

mas, geralmente, é possível avaliar a resposta da vazão à precipitação. Dessa forma, na Figura 18 são apresentados amostras dos dados de precipitação e de vazão para os cinco primeiros meses de 2000.

Na Figura 19 é apresentado uma amostra mais longa da série histórica da estação fluviométrica do Prado Velho - UCP e a média das precipitações no mesmo período de 2000.

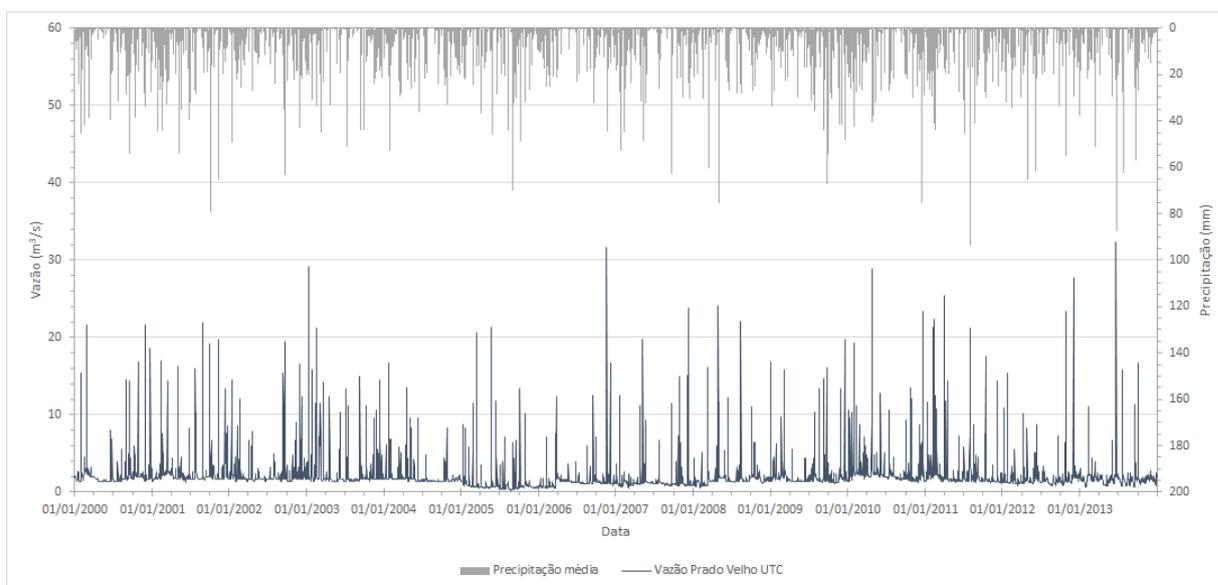


Figura 19 – Dados de precipitação média da estação do Prado Velho-UCP, do *Global Weather* 497, 494 e 491, do SIMEPAR e do INMET são apresentados na parte superior e na inferior é a vazão medida pela estação do Prado Velho-UCP.

5.2.7 PREENCHEDOR DE FALHAS

O modelo SWAT possui um preenchedor de falhas que é denominado pelo SWAT como *Weather Generator* (WGEN). Esse dado é de grande importância para as séries históricas climáticas que possuem dados faltantes, pois a partir desses dados o SWAT é capaz de preencher as falhas das séries históricas utilizando métodos matemáticos. Os parâmetros necessários para a formação do WGEN são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros de entrada para o Gerador Climático

Sigla	Definição	Unidade
PCPMM	Precipitação média	mm
PCPSTD	Desvio da precipitação	mm
PCPD	Número de dias de precipitação	dias
RAINHHMX	Precipitação máxima de 0,5 hora	mm
TMPMX	Temperatura máxima	°C

Tabela 10 – Parâmetros de entrada para o Gerador Climático

Sigla	Definição	Unidade
TMPMN	Temperatura mínima	°C
TMPSTDMX	Desvio da temperatura máxima	°C
TMPSTDMN	Desvio da temperatura mínima	°C
SOLARAV	Valor diário da energia solar	MJ m ² dia ⁻¹
WNDVAV	Velocidade do vento	m/s
DEWPT	Temperatura do ponto de orvalho	°C
PR_W1	Probabilidade de dias de chuva seguido de dias de seca	%
PR_W2	Probabilidade de dias de chuva seguido de dias de chuva	%
PCPSKW	Coeficiente de assimetria para a precipitação máxima	

Os valores de cada parâmetro do WGEN foram calculados para cada estação meteorológica utilizando o programa *SWAT Weather Database*, que é uma ferramenta capaz de processar dados diários, calculando com eficiência as estatísticas do gerador climático de várias estações meteorológicas (ESSENFELDER, 2016). Os valores dos parâmetros são apresentados nas Tabelas 11, 12, 13, 14, 15 e 16.

Tabela 11 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica 491 *Global Weather*.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	25,76	25,99	24,95	23,04	20,16	18,89	18,52	20,38	20,74	22,60	24,19	25,74
TMPMN	16,69	16,65	15,68	13,93	10,83	9,53	9,38	10,19	11,42	13,40	14,44	15,78
TMPSTDMX	3,84	3,59	3,63	3,66	3,81	4,00	4,62	5,30	5,86	5,22	4,83	4,27
TMPSTDMN	2,28	2,13	2,36	3,08	3,73	4,07	4,00	3,70	3,20	2,74	2,73	2,52
PCPMM	304,24	266,78	196,64	135,05	125,77	118,08	109,22	85,65	129,23	159,16	154,64	217,50
PCPSTD	12,02	10,25	8,60	8,87	9,27	9,94	8,66	7,23	8,54	8,29	7,58	9,60
PCPSKW	3,00	2,52	4,81	5,19	4,02	5,72	4,56	6,26	4,49	3,40	3,15	2,93
PR_W1	0,86	0,82	0,56	0,63	0,48	0,41	0,44	0,44	0,53	0,79	0,73	0,63
PR_W2	0,96	0,97	0,97	0,94	0,90	0,86	0,86	0,86	0,94	0,97	0,97	0,96
PCPD	29,75	27,33	29,28	27,47	25,69	22,47	23,58	23,37	26,86	29,89	28,71	28,97
RAINHHMX	15,15	13,22	10,64	11,91	11,67	11,48	11,18	8,76	11,32	10,78	9,77	12,16
SOLARAV	20,92	20,27	17,51	13,84	11,08	9,94	10,49	13,57	13,84	16,42	19,44	21,12
DEWPT	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,84	0,86	0,88	0,86	0,86
WNDVAV	1,66	1,57	1,54	1,55	1,59	1,72	1,76	1,73	1,85	1,85	1,86	1,76

Tabela 12 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica 494 *Global Weather*.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	25,23	25,26	24,32	22,38	19,42	18,28	18,02	20,24	20,79	22,52	24,03	25,42
TMPMN	16,25	16,26	15,21	13,50	10,32	9,02	8,87	9,77	10,94	12,97	14,04	15,39
TMPSTDMX	3,53	3,24	3,26	3,43	3,68	3,81	4,42	5,16	5,80	5,11	4,61	4,02
TMPSTDMN	2,11	2,00	2,22	2,98	3,63	3,96	3,92	3,62	3,21	2,68	2,60	2,35
PCPMM	264,88	225,04	158,73	121,52	125,69	118,35	105,52	85,23	124,75	158,09	147,50	193,06

Tabela 12 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica 494 *Global Weather*.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
PCPSTD	11,58	9,23	7,33	8,55	9,58	10,50	8,48	7,36	8,49	8,77	7,97	8,75
PCPSKW	4,14	2,95	4,19	5,67	4,28	6,01	4,75	5,70	4,30	3,93	4,18	3,08
PR_W1	0,87	0,75	0,51	0,63	0,48	0,42	0,44	0,42	0,52	0,79	0,74	0,61
PR_W2	0,97	0,98	0,96	0,94	0,90	0,86	0,86	0,86	0,94	0,97	0,97	0,96
PCPD	29,92	27,36	29,00	27,42	25,69	22,39	23,42	23,11	26,71	29,77	28,66	29,09
RAINHHMX	14,14	11,59	8,63	11,37	11,65	11,58	11,38	8,93	11,59	11,42	9,85	11,09
SOLARAV	21,01	20,32	17,60	13,88	11,05	10,09	10,78	14,11	14,65	17,08	20,25	21,71
DEWPT	0,88	0,89	0,89	0,89	0,89	0,88	0,87	0,82	0,84	0,86	0,85	0,85
WNDVAV	2,02	1,89	1,86	1,90	1,94	2,08	2,17	2,16	2,38	2,36	2,35	2,16

Tabela 13 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica 497 *Global Weather*.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	25,92	25,82	24,90	22,79	19,66	18,49	18,31	20,80	21,62	23,32	24,84	26,16
TMPMN	16,31	16,31	15,24	13,53	10,33	9,08	8,88	9,86	11,02	13,10	14,16	15,50
TMPSTDMX	3,52	3,26	3,24	3,38	3,67	3,72	4,24	4,99	5,57	4,93	4,44	3,93
TMPSTDMN	2,01	1,89	2,19	2,92	3,59	3,93	3,93	3,56	3,27	2,71	2,56	2,27
PCPMM	224,36	188,02	130,31	105,09	119,40	111,45	96,26	77,80	111,55	139,78	126,18	159,18
PCPSTD	10,62	8,97	6,96	7,94	9,46	10,04	8,09	7,01	8,31	8,69	7,73	7,92
PCPSKW	4,30	3,19	3,91	5,13	4,19	5,47	4,92	5,36	4,50	4,41	4,47	3,39
PR_W1	0,83	0,74	0,58	0,59	0,46	0,42	0,43	0,41	0,53	0,72	0,71	0,61
PR_W2	0,97	0,97	0,96	0,94	0,90	0,85	0,85	0,85	0,92	0,96	0,95	0,96
PCPD	29,83	27,31	28,83	27,14	25,28	21,92	22,83	22,54	26,23	29,46	28,14	28,80
RAINHHMX	12,35	10,51	7,78	10,48	11,27	10,64	11,00	8,59	11,48	11,14	9,30	9,82
SOLARAV	21,89	20,93	18,30	14,38	11,30	10,37	11,22	14,83	16,10	18,47	21,76	22,94
DEWPT	0,85	0,87	0,86	0,86	0,87	0,86	0,85	0,79	0,80	0,83	0,81	0,82
WNDVAV	2,32	2,17	2,14	2,18	2,22	2,35	2,48	2,50	2,79	2,75	2,73	2,49

Tabela 14 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica INMET.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	26,53	26,82	25,58	23,90	20,50	19,71	19,53	21,48	21,60	23,09	24,49	26,12
TMPMN	17,08	17,41	16,20	14,32	11,10	9,75	8,99	9,59	11,27	13,32	14,51	16,19
TMPSTDMX	3,17	3,20	3,25	3,37	3,41	3,71	4,41	4,90	5,15	4,52	4,10	3,56
TMPSTDMN	1,91	1,83	2,00	2,88	3,14	3,49	3,45	3,32	2,90	2,45	2,58	2,35
PCPMM	227,71	182,20	148,22	92,04	89,31	101,72	115,29	84,65	150,58	157,78	130,10	154,38
PCPSTD	13,84	12,69	10,66	8,88	8,60	9,96	10,20	8,84	12,31	10,19	9,64	10,30
PCPSKW	3,05	3,43	3,25	4,03	5,07	4,97	4,30	5,29	3,31	2,57	3,39	3,42
PR_W1	0,47	0,48	0,39	0,34	0,37	0,34	0,30	0,21	0,30	0,39	0,35	0,42
PR_W2	0,73	0,71	0,64	0,48	0,55	0,51	0,53	0,49	0,59	0,58	0,59	0,62
PCPD	19,75	17,63	16,00	11,75	13,96	12,25	12,04	9,04	12,40	14,92	13,96	16,40
RAINHHMX	18,59	16,95	14,42	11,32	11,43	13,07	14,56	10,16	14,40	12,84	12,53	12,88

Tabela 14 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica INMET.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
SOLARAV	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DEWPT	0,81	0,81	0,82	0,81	0,83	0,82	0,81	0,77	0,80	0,81	0,79	0,79
WNDVAV	1,85	1,76	1,63	1,52	1,44	1,48	1,53	1,62	1,84	1,91	2,03	1,91

Tabela 15 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica SIMEPAR.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	26,52	27,04	25,91	23,98	20,25	19,61	19,35	21,41	21,49	23,02	24,31	25,96
TMPMN	16,99	17,34	16,35	14,45	10,92	9,76	9,00	9,75	11,24	13,18	14,24	16,02
TMPSTDMX	3,51	3,29	3,41	3,53	3,52	3,82	4,42	5,00	5,29	4,85	4,28	3,93
TMPSTDMN	1,81	1,74	2,01	2,80	3,13	3,41	3,29	3,17	2,96	2,37	2,49	2,14
PCPMM	179,45	155,22	133,71	91,77	83,28	105,41	116,29	81,60	137,53	145,38	113,00	131,22
PCPSTD	11,02	10,73	10,16	8,64	7,66	11,12	9,44	9,01	11,77	10,39	9,12	9,65
PCPSKW	3,16	2,94	3,37	4,58	4,51	5,37	3,37	5,71	3,76	3,50	3,91	4,76
PR_W1	0,41	0,38	0,31	0,27	0,25	0,19	0,20	0,16	0,26	0,34	0,35	0,42
PR_W2	0,73	0,72	0,64	0,54	0,53	0,55	0,58	0,57	0,58	0,57	0,59	0,62
PCPD	18,79	16,26	14,42	11,05	10,84	9,05	9,95	8,26	11,53	13,63	13,84	16,00
RAINHHMX	14,93	14,19	13,85	11,30	10,28	14,40	12,01	10,39	15,36	13,95	11,65	11,78
SOLARAV	865,42	809,57	725,51	651,36	519,45	481,10	479,80	637,34	664,79	756,34	841,09	894,44
DEWPT	0,71	0,79	0,80	0,80	0,81	0,80	0,79	0,75	0,78	0,80	0,79	0,78
WNDVAV	1,68	1,58	1,52	1,42	1,44	1,40	1,52	1,58	1,79	1,84	1,92	1,86

Tabela 16 – Parâmetros climáticos obtidos para a estação meteorológica Prado Velho - UCP.

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
TMPMX	26,52	27,04	25,91	23,98	20,25	19,61	19,35	21,41	21,49	23,02	24,31	25,96
TMPMN	16,99	17,34	16,35	14,45	10,92	9,76	9,00	9,75	11,24	13,18	14,24	16,02
TMPSTDMX	3,51	3,29	3,41	3,53	3,52	3,82	4,42	5,00	5,29	4,85	4,28	3,93
TMPSTDMN	1,81	1,74	2,01	2,80	3,13	3,41	3,29	3,17	2,96	2,37	2,49	2,14
PCPMM	183,39	157,64	123,33	86,70	94,58	96,15	97,67	69,70	128,91	131,27	105,76	141,67
PCPSTD	12,23	12,38	9,66	8,36	9,24	10,19	9,38	7,78	10,90	9,26	8,56	10,25
PCPSKW	3,37	4,21	3,51	4,44	4,88	5,61	4,31	5,72	3,46	2,97	3,59	4,18
PR_W1	0,35	0,34	0,27	0,20	0,18	0,16	0,15	0,13	0,21	0,30	0,28	0,27
PR_W2	0,54	0,56	0,52	0,39	0,42	0,45	0,45	0,43	0,47	0,40	0,41	0,52
PCPD	13,33	12,36	10,94	7,33	7,27	6,79	6,73	5,61	8,55	10,45	9,64	11,30
RAINHHMX	15,78	15,89	12,04	10,98	11,13	13,22	12,29	8,41	12,98	11,66	11,19	13,17
SOLARAV	865,42	809,57	725,51	651,36	519,45	481,10	479,80	637,34	664,79	756,34	841,09	894,44
DEWPT	0,71	0,79	0,80	0,80	0,81	0,80	0,79	0,75	0,78	0,80	0,79	0,78
WNDVAV	1,68	1,58	1,52	1,42	1,44	1,40	1,52	1,58	1,79	1,84	1,92	1,86

5.3 RESERVATÓRIOS

Os pontos de reservatórios foram inseridos logo após a inserção da hidrografia, contudo as suas características só são introduzidas na etapa de edição de entradas, após o fornecimento dos dados meteorológicos.

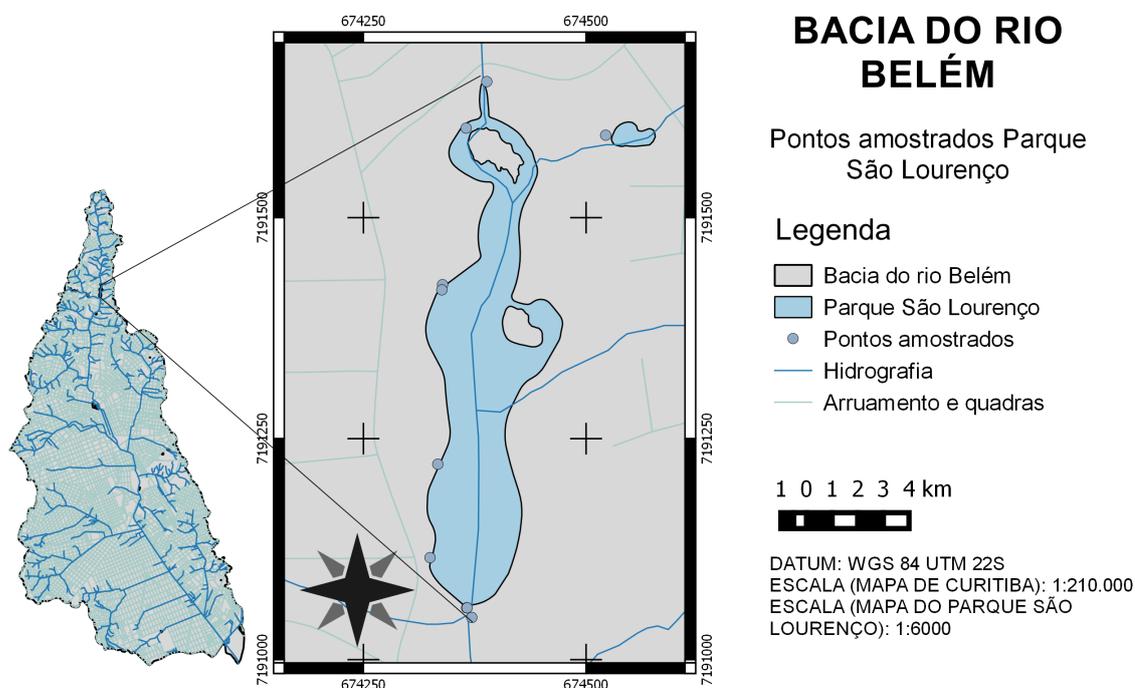


Figura 20 – Mapa de pontos amostrados no Parque São Lourenço.

Os parâmetros requeridos pelo SWAT são para duas situações distintas, quando o reservatório opera normalmente e quando o mesmo está em estado de emergência, com volume e área máximos. Os parâmetros necessários para a inserção dos reservatórios são: área da superfície do reservatório, volume médio e vazão média.

Em virtude da escassez de dados dos reservatórios do Passeio Público e do Parque São Lourenço foi realizada uma campanha no dia 22 de janeiro de 2019 para coletar dados de profundidade de ambos os reservatórios com objetivo de estimar os valores dos parâmetros baseados nos dados amostrados, as localizações das amostras estão representadas nas Figuras 20 e 21. A partir dos pontos amostrados foram realizadas estimativas para os parâmetros dos reservatórios que são apresentadas na Tabela 17.

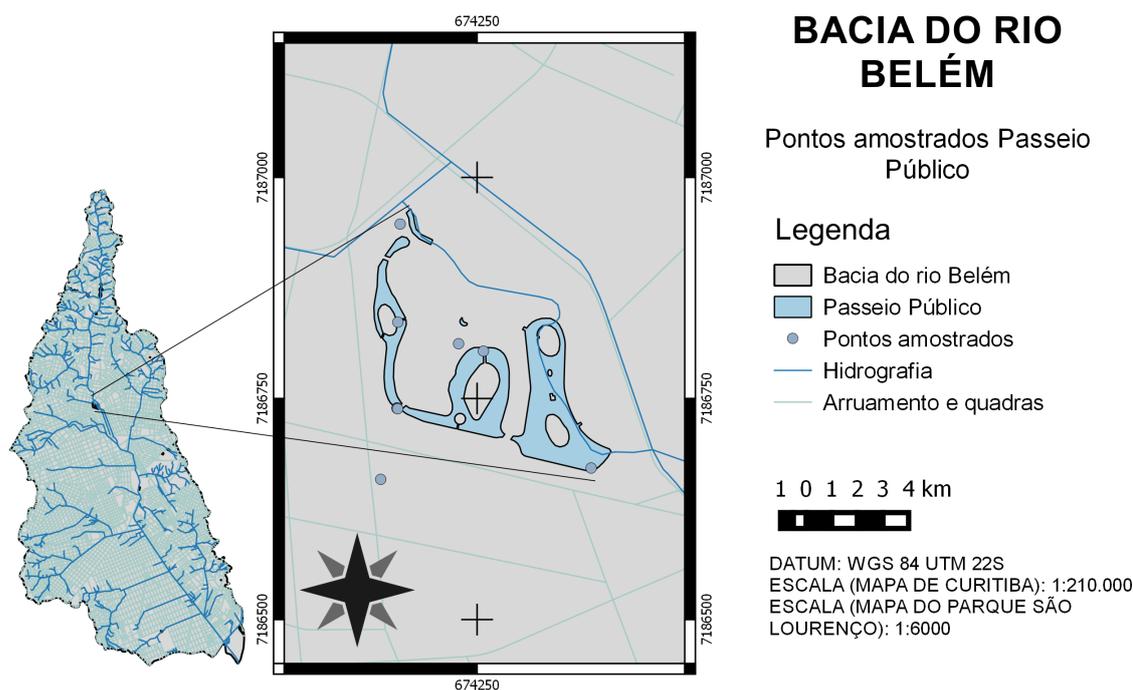


Figura 21 – Mapa de pontos amostrados no Passeio Público.

Tabela 17 – Características dos reservatórios do Parque São Lourenço e do Passeio Público

Situação	Parque São Lourenço		Passeio Público	
	Normal	Emergência	Normal	Emergência
Área da superfície (ha)	42	42	1,45	1,45
Volume (10^4 m^3)	2,66	4,2	1,03	1,76
Vazão média (m^3/s)		0,2		0,2

5.4 ÁGUA IMPORTADA

Para estimar o volume de água importada considerou-se entradas provenientes das perdas de água por vazamento do sistema de abastecimento de água municipal e o volume de águas residuais que não são coletadas pela rede pública de coleta de esgoto. A estimativa do volume de água importada deu-se a partir das estimativas dos volumes de água perdida per capita e águas residuais per capita.

Antes de estimar os volumes per capita fez-se uma projeção da população em cada parcela de bairro presente nas sub-bacias do rio Belém começando no ano de 1998 e terminando no ano de 2013. Foram utilizados dados dos anos de 2000, 2010 e 2016 de densidade demográfica de cada bairro presente na bacia do rio Belém, os quais foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) e o mapa dos bairros

de Curitiba fornecido pelo IPPUC.

Primeiro, calculou-se a população para cada parcela de bairro presente nas sub-bacias nos anos de 2000, 2010 e 2016. A população, P_b , foi calculada utilizando a área de cada bairro presente na sub-bacia, $\text{Área}_{\text{bairro}}$, e a densidade demográfica do bairro, $\text{Densidade}_{\text{demográfica}}$. A equação

$$P_b = \text{Densidade}_{\text{demográfica}} \cdot \text{Área}_{\text{bairro}} \quad (5.1)$$

apresenta o cálculo da população em cada parcela de bairro presente nas sub-bacias.

Em seguida, foi realizado uma projeção da população para os anos faltantes. A taxa média de crescimento anual da população (r) foi calculada pelo método geométrico apresentado pela equação:

$$r = \sqrt[n]{\frac{P_t}{P_o}} - 1, \quad (5.2)$$

onde P_t é a população final, P_o é a população no começo do período considerado e n é o número de anos no período.

5.4.1 ESTIMATIVA DO VOLUME DE ÁGUAS RESIDUAIS

A estimativa do volume de águas residuais per capita foi calculado para cada ano entre 1998 e 2013 utilizando o número de habitantes que possuem acesso a rede pública de coleta de esgoto, o volume anual de água consumido e o volume anual de esgoto coletado e que foi submetido a tratamento. Esses dados foram obtidos pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). A maneira com que o volume de águas residuais per capita foi calculado é apresentada na equação

$$\text{Volume}_{\text{per capita de águas residuais}} = \frac{\text{Volume}_{\text{água consumida}} - \text{Volume}_{\text{esgoto tratado e coletado}}}{P_{\text{atendida}}} \quad (5.3)$$

O coeficiente de retorno recomendado pela NBR 9649/1986 é de 80%, o qual leva em consideração a relação entre o volume de esgoto coletado pela rede e o volume de água consumida, contudo esse coeficiente pode variar entre as cidades e os anos. No município de Curitiba esse coeficiente variou entre 88% a 93% entre os anos de 2013 e 2017 (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2013). Nesse trabalho adotou-se um coeficiente de retorno de 100%.

Com o volume anual de água residual per capita e a projeção anual da população nas parcelas de cada bairro presente nas sub-bacias foi estimado um volume médio

anual de esgoto não tratado para cada parcela de bairro presente nas sub-bacias em cada ano, usou-se a equação:

$$Volume_{\text{águas residuais por bairro}} = P_b \cdot Volume_{\text{per capita de águas residuais}}. \quad (5.4)$$

5.4.2 ESTIMATIVA DO VOLUME DE ÁGUA PERDIDA

O volume anual de água perdida per capita foi calculado para os anos de 1998 a 2013 com base nos dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), que são: número de habitantes que possuem acesso ao sistema de abastecimento de água municipal, volume produzido e consumido de água. A forma com que foi calculado o volume anual de água perdida per capita é descrita na equação

$$Volume_{\text{per capita de água perdida}} = \frac{Volume_{\text{água produzida}} - Volume_{\text{água consumida}}}{P_{\text{atendida}}}. \quad (5.5)$$

Com o volume anual de água perdida per capita e a projeção anual da população nas parcelas de cada bairro presente nas sub-bacias foi estimado um volume médio anual de água perdida para cada parcela de bairro presente nas sub-bacias em cada ano, usou-se a equação

$$Volume_{\text{água perdida por bairro}} = P_b \cdot Volume_{\text{per capita de água perdida}}. \quad (5.6)$$

5.5 DESEMPENHO DO MODELO

A avaliação de um modelo que visa prever ou simular a vazão de um rio de forma contínua ou para um evento específico compara em ambos os casos a vazão simulada com a medida. O primeiro passo necessário para uma avaliação é a comparação visual de um gráfico da vazão simulada com a vazão observada. Quando o desempenho de vários modelos é comparado ou um único modelo é avaliado para anos diferentes é preciso uma avaliação quantitativa, que pode ser satisfeita usando um ou mais critérios estatísticos de adequação de qualidade (ASCE, 1993).

O critério utilizado foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) que foi desenvolvido a partir de métodos estatísticos simples que determinam a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados medidos (NASH; SUTCLIFFE, 1970 apud DILE et al., 2016). O NSE pode variar entre os valores $-\infty$ e 1. Arnold (2012) apresentou a seguinte classificação para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE): se $1,00 > NSE > 0,75$ o modelo é considerado muito bom; quando está $0,75 > NSE >$

0,65 o modelo é considerado bom; entre 0,65 e 0,50 é satisfatório, e abaixo de 0,50 inadequado.

A forma de calcular o NSE é dada pela equação

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{med}^{obs})^2} \right]. \quad (5.7)$$

Na equação 5.7, y_i^{obs} é a vazão observada, y_i^{sim} é a vazão simulada e y_{med}^{obs} é a média da vazão observada.

Outro método utilizado para avaliar o desempenho do modelo foi a comparação visual dos gráficos mensais da evapotranspiração simulada com a estimada e o nível da água no lençol freático simulado e a estimada. O nível do lençol freático foi estimado utilizando os dados da missão GRACE. A missão GRACE fornece medidas do nível dos lençóis freáticos realizadas diretamente do espaço. A variação do nível do lençol pode variar o campo gravitacional de uma região e a partir das observações dessas mudanças cientistas são capazes de estimar a variação do nível do lençol freático (NASA, 2014). Desde que GRACE foi lançado no ano de 2002 três diferentes centros de processamento, conhecidos como: *GeoforschungsZentrum Potsdam* (GFZ), *Center for Space Research at University of Texas* (CSR) e *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), lançam continuamente soluções mensais dos níveis dos lençóis freáticos da superfície da Terra com uma amostragem de 1° em latitude e longitude (NASA, 2015). O nível do lençol freático foi estimado para a região de Curitiba utilizando a média entre os valores do GFZ, CSR e JPL como é sugerido pela NASA (2015). A escala utilizada pela missão GRACE acaba sendo maior que a própria bacia do rio Belém, dessa maneira utilizou-se a média do GRACE apenas como uma aproximação para a bacia.

Conhecidos os valores estimados do nível do lençol freático (ΔS), a precipitação (P) e a vazão (Q), a evapotranspiração (ET) foi estimada utilizando a equação do balanço hídrico como

$$\Delta S = P - Q - ET. \quad (5.8)$$

5.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO MODELO

O método semi-automático do SUFI2 permite que a análise de sensibilidade seja realizada de duas maneiras diferentes. A primeira análise que pode ser realizada é a local: a sensibilidade de uma variável é analisada para um parâmetro que varia durante as simulações enquanto os outros parâmetros permanecem inalterados. A segunda análise é a global, em que se estuda a sensibilidade de diferentes parâmetros para uma mesma variável (ABBASPOUR, 2015).

A desvantagem de se utilizar a análise local é a de que a sensibilidade de um parâmetro frequentemente depende do valor de outros parâmetros relacionados e os valores desses outros parâmetros nunca são conhecidos. Já a análise global requer um grande número de simulações (ARNOLD et al., 2012).

Seguiram-se os procedimentos de Khalid et al. (2016a), Tejaswini e Sathian (2018) para a realização da análise de sensibilidade. O método compara a sensibilidade de cada parâmetro em nível local e global, os parâmetros que forem mais estáveis em ambas as análises são selecionados como sensíveis. Os parâmetros selecionados para a realização da calibração estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros utilizados para a análise de sensibilidade do modelo.

Parâmetros	Descrição do parâmetro	Mínimo	Máximo
GW_REVAP.gw	Coeficiente de reevaporação da água subterrânea (dia)	0,02	0,20
GW_DELAY.gw	Tempo de retardo do escoamento subterrâneo (dia)	0,00	500,00
ALPHA_BF.gw	Fator de recessão do escoamento de base (dia)	0,00	1,00
QWQMN.gw	Profundidade limite da água no aquífero raso para ocorrer fluxo de retorno (mm)	0,00	5.000,00
REVAPMN.gw	Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação (mm)	0,00	500,00
RCHRG_DP.gw	Percentual de água percolada para o aquífero (Fração)	0,00	1,00
SOL_ALB.sol	Albedo do solo	0,00	0,25
SOL_K.sol	Condutividade hidráulica saturada (mm/hr)	0,00	2.000,00
SOL_AWC.sol	Capacidade de água disponível no solo (mmH ₂ O/mmSolo)	0,00	1,00
ESCO.bsn	Fator de compensação da evaporação do solo (adm.)	0,00	1,00
EPCO.bsn	Fator de compensação da evaporação da planta (adm.)	0,00	1,00
SURLAG.bsn	Coeficiente de escoamento superficial (adm.)	0,05	24,00
LAT_TTIME.hru	Tempo de viagem de escoamento lateral (dia)	0,00	180,00
OV_N.hru	O valor "n" de Manning para o escoamento superficial	0,01	30,00
SLSOIL.hru	Comprimento do declive para o fluxo lateral subsuperficial (m)	0,00	150,00
HRU_SLP.hru	Inclinação média do declive (m/m)	0,00	1,00
CH_K2.rte	Condutividade hidráulica efetiva no canal principal (mm h)	0,01	500,00
CH_N2.rte	Coeficiente de Manning para o canal principal (adm.)	0,01	0,30
ALPHA_BNK.rte	Fator alfa de fluxo de base para armazenamento (dia)	0,00	1,00
CN2.mgt	Valor Curva Número, método SCS (adm.)	35,00	98,00

A análise de sensibilidade local utilizou o processamento paralelo. Essa função permite que as iterações sejam realizadas de maneira mais rápida, contudo dependem das características do computador, já que o número de iterações é dividido entre as CPUs. Atualmente, o processamento paralelo permite que sejam realizadas até 20 simulações sem a licença. Dessa forma, foram realizadas 20 iterações para cada parâmetro apresentado na Tabela 18. A análise de sensibilidade local necessita de

mais simulações, sendo recomendado um número igual ou maior que 500, dessa maneira realizou-se 1.000 simulações (ABBASPOUR, 2015).

A sensibilidade dos parâmetros é determinada calculando o seguinte sistema de regressão múltipla

$$g = \alpha + \sum_{i=1}^m \beta_i b_i, \quad (5.9)$$

onde g é o valor da função objetivo, α é a constante de regressão, e β é o coeficiente dos parâmetros. Um teste-t¹ é então utilizado para identificar a significância relativa de cada parâmetro b . As sensibilidades são estimadas das mudanças médias na função objetivo resultantes das mudanças de cada parâmetro, enquanto todos os outros parâmetros estão mudando. Isso fornece sensibilidades relativas baseadas em aproximações lineares e, portanto, fornece apenas informações parciais sobre a sensibilidade da função objetiva para modelar parâmetros. Nesta análise, quanto maior o valor absoluto do teste-t mais sensíveis são os parâmetros. Os parâmetros se tornam mais significativos quanto mais próximo de zero o valor-p² estiver (KHALID et al., 2016b).

Uma vez identificados os parâmetros mais sensíveis o processo de calibração se inicia. Foram realizadas 1000 simulações para cada iteração para se obter a melhor parametrização do modelo. A eficiência da calibração é estimada utilizando o fator-P e o fator-R descritos anteriormente. A última etapa é a validação do modelo para um período diferente do calibrado utilizando os mesmos intervalos selecionados para cada parâmetro e o mesmo número de simulações usado durante a calibração.

¹ Teste-t é um teste de hipótese que usa conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese nula quando a estatística de teste-t segue uma distribuição t de Student. Uma hipótese nula afirma que não existe relação entre dois fenômenos medidos.

² Um valor-p pequeno significa que a probabilidade de obter um valor da estatística de teste como o observado é muito improvável, levando assim à rejeição da hipótese nula

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A bacia do rio Belém foi dividida em 16 sub-bacias como ilustrado na Figura 22. Foram geradas 92 HRUs definidas de acordo com o uso do solo, tipo de solo e declividade. Os pontos de reservatórios foram implementados nas sub-bacias 2 e 3, onde estão localizados o Parque São Lourenço e o Passeio Público, respectivamente. Os pontos de entrada foram inseridos automaticamente em cada uma das sub-bacias.

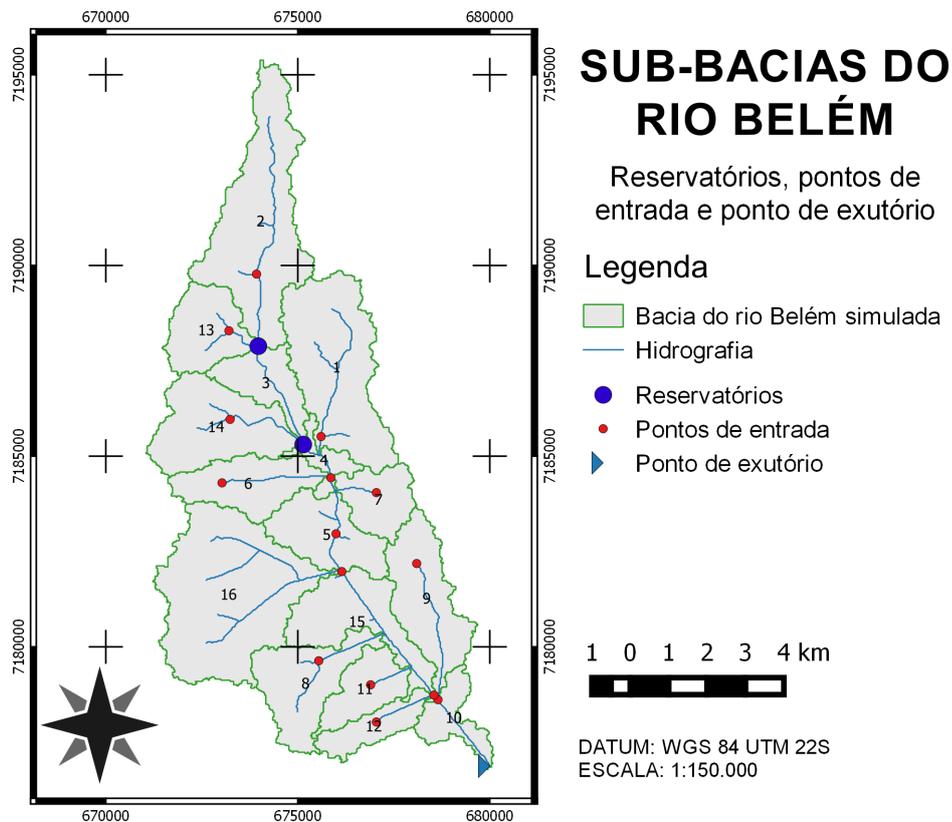


Figura 22 – Mapa das divisões em sub-bacias do modelo SWAT para a bacia do rio Belém.

A partir dos dados obtidos pelo Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) estimou-se o índice de água perdida na rede distribuidora de água nos anos de 1996 a 2016. Como pode ser observado na Tabela 19 o índice de perdas no sistema da distribuidora de água de Curitiba no início da série histórica era maior que 50%, ou seja, mais da metade da água tratada não chegava a ser consumida, contudo esse índice tem diminuído de forma não linear com o passar dos anos, como ilustrado na Figura 23. O percentual estimado de esgoto coletado na área de atuação do prestador de serviços e que foi submetido a tratamento, medido ou estimado na(s) entrada(s) da(s) Estações de Tratamento de Esgoto (ETE(s)) vem aumentando rapidamente ao

longo dos anos, havendo uma diferença expressiva entre 1996 e 2016. O volume per capita estimado para as águas residuais tem diminuído ao longo dos anos, enquanto o volume per capita estimado para a água que é perdida no sistema de abastecimento de água tem oscilado nos últimos anos como é apresentado na Tabela 19 e na Figura 23.

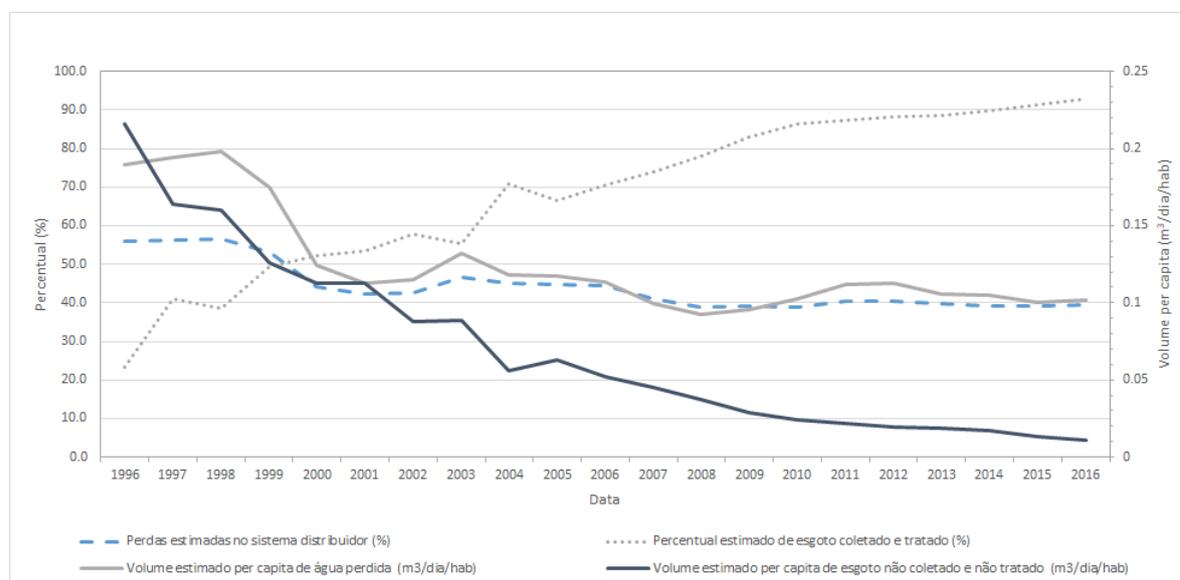


Figura 23 – Gráfico dos dados estimados de volume de água perdida no sistema distribuidor de água municipal e percentual dessas perdas, volume estimado per capita de esgoto não coletado e não tratado e o percentual de esgoto coletado e tratado.

Tabela 19 – Dados estimados de volume de água perdida no sistema distribuidor de água municipal e percentual dessas perdas, volume estimado per capita de esgoto não coletado e não tratado e o percentual de esgoto coletado e tratado,

Ano de Referência	Perdas estimadas no sistema distribuidor (%)	Volume estimado per capita de água perdida (m³/dia/hab)	Percentual estimado de esgoto coletado e tratado (%)	Volume estimado per capita de esgoto não coletado e não tratado (m³/dia/hab)
1996	55,97	0,19	23,18	0,22
1997	56,30	0,19	40,95	0,16
1998	56,49	0,20	38,55	0,16
1999	53,06	0,18	49,32	0,13
2000	44,15	0,12	52,15	0,11
2001	42,25	0,11	53,46	0,11
2002	42,69	0,12	57,70	0,09
2003	46,52	0,13	55,39	0,09
2004	44,94	0,12	70,77	0,06
2005	44,63	0,12	66,44	0,06
2006	44,51	0,11	70,41	0,05
2007	41,12	0,10	73,94	0,04

Tabela 19 – Dados estimados de volume de água perdida no sistema distribuidor de água municipal e percentual dessas perdas, volume estimado per capita de esgoto não coletado e não tratado e o percentual de esgoto coletado e tratado,

Ano de Referência	Perdas estimadas no sistema distribuidor (%)	Volume estimado per capita de água perdida (m3/dia/hab)	Percentual estimado de esgoto coletado e tratado (%)	Volume estimado per capita de esgoto não coletado e não tratado (m3/dia/hab)
2008	38,78	0,09	78,11	0,04
2009	39,24	0,10	82,95	0,03
2010	38,77	0,10	86,28	0,02
2011	40,43	0,11	87,18	0,02
2012	40,41	0,11	88,26	0,02
2013	39,66	0,11	88,44	0,02
2014	39,10	0,10	89,71	0,02
2015	39,21	0,10	91,26	0,01
2016	39,59	0,10	92,93	0,01

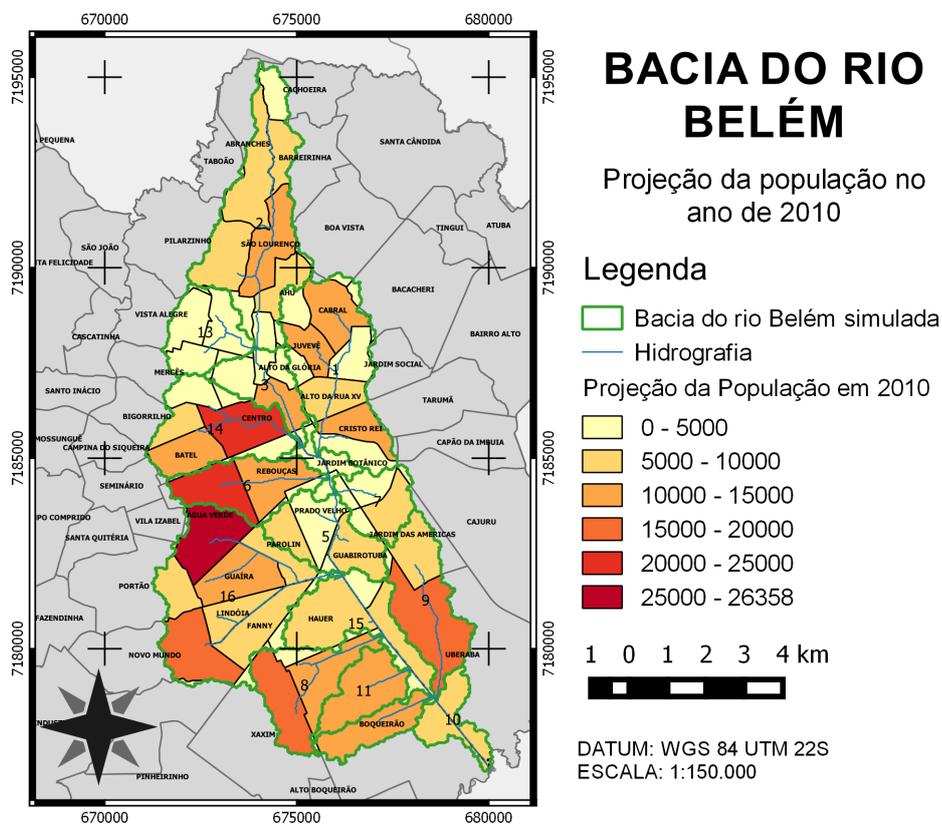


Figura 24 – Projeção da população em cada parcela de bairro pertencente as sub-bacias do rio Belém.

Baseados nos dados de densidade demográfica de cada bairro estimados pelo

IBGE e pelo IPPUC para os anos de 2000, 2010 e 2016 calculou-se a projeção da população entre 2000 e 2016 para cada parcela de bairro pertencente a cada sub-bacia. A bacia do rio Belém simulada pelo modelo possui uma área de 84,62 km² e a população estimada para o ano de 2010 em cada parcela de bairro é apresentada na Figura 24.

O volume estimado de esgoto não coletado e não tratado e o volume estimado de água perdida por sub-bacia simulada da bacia do rio Belém são apresentados nos gráficos das Figuras 25 e 26, respectivamente.

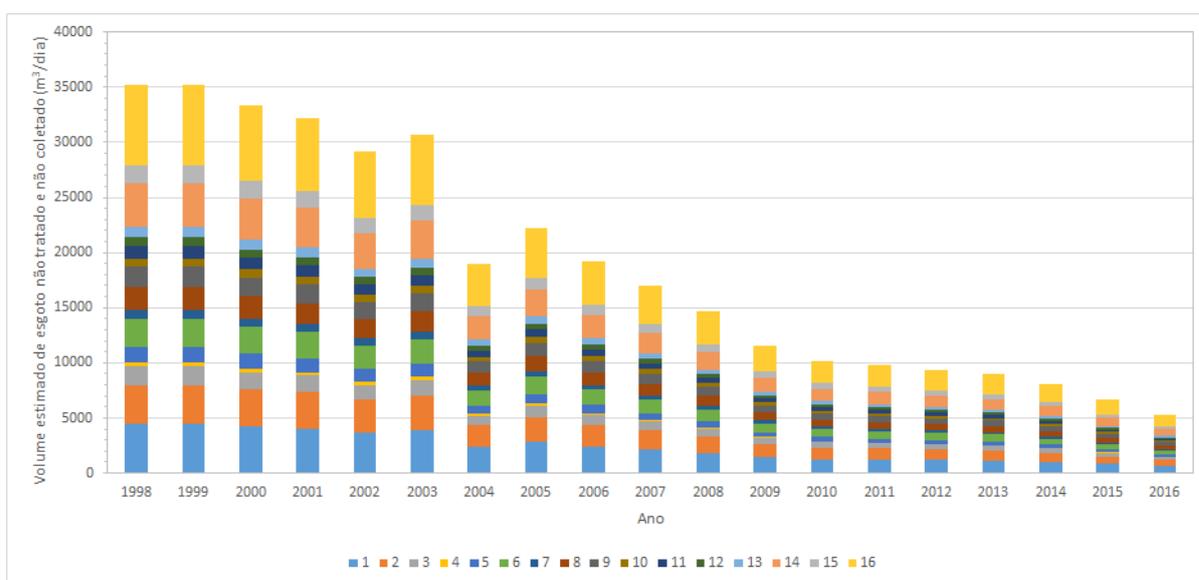


Figura 25 – Volume estimado de esgoto não coletado e não tratado para as sub-bacias do rio Belém.

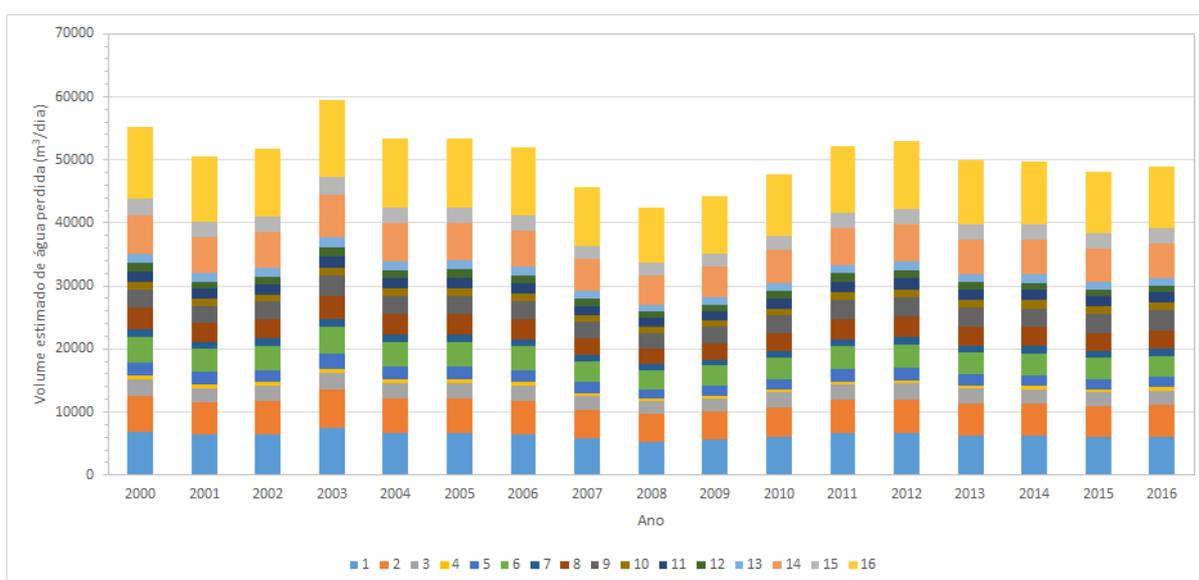


Figura 26 – Volume estimado de água perdida para as sub-bacias do rio Belém.

Na Figura 25 observa-se que a sub-bacia 10 teve uma maior contribuição para o volume de esgoto não coletado e não tratado. Contudo, esse volume diminui ao longo dos últimos anos. Na Figura 26 o volume de água perdida oscilou durante os anos e não é possível identificar nenhuma tendência. Ao comparar as Figuras 25 e 26 nota-se que o volume de água perdida é superior ao volume de esgoto não coletado e não tratado.

O modelo simulou a vazão para o período de 1998 a 2013. Para o aquecimento do modelo foram utilizados os dois primeiros anos, começando em 1998 e finalizando em 1999. Inicialmente fez-se uma comparação da vazão simulada em escala diária para os diferentes cenários: no primeiro cenário foram implementados apenas os dois reservatórios, no segundo foi adicionada a água importada proveniente de águas residuais e o último houve a adição da água importada originada das perdas da rede de distribuição de água.

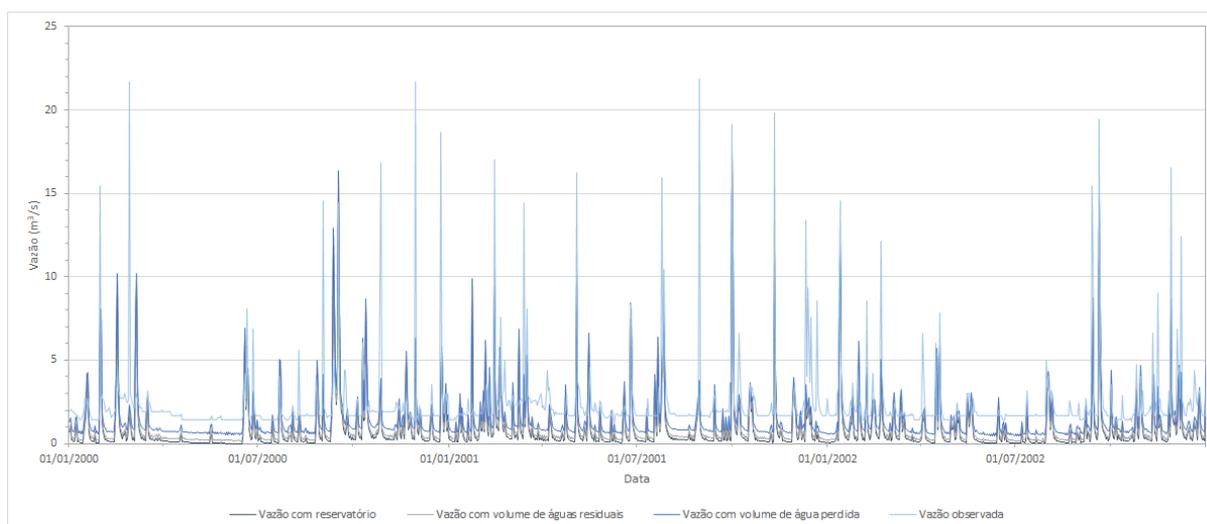


Figura 27 – Comparação da vazão simulada em escala diária para os diferentes cenários e a vazão observada para o período de 2000 a 2002.

A Figura 27 ilustra a diferença da vazão simulada em escala diária para os diferentes cenários e a vazão observada para o período de 2000 a 2002. Como mostrado na Figura 27 as vazões simuladas em todos os cenários apresentam picos que também são observados na vazão medida, contudo a vazão de base em todos os cenários fica abaixo da medida. A vazão de base cresce com o aumento da adição da água importada: dessa forma o terceiro cenário apresenta a maior vazão de base. Neste cenário também é possível observar picos menores e mais frequentes que correspondem aos efeitos de amortecimentos dos reservatórios. Devido ao terceiro cenário integrar os reservatórios e a água importada proveniente das águas residuais e da água perdida pela rede distribuidora de água este foi o escolhido para dar continuidade aos seguintes

estudos.

A avaliação do desempenho do modelo iniciou-se com o estudo do balanço hídrico. Primeiro verificou-se o balanço de água do SWAT calculado pela equação (3.2). O gráfico ilustrado na Figura 28 demonstra que o balanço hídrico realizado pelo SWAT apresenta um pequeno desvio com relação a reta 1:1. Isso se deve à algumas simplificações e limitações do SWAT.

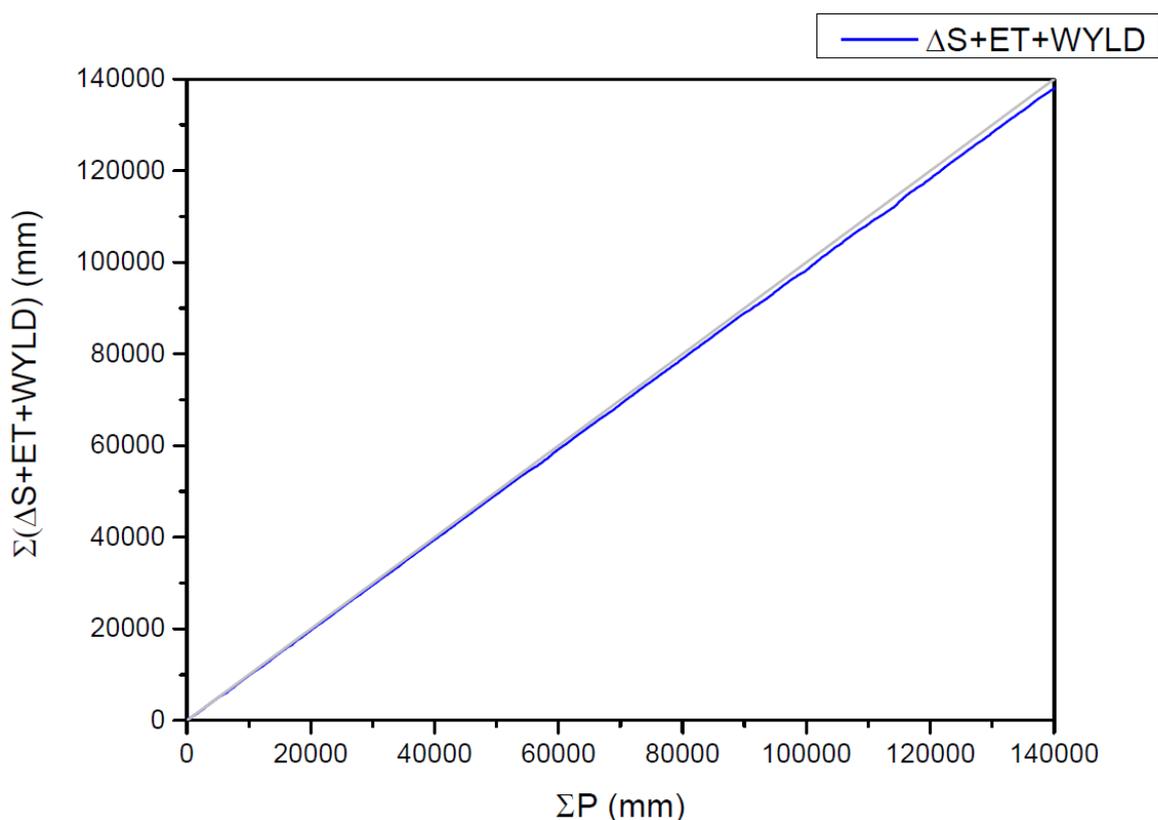


Figura 28 – Balanço hídrico simulado pelo modelo SWAT para o período de 2000 a 2013.

O balanço hidrológico pode ser observada de forma mais detalhada pela Figura 29. Nela estão apresentados valores médios anuais dos anos de 2000 a 2013 resultante do modelo sem calibração. Nesta Figura é mostrado que o valor do Número de Curva médio corresponde a 72,19, indicando um escoamento de superfície maior que o escoamento lateral e o escoamento que retorna ao canal principal pelo aquífero raso.

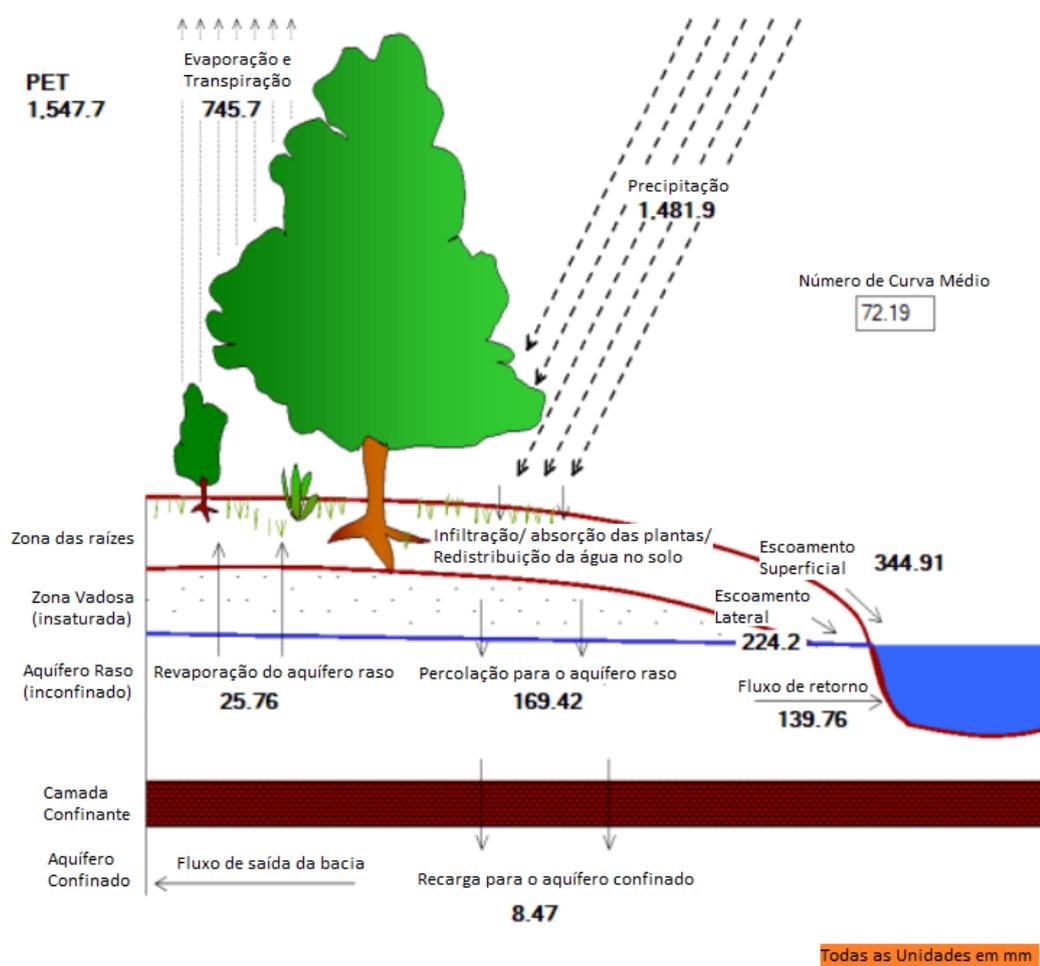


Figura 29 – Balanço hídrico médio anual do modelo simulado de 2000 a 2013.

Através dos dados estimados pelo GRACE e a altura do nível da água do lençol freático simulado (ΔSW_{mm}) fez-se a comparação visual por meio de gráficos, como mostrado pela Figura 30. A altura do nível da água do lençol freático simulado aparenta estar adiantado em alguns meses em comparação com o estimado, em outros períodos os valores simulados e estimados estão mais afastados não havendo semelhança entre ambos os dados. A principal diferença é que os dados do GRACE sugerem que a água armazenada no solo não varia tanto, ou seja, o solo é capaz de reter mais água diferente do mostrado pela simulação.

A evapotranspiração mensal foi estimada a partir dos dados do GRACE e da equação (5.8) do balanço hídrico e novamente fez-se a comparação visual do gráfico entre a evapotranspiração simulada e a estimada ilustrado na Figura 31. Foi observado pelo gráfico da Figura 31 que o modelo não calibrado é capaz de captar alguns picos e pontos de declínio dentro da mesma ordem de grandeza da evapotranspiração estimada, contudo o modelo pode estar subestimando a evapotranspiração na região de estudo.

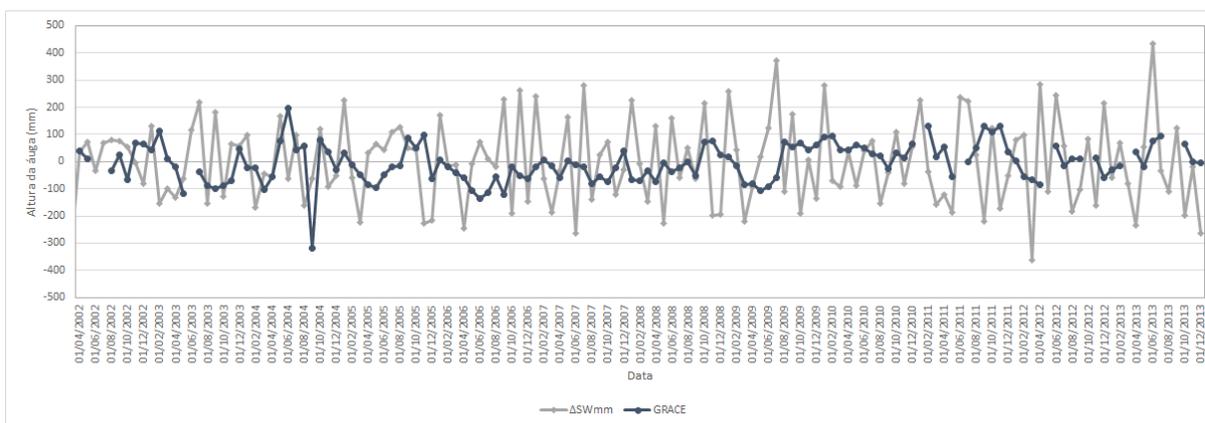


Figura 30 – Comparação da altura do nível da água do lençol freático simulado com a estimada.

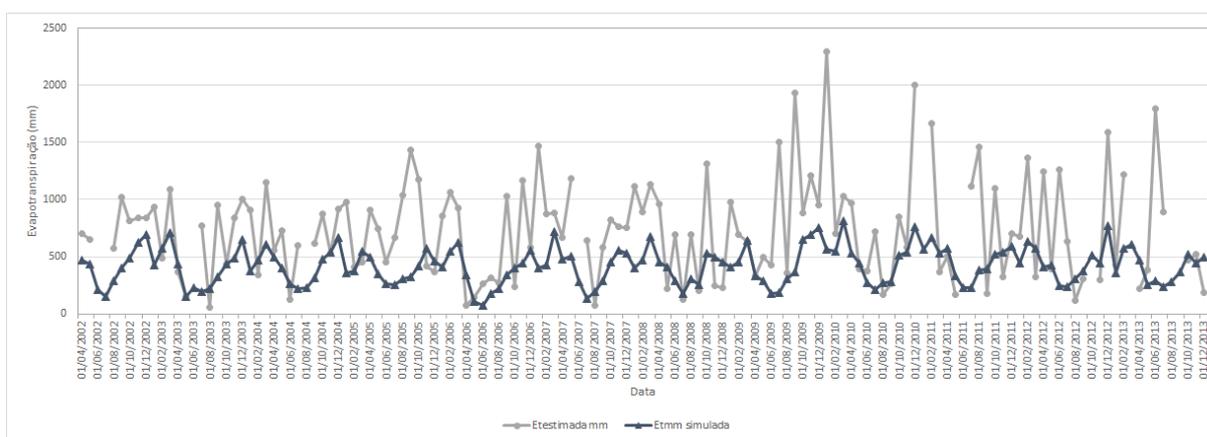


Figura 31 – Comparação da evapotranspiração simulada com a estimada.

O modelo diário sem calibração para os anos de 2000 a 2004 obteve um Nash-Sutcliffe de 0,24, indicando uma representação insatisfatória. Dessa maneira faz-se necessário a realização da calibração. Em virtude da estação fluviométrica estar localizada no meio da bacia do rio Belém, como mostrado na Figura 32, só foi possível calibrar o modelo para a região norte da bacia. A vazão simulada foi obtida na saída da sub-bacia 4, onde está localizada a estação do Prado Velho - UCP.

Calibrar o modelo com um número grande de parâmetros torna a tarefa mais difícil e exige maior processamento computacional. Dessa maneira foi realizada a análise de sensibilidade para incluir na calibração um conjunto de parâmetros menor e que possuísse maior sensibilidade. A comparação dos resultados da análise de sensibilidade local e global são apresentados na Tabela 20 e na Figura 33. A análise de sensibilidade local analisa a variação de um parâmetro enquanto os outros permanecem inalterados. O parâmetro mais sensível da análise local foi o GW_REVAP.gw, outros parâmetros

como SOL_K.sol, CH_N2.rte e GWQMN.gw também mostraram ser sensíveis nessa análise.

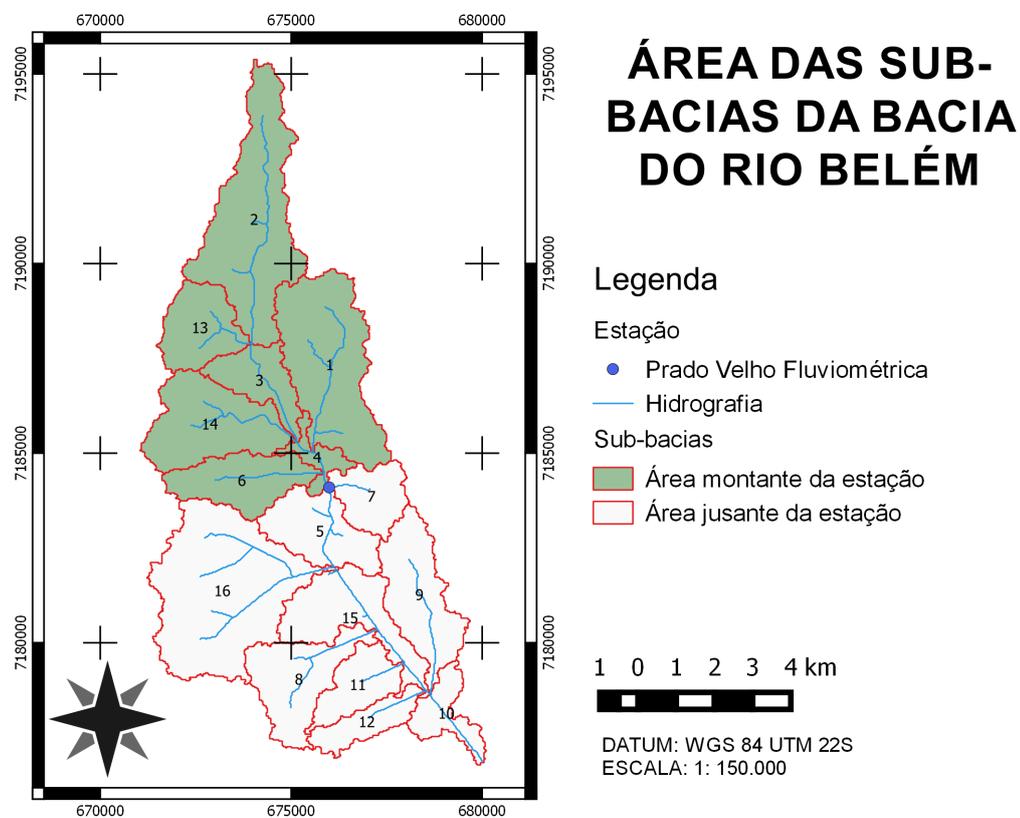


Figura 32 – Indicação da área da bacia em que foi realizada a calibração.

Tabela 20 – Comparação da sensibilidade local com a global.

Parâmetros	Análise Local de Sensibilidade			Análise Global de Sensibilidade		
	Teste-t	Valor-P	Ranking	Teste-t	Valor-P	Ranking
GW_REVAP.gw	27,089952	0,000000	1	1,155279	0,248258	13
GW_DELAY.gw	2,365685	0,029423	19	2,432991	0,015153	10
ALPHA_BF.gw	-7,347480	0,000001	11	-1,117875	0,263895	14
GWQMN.gw	-18,140853	0,000000	4	-0,023219	0,981480	20
REVAPMN.gw	3,239907	0,004545	15	-0,609011	0,542658	17
RCHRG_DP.gw	3,367157	0,003432	14	1,856847	0,063633	12
SOL_ALB.sol	11,822644	0,000000	7	-0,099511	0,920753	19
SOL_K.sol	-20,713964	0,000000	2	5,776796	0,000000	7
SOL_AWC.sol	-4,071850	0,000716	13	-2,386088	0,017218	11
ESCO.bsn	-2,569852	0,019282	16	0,912560	0,361699	16
EPCO.bsn	-2,569852	0,019282	17	1,083811	0,278716	15
SURLAG.bsn	1,376745	0,185475	20	-0,378927	0,704825	18
LAT_TTIME.hru	-8,372346	0,000000	9	3,305034	0,000984	8
OV_N.hru	-13,200992	0,000000	6	-8,019841	0,000000	5
SLSOIL.hru	-8,439565	0,000000	8	-2,724232	0,006560	9

Parâmetros	Análise Local de Sensibilidade			Análise Global de Sensibilidade		
	Teste-t	Valor-P	Ranking	Teste-t	Valor-P	Ranking
HRU_SLP.hru	8,328978	0,000000	10	8,559917	0,000000	3
CH_K2.rte	-13,409304	0,000000	5	-18,756023	0,000000	2
CH_N2.rte	-19,784844	0,000000	3	-8,304912	0,000000	4
ALPHA_BNK.rte	-2,569852	0,019282	18	20,753778	0,000000	1
CN2.mgt	-4,375336	0,000365	12	7,283831	0,000000	6

Uma representação gráfica do teste-t da análise local é apresentado na Figura 33. Os parâmetros relacionados com a água subterrânea (.gw), características físicas do solo (.sol), movimento da água e sedimentos no canal principal (.rte) e as HRUs (.hru) tiveram maior sensibilidade. A análise de sensibilidade global mostra que há 7 parâmetros mais sensíveis, sendo eles: ALPHA_BNK.rte, CH_K2.rte, HRU_SLP.hru, CH_K2.rte, OV_N.hru, CN2.mgt e SOL_K.sol. Nesta nova análise os parâmetros mais sensíveis estão mais uma vez associados com o movimento da água e sedimentos no canal principal (.rte), as estruturas das HRUs e a condutividade hidráulica (SOL_K.sol). Diferente da primeira análise de sensibilidade o CN2.mgt se destacou como um parâmetro sensível na análise global. Este parâmetro está relacionado com o valor da Curva Número.

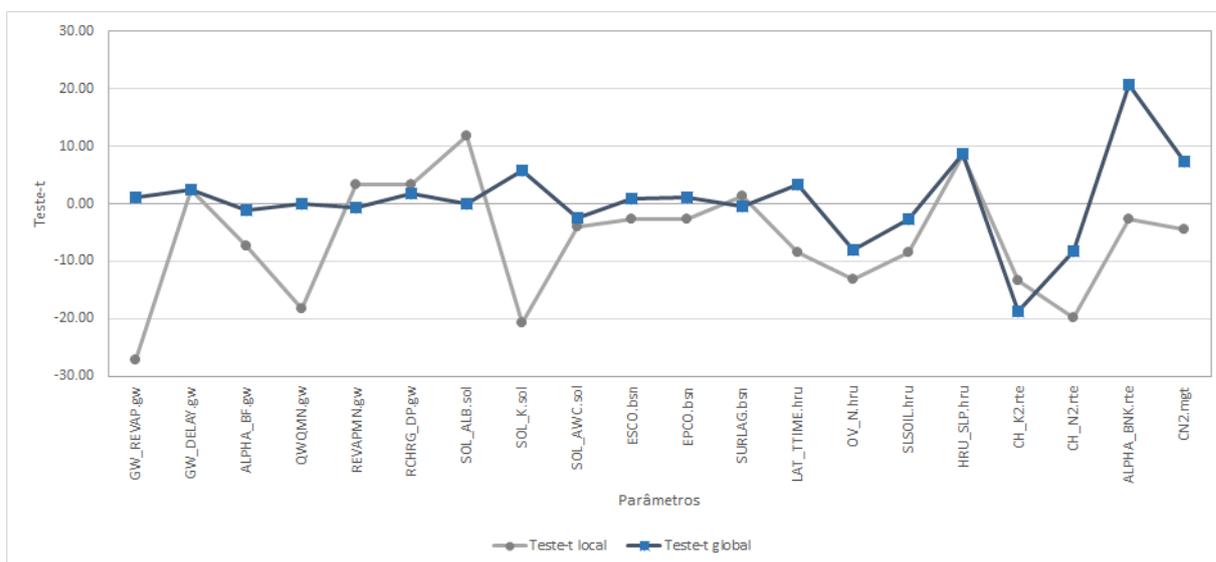


Figura 33 – Comparação da sensibilidade local com a global.

Ao todo dentre os 20 parâmetros foram selecionados 12 que apresentaram ser mais estáveis em ambas as análises de sensibilidade. Estes podem ser observados na Tabela 21. Nenhum dos parâmetros mais sensíveis entre as duas análises foram selecionados, apesar do GW_REVAP.gw ser um parâmetro local sensível ele não tem a mesma resposta na análise global de maneira inversa ocorre com o ALPHA_BNK.rte, entretanto

outros parâmetros que são sensíveis em ambas as análises foram selecionados, como o SOL_K.sol, CH_K2.rte, CH_N2.rte, OV_N.hru, SLSOIL.hru e LAT_TTIME.hru. Os parâmetros que obtiveram uma sensibilidade muito alta em apenas uma das análises, como por exemplo: GWQMN.gw e SOL_ALB.sol, não foram selecionados por apresentarem uma sensibilidade pobre na outra análise. ESCO.bsn, EPCO.bsn, SURLAG.bsn e REVAPMN.gw apresentaram uma sensibilidade muito baixa em ambas as análises e dessa maneira não foram selecionados como parâmetros sensíveis para a calibração.

Tabela 21 – Sensibilidade dos parâmetros selecionados para a calibração e o intervalo utilizado para a calibração.

Parâmetros	Análise Global		Ranking	Mínimo	Melhor simulação	Máximo
	de Sensibilidade					
	Teste-t	Valor-P				
GW_DELAY.gw	-2,084027	0,037414	8	152,738678	190,956024	229,097015
ALPHA_BF.gw	-3,668553	0,000257	6	0,040977	0,053147	0,122933
RCHRG_DP.gw	-0,466697	0,640820	12	0,558318	0,623543	0,752730
SOL_K.sol	0,802424	0,422501	10	1511,846069	1622,083862	1684,768188
SOL_AWC.sol	-7,972814	0,000000	2	0,000000	0,003039	0,063982
LAT_TTIME.hru	-0,637045	0,524243	11	61,440678	70,924545	72,248505
OV_N.hru	-5,527529	0,000000	4	14,981106	17,205090	19,831669
SLSOIL.hru	-1,496451	0,134856	9	25,510143	30,541279	41,978672
HRU_SLP.hru	2,890330	0,003933	7	0,626291	0,669166	0,721253
CH_K2.rte	-11,390694	0,000000	1	0,010000	15,335453	26,243984
CH_N2.rte	6,171466	0,000000	3	0,106838	0,153831	0,163016
CN2.mgt	5,309672	0,000000	5	95,530533	97,793800	98,000000

Para encontrar os melhores intervalos de confiança de cada parâmetro, mostrados na Tabela 21, foram realizadas ao todo 6 iterações cada uma com 1.000 simulações. Em cada iteração diminuiu-se a espessura do 95PPU e, infelizmente, o fator-P também diminuiu. A Tabela 21 também mostra os valores que geraram a melhor simulação para a calibração e a sensibilidade global dos parâmetros da última iteração.

Por meio da análise de sensibilidade local foi possível observar os efeitos das alterações de cada parâmetro na vazão simulada. O aumento do valor do parâmetro CN2.mgt indica a diminuição da infiltração da água no solo, sendo uma característica das áreas urbanizadas onde há a diminuição da permeabilidade dos terrenos devido à construção das estruturas urbanas, dessa maneira aumentou-se o escoamento superficial.

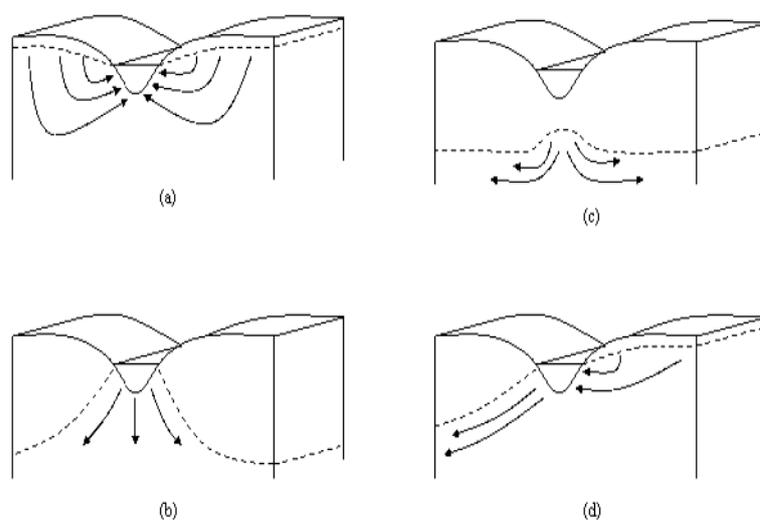


Figura 34 – Representação esquemática da recarga e descarga dos aquíferos: (A) canal principal sendo recarregado pelo aquífero; (B) canal recarregando o aquífero; (C) perda de fluxo para o aquífero alto; (D) sistema de fluxo contínuo através do canal. Fonte: (ARNOLD et al.,).

Os parâmetros CH_N2.rte e CH_K2.rte fornecem as características físicas do canal principal que afetam o escoamento de água. O parâmetro CH_K2.rte informa a rugosidade do canal, o coeficiente utilizado é o "n" de Manning que pode variar entre 0,01 e 0,3, no caso da calibração os intervalos ficaram entre 0,107 e 0,163. O parâmetro CH_K2.rte é referente a condutividade hidráulica efetiva do canal principal, este parâmetro dita o relacionamento do canal principal com o sistema subterrâneo. O canal principal pode estar sendo recarregado pelo aquífero ou descarregado, como é observado na Figura 34. Valores menores que 25 mm/hr indicam que a taxa de perda para o aquífero é menor devido à consolidação do material do canal, com alta concentração de silte e argila, entretanto vários trechos do rio Belém se encontram canalizados seja a céu aberto ou de forma subterrânea, em vista disso a canalização pode estar influenciando a relação entre o aquífero e o canal principal.

Os parâmetros que governam os movimentos de entrada e saída de água do sistema subterrâneo são o GW_DELAY.gw, ALPHA_BF.gw e o RCHRG_DP.gw. O parâmetro GW_DELAY.gw determina o tempo de atraso em que a água sai do perfil do solo e entra no aquífero raso. O aumento do valor do GW_DELAY.gw indica uma resposta mais lenta, e ocasiona um leve aumento da vazão de base. O parâmetro ALPHA_BF.gw é o período de tempo em que o escoamento superficial contribui para a vazão, apesar de ser um parâmetro sensível não teve seu valor significativamente alterado, pois o modelo já foi capaz de ter uma boa resposta aos dados de precipitação. Dentre os parâmetros da calibração o menos sensível foi o RCHRG_DP.gw, o qual corresponde a fração de água que é perdida por meio da percolação para a recarga

do aquífero. O aumento desse parâmetro na análise local não demonstrou alterações significativas na vazão simulada.

Os parâmetros SOL_AWC.sol e SOL_K.sol estão relacionados com as propriedades do solo, sendo a capacidade de água disponível no solo e a condutividade hidráulica saturada, respectivamente. A diminuição do valor do parâmetro SOL_AWC.sol aumentou os picos e a vazão de base, e o aumento do SOL_K.sol apesar de aumentar os picos diminuiu a vazão de base.

As informações das HRUs podem ser agrupadas em diferentes categorias utilizou-se parâmetros de categorias variadas para a realização da calibração. Os parâmetros SLSOIL.hru e HRU_SLP.hru estão dentro da categoria das características topográficas das HRUs, que se referem ao comprimento do declive para o fluxo lateral subsuperficial e inclinação média do declive. Ao aumentar o valor desses parâmetros aumentou-se os picos e a vazão após o início do período da recessão. O parâmetro LAT_TTIME.hru está dentro da categoria do ciclo da água, sendo o tempo de deslocamento do escoamento lateral influenciando diretamente na vazão de base. O parâmetro OV_N.hru retrata o valor "n" de Manning para o escoamento superficial o aumento desse valor ocasiona a diminuição dos picos de vazão.

A calibração do modelo diário para o período de 2000 a 2004 utilizou os 12 parâmetros selecionados pela análise de sensibilidade. O resultado da calibração da vazão é mostrado na Figura 35, onde obteve-se um fator-P igual a 0,71, fator-R igual a 0,47 e um Nash-Sutcliffe de 0,33. O primeiro indicador de eficiência da calibração, fator-P, mostra estar dentro do sugerido por Abbaspour (2015), contudo o fator-R ainda está muito próximo do 0,50, o que indica uma espessura do 95PPU muito grande. A calibração mostrou uma pequena melhora no desempenho do modelo, o qual é indicado pelo coeficiente de Nash-Sutcliffe. Antes o modelo sem calibração resultava em um Nash-Sutcliffe de 0,24 e após a calibração 0,33, dessa maneira o modelo ainda é considerado insatisfatório.

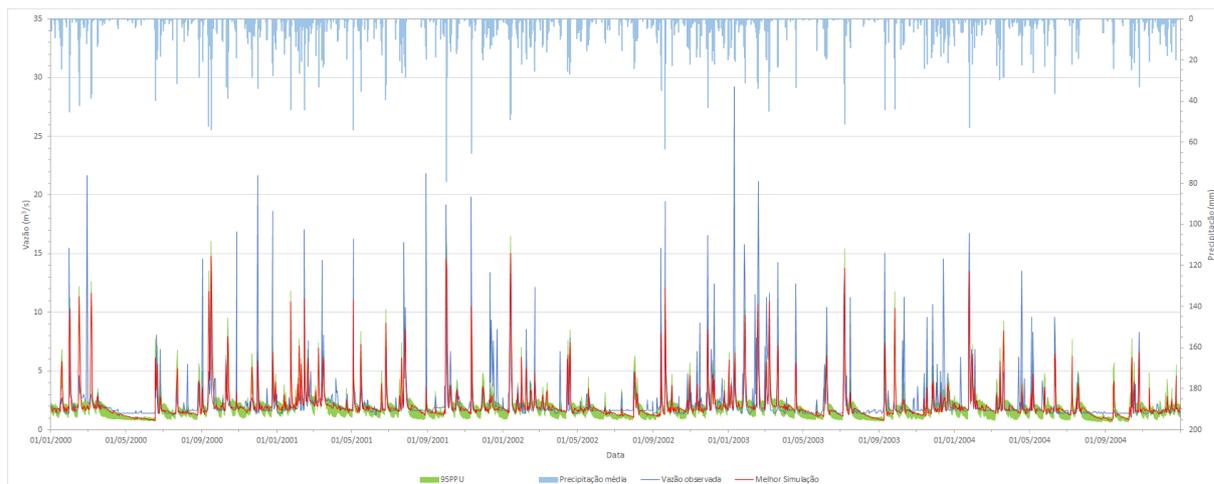


Figura 35 – Calibração da vazão simulada para o ano de 2000 a 2004.

Visivelmente o modelo foi capaz de reproduzir uma vazão de base próxima à observada, outra característica que pode ser notada na vazão de base são os períodos de recessão, o modelo simula uma vazão que decresce com o tempo enquanto os dados medidos mostram uma vazão muito constante podendo indicar erros de medição ou medidas não muito acuradas. O modelo também conseguiu captar os picos de vazões, contudo não foi capaz de alcançar valores tão altos quanto os medidos nos eventos extremos, uma das explicações se deve às limitações e as simplificações do modelo de não estar capacitado para integrar as estruturas urbanas como o sistema de drenagem pluvial, o qual pode estar associado com a captação de um volume grande de água em um período curto tempo que em seguida é descarregado no rio.

O modelo foi validado para dois períodos diferentes: a primeira validação foi para o ano de 2009 e a segunda para os anos de 2012 a 2013, como mostrados nas Figuras 36 e 37. A primeira validação mostrou uma melhora no desempenho do modelo, elevando o Nash-Sutcliffe do modelo sem calibração de 0,13 para 0,22. O fator-P e o fator-R resultaram em 0,62 e 0,54, respectivamente. A segunda validação também apresentou uma melhora no desempenho do modelo, antes da calibração o Nash-Sutcliffe resultava em 0,12 e após aumentou para 0,19. O fator-P resultou em 0,72 e o fator-R resultou em 0,47.

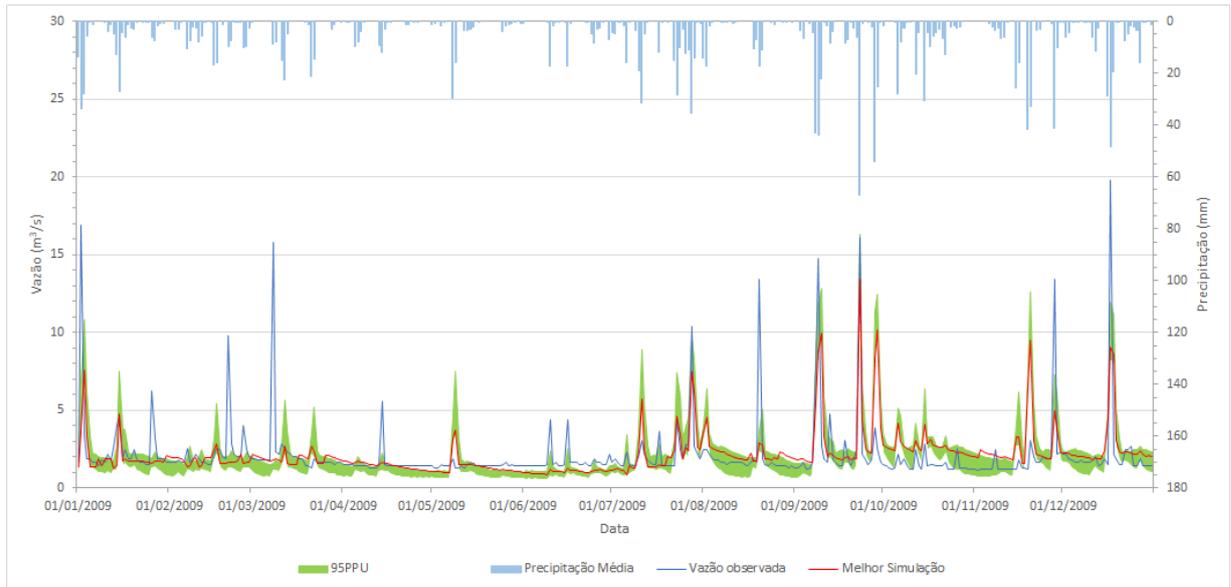


Figura 36 – Validação da vazão simulada para o ano de 2009.

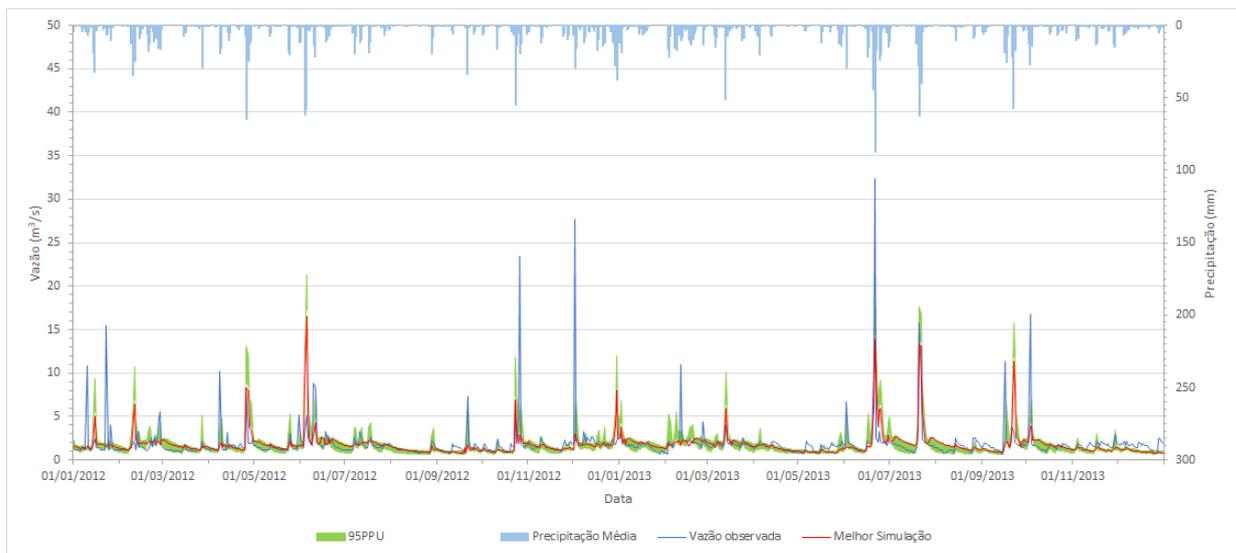


Figura 37 – Validação da vazão simulada para o ano de 2012 e 2013.

7 CONCLUSÃO

Conforme já exposto no trabalho o modelo hidrológico SWAT foi aplicado na bacia do rio Belém para simular as componentes do balanço hidrológico com o intuito de compreender melhor as condições atuais dos recursos hídricos e os processos do ciclo hidrológico na região.

Por se tratar de uma área intensamente urbanizada o presente estudo realizou um levantamento das possíveis ações antropogênicas que podem estar alterando o ciclo hidrológico do local. Em virtude das limitações do modelo e da impossibilidade de mensuração nem todas as atividades antropogênicas listadas da análise puderam ser implementadas no SWAT. Dessa maneira, o modelo considerou as alterações realizadas nos cursos d'água, no uso e ocupação do solo, as construções dos reservatórios artificiais e a água importada.

A metodologia empregada para a realização da análise de sensibilidade, calibração e validação para a escala diária do modelo utilizou o procedimento do SUFI2 do SWAT-CUP 2019. A análise de sensibilidade dispôs de ambas as análises: local e global, e selecionou um conjunto de 12 parâmetros considerados os mais estáveis entre ambas as análises. A calibração e a validação do modelo fez uso dos dados observados de vazão de uma única estação fluviométrica. Ao final o desempenho do modelo ainda deixa a desejar, já que o Nash-Sutcliffe alcançado é considerado insatisfatório.

A disponibilidade e a qualidade dos dados de entrada e da série de vazão utilizada para a realização da calibração são aspectos fundamentais para a operação, desempenho e calibração do modelo. A inexistência de mapas detalhados sobre os tipos de solos e das informações das suas propriedades forçaram o uso de dados encontrados nas bacias próximas à do Belém. As estimativas do GRACE e a análise do balanço hidrológico demonstraram que o modelo tem dificuldades em simular a água presente no solo, desse modo recomenda-se para trabalhos futuros a correção e a medição desses dados, uma vez que as propriedades do solo ditam o movimento da água em uma bacia. A limitação da disponibilidade de dados de vazão foi outro aspecto determinante para o desempenho e calibração do modelo, posto que não foram encontradas outras estações próximas com dados suficientes para dar o aporte necessário para o mesmo período de tempo.

O modelo também revelou que a água importada é um fator muito dominante em escala local e que se sobressai sobre os processos de precipitação, condensação, transporte, e evapotranspiração, que estão presentes no ciclo hidrológico em escala

global de forma natural. Outro agente que apresenta ser determinante nos eventos extremos de precipitação, mas que não foi considerado no modelo devido às suas limitações, é o sistema de drenagem pluvial podendo ser o principal motivador das enchentes na região.

A bacia do rio Belém é uma área de grande importância econômica, social e ambiental, o que incentiva e encoraja novos estudos a serem desenvolvidos na área de engenharia ambiental, como por exemplo: estudos de monitoramento da qualidade da água e saneamento para a revitalização das águas do rio Belém, pesquisas de identificação das áreas vulneráveis às enchentes e alagamentos, e assim, propor novos cenários de alteração do uso do solo, análise dos possíveis impactos que as mudanças climáticas podem ocasionar na região, etc.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C. *SWAT-CUP: Calibration Uncertainty Program*. [S.l.], 2015. Citado 5 vezes nas páginas 11, 12, 41, 43 e 56.

ABBASPOUR, K. C. et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 12 e 13.

ARNOLD, D. N. M. J. G. SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION. *Transactions of the ASABE*, v. 55, n. 4, 2012. Citado na página 40.

ARNOLD, J. G. et al. *Soil and Water Assessment Tool: Input/Output Documentation - Version 2012*. [S.l.]. Citado 2 vezes nas páginas 55.

ARNOLD, J. G. et al. SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, v. 55, n. 4, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 42.

ARNOLD, J. G. et al. *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. [S.l.], 2011. Citado 4 vezes nas páginas 5, 7, 8 e 9.

ASCE. CRITERIA FOR EVALUATION OF WATERSHED MODELS. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 119, n. 3, p. 4386, maio 1993. Citado na página 40.

ASSAD, L. Cidades nascem abraçadas a seus rios, mas lhes viram as costas no crescimento. *Notícias do Brasil*, 2013. Citado na página 1.

BACHMANN, J. *Analyse de la sensibilité du modèle SWAT à la précision des données pédologiques sur deux bassins de Bourgogne (France) : modélisation à partir de la base Donesol*. Tese (mathesis) — Université de Bourgogne, out. 2015. Citado na página 10.

BALDISSERA, G. Aplicabilidade do modelo de simulação hidrológica swat (soiland water assessment tool), para a bacia hidrográfica do rio cuiabá/mt. *Universidade Federal do Mato Grosso*, 2005. Citado na página 29.

BEVEN, K.; BINLEY, A. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, Wiley, v. 6, n. 3, p. 279–298, jul 1992. Citado na página 11.

BINO, J. *Aplicação do Modelo SWAT no Estudo da Produção de Sedimentos na Bacia do Rio Nhundiaquara*. 2009. Brasil, Curitiba, Universidade Federal do Paraná. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 26.

BOLLMANN, H. A.; EDWIGES, T. Avaliação da qualidade das águas do Rio Belém, Curitiba-PR, com o emprego de indicadores quantitativos e perceptivos. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, FapUNIFESP (SciELO), v. 13, n. 4, p. 443–452, dec 2008. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

- BRAUD, I.; FLETCHER, T. D.; ANDRIEU, H. Hydrology of peri-urban catchments: processes and modelling. *Journal of Hydrology*, v. 485, p. 1–4, 2013. Citado na página 4.
- COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Plano Diretor SAIC: Sistema de Abastecimento Integrado de Curitiba e Região Metropolitana. *Sanepar*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas e 20.
- CUNHA, C. et al. resreport. *Eutrofização em reservatórios: gestão preventiva - Estudo interdisciplinar na Bacia do Rio Verde, PR*. [S.l.]: UFPR, 2011. v. 1. Citado 3 vezes nas páginas , 28 e 30.
- DEVIA, G. K.; GANASRI, B.; DWARAKISH, G. A review on hydrological models. *Aquatic Procedia*, Elsevier, v. 4, p. 1001–1007, 2015. Citado na página 4.
- DILE, R. S. e. C. G. Yihun. *QGIS Interface for SWAT (QSWAT)*. 2018. Citado 2 vezes nas páginas e 6.
- DILE, Y. T. et al. Assessing the implications of water harvesting intensification on upstream–downstream ecosystem services: A case study in the Lake Tana basin. *Science of the Total Environment*, v. 542, 2016. Citado na página 40.
- EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER. *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled*. [S.l.]: U.S. Geological Survey, 2017. Citado na página 24.
- ESSENFELDER, A. H. *SWAT Weather Database*. [S.l.]: Unpublished, 2016. Citado na página 34.
- FILHO, E. F. d. R.; HINDI, E. C.; LUCENA, L. R. F. de. OS AQUÍFEROS QUE CONTRIBUEM NO ABASTECIMENTODA CIDADE DE CURITIBA-PARANÁ. *Revista Águas Subterrâneas*, n. 16, maio 2002. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 22.
- GALLARZA, G. et al. *Retratos do Belém: A trajetória de um rio urbano*. 2011. 2018. Disponível em: <<http://retratosdobelem.blogspot.com/2012/10/contexto-natural-e-urbano.html>>. Citado 3 vezes nas páginas , 17 e 18.
- GASSMAN, P. W. et al. The Soil and Water Assessment Tool: historical development, application, and future research diretions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007. Citado na página 5.
- GASSMAN, P. W. et al. THE SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL: HISTORICAL DEVELOPMENT, APPLICATIONS, AND FUTURE RESEARCH DIRECTIONS. *SWAT*, 2007. Citado na página 1.
- GORNITZ C. ROSENZWEIG, D. H. V. Effects of anthropogenic intervention in the land hydrologic cycle on global sea level rise. *GLOBAL AND PLANETARY CHANGE*, 1997. Citado na página 1.
- GOUVEIA, I. C. M.-C. *A cidade de São Paulo e seus rios: uma história repleta de paradoxos*. 2016. Revista Franco-Brasileira de Geografia. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/confins/10884?lang=pt>>. Citado na página 1.

IAP. Monitoramento da qualidade das águas dos rios da bacia do alto iguaçu, na região metropolitana de Curitiba, no período de 2005 a 2009. *Instituto Ambiental do Paraná*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 22.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ. *Mapeamentos de abrangência da bacia do Alto Iguaçu*. 2002. Disponível em: <<http://www.aguasparana.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=79>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 27 e 28.

INSTITUTO DAS ÁGUAS DO PARANÁ et al. MAPA HIDROGEOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ. *Instituto das Águas do Paraná*, 2015. Citado na página 2.

INSTITUTO TRATA BRASIL. *Curitiba*. 2013. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/curitiba-e-melhor-capital-do-pais-em-saneamento-basico>>. Citado na página 39.

IPPUC; COHAB-CURITIBA. Plano Municipal de Regularização Fundiária em Áreas de Preservação Permanente. *Prefeitura Municipal de Curitiba*, 2010. Citado na página 18.

KALCIC, M. M.; CHAUBEY, I.; FRANKENBERGER, J. Defining Soil and Water Assessment Tool (SWAT) hydrologic response units (HRUs) by field boundaries. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2015. Citado na página 5.

KARTERAKIS, B. K. S.; SINGH, B.; GUERGACHI, A. The hydrologic cycle: a complex history with continuing pedagogical implications. *Water Science and Technology: Water Supply*, IWA Publishing, v. 7, n. 1, p. 23–31, mar 2007. Citado na página 1.

KHALID, K. et al. Sensitivity Analysis in Watershed Model Using SUFI-2 Algorithm. *Procedia Engineering*, Elsevier BV, v. 162, p. 441–447, 2016. Citado na página 42.

KHALID, K. et al. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. *International Conference on Efficient & Sustainable Water Systems Management toward Worth Living Development, 2nd EWaS 2016*, 2016. Citado na página 43.

KOLBJORN, E.; XU, C.-Y.; GOTTSCHALK, L. Assessing uncertainties in a conceptual water balance model using Bayesian methodology. *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques*, n. 50, fev. 2005. Citado na página 4.

KUWAJIMA, J. I. *Análise do modelo SWAT como ferramenta de prevenção e de estimativa de assoreamento no reservatório do Lobo*. Tese (mathesis) — Universidade de São Paulo, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

LEE, T. R. Urban water management for better urban life in Latin America. *Urban Water*, 2000. Citado na página 4.

LOHMANN, M. Regressão Logística e Redes Neurais Aplicadas à Previsão Probabilística de Alagamentos no Município de Curitiba, PR. 2013. Citado na página 2.

MACHADO, R. E. Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. *Escola superior de Agricultura Luiz de Queiroz Univerisdade de São Paulo*, 2002. Citado na página 5.

- MARSALEK, J. et al. Urban water cycle processes and interactions. *International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*, n. 78, 2006. Citado na página 19.
- MCGRANE, S. J. Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal*, Informa UK Limited, v. 61, n. 13, p. 2295–2311, jul 2016. Citado na página 4.
- MOREIRA, I. A. Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros. *Universidade Federal do Paraná*, 2005. Citado na página 4.
- NASA. *Groundwater: Tracking groundwater changes around the world*. 2014. Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: <<https://grace.jpl.nasa.gov/applications/groundwater/>>. Citado na página 41.
- NASA. *JPL, CSR or GFZ - which solution should I use?* 2015. Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: <<https://grace.jpl.nasa.gov/data/choosing-a-solution/>>. Citado na página 41.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flowforecasting through conceptualmodels: part 1 — a discussion of principles. *Hydrol*, v. 10, 1970. Citado na página 40.
- NEITSCH, S. L. et al. *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation*. [S.l.]: Texas Water Resources Institute, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 7.
- ONO, M. M. *Rio Belém*. 2018. Disponível em: <<http://www.cuidadosrios.eco.br/rio-belem/>>. Citado na página 2.
- PAUL, A. The Importance of Hydrological Cycle on Earth. *Bhatter College Journal of Multidisciplinary Studies*, IV, dez. 2014. Citado na página 1.
- PAULISTA, L. O. et al. ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DA CIDADE DE CURITIBA/PR: PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. *XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 2016. Citado na página 20.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. *Plano Diretor de Drenagem de Curitiba – SMOP- IPPUC*. [S.l.], 2012. Citado 2 vezes nas páginas e 16.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. *Plano municipal de saneamento de Curitiba: Infraestrutura de Esgotamento Sanitário*. [S.l.], 2013. Citado na página 22.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba - Etapa Macrodrenagem nas bacias Atuba, Belém, Barigui, Iguaçu, Padilhas e Passaúna, inseridas no município de Curitiba. *Prefeitura, de Curitiba*, v. 2, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 1, 2 e 17.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. *Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba: manual de drenagem*. Volume iv. [S.l.], 2017. Citado na página 14.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. *Plano Diretor de Drenagem Urbana de Curitiba: Políticas e Ações Não Estruturais*. Volume ii. [S.l.], 2017. Citado na página 18.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. *Plano Municipal de Saneamento Básico: Panorama do saneamento básico em Curitiba*. Volume i. [S.l.], 2017. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 18.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. *Plano Municipal de Saneamento Básico: Plano Diretor de Drenagem*. Volume v. [S.l.], 2017. Citado 6 vezes nas páginas , 1, 2, 16, 17 e 18.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. *Plano Municipal de Saneamento Básico: Plano Municipal de Abastecimento de Água*. Volume ii. [S.l.], 2017. Citado na página 19.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CURITIBA. *Perfil de Curitiba*. 2019. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/perfil-da-cidade-de-curitiba/174>>. Citado na página 14.

SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE DE CURITIBA. *Parque Municipal Nascentes do Belém*. 2019. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/parques-e-bosques-parque-municipal-nascentes-do-belem/314>>. Citado na página 18.

SECRETARIA MUNICIPAL DO MEIO AMBIENTE DE CURITIBA. *Rede Municipal das Águas*. 2019. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/rede-de-aguas-smma/310>>. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.

SERRANO, S. E. *Hydrology for Engineers, Geologists and Environmental Professionals: An Integrated Treatment of Surface, Subsurface, and Contaminant Hydrology*. [S.l.]: University of Kentucky, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 1, 7 e 8.

SHARMA, K.; SOROOSHIAN, S.; WHEATER, H. Hydrological modelling in arid and semi-arid areas. *New York, Cambridge University*, 2008. Citado na página 4.

SHAWUL, A. A.; ALAMIREW, T.; DINKA, M. O. Calibration and validation of SWAT model and estimation of water balance components of Shaya mountainous watershed, Southeastern Ethiopia. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Copernicus GmbH, v. 10, n. 11, p. 13955–13978, nov 2013. Citado na página 1.

SHIKLOMANOV, I. A. World water resources: a new appraisal and assessment for the 21st century. *UNESCO*, 1998. Citado na página 1.

SHIVHARE, N.; DIKSHIT, P. K. S.; DWIVEDI, S. B. A Comparison of SWAT Model Calibration Techniques for Hydrological Modeling in the Ganga River Watershed. *Engineering*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.

SUDERHSA. *Plano Diretor de Drenagem para a Bacia do Alto Iguaçu na Região Metropolitana de Curitiba: Estudos Hidrológicos - Metodologia e Hidrogramas Calculados*. [S.l.]: Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2002. v. 3.2. Citado na página 8.

SUDERHSA. *Plano Diretor de Drenagem para a bacia do rio Iguaçu na região metropolitana de Curitiba*. [S.l.]: Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2002. v. 4.8. Citado na página 14.

SUDERHSA; SANEPAR. *Plano das Bacias do Alto Iguaçu e Afluentes do Alto Ribeira*. 2007. Disponível em: <<http://www.recursoshidricos.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=47>>. Citado 2 vezes nas páginas e 21.

SURDERHSA; COBRAPE. *ELABORAÇÃO DO PLANO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS - DIAGNÓSTICO DAS DISPONIBILIDADES HÍDRICAS SUBTERRÂNEAS - REVISÃO FINAL*. [S.l.]: Instituto das Águas do Paraná, 2010. parte B. Citado na página 2.

TEJASWINI, V.; SATHIAN, K. K. Calibration and Validation of Swat Model for Kunthipuzha Basin Using SUFI-2 Algorithm. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, Excellent Publishers, v. 7, n. 1, p. 2162–2172, jan 2018. Citado na página 42.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *American Geographical Society*, v. 38, n. 1, 1948. Citado na página 7.

TIM, U. S. Emerging Technologies for Hydrologic and Water Quality Modeling Research. *Transactions of the ASAE*, American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), v. 39, n. 2, p. 465–476, 1996. Citado na página 5.

VALLAM, P.; QIN, X. S.; YU, J. J. Uncertainty Quantification of Hydrologic Model. *APCBEE Procedia*, Elsevier BV, v. 10, p. 219–223, 2014. Citado na página 4.

WEI, H.; WANG, Y.; WANG, M. Characteristic and pattern of urban water cycle: theory. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, Desalination Publications, v. 110, p. 349–354, 2018. Citado na página 4.

WILLIAMS, J. R. *Computer models of watershed hydrology*. [S.l.]: Water Resources Publications, 1995. 909 - 1000 p. Citado na página 9.