

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HÍDRICA



IGOR GONZAGA MARTINS SANTOS

**ANÁLISE E GARANTIA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM PEQUENAS BARRAGENS
DE ACUMULAÇÃO**

ITAJUBÁ
2022

IGOR GONZAGA MARTINS SANTOS

**ANÁLISE E GARANTIA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM PEQUENAS BARRAGENS
DE ACUMULAÇÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Hídrica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez

**ITAJUBÁ
2022**

IGOR GONZAGA MARTINS SANTOS

**ANÁLISE E GARANTIA DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA EM PEQUENAS BARRAGENS
DE ACUMULAÇÃO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Hídrica, na área de concentração de Geração Hidrelétrica.

**ITAJUBÁ
2022**

AGRADECIMENTOS

A presente dissertação de mestrado não atingiria o objetivo final sem o precioso apoio de várias pessoas.

Em primeiro lugar, não posso deixar de agradecer ao meu orientador, Professor Doutor Carlos Barreira Martinez, por toda a paciência, empenho e sentido prático com que sempre orientou. Muito obrigado por me ter corrigido quando necessário sem nunca me desmotivar.

Desejo igualmente agradecer à Tatiani Thimotti, a qual contribuiu com ensinamentos técnicos e profissionais durante toda a jornada do programa de mestrado.

Sou grato à Universidade Federal de Itajubá e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hídrica pela oportunidade de desenvolvimento que obtive.

Por último, quero agradecer à minha família pelo apoio incondicional que me deram, especialmente aos meus pais Luiz e Marise por todo apoio durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

Os reservatórios se constituem numa das principais formas de moldar o ciclo hidrológico ao armazenar água para usos futuros. Nesse contexto, pequenos reservatórios desempenham papel estratégico no abastecimento de água em comunidades no mundo todo e em especial no Brasil, já que, aumentam a disponibilidade hídrica durante o período de estiagem. Para que isso aconteça é fundamental se ter maior conhecimento dos diferentes processos que interferem na dinâmica hidráulica nessas estruturas. O presente trabalho tem como objetivo auxiliar na garantia de captação de água em pequenas barragens de acumulação através da aplicação do balanço hídrico por meio da utilização do software GoldSim. Além disso, propor um roteiro metodológico orientativo para tal finalidade. Para elucidar a proposta foi realizado um estudo de caso na Barragem Brejo Grande em Paraisópolis, Minas Gerais. Como resultado pode-se projetar o comportamento do nível de água na estrutura de acordo a variação da retirada vazão em um horizonte de planejamento estabelecido. Dessa forma, visando não atingir a restrição operacional e manter a garantia de captação de água durante os três anos de período simulado a demanda de vazão deve permanecer na faixa entre 100 m³/h e 110 m³/h.

Palavras-chave: Pequenos reservatórios, Balanço hídrico, GoldSim.

ABSTRACT

Reservoirs are one of the main ways to shape the hydrological cycle by storing water for future uses. In this context, small reservoirs play a strategic role in water supply in communities around the world and especially in Brazil, since they increase water availability during the dry season. For this to happen, it is fundamental to have a better knowledge of the different processes that interfere in the hydraulic dynamics of these structures. The present dissertation aims to use the water balance methodology together with the application of the GoldSim software to assist the planning of small storage dams with respect to water catchment guarantee. Furthermore, to propose a methodological guide for this purpose. To elucidate the proposal, a case study was conducted on the Brejo Grande Dam in Paraisópolis, Minas Gerais. As a result, it was possible to project the behavior of the water level in the structure according to the variation of the withdrawal flow in a planning horizon. Thus, in order not to reach the operational restriction and to maintain the guarantee of water withdrawal during the three years of the simulated period, the flow demand should remain in the range between 100 m³/h and 110 m³/h.

Keywords: Small reservoirs, Water balance, GoldSim.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Exemplo das realizações exibidas no Time History.	37
Figura 4.2 – Resultados em bandas percentuais.	38
Figura 4.3 – Janela de visualização do elemento Distribution Result.	39
Figura 5.1 – Roteiro metodológico proposto no estudo.	43
Figura 6.1 – Localização da Barragem Brejo Grande.	48
Figura 6.2 – Vista panorâmica da barragem Brejo Grande.	49
Figura 6.3 – Estações pluviométricas selecionadas.	51
Figura 6.4–Totais mensais de precipitação característicos na estação Bairro do Analdino.	53
Figura 6.5 – Isolinhas de precipitação total anual média sobre a área da barragem Brejo Grande.	55
Figura 6.6 – Estações fluviométricas selecionadas.	58
Figura 6.7 – Área de drenagem da Barragem Brejo Grande.	59
Figura 6.8 – Medição de descarga líquida e traçado das curvas-chaves.	60
Figura 6.9 – Isolinhas de precipitação total anual média sobre a área de drenagem da estação Analdino (61343000).	61
Figura 6.10 – Médias mensais totais de evaporação de lâmina de água para área de interesse.	63
Figura 6.11 – Localização da estação de evaporação Maria da Fé em relação à barragem Brejo Grande.	64
Figura 6.12 – Representação esquemática do balanço hídrico do reservatório da barragem Brejo Grande.	65
Figura 6.13 – Curva cota, área e volume do reservatório da barragem Brejo Grande. ...	66
Figura 6.14 – Esquema dos elementos lógicos do GoldSim®.	68
Figura 6.15–Comportamento do reservatório para captação de 80 m ³ /h a 100 m ³ /h. Fonte: Adaptado GoldSim (2022).	70
Figura 6.16–Comportamento do reservatório para captação de 110 m ³ /h a 130 m ³ /h. Fonte: Adaptado GoldSim (2022).	71
Figura 6.17–Comportamento do reservatório para captação de 140 m ³ /h a 162 m ³ /h. Fonte: Adaptado GoldSim (2022).	72
Figura 6.18–Curva de vazão versus porcentagem de falhas no sistema de captação de água no reservatório da barragem Brejo Grande.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Resultado da pesquisa de artigos nas bases de dados bibliográficos Scopus e Web of Science.	16
Tabela 4.2 – Categorias de elementos do GoldSim.	33
Tabela 4.3 – Principais elementos utilizados no GoldSim.	35
Tabela 5.1 – Proposta da utilização dos elementos de lógica do software GoldSim.....	46
Tabela 6.1 – Estações pluviométricas selecionadas.	50
Tabela 6.2 - Precipitação total média anual nas estações pluviométricas selecionadas.	54
Tabela 6.3 - Estações fluviométricas analisadas.....	56
Tabela 6.4 – Indicadores da estação fluviométrica Bairro do Analdino (61343000).....	62
Tabela 6.5 – Estação Meteorológica.	63
Tabela 6.6 – Parâmetros de entrada do balanço hídrico da barragem Brejo Grande. ...	66

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO GERAL	13
2.1	Objetivos Específicos	13
3	JUSTIFICATIVA	14
4	REFERENCIAL TEÓRICO	15
4.1	Bibliometria	15
4.2	Balanço Hídrico	18
4.3	Principais Variáveis do Balanço Hídrico	21
4.3.1	Precipitação	21
4.3.2	Contribuição Superficial	24
4.3.3	Evaporação de Lagos e Reservatórios	27
4.4	Modelagem do Balanço Hídrico	29
4.5	GoldSim	31
5	ROTEIRO METODOLÓGICO	40
5.1	Fontes de Consulta de Dados	40
5.2	Métodos Considerados	41
5.2.1	Aquisição de Dados	42
5.2.2	Consistência de Dados	44
5.2.3	Estudos Hidrológicos e Estimativa da Evaporação	45
5.2.4	Modelagem	46
6	ESTUDO DE CASO	47
6.1	Caracterização da Área de Interesse	47
6.2	Pluviologia	50
6.2.1	Dados Básicos	50
6.2.2	Consistência de Dados	52
6.2.3	Precipitação Total Mensal	52
6.2.4	Precipitação Total Anual	53
6.3	Fluviologia	56
6.3.1	Dados Básicos	56
6.3.2	Consistência de Dados	57
6.3.3	Vazão Média Mensal	60
6.4	Evaporação	62
6.5	Balanço Hídrico	65

6.5.1	Modelagem no GoldSim	67
6.6	Resultados do Estudo de Caso	69
7	CONCLUSÃO	74
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DE DUPLA MASSA.....	83
	APÊNDICE B – MÉDIAS MENSAS DE PRECIPITAÇÃO - BAIRRO ANALDINO	86
	APÊNDICE C – MÉDIAS MENSAS DE VAZÃO - BAIRRO ANALDINO	88
	APÊNDICE D – MÉDIAS MENSAS DE VAZÃO BREJO GRANDE	90
	APÊNDICE E – MÉDIAS MENSAS DE EVAPORAÇÃO EM BREJO GRANDE	92

1 INTRODUÇÃO

As barragens são estruturas comuns em rios e córregos no Brasil. Tanto em grandes rios com a finalidade principal de geração de energia elétrica quanto em pequenos afluentes para usos múltiplos. No contexto de abastecimento público, as barragens para acúmulo de água representam um importante ativo, uma vez que, a água em seu regime natural varia ao longo do tempo e espaço.

Para os serviços autônomos de água e esgoto responsáveis pelo abastecimento de municípios, os reservatórios de água são estruturas que têm o papel de regularização das vazões naturais, armazenando o volume disponível durante os períodos chuvosos para que seja utilizado nos períodos de estiagem compensando as diferenças entre a demanda e oferta de água (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

O planejamento e a operação de um reservatório de água dependem, principalmente, da previsão de vazões afluentes, que resultará nas estimativas de volume disponível no futuro. Essa ação pode ser otimizada através de modelo hidrológico, como por exemplo, balanço hídrico. Onde a partir do princípio da conservação de massa Amorim Neto (1989) define como uma contabilidade de entrada e saída de água no solo.

De acordo com ANA (2020) ainda há um passivo no que se refere as informações básicas sobre barragens. Nesse sentido, é possível concluir que existe um número elevado de pequenas barragens de acumulação de água com poucas informações.

O presente trabalho tem como objetivo auxiliar a análise e garantia de captação de água em pequenas barragens de acumulação através da aplicação do balanço hídrico por meio da utilização do *software* GoldSim.

Para isso, o estudo abarca o cenário onde são utilizados dados hidrológicos secundários disponibilizados em órgãos públicos e levantamentos topográficos do local a partir metodologias consagradas na literatura e abordadas, por exemplo, nos trabalhos de USGS (1960), Mattos e Villela (1975), Pinto *et al* (1976), Ometto (1981), Tucci (1993), Hipólito e Vaz (2011) e Pinheiro (2011).

As metodologias utilizadas no estudo foram reunidas em um roteiro metodológico e aplicadas em um estudo de caso com a finalidade de elucidar a proposta do trabalho. O

local de escolhido foi a barragem Brejo Grande, que tem o objetivo de acumular água para abastecimento público e situa-se no município de Paraisópolis em Minas Gerais.

No estudo de caso projetou-se o comportamento do nível de água no reservatório de acordo com a restrição operacional em que a estrutura se encontra. Dessa forma, foi possível identificar a faixa de vazão em que precisa operar para garantir a captação de água para abastecimento público.

Esta dissertação apresenta sete capítulos, a contar com este, sendo estruturada da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados os objetivos do estudo; no Capítulo 3 é apresentada a justificativa que estimulou a realização do estudo; o Capítulo 4 contém a revisão bibliométrica e bibliográfica que deu base e fundamentos para os capítulos seguintes; o Capítulo 5 apresenta o roteiro metodológico; o Capítulo 6 discorre sobre o estudo caso; o Capítulo 7 apresenta as principais conclusões sobre o estudo.

2 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo auxiliar a análise e garantia de captação de água em pequenas barragens de acumulação através da aplicação do balanço hídrico por meio da utilização do *software* GoldSim.

2.1 Objetivos Específicos

Pode-se citar como objetivos específicos do trabalho os seguintes tópicos, a saber:

- Apresentar um roteiro metodológico para guiar a aplicação do balanço hídrico, assim como definir as principais variáveis de entrada no modelo GoldSim para locais com carência de monitoramento hidrológico e hidráulico;
- Realizar o balanço hídrico do reservatório Brejo Grande, localizado no município de Paraisópolis – Minas Gerais, de acordo com o roteiro metodológico proposto. Caracterizando assim um estudo de caso; e,
- Analisar e apresentar os resultados obtidos para o cenário da Barragem Brejo Grande e os impactos no sistema de captação de água do empreendimento.

3 JUSTIFICATIVA

O barramento de cursos de água foi utilizado desde cedo para a adaptação da civilização ao ambiente natural e a melhoria da qualidade de vida das populações. No Brasil, milhões de pessoas dependem de barragens para obter água em condições adequadas, em termos de quantidade e qualidade, localização e tempo, o que torna as barragens elementos de infraestrutura importantes para o desenvolvimento sustentável (ANA, 2017).

Ainda de acordo com ANA (2017) a Comissão de Internacional de Grandes Barragens (ICOLD), tem atualmente, no seu Registro Mundial, cadastradas cerca de 40.000 barragens, com pelo menos 15 metros de altura acima da fundação. Contudo, o número de barragens de menores dimensões não está contabilizado, mas é muito grande.

No Brasil, a Resolução nº 144 de 10 de julho de 2012 classifica as barragens para acumulação de água quanto ao volume do seu reservatório. A barragem é considerada pequena quando o reservatório é igual ou inferior a 5 milhões de metros cúbicos (BRASIL, 2012).

Mesmo com o *déficit* de mapeamento e contabilização, um panorama sobre as pequenas barragens no país pode ser observado a partir do cadastro dessas estruturas feito pelos órgãos fiscalizadores no contexto da Política Nacional de Segurança de Barragens. De acordo com a ANA (2020), em relação ao volume, 60% das barragens cadastradas possuem capacidade inferior a 3 hm³, sendo que as com volume inferior a 1 hm³ representam quase metade do total (46%). Sendo que, a finalidade principal dessas estruturas está ligada à irrigação e abastecimento humano.

A falta de cadastro e o desconhecimento da quantidade de pequenas barragens que existe no Brasil incide também na falta de informações sobre essas estruturas. Assim, os fatores ligados à segurança e gestão de recursos hídricos de elementos dessa natureza são comprometidos

Nesse sentido, o trabalho encontra justificativa já que visa, através do balanço hídrico, utilizar a ferramenta GoldSim para apoiar tecnicamente o planejamento e tomada de decisões no que tange a captação de água nessas estruturas.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

Este item aborda o levantamento do estado da arte e revisão dos trabalhos já existentes sobre o tema abordado, que pode ser em livros, artigos, monografias, teses, mídias eletrônicas e outros materiais cientificamente confiáveis. Tem o objetivo de fundamentar e dar consistência ao presente estudo, norteando a pesquisa e apresentando embasamento da literatura já publicada sobre o tema.

Para tal, o tópico será desenvolvido principalmente em duas partes, iniciando com a bibliometria sobre a produção científica internacional do tema, principalmente em artigos, e a bibliografia com principais conceitos teóricos sobre balanço hídrico e da ferramenta GoldSim.

4.1 Bibliometria

Segundo McBurney e Novak (2002) a bibliometria é definida como uma abordagem para avaliar monitorar o progresso de determinadas disciplinas por meio da classificação dos dados via técnicas estatísticas. Dentre os dados, inclui-se as principais informações presentes em um trabalho, como por exemplo: autores, palavras-chaves, tema discutido e fonte de publicação.

No contexto do estudo a pesquisa bibliométrica tem o objetivo de, através de técnicas avaliativas, realizar triagem de artigos que se correlacionam com o presente estudo através das palavras-chaves ou título. Também, compor o entendimento sobre a aplicação de balanço hídrico em pequenos reservatórios no panorama internacional de produção científica.

A pesquisa foi realizada na base de dados bibliográficos *Web of Science* (WoS) e Scopus e o acesso se deu pelo Portal de Periódicos CAPES.

A WoS pode ser entendida como um banco de dados que dá aos estudiosos acesso a artigos de revistas científicas, livros e outros documentos acadêmicos em todos os campos da ciência (ALBORT-MORANTE; RIBEIRO SORIANO, 2016). A Scopus de acordo com Elsevier (2015) é uma base de dados de resumos e citações de literatura revisada por pares, com mais de 22.000 títulos de mais 5.000 editores abrangendo área da ciência, tecnologia, medicina, ciências sociais e artes e humanidades.

A pesquisa foi realizada no dia 16 de abril de 2022. A estratégia de busca consistiu em procurar trabalhos onde as palavras balanço hídrico, pequenos reservatórios e GoldSim fossem relacionadas. Devido à natureza das bases de dados as palavras foram pesquisadas em inglês. A Tabela 4.1 apresenta o resultado dos artigos encontrados na WoS e Scopus.

Tabela 4.1 – Resultado da pesquisa de artigos nas bases de dados bibliográficos Scopus e Web of Science.

Combinação das Palavras				Bases de dados	
				Scopus	Web of Science
1	<i>Water balance</i>	<i>Small reservoirs</i>	<i>GoldSim</i>	-	-
2	<i>Water balance</i>	<i>Small reservoirs</i>		18	16
3	<i>Water balance</i>		<i>GoldSim</i>	8	7

Fonte: Própria (2022).

Não houve resultados para a primeira combinação de palavras, contudo, sem a inserção da palavra GoldSim foi possível obter 34 trabalhos enquanto que retirando pequenos reservatórios a quantidade é de 15 artigos. Importante ressaltar que diversas produções acadêmicas estavam presentes em ambas as bases de dados bibliográficos.

A pesquisa direcionada permitiu encontrar as produções científicas que de alguma forma abordam a combinação das palavras citadas anteriormente. Contudo, na maioria dos artigos pesquisados o tema principal não se relaciona diretamente com o assunto tratado na presente dissertação.

O próximo passo da prospecção consistiu na seleção dos trabalhos que possuem interface direta com o balanço hídrico em pequenos reservatórios ou a utilização do GoldSim para este fim. Nesse contexto é importante citar os trabalhos de Machiwal *et al.* (2017), Fowe *et al.* (2015) e Dulkar *et al.* (2020).

Em seu trabalho, Machiwal *et al.* (2017) através de estudo de caso em Kachchh, Índia, concentrou-se em estimar os componentes de entrada e saída para o desenvolvimento do balanço hídrico de pequenos reservatórios na região.

O balanço hídrico foi desenvolvido a partir da equação da continuidade tendo como entrada e saída as seguintes variáveis: escoamento superficial, precipitação direta no lago, evaporação, percolação e retirada de água por bombeamento (MACHIWAL *et al.*, 2017).

De acordo com o autor os dados de chuva foram medidos através de pluviômetro instalado próximo ao reservatório, a evaporação a partir de Tanque Classe A, a percolação foi estimada através de ensaio e o bombeamento foi determinado por dados históricos de captação. A vazão de contribuição foi estimada a partir do registro de chuva, curva cota x área x volume e coeficiente de *runoff*.

De acordo com Machiwal *et al.* (2017) com dois anos de dados medidos das principais variáveis o balanço hídrico mostrou que na região o volume de água retirado para irrigação foi equivalente a perda de água por evaporação mostrando uma oportunidade para aumentar a eficiência no uso da água, reduzindo a evaporação.

Uma outra aplicação de balanço hídrico em pequenos reservatórios pode ser identificada no trabalho de Fowe *et al.* (2015) onde aplicou a metodologia para melhorar a gestão de usos múltiplos no reservatório Boura em Burkina Faso, na África.

Assim como o autor anterior, Fowe *et al.* (2015) utilizou o conceito de entrada e saídas a partir do balanço de massas. Para tal, adotou as seguintes variáveis, a saber: precipitação direta no lago, evaporação, infiltração, volume vertido, bombeamento e escoamento superficial.

De acordo com Fowe *et al.* (2015) os dados de chuva foram medidos por pluviômetro, evaporação por Tanque Classe A e a infiltração pela correlação do monitoramento de nível do reservatório com a curva cota x área x volume em períodos sem chuva. O escoamento superficial foi determinado com a calibração de um coeficiente de deflúvio a partir dos dados medidos.

A partir de 24 meses de dados das variáveis anteriormente citadas Fowe *et al.* (2015) obteve resposta similar ao autor anterior onde concluiu que para a região de estudo a evaporação é a principal variável de retirada de água do reservatório e que a demanda de uso múltiplo ainda sim pode aumentar.

No âmbito do GoldSim é importante citar Dulkar *et al.* (2020) que utilizou o *software* para criar regras operacionais baseadas em risco para a barragem Alibey de acordo com o sistema em que está inserida. A estrutura está localizada em Istanbul e tem a finalidade de abastecimento público e controle de inundações.

Para construção do modelo Dulkar *et al.* (2020) utilizou 37 anos de dados históricos de precipitação, assim como, dados meteorológicos. Para calibração do escoamento superficial utilizou 19 anos de dados de vazão a montante da área de interesse.

Para a criação das regras operacionais Dulkar *et al.* (2020) utilizou submodelos para determinar as variáveis de entrada do estudo. A evapotranspiração de referência foi determinada a partir de FAO Penman-Monteith e a contribuição superficial pelo *Australian Water Balance Model* (AWBM) (DULKAR *et al.*, 2020). A demanda e os limites operacionais foram determinados a partir das particularidades da barragem Alibey.

Como resultado Dulkar *et al.* (2020) discute a probabilidade de falta de água variando a demanda de água no sistema em que está inserido a barragem Alibey e discute a importância sobre as precauções na gestão dos reservatórios dado que a possibilidade de escassez de uma barragem pode afetar a operação conjunta de outras.

Os principais trabalhos consultados na revisão bibliométrica evidenciaram a aplicação do balanço hídrico em pequenos reservatórios a partir da equação da continuidade tendo principalmente como variáveis a precipitação, evaporação, contribuição superficial e demanda de água.

Também pode-se verificar a utilização do GoldSim no desenvolvimento de regras operacionais em reservatório de abastecimento de água a partir de série de dados históricos de precipitação, dados meteorológicos e de vazão. A bibliometria proporcionou a filtragem e acesso à artigos com aplicação do tema da dissertação, assim, o próximo tópico abordará o assunto do ponto de vista teórico das variáveis identificadas para o balanço hídrico.

4.2 Balanço Hídrico

De acordo com Amorim Neto (1989) o balanço hídrico é definido como uma contabilidade de entrada e saída de água no solo. Para Pereira *et al.* (1997) é um sistema contábil de monitoramento de água no solo a partir da aplicação do princípio da conservação de massa para água. Assim como, Galvani (2008) afirma que a variação

de armazenamento com entradas e saídas de água em um volume de solo são fenômenos que podem ser descritos, nacionalmente e internacionalmente, como balanço hídrico.

O balanço hídrico segundo Tucci (1993) relaciona a quantidade de massa e a troca de energia dos sistemas envolvidos, no tempo e no espaço e seus principais componentes são: precipitação, evaporação, evapotranspiração, escoamento superficial e subterrâneo.

Gomes (2008) destaca que o balanço hídrico é extensivamente usado para estimativas quantitativas dos recursos hídricos e dos impactos de atividades humanas no ciclo hidrológico e é definido pela equação hidrológica, que é basicamente uma condição da lei de conservação de massa aplicada para o ciclo hidrológico.

O balanço hídrico está ligado ao conceito de continuidade de massas de acordo com Pinheiro (2011), pois, estabelece que a quantidade de matéria que entra em um sistema é igual à quantidade de matéria que sai do mesmo, em um intervalo de tempo determinado ou para as condições médias de funcionamento das variáveis de entrada e saída. Os trabalhos de Machiwal *et al.* (2017) e Fowe *et al.* (2015) exibem a aplicação prática, por exemplo.

De acordo com UNESCO (1982, *apud* TUCCI, 1993) os balanços hídricos podem ser, a saber: superficial, aerológico, isotópico, balanços energéticos, balanços de superfícies líquidas e modelos matemáticos.

Como aplicabilidade e alternativa de uso Amorim Neto (1989) cita que o balanço hídrico, dentre suas aplicações, na “hidrologia” é ferramenta indispensável para os estudos de bacia hidrográfica e na quantificação de disponibilidades hídricas para confecção de reservatórios para armazenamento de água.

Em bacias hidrográficas a metodologia, de acordo com Tucci (1993), geralmente visa estimar a evapotranspiração baseando em dados de precipitação, evaporação e escoamento superficial e subterrâneo. Ainda nesse sentido, Pinheiro (2011) diz que é feito para as condições médias de longo termo das variáveis de entrada e saída.

As escalas temporais normalmente utilizadas para a realização do balanço hídrico são em intervalos anuais, mensais, decendiais, semanais ou mesmo diários,

conforme a sua aplicação, sendo subdivididas em cíclicas e sequenciais (contínuas) (PEREIRA *et al.*, 1997 *apud* SHAFFER, 2009).

De acordo com Sentelhas (2009) o balanço hídrico cíclico é elaborado a partir de normais climatológicas de temperatura média e chuva do local. Por sua vez, o balanço hídrico sequencial ou contínuo normalmente é realizado em pequenos intervalos de tempo e demonstra a variação da condição hídrica do local. Sua utilização é mais intensa em estudos climatológicos onde, evidentemente, a finalidade é a descrição do clima e não do tempo meteorológico (SHAFFER, 2009).

Um dos processos de balanço hídrico climatológico mais citados e utilizados na literatura é o descrito por Thornthwaite & Mather (1955 *apud* SOUZA, 2001). Este balanço hídrico foi desenvolvido para determinar o regime hídrico de um local, sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo (SCHAFER, 2009). Ainda nesse sentido, Souza (2001) comenta que o método dá a indicação do valor das deficiências e excedentes hídricos de uma dada região em milímetros.

Como ferramenta para seus trabalhos Willmott *et al.* (1985) utilizou o balanço hídrico para fundamentar seu estudo e produzir cartas de armazenamento de água no solo, cobertura de neve e evapotranspiração real.

Vanderkelen *et al.* (2018) apresenta em seu trabalho a determinação do nível de água do lago Vitória, na África, a partir do balanço hídrico. Para tanto, o autor cita que o balanço foi realizado com base nas variáveis de precipitação, evaporação, vazão dos rios afluentes e vazão de saída do lago a partir da Equação 1.

$$\frac{dL}{dt} = P - E + \frac{Q_{in} - Q_{out}}{A} \quad \text{Equação 1}$$

Onde dL/dt apresenta a variação do nível no tempo; P a precipitação no lago (m/dia); E a evaporação do lago (m/dia); Q_{in} vazão de entrada m^3/dia ; Q_{out} vazão de saída do lago; e, A a área de superfície do lago (VANDERKELEN *et al.*, 2018).

Panigrahi e Panda (2003), baseando-se na abordagem e teorias de balanço hídrico desenvolveram uma rotina computacional para o dimensionamento ótimo econômico de reservatórios de água para o abastecimento de irrigação suplementar.

A partir dos exemplos supracitados pode-se observar a gama de aplicações que proporciona a utilização do balanço hídrico. Assim, torna-se importante aprofundar-se nas principais variáveis que o compõe.

4.3 Principais Variáveis do Balanço Hídrico

4.3.1 Precipitação

A precipitação é entendida na hidrologia como toda água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre e dentre as suas formas a chuva, por sua capacidade de gerar escoamento, é a mais importante (TUCCI, 1993). Ainda nesse sentido, para Collischonn e Dornelles (2013) a água da atmosfera que atinge a superfície na forma de chuva, granizo, neve, neblina é denominada precipitação e a chuva é a forma mais importante das precipitações.

As principais grandezas que caracterizam a chuva são:

Altura pluviométrica (P ou r): é a espessura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região atingida pela precipitação admitindo-se que essa água não se infiltrasse, não evaporasse, nem se escoasse para fora dos limites da região. A unidade de medição habitual é o milímetro de chuva, definido como a quantidade de precipitação correspondente ao volume de 1 litro por metro quadrado de superfície.;

Duração (t): é o período de tempo durante o qual a chuva cai. As unidades normalmente utilizadas são o minuto ou a hora;

Intensidade (i): é a precipitação por unidade de tempo, obtida com a relação $i = P/t$. Expressa-se normalmente em mm/h ou mm/min. A intensidade de uma precipitação apresenta variabilidade temporal, mas, para a análise dos processos hidrológicos, geralmente são definidos intervalos de tempo nos quais é considerada constante.

Frequência de probabilidade ou Tempo de Retorno (Tr): a precipitação é um fenômeno do tipo aleatório. Na análise de alturas pluviométricas máximas, o Tr é interpretado como o número médio de anos durante o qual espera-se que a precipitação analisada seja igualda ou superada (TUCCI, 1993).

A medida da precipitação é um parâmetro extremamente importante, pois possibilita-nos saber de quanto de água temos disponível naquele local. A medida é sempre considerada em altura da coluna d'água, em milímetros, que ficaria no local, se não houvesse infiltração e nem deflúvio lateral algum (OMETTO, 1981).

Basicamente existe duas formas de medir chuva: pontualmente com pluviômetros e pluviógrafos ou espacialmente com radares (TUCCI, 1993). De acordo com Collischonn e Dornelles (2013) os pluviômetros nada mais são que recipientes para coletar a água precipitada com dimensões padronizadas e quando são adaptados para realizar medições de forma automática em intervalos de tempo são chamados de pluviômetros automáticos ou pluviógrafos.

Para Tucci (1993) a chuva estimada utilizando radares meteorológicos baseiam-se na emissão de pulsos eletromagnéticos que são refletidos pelas partículas de chuva na atmosfera. A relação entre a intensidade do sinal enviado e recebido é correlacionada à intensidade da chuva.

No Brasil a rede de observação de chuvas é mantida pela Agência Nacional da Água e Saneamento Básico (ANA), a medição de chuva é realizada uma vez por dia, sempre às 7h. Além da ANA existem outras empresas que mantêm pluviômetros como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), empresas de geração de energia hidrelétrica e empresas de pesquisa agropecuária (COLLISCHONN e DORNELLES 2013).

O objetivo da instalação de um posto de medição de chuvas é obter uma série ininterrupta de precipitação ao longo dos anos. Ao longo do tempo podem ocorrer a existência de períodos sem informações ou com falhas (TUCCI, 1993).

As causas mais comuns para erros nas observações de acordo com Collischonn e Dornelles (2013), estão relacionadas na coleta, registro e transcrição dos dados, estimativa de valores por parte do observador por não estar no local, interferência de vegetação ou obstrução do posto e problemas de funcionamento no registrador.

Como há a necessidade de trabalhar com séries contínuas de precipitação as falhas devem ser preenchidas. Um método bastante utilizado é a ponderação regional que pode ser consultado nos trabalhos de Mattos e Villela (1975), Ometto (1981) e Tucci (1993).

De acordo com Tucci (1993) é um método simplificado normalmente utilizado para o preenchimento de séries mensais ou anuais de precipitações, visando a homogeneização do período de informações e à análise de estatística de precipitações.

Designado por x a estação que apresenta falha e por A, B e C as estações vizinhas, pode-se determinar a precipitação P_x da estação x pela média ponderada dos registros das três estações vizinhas de acordo com com Mattos e Villela (1975), utilizando a Equação 2.

$$P_x = \frac{1}{3} \left(\frac{N_x}{N_A} P_A + \frac{N_x}{N_B} P_B + \frac{N_x}{N_C} P_C \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde N é a precipitação normal.

Outro método mais aprimorado de preenchimento de falhas consiste em utilizar as regressões lineares simples ou múltiplas. Na regressão linear simples, as precipitações do posto com falhas e de um posto vizinho são correlacionadas já na regressão múltipla a correlação é feita com vários postos vizinhos (TUCCI, 1993).

Após o preenchimento das falhas é necessário analisar a consistência da série histórica de dados e para tal o USGS (1960) destaca que o método de dupla massa é um dos mais conhecidos para a análise de consistência de dados de precipitação. A principal aplicação do método é identificar se ocorreram mudanças no comportamento da precipitação ao longo do tempo.

USGS (1960) conceitua que o método consiste em construir-se uma curva dupla acumulativa, na qual são relacionados os totais anuais acumulados de um determinado posto e a média acumulada dos totais anuais dos postos vizinhos. Se os valores dos postos a consistir forem proporcionais aos observados na base de comparação, os pontos devem se alinhar segundo uma única reta (USGS, 1960).

Os métodos de tratamento de dados pluviométricos de acordo com Tucci (1993) visam produzir estimativas pontuais de precipitação. Dessa forma, para calcular precipitação média de uma numa superfície é necessário utilizar observações nessa superfície e nas suas vizinhanças.

Para Mattos e Villela (1975) a altura média de precipitação em uma área específica é necessária em muitos tipos de problemas hidrológicos, notadamente na determinação do balanço hídrico de uma bacia hidrográfica. A partir dos trabalhos de Mattos e Villela (1975); Ometto (1981); Tucci (1993) e Collischonn e Dornelles (2013)

pode-se observar que os principais métodos para cálculo de chuva média são: método aritmético, Thiessen e isoietas.

O método aritmético é o mais simples: consiste em determinar-se a média aritmética entre as as quantidades medidas na área. Método que apresenta boa estigmática se os aparelhos forem distribuídos uniformemente e a área for plana (MATTOS e VILLELA, 1975)

Já o método de Thiessen considera a não uniformidade da distribuição espacial dos postos, mas não leva em conta o relevo da bacia (TUCCI, 1993). De acordo com Collischonn e Dornelles (2013) está baseado na hipótese que a chuva que atinge um ponto qualquer dentro da bacia é exatamente igual a chuva que atinge o pluviômetro mais próximo. Assim, pelo critério da menor distância é definida a área e influência de cada posto.

De acordo com Tucci (1993), as isoietas são chamadas de linha de mesma precipitação. Esse método é o mais preciso de todos, pois independe da topografia do terreno e das precipitações. Os pontos de mesma precipitação estabelecem as curvas que serão utilizadas para a estimativa do valor médio de altura pluviométrica em qualquer ponto (OMETTO, 1981).

4.3.2 Contribuição Superficial

No contexto do balanço hídrico a variável relacionada a contribuição superficial pode ser entendida como a afluência de vazões de no reservatório da estrutura. Quando não há medição hidrométrica no local é necessário realizar o processo de transferência de dados de vazão. Dito isso, a transferência de informações de bacias com monitoramento hidrométrico para bacias com carência ou ausência de dados pode ser realizada a partir da regionalização hidrológica (PINHEIRO, 2011).

Normalmente não existem dados de vazão exatamente no local necessário. Assim Collischonn e Tassi (2008) apontam que muitas vezes é necessário estimar valores a partir de informações de postos fluviométricos próximos. A este procedimento, quando realizado de forma cuidadosa e detalhada, dá se o nome de regionalização hidrológica.

A forma mais simples de regionalização hidrológica é o estabelecimento de uma relação linear entre vazão e área de drenagem da bacia (COLLISCHONN e TASSI, 2008). Suponha que é necessário estimar a vazão média em um ponto A, sabendo que, um posto B no mesmo curso d'água possui dados medidos. Pode-se então utilizar a Equação 3 de acordo com os autores:

$$Q_A = Q_B \cdot \frac{A_A}{A_B} \quad \text{Equação 3}$$

Onde, A_A é a área de drenagem do ponto A e A_B a área de drenagem do ponto B, e Q_A vazão média no ponto A e Q_B é a vazão média no ponto B.

Outro método entre os mais difundidos para a regionalização de vazões é o método tradicional, o qual é descrito pela ELETROBRÁS (1985a) *apud* Amorim *et al.* (2005) e que consiste nas seguintes etapas: identificação de regiões hidrológicamente homogêneas e no ajuste de equações de regressão entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem para cada região homogênea.

De acordo com Amorim *et al.* (2005) a regionalização pode ser utilizada nas seguintes situações:

- a) quando uma variável, como a vazão mínima, precipitação média, entre outras, é determinada numa região com base em relações estabelecidas a partir de dados pontuais existentes;
- b) quando uma função hidrológica, como a curva de permanência ou de duração, a curva de regularização, a curva de intensidade – duração – frequência, entre outras, é determinada numa região com base em dados hidrológicos existentes; e
- c) quando os parâmetros de uma função ou modelo matemático são determinados pela sua relação com características físicas das bacias, a partir do ajuste de um modelo com base em dados observados em algumas bacias representativas (AMORIM *et al.*, 2005).

A regionalização pode ser realizada para vazão máxima, mínima e média de acordo com Tucci (1993). No âmbito do presente trabalho é importante destacar a regionalização hidrológica para vazões médias.

Tucci (2002) e Pinheiro (2011) abordam em seus respectivos livros diversas metodologias de regionalização de vazões incluindo vazões máximas, médias e mínimas. Além dos trabalhos supracitados, para a transferência de vazões os estudos

de Amorim *et al.* (2005), Gasques (2018) e Santos (2019) fazem revisão da literatura dos principais métodos de regionalização hidrológica.

No contexto de balanço hídrico é importante destacar a regionalização da vazão média de longo termo abordada por Pinheiro (2011), onde diz que em uma região hidrologicamente homogênea, a vazão média de longo termo - MLT pode ser estimada com base no balanço hídrico simplificado das bacias hidrográficas. Para tanto, nos dados de referência aplica-se a equação de balanço hídrico de bacias hidrográficas simplificado descrita pela Equação 4.

$$E = P - D \quad \text{Equação 4}$$

Onde E representa a evapotranspiração e as todas as demais perdas da bacia (mm), P a precipitação total anual (mm) e D o deflúvio anual (mm), sendo todas essas variáveis referenciadas aos respectivos valores médios de longo termo (PINHEIRO, 2011).

Determinando a evapotranspiração e perdas da bacia hidrográfica da estação base é possível subsidiaram a aplicação das técnicas de transferência de relações das vazões características entre regiões consideradas hidrologicamente homogêneas a partir da Equação 5.

$$Q_{MLT} = \frac{(P - E) * 10^{-3} * A_D}{\Delta t} \quad \text{Equação 5}$$

Na qual Q_{MLT} é a vazão média de longo termo no exutório da sub-bacia hidrográfica sem dados (m^3/s), P a precipitação total anual (mm) na referida bacia hidrográfica, E evapotranspiração e perdas da bacia hidrográfica da estação de referência, A_D é a área de drenagem (km^2) e Δt é o intervalo de tempo, igual ao número de segundos em um ano (PINHEIROS, 2011).

A partir da correlação aderente entre a vazão média de longo termo da estação base e do local a ser transferidos os dados é possível foi calculada a série de vazões médias mensais para a seção fluvial de interesse (PINHEIROS, 2011).

4.3.3 Evaporação de Lagos e Reservatórios

De acordo com Hartwig (2012) a evaporação é a transformação de água em vapor devido a incidência de raios solares sobre a superfície terrestre. A evaporação também pode ser entendida como o processo de transferência de água líquida para vapor do ar diretamente de superfícies líquidas, como rios, poças, lagos e reservatórios (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Segundo Collischonn e Tassi (2008) os principais fatores que afetam a evaporação são a temperatura, a umidade do ar, a velocidade do ar e a radiação solar, a saber:

Temperatura: vapor de água que pode conter o ar varia com a temperatura. Ar mais quente pode conter mais vapor, portanto, o ar mais quente favorece a evaporação;

Umidade do ar: quanto menor a umidade do ar, mais fácil é fluxo de vapor da superfície que está evaporando. O efeito é semelhante ao da temperatura. Se o ar da atmosfera próximo à superfície estiver com umidade relativa próxima a 100% a evaporação diminui por que o ar já está praticamente saturado do vapor.

Velocidade do vento: O vento é uma variável importante no processo da evaporação por que remove o ar úmido diretamente do contato da superfície que está evaporando ou transpirando. O processo de fluxo de vapor na atmosfera próxima à superfície ocorre por difusão, isto é, de uma região de alta concentração (umidade relativa) próxima a superfície para uma região de baixa concentração afastada da superfície. Esse processo pode ocorrer pela próxima ascensão do ar quente como pela turbulência causada pelo vento (COLLISCHONN e TASSI, 2008).

De acordo com Tucci (1993) os métodos normalmente utilizados para determinar a evaporação são: transferência de massa, balanço de energia, equações empíricas, balanço hídrico e evaporímetros. Na primeira abordagem a transferência de massa baseia-se na primeira Lei de Dalton que estabelece a relação entre evaporação e pressão de vapor (TUCCI, 1993).

Segundo Bueno (2016) com base no balanço de energia a evaporação é considerada como uma das formas de consumo da radiação incidente. Nesse contexto, é importante citar Penman (1948) que combinou o poder evaporante do ar (temperatura, umidade, velocidade do vento) com poder evaporante da radiação solar,

originando um dos métodos mais utilizados para determinação da evaporação no contexto de balanço de energia.

Já no método do balanço hídrico, Tucci (1993) diz que a evaporação é determinada com base na equação da continuidade do lago ou reservatório. Ainda nesse sentido, o autor aponta que o uso da metodologia para cálculo da evaporação é teoricamente precisa, pois, tem alicerce no princípio da conservação de massa.

As equações empíricas foram estabelecidas com base no ajuste por regressão das variáveis envolvidas para algumas regiões e condições específicas (TUCCI, 1993). As equações se baseiam na equação da aerodinâmica e de acordo com o próprio autor, que devem ser usadas com cautela.

Nos métodos diretos a medição da evaporação, pelos evaporímetros, ocorre de forma semelhante a precipitação, utilizando unidades de mm para caracterizar a lâmina evaporada ao longo de um determinado intervalo de tempo (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013).

Entre os instrumentos utilizados pode-se destacar o Tanque Classe A, e que de acordo com Ometto (1981) é preconizado pela Organização Meteorológica Mundial e que a evaporação resultante do Tanque Classe A provém de um efeito conjugado da radiação incidente, do vento ocorrente e do déficit de saturação sobre uma superfície livre de água.

Para o local onde não existe a instrumentação o método de Penman (1948) é um dos mais utilizados na determinação da evaporação, contudo, depende da medição de diversas variáveis climatológicas. Nesse sentido, é importante ressaltar o trabalho de Linacre (1977) que propõe uma fórmula para cálculo de evaporação a partir da temperatura média, latitude, temperatura do ponto de orvalho e elevação da área de interesse.

De acordo com Linacre (1977), as melhores fórmulas são as baseadas na compreensão da física do processo de evaporação, como por exemplo a fórmula proposta no trabalho de Penman (1948) para o cálculo de evaporação. Contudo, a maior dificuldade é necessidade das diversas variáveis climatológicas.

Dito isso, com base na fórmula de Penman (1948) e principalmente considerando o albedo da água como 0,05 Linacre (1977) propôs a Equação 6 para cálculo da evaporação em vários tipos de climas:

$$E = \frac{\frac{700(T_a + 0,006h)}{100 - \phi} + 15(T_a - T_d)}{(80 - T_a)} \quad \text{Equação 6}$$

Em que E é a evaporação em mm/dia; T_a a temperatura média do ar °C; h a altitude em metros; ϕ latitude em graus decimais e T_d a temperatura do ponto de orvalho em °C.

Após a comparação dos resultados de evaporação do Tanque Classe A de diversos lugares com a equação proposta, para o passo de tempo mensal, o erro encontrado foi em torno de 0,5 mm/dia (LINACRE, 1977).

4.4 Modelagem do Balanço Hídrico

Conforme mencionado por Gomes (2008) o balanço hídrico pode ser expresso como uma equação hidrológica com aplicabilidade para diferentes finalidades. Assim, a sua execução pode ser guiada a partir do emprego de diversos *softwares* e ferramentas computacionais. Na literatura é possível identificar a construção de *softwares* para diversas aplicações do balanço hídrico.

Rolim (1998) desenvolveu em ambiente EXCEL™ três programas para o cálculo de balanço hídrico normal, sequencial e de cultura. De acordo com o autor a utilização da ferramenta auxilia na confecção de gráficos e manipulação de banco de dados.

Uma outra abordagem pode ser encontrada no trabalho de Melato (2010) que para avaliar a perda de água no sistema de abastecimento de água da região metropolitana de São Paulo, através do balanço hídrico, utilizou o *software* W-B Easy Calc – v1.17 desenvolvido pelo banco mundial.

A ferramenta também é ambientada em EXCEL™ e estabeleceu valores para o Índice de Vazamentos da Infraestrutura (IVI), e perdas reais em L/ligação*dia para

sistemas de países desenvolvidos e países em desenvolvimento, com diferentes faixas de operação (MELATO, 2010).

Além do W-B Easy Calc, Fantozzi (2006) aponta que existe uma série de *softwares* disponíveis no mercado para o cálculo de balanço hídrico de acordo com os indicadores de performance seguindo o padrão do *Internacional Water Association* para perdas de água. Entre eles pode-se citar, a saber: AquaLite, BenckLeak, CheckCalcs, Leakage CheckUp e WaterAudit (FANTOZZI, 2006).

No ambiente GIS é importante mencionar o RUBEM Hidrological que é um *plugin* em desenvolvimento criado pelo Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões em Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos (LabSid) no Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

De acordo com LabSid (2022) RUBEM Hydrological é o plugin QGIS de código aberto que usa *Rainfall rUnoff Balance Enhanced Model* para calcular o balanço hídrico mensal (escoamento, recarga de aquífero, interceptação de dossel e fluxo de base) com recursos para considerar mudanças no uso e cobertura da terra ao longo do tempo.

Também relacionado ao LabSid pode-se citar o AcquaNet surgiu para resolução de problemas de alocação de água em bacias complexas, utilizando: um algoritmo de balanço de massa para simulação e o algoritmo *out-of-Kilter* conforme apresenta Albano (2004) em seu trabalho.

Um importante *software* para balanço hídrico no contexto de reservatórios é o HEC-ReSim desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers* no *Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC)*. De acordo com o USACE (2021) HEC-ResSim é utilizado para modelar um ou mais reservatórios para gerenciamento de enchentes, planejamento para fornecimento de água e apoio a decisões em tempo real.

De acordo com Klipsch (2006) o HEC-ResSIM usa uma abordagem original baseada em regras para imitar a tomada de decisões operacionais que os operadores de reservatórios seguem. O processo de tomada de decisão de liberação do HEC-ResSim para um reservatório leva em conta a época do ano, condições hidrológicas,

temperatura da água e operações simultâneas por outros reservatórios em um sistema (KLIPSCH, 2006).

A ferramenta representa o sistema de reservatórios principalmente com uma rede composta de quatro elementos: junções, roteamento de alcances, desvios e reservatórios. Cada elemento é definido com suficiente informações para serem fisicamente realistas sem exigir tempo de computação (USACE, 2021).

Foi englobado na versão HEC-ResSIM 3.3, conforme a USACE (2021) descreve no manual de usuários, a análise de Monte Carlo com o objetivo de fornecer ao *software* a capacidade de avaliar os impactos da incerteza dos dados de entrada nas operações de reservatórios.

Assim como no HEC-ResSIM o GoldSim, *software* escolhido no contexto do estudo, utiliza o método de Monte Carlo para lidar as incertezas nos dados de entrada.

Diante da importância do *software* no desenvolvimento do estudo faz-se necessário uma abordagem mais detalhada do GoldSim.

4.5 GoldSim

O *software* GoldSim de acordo GoldSim Technology Group (2022), trata-se de um simulador de probabilidade múltipla que utiliza o método de Monte Carlo para as simulações de sistemas complexos.

Halton (1970) diz que o método de Monte Carlo consiste em uma técnica para representar a solução de um problema como um parâmetro de uma população hipotética e, que usa uma sequência aleatória de números para construir uma amostra da população da qual estimativas estatísticas desse parâmetro possam ser obtidas.

No contexto da ferramenta, todo sistema é simulado um grande número de vezes e cada simulação é igualmente provável. Para cada realização, todos os parâmetros incertos são amostrados. O sistema é simulado ao longo do tempo e o resultado é composto de uma distribuição de probabilidade (GOLDSIM TECHNOLOGY GROUP, 2022).

Embora tenha outras aplicações o GoldSim é particularmente bem adaptado para aplicações em recursos hídricos. Permite criar modelos realistas de sistemas de

recursos hídricos a fim de realizar análise de risco e apoiar tomadas de decisões (GOLDSIM, 2017).

O modelo foi construído para representar processos incertos e estocásticos. Isto é feito através da especificação das entradas como distribuições de probabilidade por exemplo. Dessa forma, faz com que seja fácil representar variáveis incertas, assim como, gerar registros estocásticos de precipitação, evaporação entre outras variáveis (GOLDSIM, 2017).

De acordo com Chow *et al.* (1988) em um modelo determinístico as mesmas entradas sempre produzem as mesmas saídas. Enquanto que no estocástico as saídas são ao menos parcialmente aleatórias. Os modelos determinísticos fazem projeções enquanto que os estocásticos entregam previsões.

Wade (2014) aponta as seguintes vantagens da utilização da ferramenta, a saber: a facilidade de construção de sistemas complexos; ajuste das dimensões de forma automática; compatibilidade com programas e planilhas externas; trabalhar com variáveis incertas; e, transformações de eventos discretos em eventos contínuos em sistemas variáveis.

De acordo com Wade (2014) o GoldSim é comumente utilizado na área da mineração, mas outros trabalhos mostram que também é apropriado para balanço hídrico. Como por exemplo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) que listou o GoldSim entre outros como adequados para gestão entre abastecimento público e drenagem superficial (DAN RODRIGO, 2012 *apud* WADE, 2014).

Uma aplicação mais específica e de grande importância ocorreu no projeto elaborado pelo Departamento de Recursos Hídricos da Califórnia (DWR) e a U.S. *Bureau of Reclamation*, onde a partir da utilização da ferramenta foi criada uma interface para gerenciamento de recursos hídricos na região do Central Valley abarcando os rios *Upper Trinity, Sacramento Valley, San Joaquin Valley* e *Sacramento-San Joaquin Delta* (ISLAM NAZRUL *et al.*, 2011).

Baseado na revisão de estudos desenvolvidos, estando entre eles as aplicações supracitadas, Wade (2014) conclui que o *software* é apropriado para aplicações em balanço hídrico.

- Conceitos básicos de simulação

De certa forma, o GoldSim é uma “planilha visual” que permite facilmente criar e manipular equações. Para tanto, é possível criar um modelo altamente organizacional e hierárquico utilizando uma biblioteca visual de elementos (GOLDSIM, 2017).

A GoldSim Technology Group (2022) define simulação como o processo de construir o modelo e simular de acordo com os elementos e dados inseridos. Já a realização é cada caminho possível que o sistema segue no tempo.

Em linhas gerais as simulações podem ser estáticas ou dinâmicas. Nas estáticas assume-se que o sistema não muda com o tempo, já nas dinâmicas o sistema evolui com o tempo e seu objetivo na modelagem é entender com ele se comportará no futuro (GOLDSIM, 2021).

De acordo com GoldSim (2021), como ferramenta probabilística, as entradas incertas no modelo necessariamente produzem saídas incertas e conforme mencionado a propagação se dá pelo método de Monte Carlo.

- Elementos básicos de construção de um modelo

A ferramenta fornece uma grande variedade de elementos para o usuário inserir os dados de entrada, representar funções e operações por exemplo. Principalmente esses elementos estão divididos em seis categorias (GOLDSIM, 2021). A Tabela 4.2 e Tabela 4.3 exibem as categorias e descrição dos principais elementos.

Tabela 4.2 – Categorias de elementos do GoldSim.









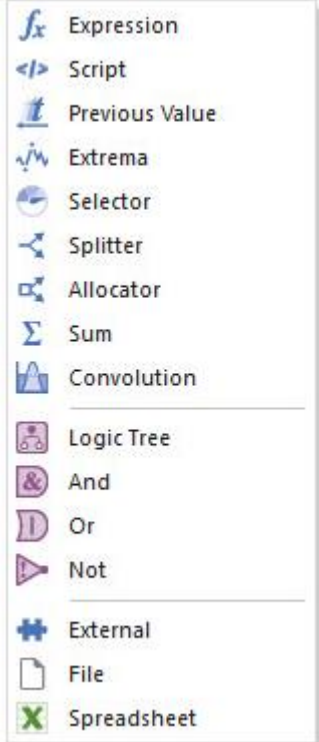

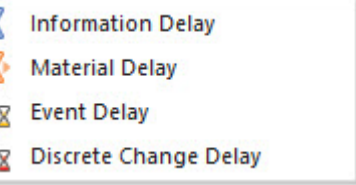
Categoria	Descrição	Elementos
<i>Input</i>	Elementos que definem os dados básicos de entrada	 Data  Stochastic  Time Series  Lookup Table  History Generator
<i>Stock</i>	Computam as saídas integrando numericamente outras variáveis do modelo em relação ao tempo	 Integrator  Reservoir  Pool

Tabela 4.2 – Categorias de elementos do GoldSim.

<i>Funcion</i>	Elementos computam as saídas com base nos valores atuais das saídas de outros elementos	 <ul style="list-style-type: none"> Expression Script Previous Value Extrema Selector Splitter Allocator Sum Convolution Logic Tree And Or Not External File Spreadsheet
<i>Event</i>	Os elementos representam a ocorrência e as consequências de eventos discretos ("repentinos") em um modelo	 <ul style="list-style-type: none"> Timed Event Triggered Event Decision Random Choice Milestone Status Discrete Change Interrupt
<i>Delay</i>	Elementos simulam processos que levam um tempo específico e, portanto, resultam em um atraso na transmissão de material, informações ou sinais em um modelo	 <ul style="list-style-type: none"> Information Delay Material Delay Event Delay Discrete Change Delay
<i>Result</i>	Responsáveis por coletar, analisar e exibir os resultados	 <ul style="list-style-type: none"> Time History Result Final Value Result Distribution Result Multi-Variate Result Array Result

Fonte: Adaptado de Goldsim (2021).

Tabela 4.3 – Principais elementos utilizados no GoldSim.









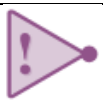




Input		<i>Data Elements</i>	Representa entradas constantes. Pode representar tanto valores quanto condições (verdadeiro/falso).
		<i>Stochastic Elements</i>	Os elementos estocásticos permitem que você represente explicitamente a incerteza nos dados de entrada do seu modelo.
		<i>Time Series</i>	Permite a inserção de dados externos como históricos.
		<i>Lookup Table</i>	Elemento que permite a entrada em termos de tabelas de pesquisa.
		<i>History Generator</i>	Gera séries estocásticas no tempo de variáveis.
Stock		<i>Reservoir</i>	Representa um elemento com objetivo de acumular fluxos.
		<i>Poll</i>	Similar ao reservoír, contudo, permite especificar as entradas e saídas como individuais e colocar em ordem de prioridade.
		<i>Integrator</i>	Elemento que possibilita a integração de taxas
Functions		<i>Expression</i>	Similar ao elemento Data, porém, possibilita a entrada de funções matemáticas.
		<i>Extrema</i>	Computa os valores máximos e mínimos.
		<i>Selector</i>	Permite a utilização de condições.
		<i>Splitter</i>	Divide uma entrada com base em frações de saídas especificadas.

Tabela 4.3 – Principais elementos utilizados no GoldSim.

		<i>Allocator</i>	Aloca uma entrada em um número de saídas de acordo com um conjunto de prioridades.
		<i>Sum</i>	Soma valores.
		<i>And</i>	Opera a lógica "E" em uma lista de condições.
		<i>Or</i>	Opera a lógica "OU" em uma lista de condições.
		<i>Not</i>	Eles executam uma operação lógica "NÃO" sobre um único argumento de entrada
<i>Results</i>		<i>Time History</i>	Exibem o histórico da simulação em função do tempo
		<i>Distribution</i>	Quando o dado de entrada é em uma distribuição de probabilidade o elemento permite visualizar o resultado também na forma de distribuição de probabilidade
		<i>Multi-Variate</i>	Exibe os múltiplos resultados em forma tabular de visualização
		<i>Array</i>	Elemento utilizado quando o modelo utiliza vetores e matrizes

Fonte: Adaptado de Goldsim (2021).

- Método de Monte Carlo

De acordo com Donatelli e Konrath (2005) os matemáticos norte-americanos John Von Neumann e Stanislaw Ulam são considerados os principais autores da técnica. GoldSim (2021) descreve que em cada realização do método de Monte Carlo todos os parâmetros incertos são amostrados (ou seja, um único valor aleatório é selecionado a

partir de uma distribuição de probabilidade) e então todo sistema é simulado ao longo do tempo.

Donatelli e Konrath (2005) apontam que cada variável de entrada na simulação de Monte Carlo é caracterizada pela Função de Densidade de Probabilidade (PDF), sua média e desvio padrão. Assim como, produz a propagação das PDFs nos resultados de saída.

Importante ressaltar que o processo de geração de números aleatórios do GoldSim é baseado em um método apresentado por L'Ecuyer (1988).

- Visualização os resultados

Os resultados podem ser observados, principalmente, através dos elementos *Time History* e *Distribution Results*. O primeiro consiste em um display que exibe todas realizações simuladas no modelo conforme exibe a Figura 4.1. Além disso, também é possível exibir as realizações em um histórico de probabilidades (Figura 4.2) mostrando as bandas percentuais (GOLDSIM, 2021).

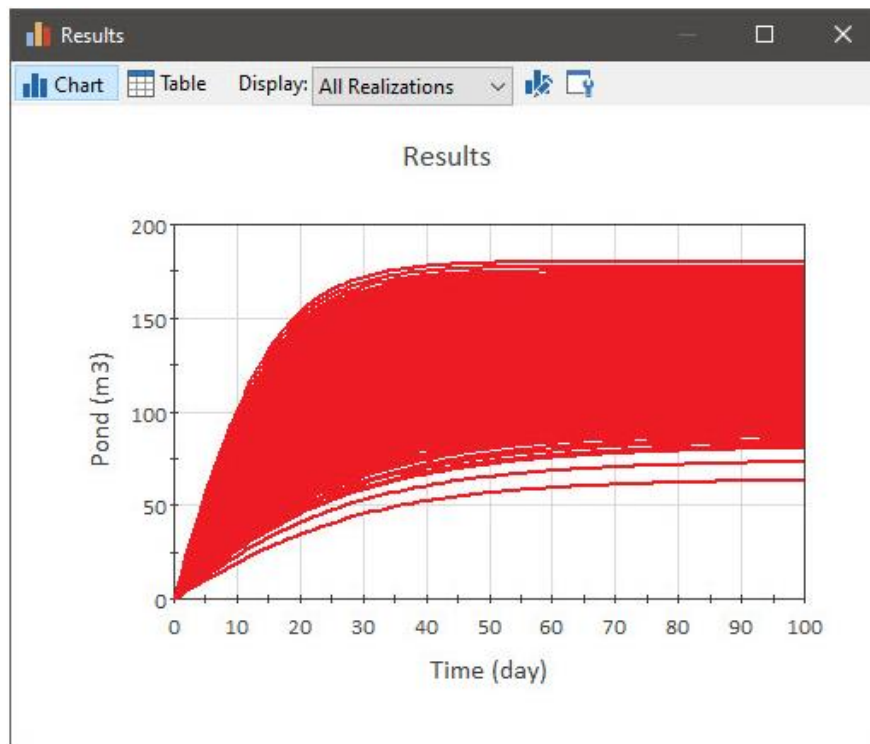


Figura 4.1 – Exemplo das realizações exibidas no Time History.

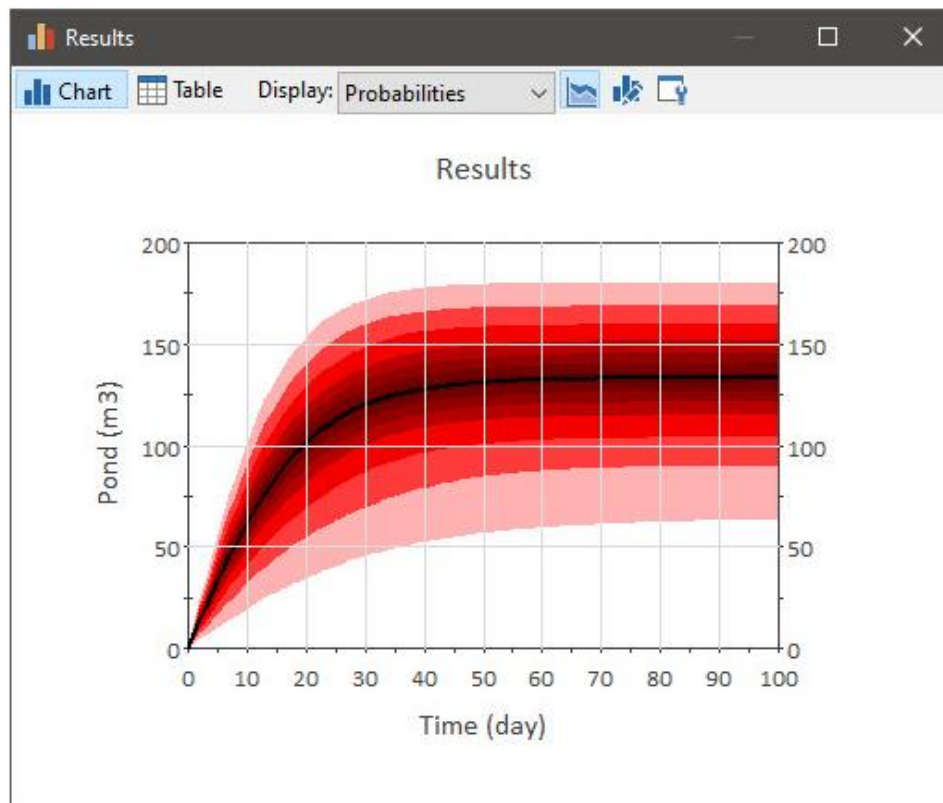


Figura 4.2 – Resultados em bandas percentuais.

Uma outra forma de visualizar os resultados é utilizando o elemento *Distribution Result*. Nele é possível visualizar os resultados em um conjunto comum de percentis (em termos de pares de Probabilidade/Valor Cumulativo). Assim como, estatísticas para a distribuição como por exemplo, média, 5% e 95% de confiança, desvio padrão, Espécie e Curtose (GOLDSIM, 2021).

De acordo com GldSim (2021) a janela possui a seção calculadora que permite que você calcule o valor associado a um determinado percentil ou o percentil associado a um valor particular.

Além disso é possível visualizar os resultados em diferentes modos, são eles: função densidade de probabilidade (PDF), função de distribuição cumulativa (CDF) e complemento da função cumulativa (CCDF) (GOLDSIM, 2021).

A Figura 4.3 exibe a janela do elemento supracitado com os principais detalhes de acordo com o exemplo exibido no manual de usuário.

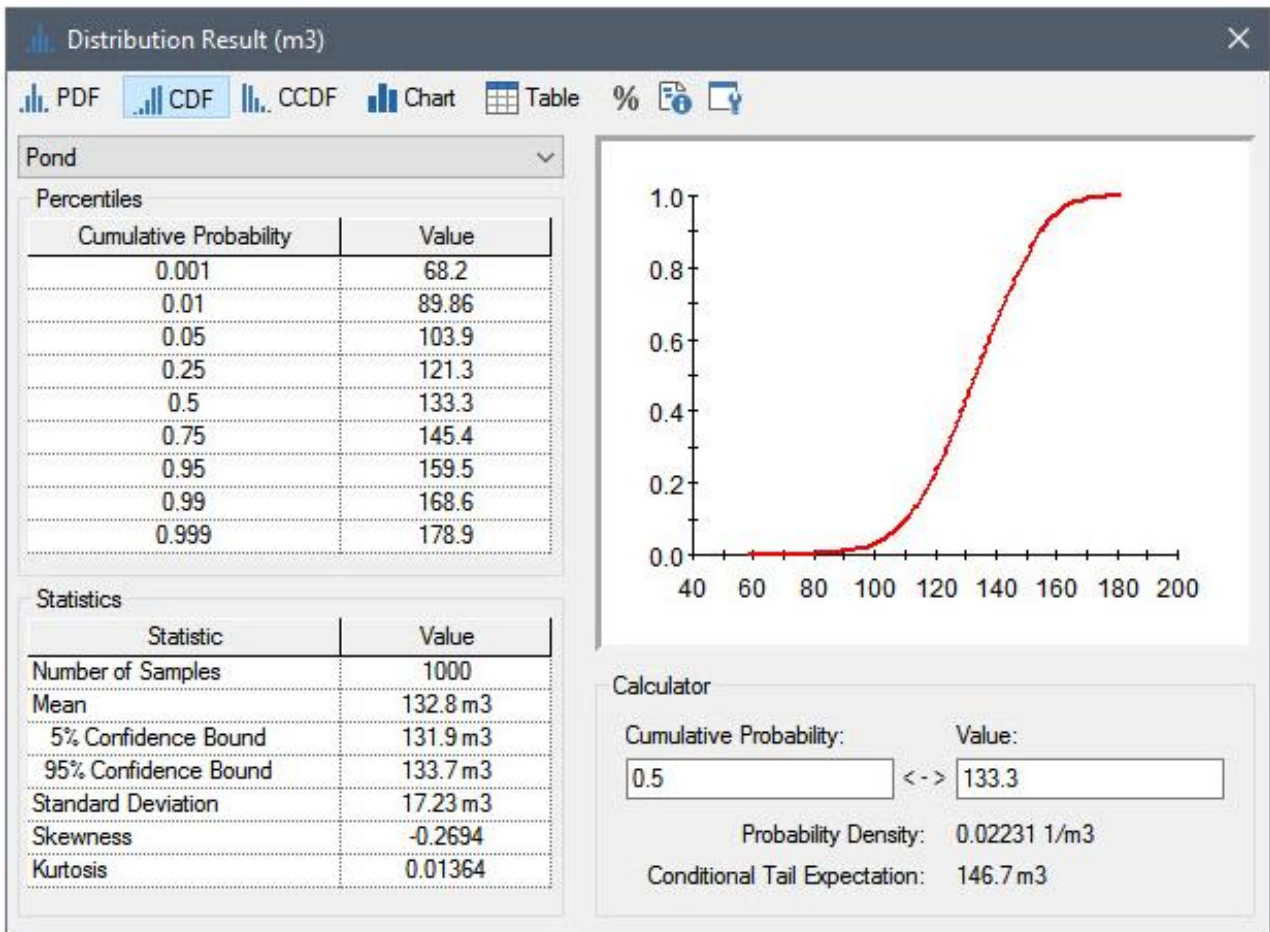


Figura 4.3 – Janela de visualização do elemento *Distribution Result*.

De acordo com GoldSim (2022) um dos diversos usos do *Distribution Result* é quando combinado com o elemento *Extrema* que rastreia os valores de topos e vales ao longo das realizações. A combinação pode, por exemplo, responder a seguinte pergunta: qual a probabilidade de uma vazão exceder determinado valor na simulação.

Conforme mencionado por Chow *et al.* (1988) os modelos determinísticos fazem projeções enquanto que os estocásticos entregam previsões. Nesse sentido, o GoldSim foi selecionado no contexto do presente estudo por se adequar no cenário onde as pequenas barragens de acumulação de água não possuem farta disponibilidade de dados e precisam de direcionamento no planejamento.

Assim, o objetivo esperado com a utilização da ferramenta é direcionar, nortear ou projetar uma direção para que a operação dessas estruturas possa assumir forma e estruturação.

5 ROTEIRO METODOLÓGICO

No contexto da presente dissertação o roteiro metodológico se traduz nas macros etapas que guiam a aplicação do balanço hídrico. As etapas compreendem as fontes de consultas de dados, métodos e programas sugeridos para que seja possível ao final do estudo projetar conclusões sobre o comportamento do reservatório de pequenas barragens de acumulação e a influência sobre o sistema de captação de água.

O roteiro confeccionado será apresentado em forma esquemática através de um fluxograma, assim como, o detalhamento das etapas serão descritas nos tópicos subsequentes.

5.1 Fontes de Consulta de Dados

O desenvolvimento dos estudos que contemplam o roteiro metodológico é subsidiado principalmente por dados hidrológicos, climáticos e informações intrínsecas do local de interesse. Tucci (1993) discute que a dificuldade de obtenção de dados para os estudos em hidrologia e recursos hídricos levaram os hidrólogos a buscar formas de transferências de informações de um local para outro na bacia hidrográfica.

Sabendo a dificuldade de obtenção de informações de pequenas barragens, a metodologia do presente estudo será pautada na utilização de dados secundários para construção dos estudos hidrológicos e no cálculo da evaporação a partir da aplicação de métodos para transferência de dados.

De acordo com Mattar (1996) os dados primários são aqueles que antes não foram coletados, estando ainda em posse dos pesquisados e que são coletados com propósito específico de atender as necessidades da pesquisa. Ainda de acordo com o autor dados os secundários, são o que foram coletados, ordenados e tabulados e as vezes analisados e que estão à disposição dos interessados.

Importante ressaltar que os dados primários agregam precisão ao estudo e em posse destes recomenda-se a utilização ao invés dos dados secundários. Entretanto, dados hidrológicos secundários podem ser acessados através de portais disponibilizados por entidades públicas.

Especificadamente na etapa inicial de levantamento de informações é possível realizar a aquisição de dados pluviométricos e fluviométricos pelo portal HidroWeb de

responsabilidade da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). O Portal é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos (ANA, 2022)

As estações hidrometeorológicas são operadas por entidades parceiras ou contratadas pela agência. Atualmente, de acordo com ANA (2022), fazem parte desta operação: Serviço Geológico do Brasil (CPRM), a Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI/SC), o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE/SP), o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM/MG), o Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ) e as empresas contratadas COHIDRO, CONSTRUFAM e UFC.

A aquisição dos dados de temperatura média do ar e do ponto de orvalho é possível através do banco de dados meteorológicos gerenciado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). O Sistema de Coleta e Distribuição de Dados Meteorológicos do Instituto (temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, precipitação, entre outras variáveis) é dotado de estações de sondagem de ar superior (radiossonda); estações meteorológicas de superfície, operadas manualmente; e a maior rede de estações automáticas da América do Sul (INMET, 2022).

Para as análises espaciais dos dados coletados, no contexto do roteiro metodológico, sugere-se a utilização da ferramenta de QGis, que pode ser definida como um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de código aberto criado pelo projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (QGis, 2021). Já para a simulação do balanço hídrico recomenda-se a utilização do *software* GoldSim.

5.2 Métodos Considerados

Visando apresentar as principais etapas na construção de um modelo que permitirá auxiliar na garantia e operação em sistemas de captação de água em pequenas barragens a Figura 5.1 exibe um roteiro metodológico e sua respectiva sequência

lógica. As principais etapas consistem na aquisição e consistência de dados, cálculo das variáveis hidrológicas e meteorológicas, modelagem do balanço hídrico e a determinação dos resultados. A seguir apresenta-se com maior nível de detalhamento os métodos compreendidos no roteiro para o desenvolvimento de cada etapa.

5.2.1 Aquisição de Dados

As principais informações que representam a etapa de aquisição de dados são:

- Registros Pluviométricos (dados de precipitação);
- Registros Fluviométricos (dados de vazão);
- Temperatura média do ar;
- Temperatura do ponto de orvalho;
- Curva cota x área x volume do reservatório e histórico de levantamentos topobatimétricos;
- Altimetria e localização da barragem (elevação da crista, sistema extravasor, sistema de captação de água, latitude, etc.);
- Outorga de direito de uso, condicionantes de manutenção de vazão mínima, percolação de água; e,
- Histórico de captação de água no reservatório da barragem.

As informações necessárias na construção no modelo de balanço hídrico são principalmente compostas de dados hidrológicos, meteorológicos e dados do local onde o estudo será realizado.

Dessa forma, o item 5.1 abordou sobre os portais onde os dados de precipitação, vazão, temperatura média do ar e ponto de orvalho podem ser obtidos. Já as informações e dados inerentes à barragem alvo do estudo são coletas *in loco*.

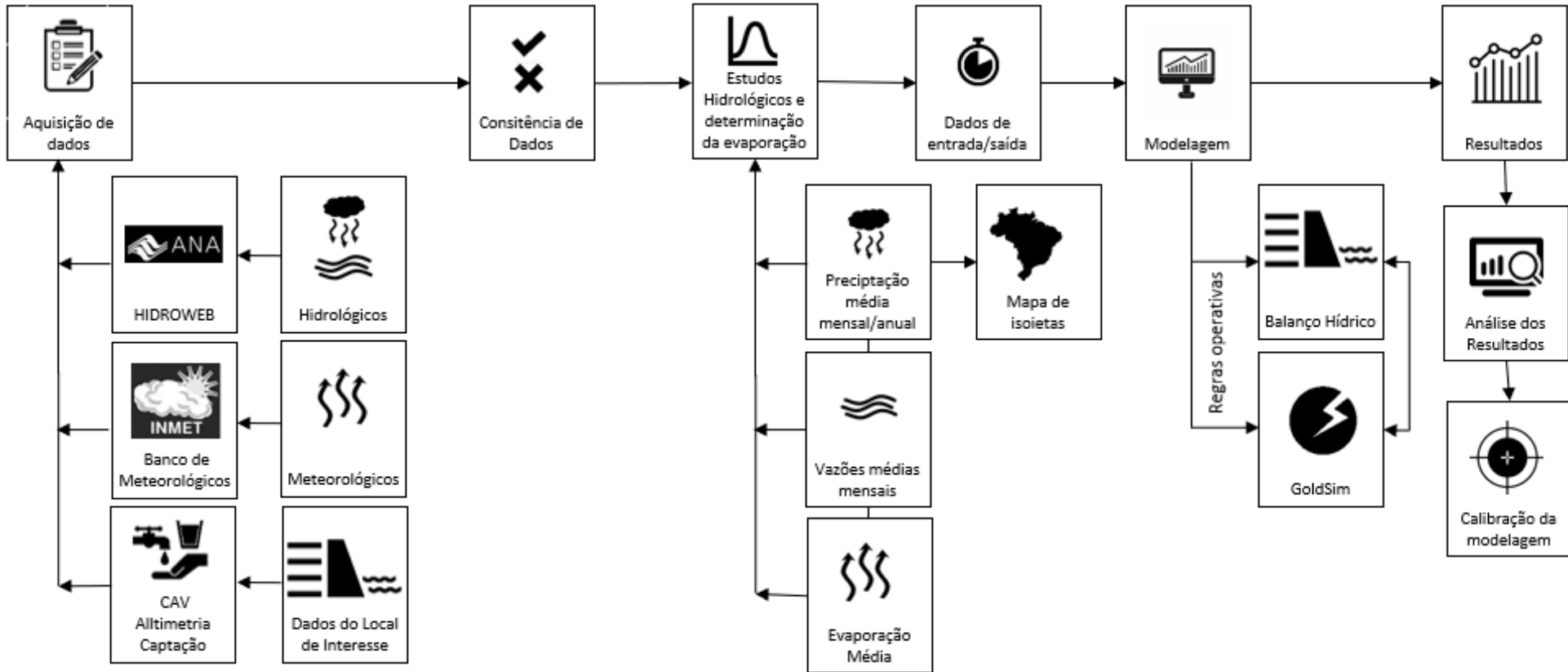


Figura 5.1 – Roteiro metodológico proposto no estudo.
Fonte: Própria (2022)

5.2.2 Consistência de Dados

Dados Pluviométricos: Para o início da consistência dos dados pluviométricos o roteiro sugere o preenchimento dos meses com falhas nas séries históricas a partir do método da ponderação regional abordado em Tucci (1993). É um método normalmente utilizado para o preenchimento de séries mensais ou anuais de precipitações, visando a homogeneização do período de informações disponíveis.

A complemento do preenchimento é possível, do ponto de vista regional, o emprego do método da dupla-massa para verificar a consistência dos dados e validar a premissa de homogeneidade hidrológica entre as estações selecionadas para o desenvolvimento do estudo. O método foi criado pela USGS (1960) e também é discutido nos trabalhos de Mattos e Villela (1975), Tucci (1993), Hartwig (2012) e Collischonn e Dornelles (2013).

Dados Fluviométricos: Algumas inconsistências podem ser encontradas na base de dados fluviométricos da ANA. As incongruências podem ser decorrentes de problemas nos equipamentos de medição, erro de leitura por parte do observador, erro na alimentação do banco de dados, etc. Para a consistência dos dados fluviométricos é importante primeiramente analisar as cotas para a identificação de erros grosseiros. Para tal, pode-se comparar o comportamento de uma estação fluviométrica vizinha no mesmo rio, pois, estas devem apresentar comportamento semelhante.

Avalia-se junto com o cotograma os boletins para identificar, por exemplo, preenchimento incorreto, anotações pertinentes de desnivelamento e estado da régua graduada. Os boletins podem ser consultados a partir de ANA (2010) para pesquisa de ficha de campo. A plataforma permite consultar diversos documentos sobre a seção de medição.

As medições de descarga líquida podem ser analisadas a partir da verificação dos dados disponibilizados de área molhada, largura, profundidade e velocidade média. O produto da área molhada pela velocidade média permite a comparação da vazão medida com a calculada. Ressalta-se que é importante verificar a separação das curvas-chaves ajustadas a partir das descargas líquidas para o cálculo das vazões

durante a série histórica de dados. Para tal, o presente estudo sugere a metodologia empregada no trabalho de Piscoya *et al* (2013) onde a determinação da curva-chave foi feita buscando-se ajustar os pares de valores cota (h) x vazão (Q) a uma equação do tipo potencial de acordo com a metodologia presente em Jaccon e Cudo (1989).

Por fim inclui-se no roteiro a verificação das vazões comparando os hidrogramas da estação base com uma estação no mesmo rio. A análise é subsidiada pelo fato de que mudanças no hidrograma a montante deve acontecer a jusante, desde que, não ocorra interferência de barramentos e intervenções no curso de água entre os instrumentos.

Para a realização da consistência das vazões aconselha-se a utilização do Sistema de Análise de Dados Hidrológicos - SiADH desenvolvido pela ANA. O sistema gera vários gráficos e tabelas referentes às análises de vazões e cotas que permitem ao usuário identificar inconsistências e possíveis incoerências nos dados hidrológicos armazenados em banco de dados da ANA (LOPES, 2013).

Para os dados de temperatura média e temperatura do ponto de orvalho, variáveis de suma importância no cálculo da evaporação, o roteiro metodológico recomenda o preenchimento de falhas a partir da regressão linear múltipla conforme aborda Ventura (2016), onde, compara métodos estatísticos para o preenchimento de falhas em dados meteorológicos.

5.2.3 Estudos Hidrológicos e Estimativa da Evaporação

Para o cenário onde não há medição vazão afluente à barragem, é necessária a transferência de dados a partir da regionalização de vazões. Uma sugestão é a regionalização da vazão média de longo termo abordada em Pinheiro (2011). Onde em uma região hidrológicamente homogênea, a vazão MLT pode ser estimada com base no balanço hídrico simplificado das bacias hidrográficas.

Para aplicação da metodologia é necessário a espacialização da chuva, para através da construção das isoietas de precipitação média anual sobre a área de interesse. A construção das chamadas linhas de mesma precipitação é subsidiada pela

consistência das estações pluviométricas previamente selecionadas para o desenvolvimento do estudo.

Para a construção das isoietas é necessário utilizar a função IDW (*Inverse Distance Weighting*) do QGIS, que por definição implementa explicitamente o pressuposto de que as coisas mais próximas entre si são mais parecidas do que as mais distantes (JAKBO e YOUNG, 2006). Por fim, após a construção da isolinha de precipitação média anual e aplicação da metodologia de regionalização é possível determinar a série de vazões afluentes ao reservatório da barragem.

Para estimativa da evaporação o roteiro metodológico indica a metodologia proposta por Linacre (1977)

5.2.4 Modelagem

O comportamento da variação de nível de água no reservatório é embasado a partir da aplicação do balanço hídrico que, conforme mencionado por Pinheiro (2011), representa a aplicação da equação da continuidade na contabilização das entradas e saídas do sistema.

Dessa forma, de posse das variáveis hidrológicas, meteorológicas e das informações do local de interesse é possível construir um modelo, baseado na aplicação do balanço hídrico, no *software* GoldSim. De forma geral, para as variáveis de entrada do balanço hídrico propõem-se a utilização dos seguintes elementos de lógica, conforme exibe a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Proposta da utilização dos elementos de lógica do software GoldSim.

Reservatório e variáveis do balanço hídrico	Elementos de lógica
Barragem	<i>Pool</i>
Série de vazões mensais	<i>Time Series</i>
Série de precipitações mensais	
Vazão residual	<i>Data Elements</i>
Vazão da captação de água no reservatório	
Elevação da crista da Barragem	
Elevação do sistema extravasor	
Precipitação na área do reservatório	<i>Expression</i>
Curva cota x área x volume	<i>Lookup Table</i>
Evaporação	
Rastreio das cotas	<i>Extrema</i>
Visualização dos resultados	<i>Time History/Distribution Result</i>

Fonte: Própria (2022).

6 ESTUDO DE CASO

O roteiro metodológico descrito no item anterior tem a função de nortear o caminho para a construção de um modelo que permita projetar o comportamento do reservatório de uma pequena barragem de acumulação de água para fins de planejamento. Nesse sentido, buscou-se realizar a aplicação das metodologias supracitadas em um estudo de caso com o objetivo de elucidar a proposta do trabalho. O estudo de caso será aplicado na barragem Brejo Grande em Paraisópolis, Minas Gerais. A estrutura tem o objetivo de acumular água para o abastecimento público do município.

6.1 Caracterização da Área de Interesse

A barragem Brejo Grande, construída na década de 1950, localiza-se em Paraisópolis em Minas Gerais. A principal forma de acesso, a partir do município, se dá pela rodovia estadual MG – 173 sentido São Bento do Sapucaí. A estrutura tem objetivo de acumular água para abastecimento público e atualmente é gerenciada pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Paraisópolis – SAAE. De acordo com IBGE (2022), dados de 2021, a cidade de Paraisópolis possui 331,238 km² de área territorial e uma população estimada de 21.353 mil pessoas.

Em termos potamográficos, a barragem Brejo Grande está implantada na cabeceira de um córrego sem nome que deságua totalmente no reservatório da estrutura. Está fundada na elevação 1407 m nas coordenadas UTM, Longitude 416269.47 e Latitude 7502227.84. Possui crista com aproximadamente 165 metros de comprimento, 5,2 metros de largura e barramento com cerca de 15 metros de altura.

Na ombreira direita está o sistema extravasor, implantado na El. 1404,84 m, de soleira livre com canal retangular de aproximadamente 3 metros de largura e 40 metros de extensão. A área de contribuição do reservatório é 1,23 km² e a bacia hidrográfica é majoritariamente coberta por vegetação densa. A norte do reservatório existe sistema de captação de água composto por duas bombas.

A Figura 6.1 exhibe a localização do empreendimento em relação a rede de drenagem e a Figura 6.2 vista panorâmica da barragem Brejo Grande.

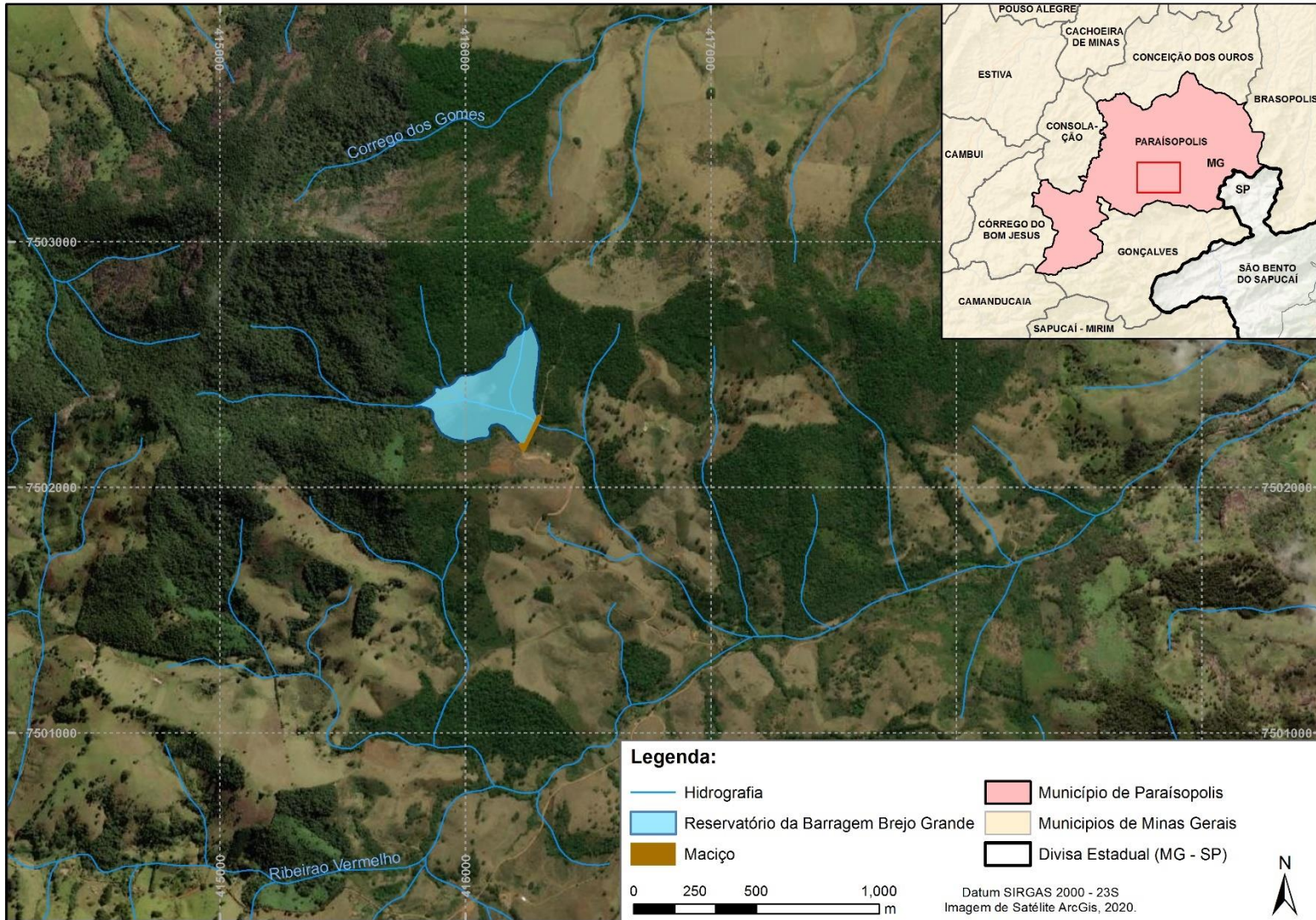


Figura 6.1 – Localização da Barragem Brejo Grande.
Fonte: Própria (2022)



Figura 6.2 – Vista panorâmica da barragem Brejo Grande.
Fonte: Própria (2022).

6.2 Pluviologia

6.2.1 Dados Básicos

Tendo em vista a disponibilidade de dados na região que envolve a área de abrangência deste trabalho, foram analisados os registros de precipitação de estações pluviométricas selecionadas a partir do banco de dados da ANA.

Foram analisados dados de doze estações pluviométricas, sendo que as principais informações a respeito dessas estações estão apresentadas na Tabela 6.1 e a respectiva localização em relação ao empreendimento está mostrada na Figura 6.3.

A seleção das estações pluviométricas em questão levou em consideração a existência e proximidade com o local objeto de estudo. Outro aspecto levado em conta foi a seleção de estações pluviométricas na mesma região climatológica e elevação. O município de Paraisópolis está inserido na Serra da Mantiqueira, dessa forma, foram descartados postos inseridos no divisor de clima.

Tabela 6.1 – Estações pluviométricas selecionadas.

Código	Estação	Município	Altitude (m)	Período de Dados	Coordenadas	
					Latitude	Longitude
2245070	BRASÓPOLIS	BRASÓPOLIS	880	De 01/01/1941 a 01/09/2021	-22,4714	-45,6219
2245011	SÃO BENTO DO SAPUCAÍ	SÃO BENTO DO SAPUCAÍ	895	De 01/04/1937 a 01/09/2021	-22,6858	-45,7353
2245077	POUSO ALEGRE	POUSO ALEGRE	831	De 01/07/1941 a 01/09/2021	-22,2447	-45,9597
2245083	SÃO JOÃO DE ITAJUBÁ	ITAJUBÁ	845	De 01/01/1966 a 01/09/2021	-22,3756	-45,4469
2245084	BAIRRO DO ANALDINO	CONSOLAÇÃO	880	De 01/09/1966 a 01/09/2021	-22,5656	-45,8833
2245104	SAPUCAÍ-MIRIM	SAPUCAÍ-MIRIM	-	De 01/08/1975 a 01/09/2021	-22,7453	-45,7447
2246050	CAMBUÍ (CSME)	CAMBUÍ	900	De 01/07/1941 a 01/09/2021	-22,6078	-46,0394
2245029	ZÉ DA ROSA	SANTO ANTÔNIO DO PINHAL	980	De 01/03/1943 a 01/05/2020	-22,7667	-45,700
2245090	CONCEIÇÃO DAS PEDRAS	CONCEIÇÃO DAS PEDRAS	536	De 01/08/1975 a 01/08/2021	-22,1622	-45,4581
2246127	BORDA DA MATA	BORDA DA MATA	-	De 01/08/1975 a 01/09/2021	-22,2772	-46,1639
2245024	FAZENDA CAPITUVA	GUARATINGUETÁ	550	De 01/09/1957 a 01/10/2014	-22,75	-45,2333
2245054	MONTEIRO LOBATO	MONTEIRO LOBATO	680	De 01/05/1939 a 01/03/2020	-22,9333	-45,8333

Fonte: Própria (2022)

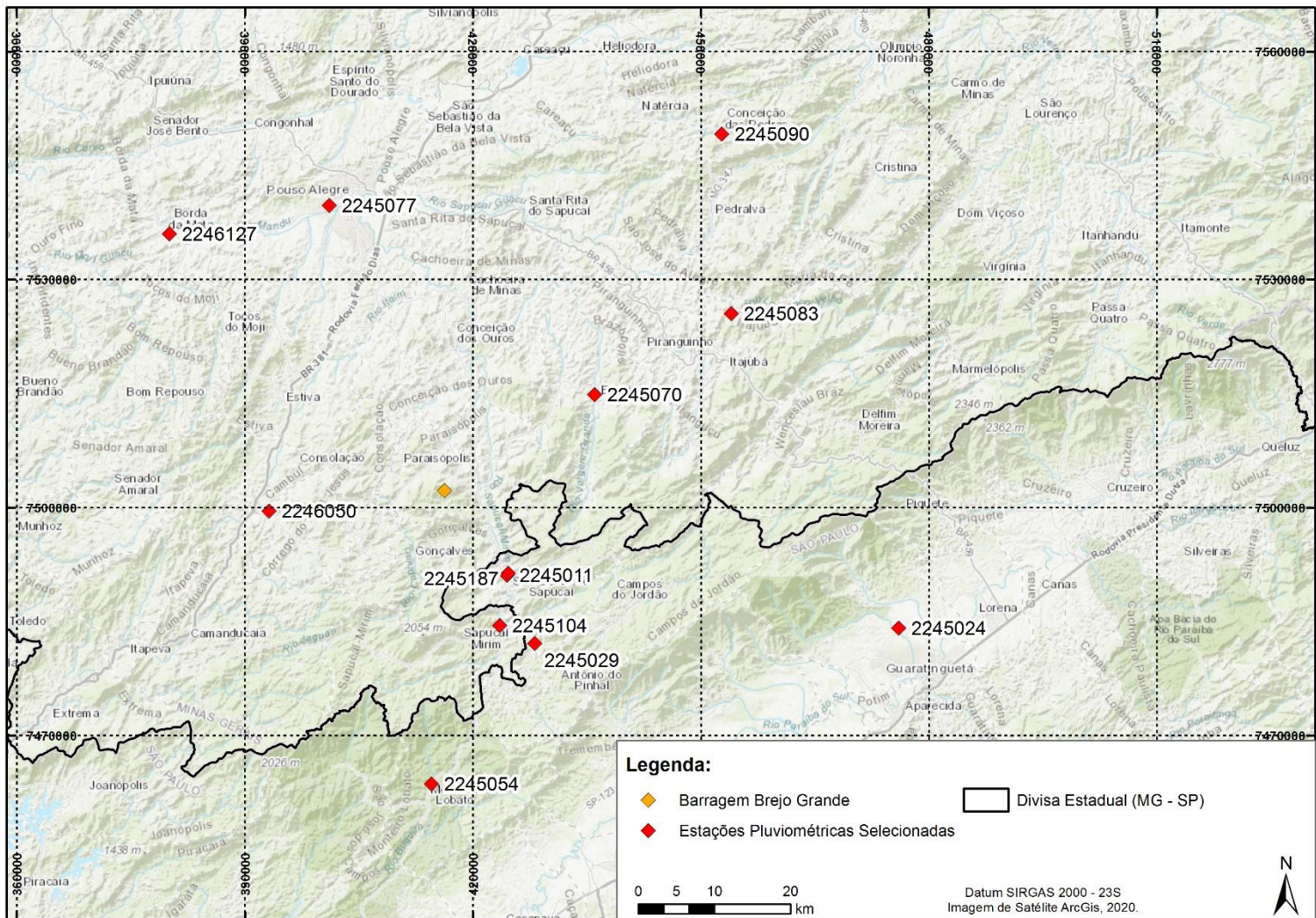


Figura 6.3 – Estações pluviométricas seleccionadas.
Fonte: Própria (2022)

6.2.2 Consistência de Dados

Para o preenchimento dos meses com falhas nas séries históricas das estações pluviométricas foi empregado o método da ponderação regional abordado em Tucci (1993), discutido no Item 5.2.2.

Tendo em conta os períodos de registros diferenciados em cada estação, foi realizada a homogeneização das séries de dados pluviométricos para um período comum de análise, que permitisse, mais adiante, a construção das isolinhas de igual precipitação para toda a área de interesse. Foi possível homogeneizar 49 anos de dados de as todas as estações selecionadas compreendendo o período de 01/1968 a 12/2017.

Após o preenchimento foi feita a análise e consistência de dados do ponto de vista regional para verificar a consistência dos dados e validar a premissa de homogeneidade hidrológica entre as estações selecionadas. Para tal foi empregado o método da dupla massa (USGS, 1960).

Em um primeiro momento, as curvas dupla-massa foram feitas considerando a eliminação dos meses com falhas no registro de informação, na sequência foi feita a homogeneização dos períodos de informação e a verificação de consistência foi novamente realizada, com vistas, inclusive, a validar o procedimento de preenchimento.

Cabe destacar que em algumas estações foi necessário eliminar registros muito discrepantes, considerados inconsistentes. Os gráficos de dupla massa são apresentados no APÊNDICE A.

6.2.3 Precipitação Total Mensal

Considerando o objetivo desse trabalho, especificadamente a necessidade de modelar o balanço hídrico do reservatório da barragem Brejo Grande, determinou-se como mais representativa para o trabalho a estação Bairro do Analdino (2245084).

A série histórica preenchida pela metodologia apresentada anteriormente encontra-se no APÊNDICE B e os totais médios mensais característicos estão ilustrados na Figura 6.4.

Importante destacar que o período entre fevereiro 1968 a novembro de 1972 foi descartado e substituído por preenchimento por conta de períodos discrepantes em relação às estações próximas e períodos subsequentes da própria estação.

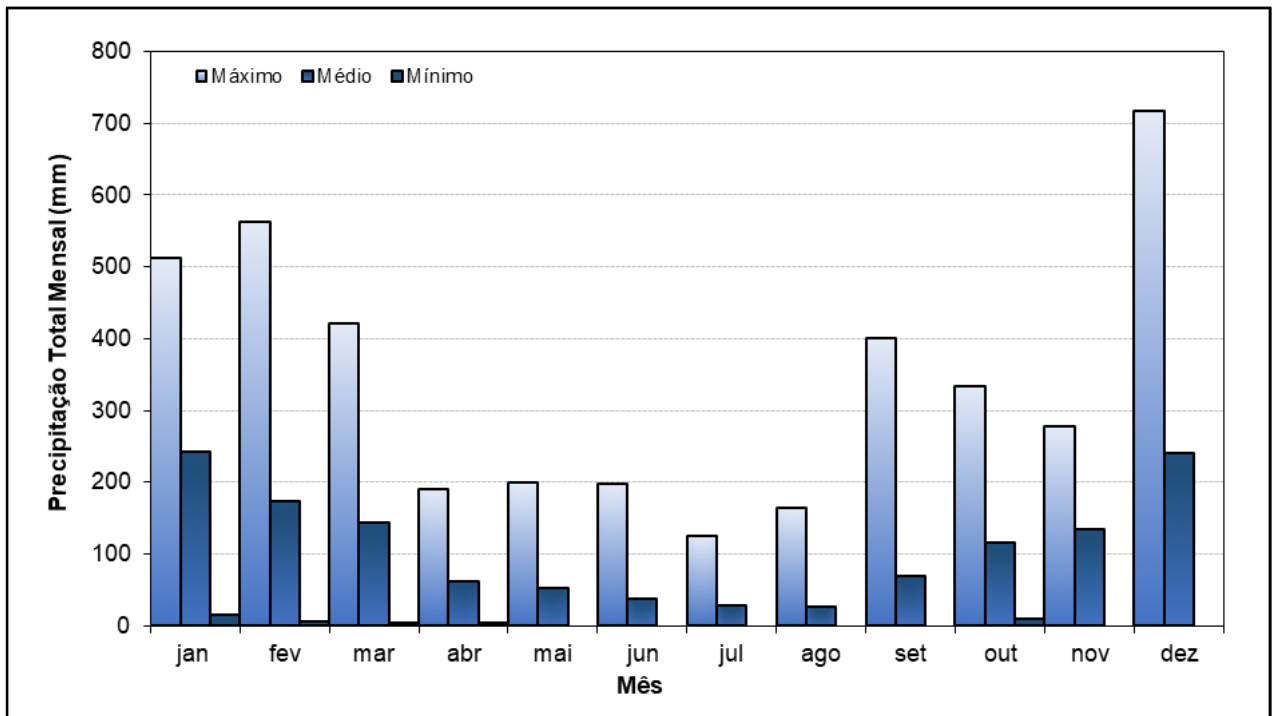


Figura 6.4–Totais mensais de precipitação característicos na estação Bairro do Analdino.
Fonte: Própria (2022)

6.2.4 Precipitação Total Anual

Considerando o período entre 01/1968 a 12/2017, comum a todas as estações após o procedimento descrito anteriormente, foi calculada a precipitação total anual média, para cada estação, mostrada na Tabela 6.2.

Estes dados foram especializados sobre a área de interesse, para permitir traçar o mapa de isoietas de precipitação total anual mostrado na Figura 6.5.

Para tanto, foi utilizada a ferramenta QGis 3.10. A construção das isolinhas realizada principalmente com o auxílio da função IDW (*Inverse Distance Weighting*).

Tabela 6.2 - Precipitação total média anual nas estações pluviométricas selecionadas.

Código	Estação	Precipitação Média Anual (mm)
2245070	BRASÓPOLIS	1401,0
2245011	SÃO BENTO DO SAPUCAÍ	1240,5
2245077	POUSO ALEGRE	1399,9
2245083	SÃO JOÃO DE ITAJUBÁ	1380,1
2245084	BAIRRO DO ANALDINO	1434,4
2245104	SAPUCAÍ-MIRIM	1486,2
2246050	CAMBUÍ (CSME)	1405,3
2245029	ZÉ DA ROSA	1804,5
2245090	CONCEIÇÃO DAS PEDRAS	1550,0
2246127	BORDA DA MATA	1441,7
2245024	FAZENDA CAPITUVA	1411,0
2245054	MONTEIRO LOBATO	1685,7

Fonte: Própria (2022)

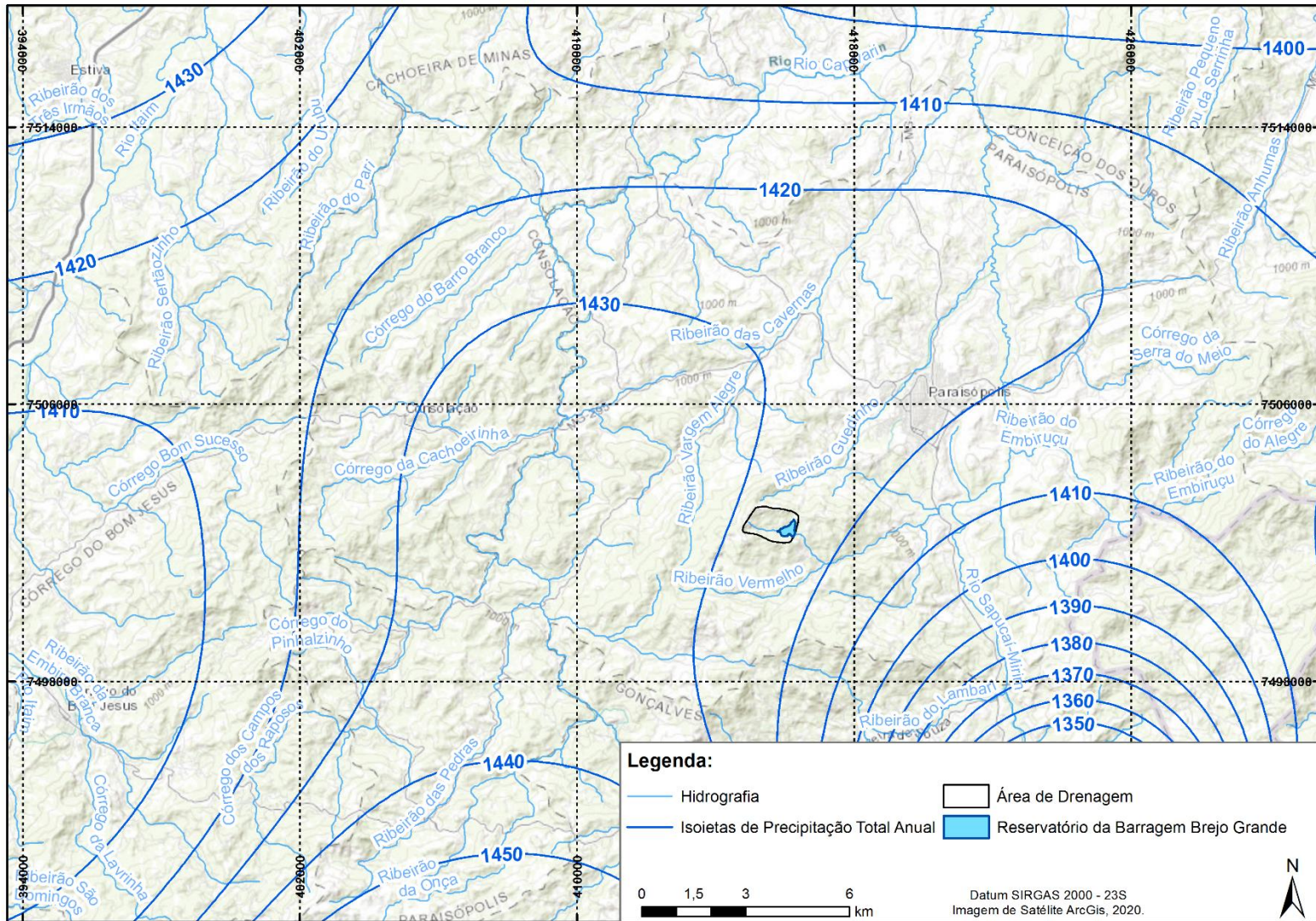


Figura 6.5 – Isolinhas de precipitação total anual média sobre a área da barragem Brejo Grande.
Fonte: Própria (2022)

6.3 Fluviologia

6.3.1 Dados Básicos

Os dados de fluviometria foram obtidos a partir do inventário das estações fluviométricas localizadas no entorno da região de interesse. Como critério de seleção foram considerados a localização em termos hidrográficos, a proximidade à barragem Brejo Grande, a extensão do período de observações, a estabilidade das curvas-chaves e o número de medições de descarga líquida. As informações das estações fluviométricas foram selecionadas a partir do banco de dados da ANA.

A Figura 6.6 exibe a localização das estações fluviométricas analisadas e a Tabela 6.3 apresenta algumas informações sobre estas estações.

Tabela 6.3 - Estações fluviométricas analisadas.

Código	Estação	Município	Disponibilidade de Dados	Área de Drenagem (km ²)	Latitude	Longitude
61343000	BAIRRO DO ANALDINO	PARAISÓPOLIS	De 01/07/1941 a 01/11/2014	247	-22,5575	-45,8825
61295000	BRASÓPOLIS	BRASÓPOLIS	De 01/04/1937 a 01/11/2014	846	-22,4697	-45,6219
61350000	CONCEIÇÃO DOS OUROS	CONCEIÇÃO DOS OUROS	De 01/09/1934 a 01/11/2014	1310	-22,4142	-45,7914

Fonte: Própria (2022).

A primeira análise realizada consistiu na determinação da estação fluviométrica mais representativa, ficando definida a estação Bairro do Analdino (61343000). Desta forma optou-se por descartar as outras estações previamente selecionadas. Os critérios que embasaram esta decisão foram os seguintes:

- Conceição dos Ouros (61295000): a estação possui série histórica robusta, mas com falhas a partir do ano de 2018. Além disso, está localizada no rio Sapucaí Mirim com magnitude alta de área de drenagem quando se comparada as outras estações selecionadas.
- Brasópolis (61295000): assim como a estação anterior, Brasópolis possui série histórica extensa, mas finalizando no ano de 2014. Entre as estações selecionadas é a que está mais distante do empreendimento, localizada no ribeirão Vargem Grande.

- ✓ Bairro do Analdino (61343000): a estação possui longa série histórica de vazões compreendendo o período de 07/1941 a 11/2014, mas com série robusta a partir de 01/1966. Dentre as estações selecionadas e analisadas é a que possui menor área de drenagem e maior proximidade com o empreendimento, pontos importantes para a representatividade no contexto do estudo.

A Figura 6.7 apresenta a delimitação da área de drenagem da estação selecionada para o desenvolvimento do balanço hídrico.

6.3.2 Consistência de Dados

Para a etapa de consistência de dados a estação Bairro do Analdino (61343000) foi submetida a uma análise detalhada, conforme apresentada no item 5.2.2 cujo os passos podem ser assim resumidos:

- Análise dos cotograma a fim de detectar inconsistências nas séries de cotas, tais como erros de metro, para mais ou menos, comportamento anômalo e outros;
- Consistência das medições de descarga líquida, recalculando área molhada e vazão através da velocidade, largura e profundidade média, com valores médios na seção medidora. Valores discrepantes foram corrigidos e aqueles cujas informações eram insuficientes foram eliminados;
- Traçado das curvas-chaves, verificando a coerência das medições de descarga consolidadas, dos períodos de validade, extensão, comportamento e extrapolação das curvas existentes.

A estação possui 233 medições de descarga líquida entre o período de 11/1966 a 09/2013, e destas, 4 medições apresentaram discrepâncias quando analisada área molhada e vazão através da velocidade, largura e profundidade média. As medições foram descartadas e o período correspondente analisados e não se identificou mudanças nas curvas chaves definidas pela ANA.

A estação selecionada não possui falhas a não ser para o mês de dezembro de 1988, que é comum as outras estações selecionadas. Dito isso, o preenchimento do dado faltante foi feito pela média dos meses anteriores. A tendência das curvas-chaves (cota versus vazão) para o período de 1966 a 2014, juntamente com as medições de descarga líquidas realizados pela ANA pode ser visto na Figura 6.8.

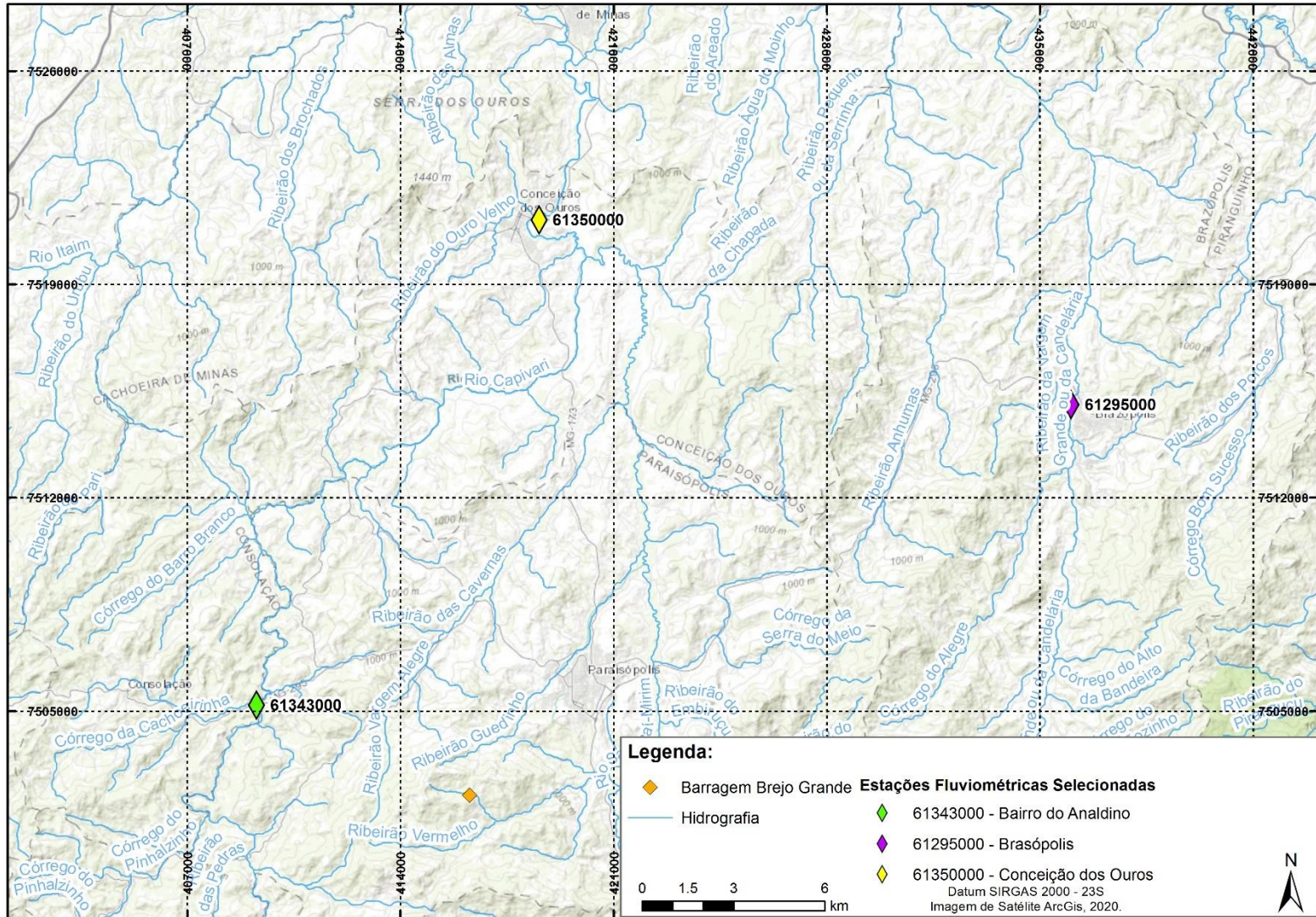


Figura 6.6 – Estações fluviométricas selecionadas.
Fonte: Própria (2022)

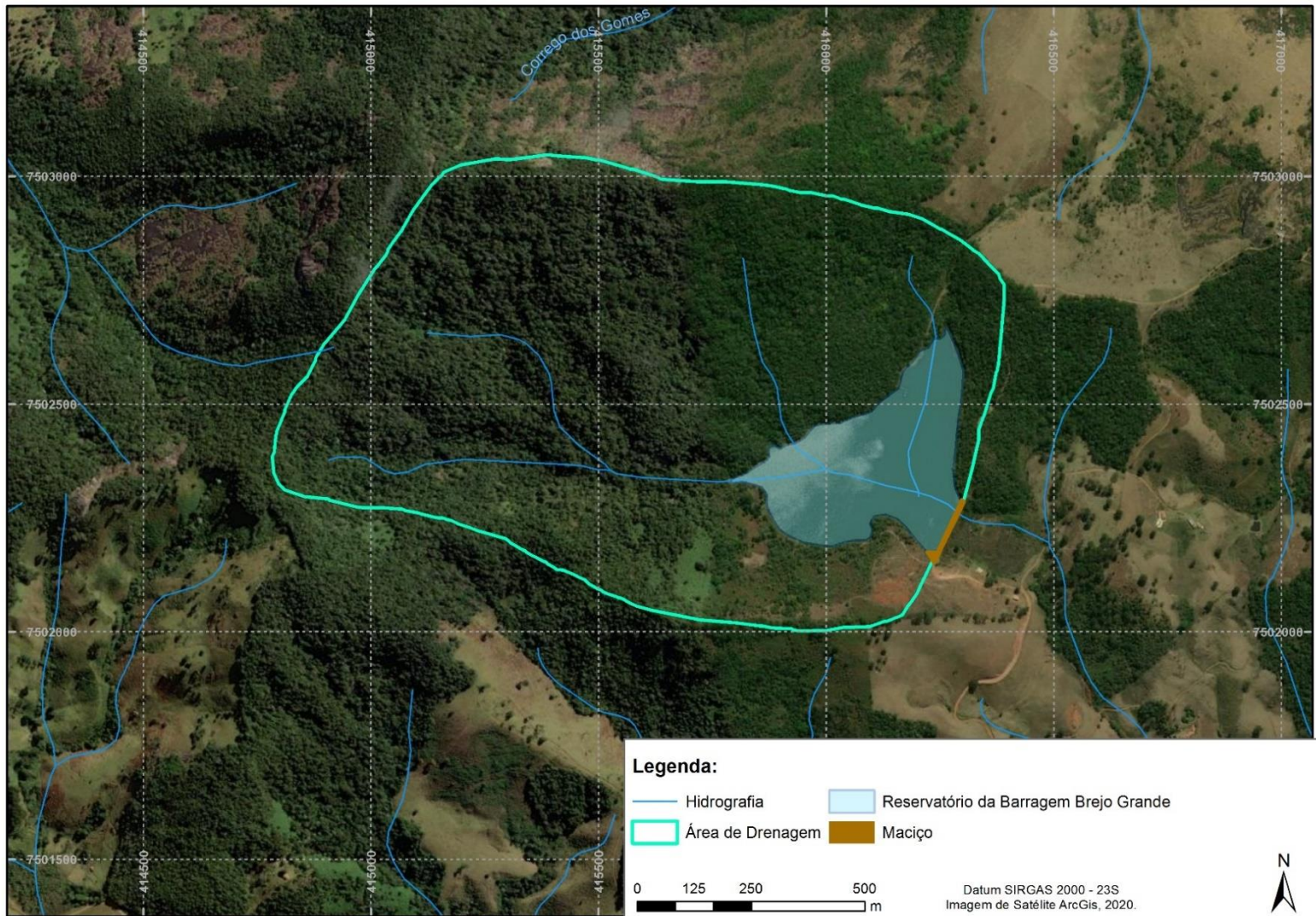


Figura 6.7 – Área de drenagem da Barragem Brejo Grande.
Fonte: Própria (2022)

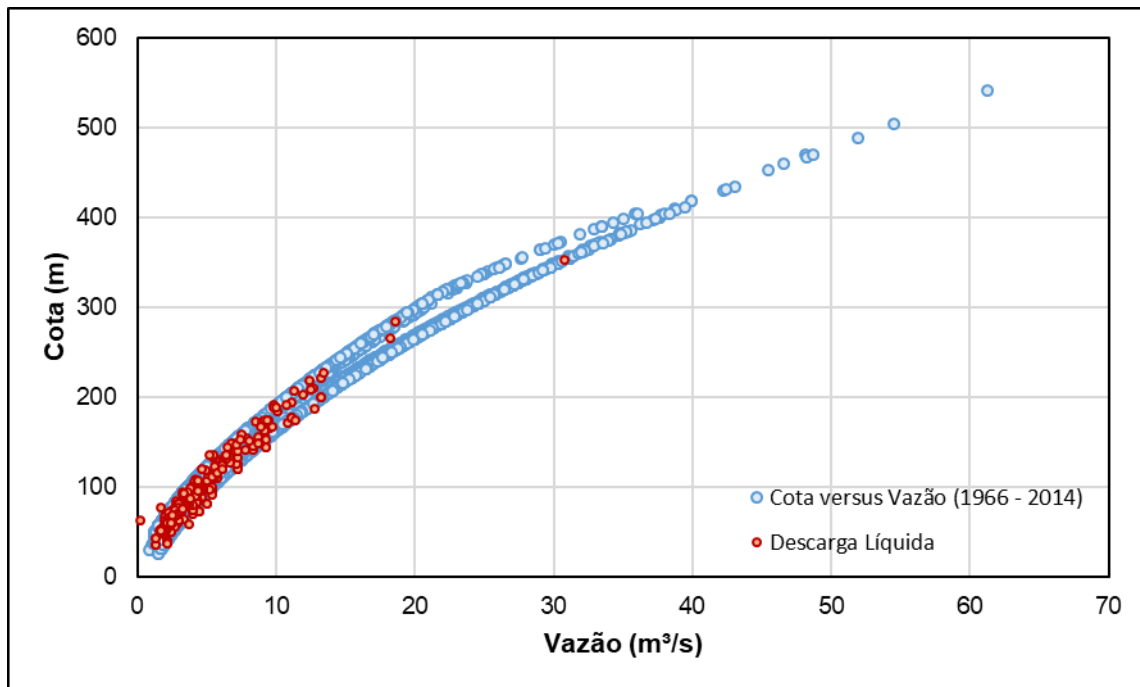


Figura 6.8 – Medição de descarga líquida e traçado das curvas-chaves.
Fonte: Própria (2022)

6.3.3 Vazão Média Mensal

Após a consistência de dados foi possível definir a série de vazões mensais para a estação fluviométrica Bairro do Analdino (61343000) no rio Capivari para o período de 11/1966 a 11/2014. Os dados finais são apresentados no APÊNDICE C.

As séries de vazões médias mensais da estação juntamente com a construção da distribuição espacial das alturas médias de precipitação total anual (isolinhas) sobre a respectiva bacia hidrográfica, possibilitaram a estimativa da evapotranspiração e todas as demais perdas da bacia hidrográfica da estação fluviométrica.

Na obtenção do referido valor de evapotranspiração e perdas foi aplicada a equação simplificada de balanço hídrico de bacias hidrográficas (Equação 4) abordada em Pinheiro (2011). A proporção das perdas em relação à precipitação média anual para estação fluviométrica base, a saber 43,3%, foi adotada para a área de estudo.

A Tabela 6.4 apresenta os resultados obtidos a partir da determinação das vazões médias mensais e média de precipitação total anual e a Figura 6.9 as isolinhas na bacia hidrográfica do rio Capivari na estação Analdino (61343000).

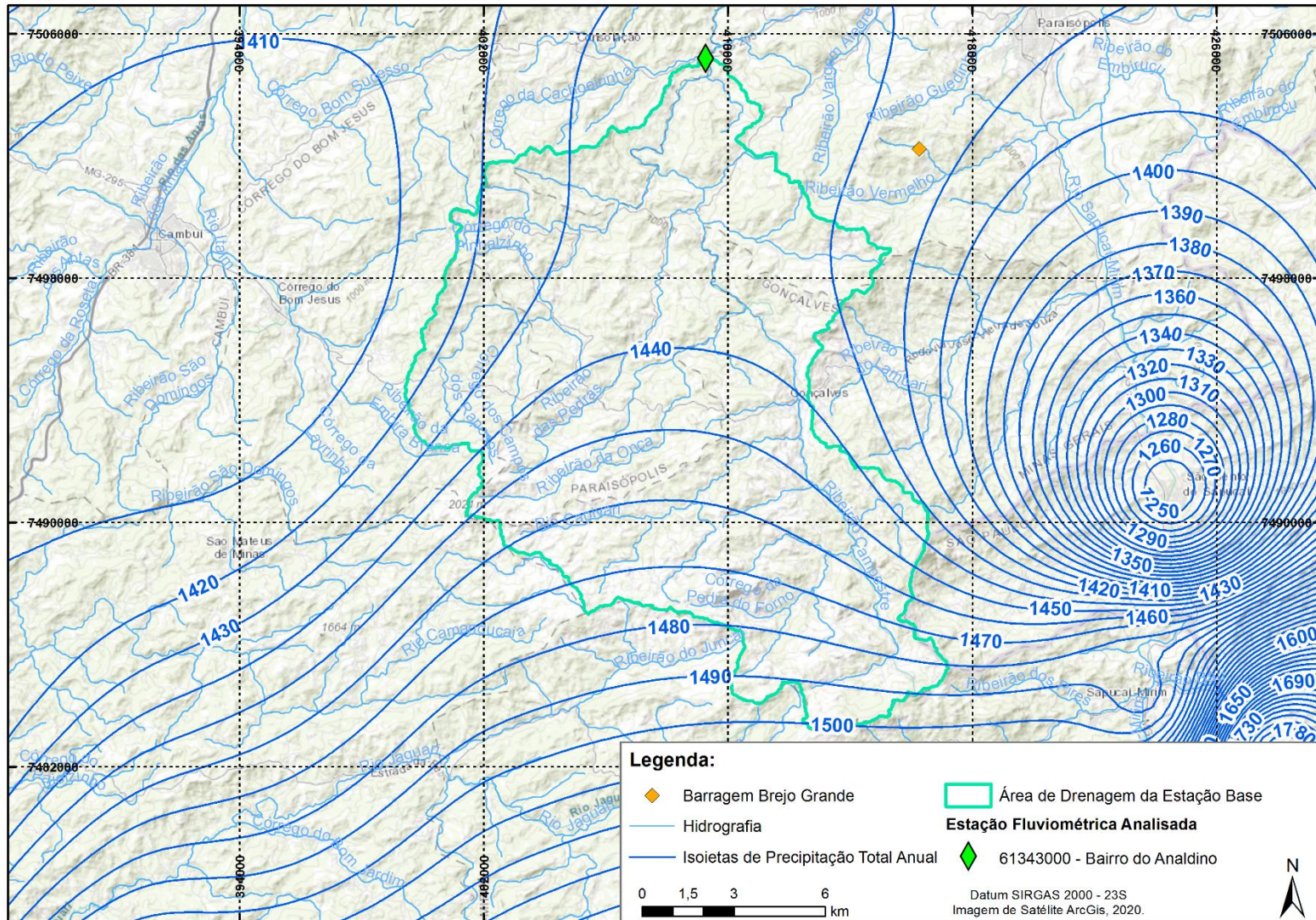


Figura 6.9 – Isolinhas de precipitação total anual média sobre a área de drenagem da estação Analdino (61343000).
Fonte: Própria (2022)

Tabela 6.4 – Indicadores da estação fluviométrica Bairro do Analdino (61343000).

Parâmetro	Fazenda Barraca (56787000)
Área de Drenagem	247 km ²
Vazão Média de Longo Termo (Q _{MLT})	6,13 m ³ /s
Deflúvio Médio Anual	783,2 mm
Precipitação média anual total	1446,8
Vazão Específica Média de Longo Termo (Q _{ESPC.})	24,8 L/s.km ²

Fonte: Própria (2022)

Os resultados apresentados na Tabela 6.4 subsidiaram a aplicação da técnica de transferência de relação das vazões características abordada em Pinheiro (2011). Assim, a vazão média de longo termo para a bacia hidrográfica da barragem Brejo Grande foi determinada a partir da Equação 5.

Assim como para a estação base, o valor de precipitação total anual média para a bacia hidrográfica da barragem Brejo Grande foi definido por meio de ponderação regional, utilizando o mapa de isolinhas apresentado na Figura 6.5.

A partir do valor de vazão média de longo termo determinado pelo método descrito, foi calculada a série de vazões médias mensais utilizando a Equação 7.

$$Q_{SEC} = Q_{EST.REF} \frac{Q_{MLT-SEC}}{Q_{MLT-EST.REF}} \quad \text{Equação 7}$$

Em que o índice SEC corresponde ao local de interesse, o índice EST.REF à estação fluviométrica base, Q é a vazão média mensal (m³/s) e Q_{MLT}, a vazão média mensal de longo termo (m³/s). A série de vazões médias mensais para a barragem Brejo Grande é apresentada no APÊNDICE D.

6.4 Evaporação

Conforme mencionado, a barragem Brejo Grande está implantada na elevação 1407 m no sul de Minas Gerais. Dito isso, e aliado ao fato de a região possuir escassez de dados meteorológicos a evaporação do reservatório foi calculada a partir da equação proposta por Linacre (1977). A metodologia leva em consideração a altitude,

temperatura média do ar, temperatura do ponto de orvalho e latitude, com aplicabilidade em diversos climas.

Para o cálculo da evaporação foram utilizados dados da estação meteorológica Maria da Fé (A531) disponibilizados no banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021). A estação, no contexto da área de interesse, foi selecionada pelo critério de proximidade e por estar localizada em patamar alto de elevação. A Tabela 6.5 apresenta informações sobre a estação meteorológica e a Figura 6.11 a localização.

Tabela 6.5 – Estação Meteorológica.

Nome	MARIA DA FÉ
Código da Estação	A531
Latitude	-22,31
Longitude	-45,37
Situação	Operante
Período de dados	23/05/2007 a 01/01/2022
Periodicidade da medição	Diária

Fonte: Própria (2022)

A estação possui poucas falhas diárias de temperatura média do ar e do ponto de orvalho, a não ser o mês de junho de 2018, que está incompleto e foi descartado dos cálculos e análises. A partir dos dados diários foi possível calcular a evaporação média mensal para o período de 07/2007 até 12/2021. A série histórica calculada é apresentada no APÊNDICE E e o gráfico com as médias mensais totais na Figura 6.10.

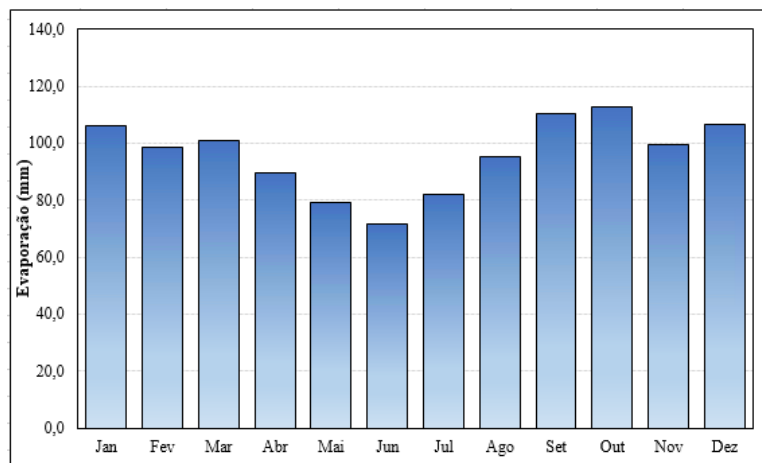


Figura 6.10 – Médias mensais totais de evaporação de lâmina de água para área de interesse.
Fonte: Própria (2022).

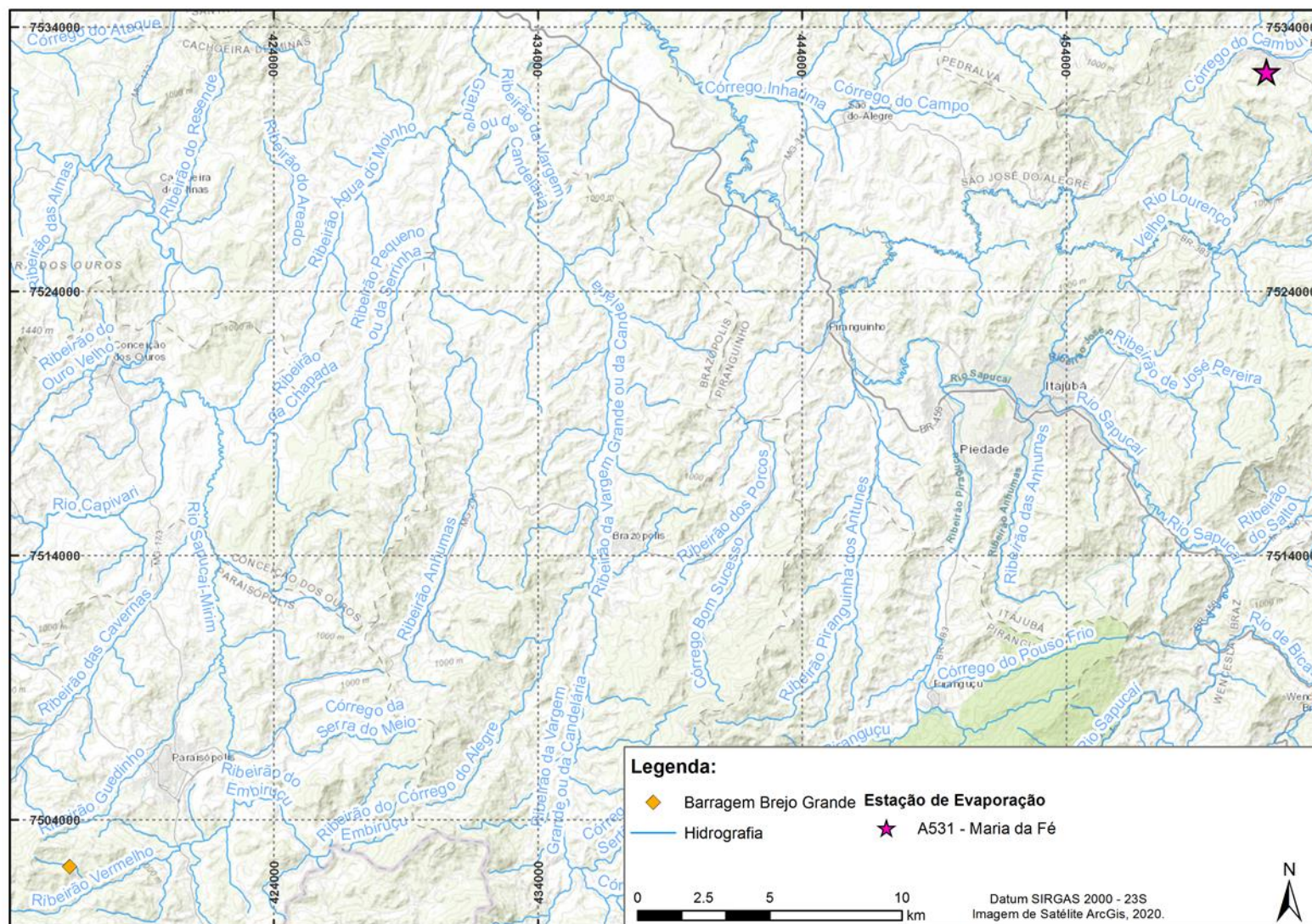


Figura 6.11 – Localização da estação de evaporação Maria da Fé em relação à barragem Brejo Grande.
Fonte: Própria (2022).

6.5 Balanço Hídrico

A projeção do comportamento do reservatório da barragem Brejo Grande pode ser obtida pela simulação do seu balanço hídrico, que conforme mencionado, representa a aplicação da equação da continuidade na contabilização das entradas e saídas do sistema (PINHEIRO, 2011).

Assim, as principais entradas consideradas no estudo foram: (i) vazão afluente; e, (ii) precipitação direta sobre o lago. Já as saídas consideradas para o reservatório foram: (i) vazão captada; e, (ii) evaporação direta do lago. As potenciais perdas por infiltração foram desconsideradas. Na Figura 6.12 são apresentadas de forma esquemática, as variáveis de entrada e saída de água, utilizadas na simulação do balanço hídrico do reservatório.

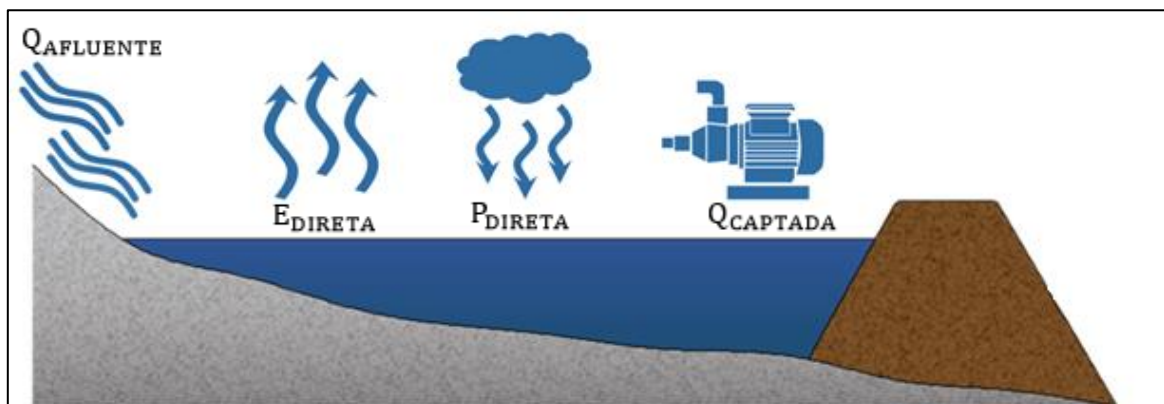


Figura 6.12 – Representação esquemática do balanço hídrico do reservatório da barragem Brejo Grande.

Fonte: Própria (2022)

Como entradas tem-se:

- $Q_{AFLUENTE}$, que representa vazão natural da bacia de contribuição incremental a montante do exutório considerado, determinada no Item 6.3.3; e,
- P_{DIRETA} , que denota a precipitação total sobre a superfície do espelho de água formado pelo reservatório. As séries de precipitações utilizadas correspondem àquelas obtidas, nos estudos de pluviologia, detalhada no Item 6.2.3.

Como saídas tem-se:

- E_{DIRETA} , correspondente à da série de evaporação calculada para a área de interesse e apresentada no Item 6.4; e,
- Q_{CAPTADA} , que representa a parcela de água a ser captada no reservatório para atendimento às demandas do SAAE – Paraisópolis para abastecimento público.

Os dados do local de interesse como por exemplo, levantamento topográfico, curva cota, área e volume, nível mínimo operacional do sistema de bombeamento e capacidade da estação de tratamento de água foram disponibilizadas pelo SAAE Paraisópolis para a construção do modelo do balanço hídrico. A Figura 6.13 exibe a curva cota, área e volume do reservatório e Tabela 6.6 as informações altimétricas da barragem Brejo Grande.

Tabela 6.6 – Parâmetros de entrada do balanço hídrico da barragem Brejo Grande.

Parâmetro	Barragem Brejo Grande
Área de Drenagem Total	1,23 km ²
Batimetria	12 de dezembro de 2021
Nível de água	El. 1398,6 m
Cota da Soleira Vertente	El. 1404,84 m
Nível de Água Mínimo Operacional	El. 1388,6 m

Fonte: Própria (2022).

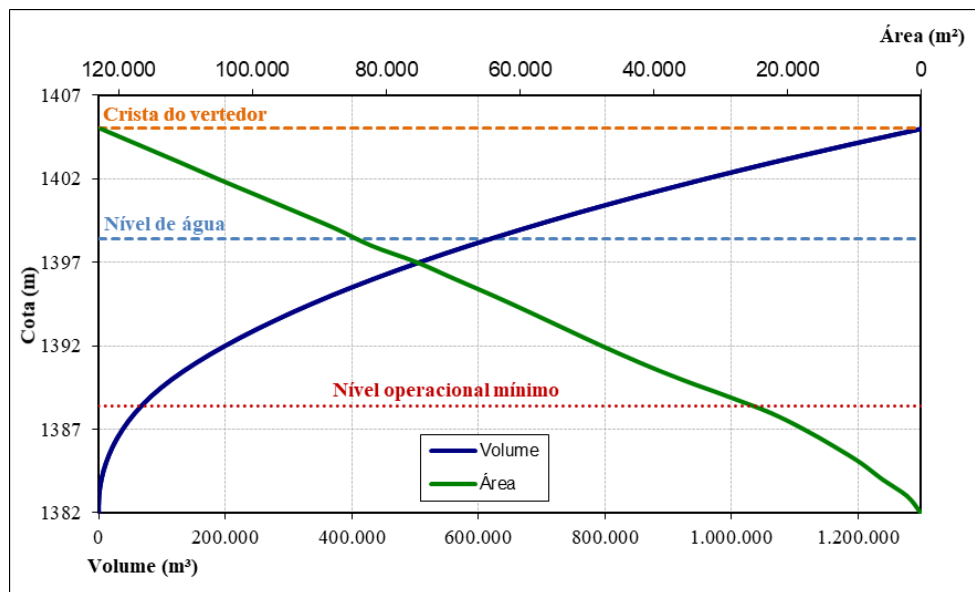


Figura 6.13 – Curva cota, área e volume do reservatório da barragem Brejo Grande.

Fonte: Própria (2022).

Importante ressaltar que não é previsto a manutenção de vazão residual a jusante da estrutura. Ainda nesse sentido o nível de água, a saber, El. 1398,6 m, foi definido a partir da batimetria realizada em 12 de dezembro de 2021. O nível de água mínimo operacional foi determinado na cota mínima de operação do conjunto de bombas responsáveis pela captação de água, definido a partir do levantamento topográfico disponibilizado pelo SAAE Paraisópolis.

De acordo com SAAE - Paraisópolis (2022) a estação de tratamento de água – ETA pode operar em média com 162 m³/h vazão. Em dezembro de 2021 foi necessário rebaixar o nível do reservatório para a El. 1398.6 com o objetivo de implementar atividades de manutenção do maciço do barramento. As obras para a melhoria da estrutura têm horizonte de planejamento de 3 anos.

6.5.1 Modelagem no GoldSim

Conforme mencionado por Chow *et al.* (1988) no modelo estocástico as saídas são ao menos parcialmente aleatórias e entregam projeções. Para o GoldSim (2021) a propagação das incertezas é realizada pela simulação de Monte Carlo que segundo Yoriyaz (2009) pode ser descrito como um método estatístico, no qual se utiliza uma sequência de números aleatórios para a realização de uma simulação.

Ainda de acordo com Yoriyaz (2009) a essência do método de Monte Carlo consiste em estimar determinadas quantidades, observando-se o comportamento de um número grande de eventos individuais.

GoldSim (2021) discute que o número de realizações de Monte Carlos é em função das perguntas que está tentando responder com o modelo. Contudo, quando se está interessado em resultados próximos à calda da distribuição de resultados uma regra geral é utilizar realizações na ordem de .

Para o presente estudo foram consideradas 1.000 realizações de Monte Carlo na modelagem do balanço hídrico. Os *inputs* de entrada e saída foram considerados no período disponível de dados de cada variável discutida nos itens anteriores. As simulações partiram no nível de água definido na batimetria do dia 12 de dezembro de 2021. Foi considerado o horizonte de planejamento de 3 anos.

O procedimento para extração dos resultados foi feito da seguinte maneira, a saber:

- O sistema foi simulado variando a vazão até a capacidade de operação da ETA operada pelo município (162 m³/h);
- Utilizou-se o elemento *Extrema* para identificar o comportamento do sistema através do rastreo dos topos e vales de cada realização;
- A partir do visualizador *Distribution Results* foi extraída a probabilidade não excedência da condição de restrição operacional, e;
- Construído um gráfico de vazão *versus* probabilidade de não excedência da condição de restrição para a variação de vazão.

Para as simulações foi utilizada a versão para estudantes e pesquisadores do software GoldSim disponibilizada pela *GoldSim Technology Group*. A Figura 6.14 apresenta a forma esquemática da utilização dos elementos de lógica do GoldSim para a modelagem conforme as premissas discutidas anteriormente.

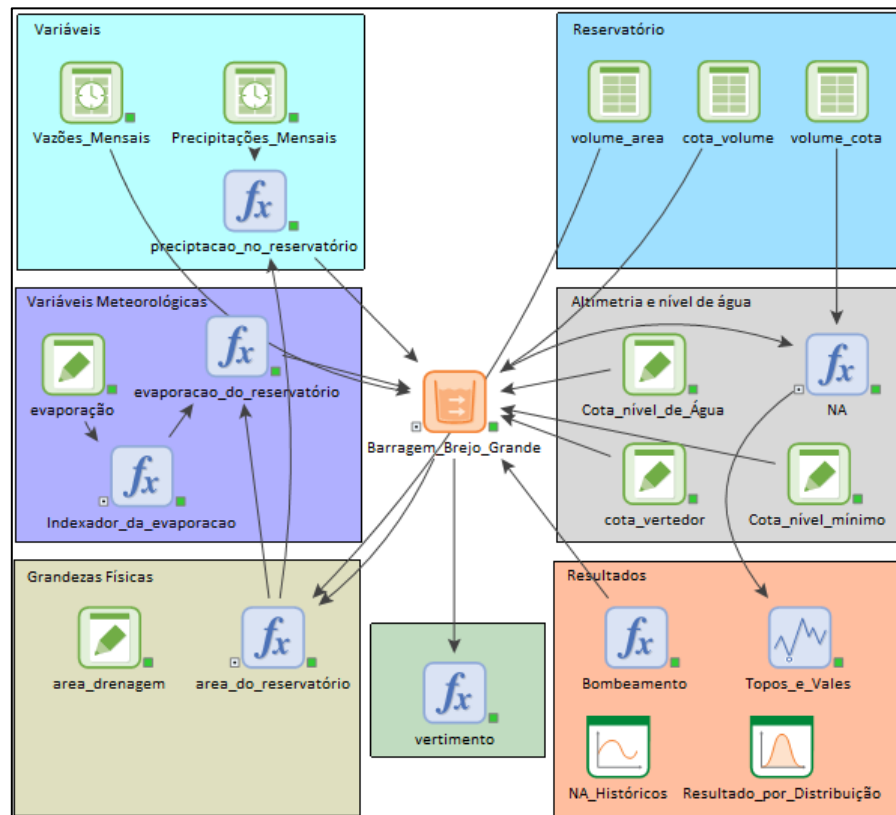


Figura 6.14 – Esquema dos elementos lógicos do GoldSim®.
Fonte: Própria (2022).

6.6 Resultados do Estudo de Caso

Conforme mencionado, a fim de projetar e avaliar o comportamento da Barragem Brejo Grande o sistema construído no GoldSim foi avaliado na faixa de vazão média que pode ser operada pela ETA de Paraisópolis.

As realizações começaram a indicar comportamento rumo a restrição operacional, mesmo que poucas em relação ao todo, no intervalo de vazões entre 80 m³/h e 90 m³/h. Dessa forma, o sistema foi simulado variando a vazão até o valor de 162 m³/h.

Entre Figura 6.15 e Figura 6.17 são exibidos os gráficos da variação de nível de água de acordo com as realizações a fim de ilustrar o comportamento do reservatório ao longo das simulações. Além disso, são apresentados os percentis das realizações conforme a propagação das funções de densidade de probabilidade no tempo.

Para a faixa de vazões simuladas foi extraída da função de distribuição cumulativa (CDF) a probabilidade de não excelência da restrição operacional, assim como, os limites de confiança de 5% e 95%. A Figura 6.18 exibe a gráfico com os resultados.

De acordo com Yoriyaz (2009) o método de Monte Carlo é qualificado pela impraticabilidade em se obter a solução exata do problema, mas o que se espera é a estimativa à medida que um número suficientemente grande de amostra é processado.

Diante do exposto, é possível observar o comportamento do reservatório da Barragem Brejo Grande no sentido de atingir a restrição operacional de acordo com o incremento da vazão de captação.

Não muitas realizações começam a atingir o nível operacional mínimo entre 90 m³/h e 100 m³/h, o que não necessariamente incide no cenário de interferência na captação de água, já que observando a Figura 6.18 é possível identificar que as chances de o nível exceder a cota de restrição são altas.

Através dos resultados é possível observar que o melhor cenário para a captação na estrutura é transitar na região de vazões entre 100 m³/h a 110 m³/h, já que, o comportamento do reservatório não indica atingir o nível mínimo operacional. Para vazões acima, as chances de exceder a El. 1388.6 tornam-se baixas, ou seja, o nível de água permanecerá próximo à região de restrição.

Dessa forma, no cenário de demandas acima de 110 m³/h – 110 m³/h para a ETA, outros pontos de disponibilidade hídrica devem ser mapeados em Paraisópolis.

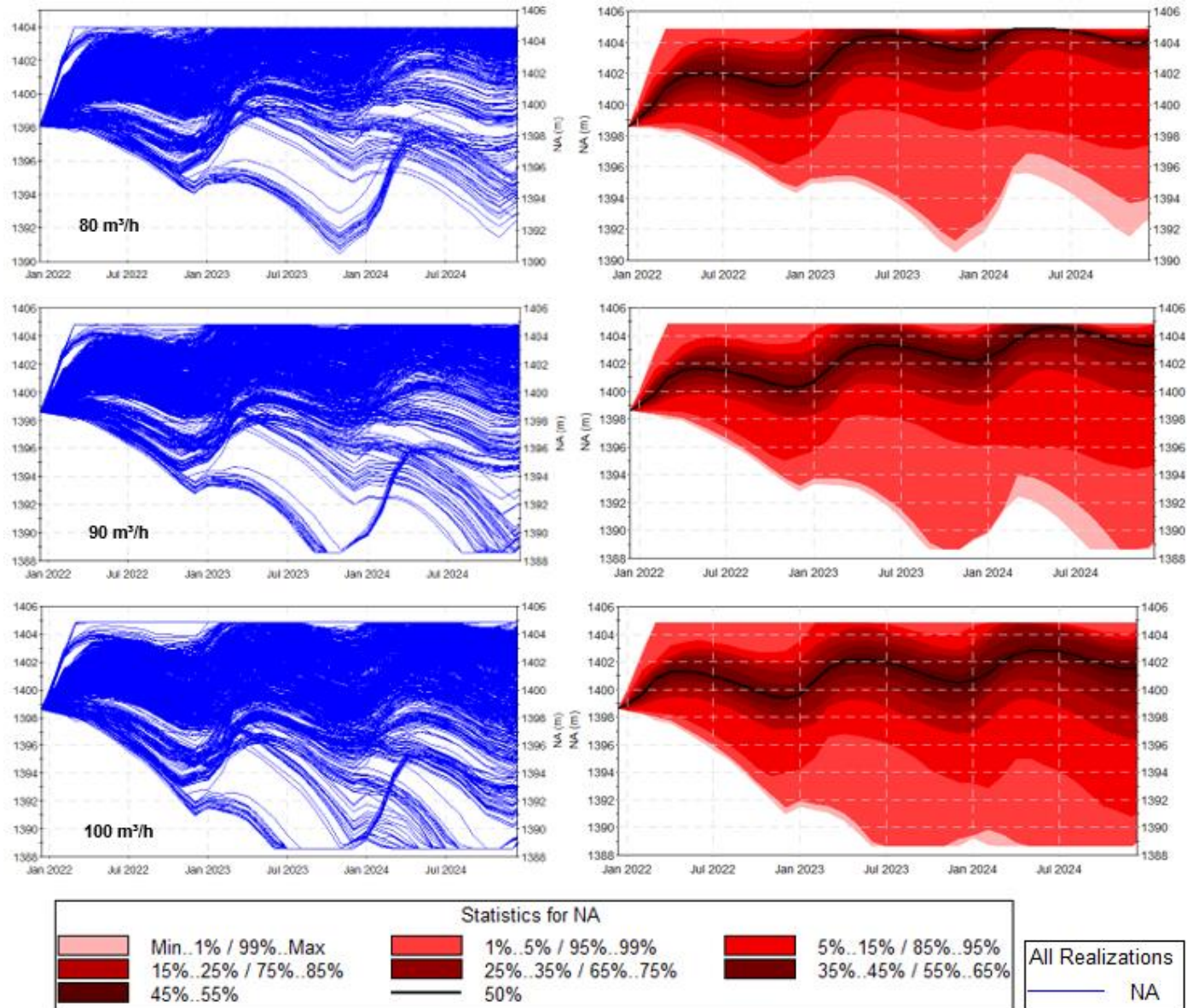


Figura 6.15—Comportamento do reservatório para captação de 80 m³/h a 100 m³/h. Fonte: Adaptado GoldSim (2022).

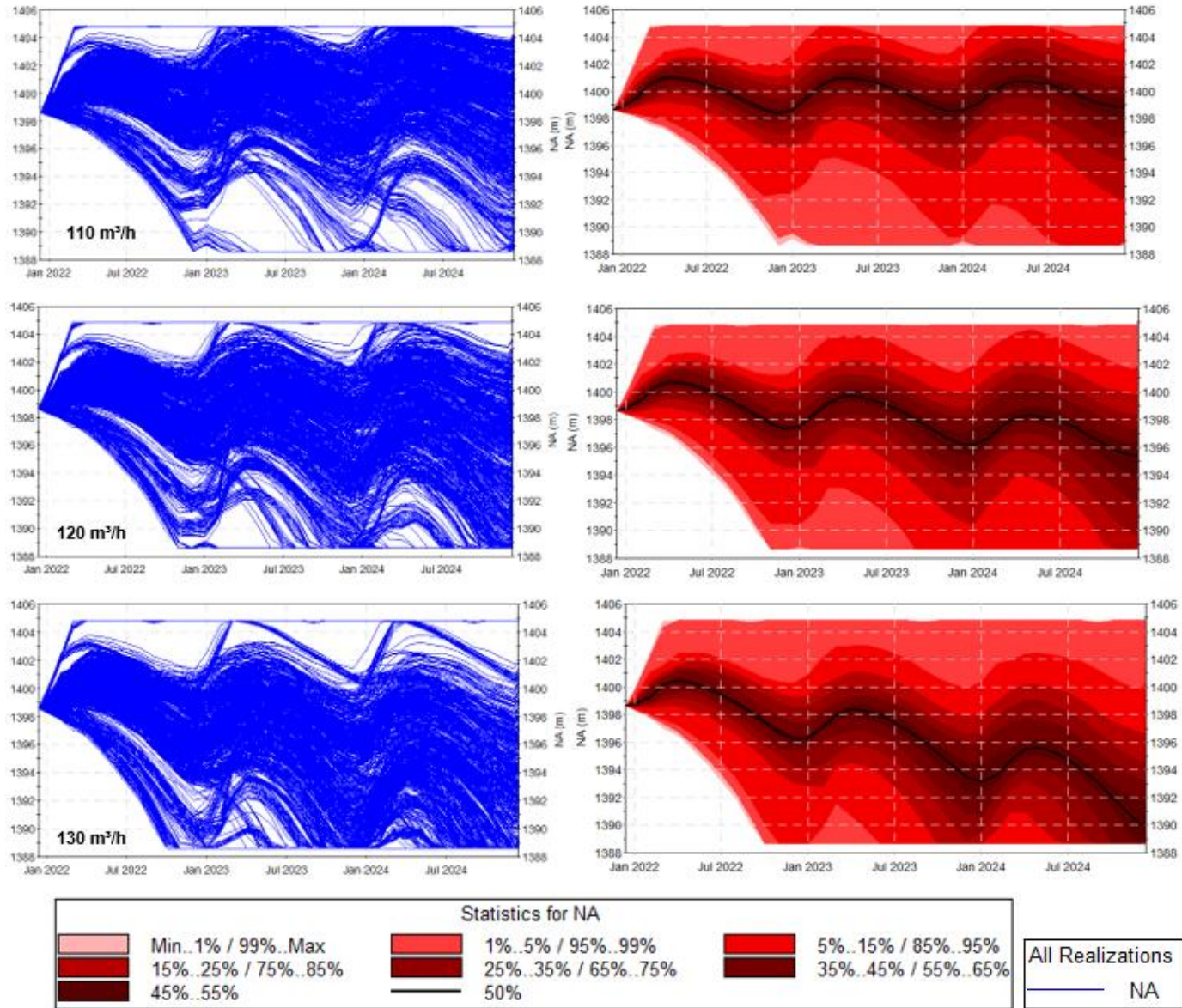


Figura 6.16–Comportamento do reservatório para captação de 110 m³/h a 130 m³/h. Fonte: Adaptado GoldSim (2022).

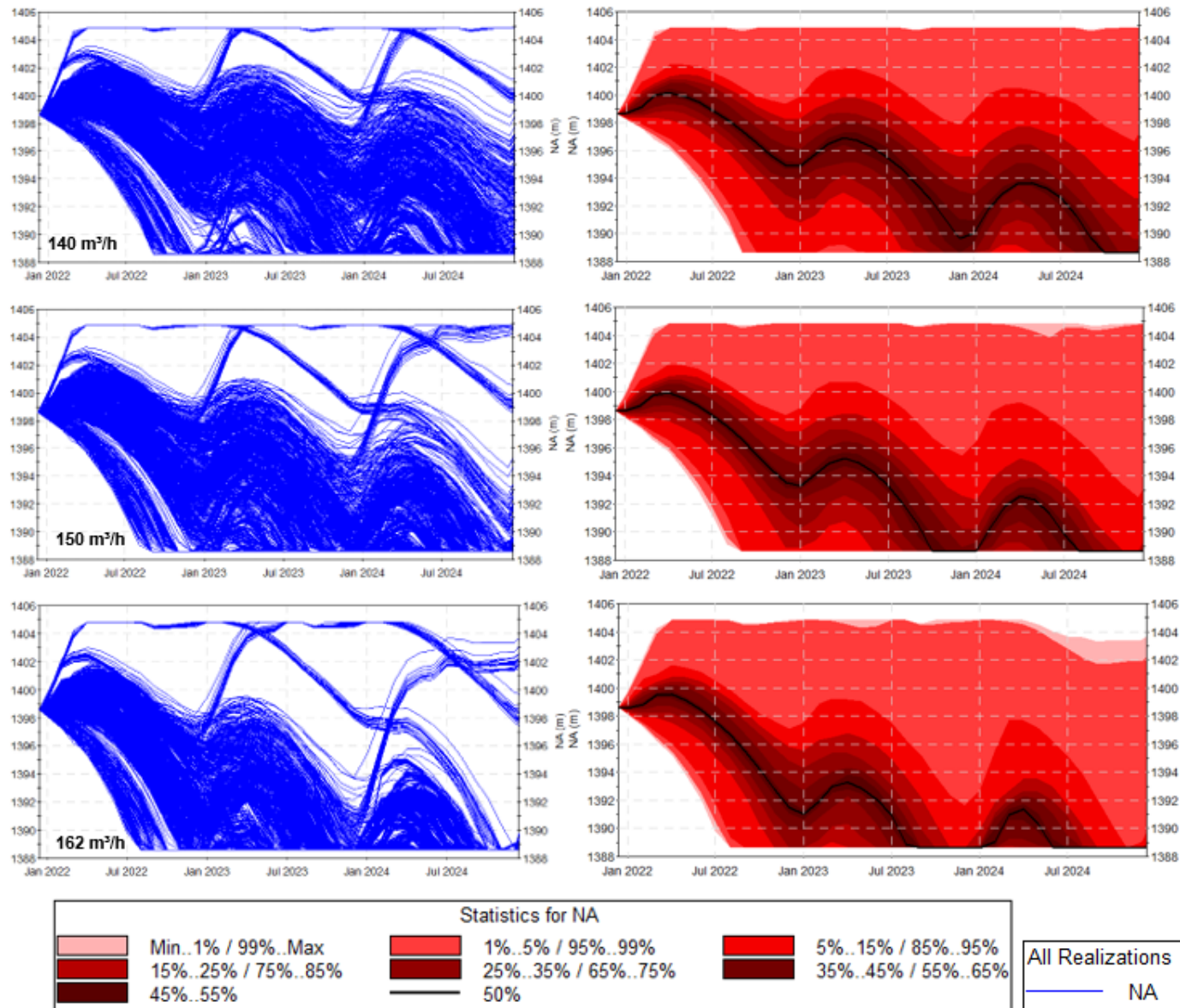


Figura 6.17–Comportamento do reservatório para captação de 140 m³/h a 162 m³/h. Fonte: Adaptado GoldSim (2022).

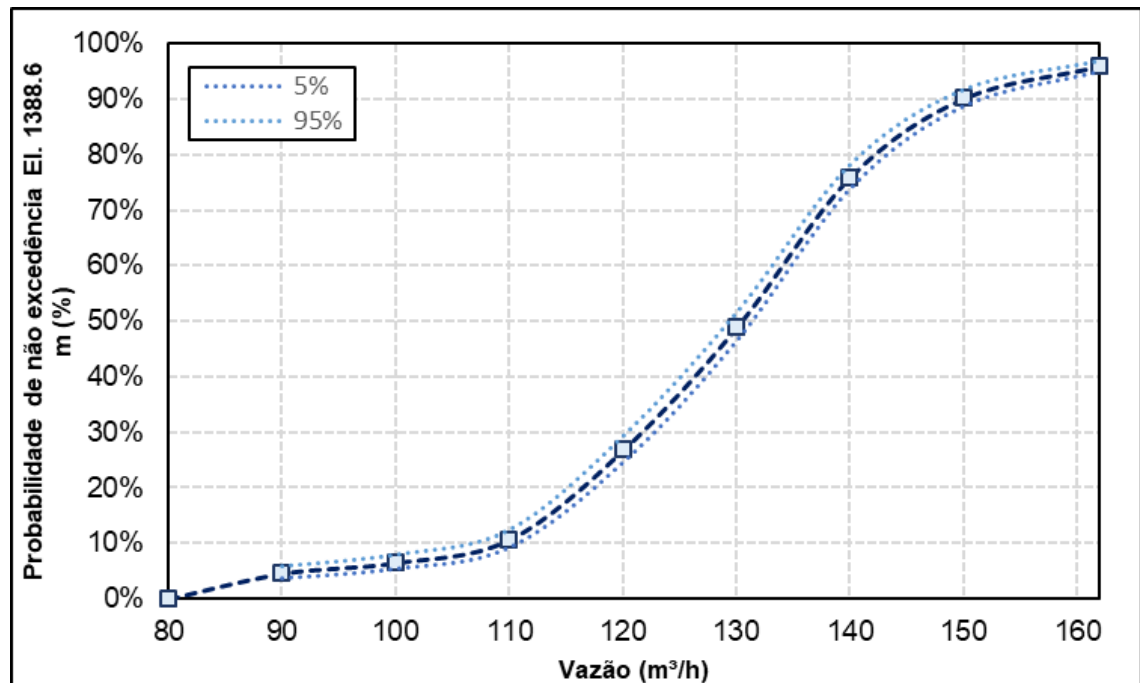


Figura 6.18—Curva de vazão versus porcentagem de falhas no sistema de captação de água no reservatório da barragem Brejo Grande.
Fonte: Própria (2022).

Assim, cumprindo com o objetivo do roteiro metodológico o estudo apresentou um ponto de partida para o planejamento do SAAE – Paraisópolis no que tange a garantia do sistema de captação de água no empreendimento.

Importante ressaltar que atualmente não há qualquer tipo de monitoramento na Barragem Brejo Grande e, nesse contexto, foram utilizados dados secundários para a definição das entradas e saídas na construção do balanço hídrico.

Na falta de dados primários a transferência de dados hidrológicos e meteorológicos é acompanhada de incertezas no processo.

Nesse sentido, o modelo construído no GoldSim se torna mais robusto à medida que é alimentado por dados primários de monitoramento, agregando confiabilidade na amostra populacional.

A implantação e monitoramento de instrumentos de medição no empreendimento como, por exemplo, hidrômetro nas bombas responsáveis pelo sistema de captação de água, régua linimétrica, pluviômetro e evaporímetro proporcionam a produção de dados primários e conseqüente a calibração do modelo. A calibração proporcionará acurácia dos resultados.

7 CONCLUSÃO

O presente estudo propôs a partir do balanço hídrico e através da utilização do *software* GoldSim uma forma de auxiliar e apoiar a análise e garantia de captação de água em pequenas barragens de acumulação, uma vez que, são carentes de informações, mas representam um importante ativo na sociedade.

Além disso, na construção do balanço hídrico foram utilizadas metodologias, que agrupadas em etapas, formaram um roteiro metodológico a fim de dar direção e orientação na finalidade do estudo (Figura 5.1).

Em face da escassez de informações em pequenas barragens a proposição do roteiro metodológico envolveu principalmente as seguintes etapas, a saber: aquisição e consistência de dados, estudos hidrológicos e meteorológicos, modelagem do sistema e a análise dos resultados.

Importante destacar a primeira etapa do roteiro, já que, a falta de informações em pequenas barragens incorre na necessidade de transferência de dados secundários entre regiões. Em grande parte dos casos os dados secundários são provenientes dos bancos de dados públicos.

Assim, o processo de triagem e consistência de dados é fundamental para mitigar possíveis erros na construção de um modelo hidrológico. De acordo com Pinheiro (2011) os dados coletados nas redes de monitoramento podem apresentar inconsistências inerentes ao processo de amostragem requerendo uma análise previa, antes da efetiva utilização nos estudos hidrológicos.

Para a aquisição de dados o roteiro aponta como opção as informações hidrológicas disponíveis na base de dados da ANA e para dados meteorológicos o INMET. Enquanto que os dados da estrutura objeto de estudo são coletados *in loco*.

Para os dados pluviométricos foi discutido o preenchimento de falhas e a verificação da homogeneidade das séries a partir da ponderação regional (TUCCI, 1993) e dupla-massa (USGS, 1960).

No que concerne os dados fluviométricos sua consistência, abordou a análise das curvas-chaves, cotogramas, boletins e fichas de inspeção. Procedimentos similares são discutidos no trabalho de Piscocya *et al* (2013).

A segunda parte do roteiro metodológico compreende os estudos hidrológicos e meteorológicos. Nesse contexto é importante citar a transferência de dados de vazão através da regionalização da vazão média de longo termo abordada em Pinheiro (2011). Para a estimativa da evaporação da lâmina de água nos reservatórios foi sugerida e empregada a metodologia de Linacre (1977).

O presente estudo abordou o balanço hídrico do ponto de vista probabilístico através da utilização do GoldSim. O *software* trata-se de um simulador de probabilidade múltipla que utiliza o método de Monte Carlo para as simulações de sistemas complexos.

De acordo com GoldSim (2021) uma das vantagens do programa é ser projetado especialmente para tratar quantitativamente a incerteza inerente que está presente no mundo real.

Nesse contexto, a ferramenta foi selecionada pelo fato de tratar probabilisticamente o cenário onde as informações e as transferências de dados entre regiões possuem incertezas inerentes ao processo. Dessa forma, é vantajoso permitir a construção de diversos cenários a fim de avaliar o comportamento do sistema avaliado.

Realizou-se um estudo de caso na Barragem Brejo Grande em Paraisópolis, Minas Gerais, a fim de elucidar a proposta do trabalho. A estrutura não possui monitoramento das principais variáveis hidrológicas e hidráulicas comumente acompanhadas em estruturas dessa natureza.

Tem finalidade de acumular água para abastecimento público e por motivos de manutenção e melhoria encontra-se em nível de restrição operacional. Levando essas premissas em conta foi simulado o balanço hídrico de acordo com o roteiro metodológico proposto.

Como resultado foi possível projetar o comportamento do reservatório no horizonte de planejamento a fim de avaliar as chances de o nível de água atingir a cota de restrição operacional do sistema de captação de água.

A partir dos cenários simulados para diferentes vazões, identificou-se a faixa de vazão aconselhável para o sistema operar prezando pela garantia de disponibilidade hídrica no período analisado.

Tendo em vista que a Barragem Brejo Grande não possui qualquer tipo de monitoramento e representa um ativo importante para o município, a proposta abordada na presente dissertação apresenta resultados que se traduzem em um ponto de partida/direcionamento para o planejamento do empreendimento no que tange a garantia do sistema de captação de água.

Entretanto, existem incertezas nos dados e nas metodologias utilizadas na construção do estudo. Assim, partindo do direcionamento alcançado é imprescindível que sejam instalados instrumentos de monitoramento e coletados dados primários do local para que seja possível calibrar o modelo criado para a Barragem Brejo Grande com objetivo de refinamento dos resultados.

Importante ressaltar que a presente dissertação recomenda a prioridade na utilização dos dados primários tendo em vista a validação das séries históricas por parte do responsável pelo desenvolvimento do estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBORT-MORANT, Gema; RIBEIRO-SORIANO, Domingo. A bibliometric analysis of international impact of business incubators. **Journal of Business Research**, v. 69, n. 5, p. 1775-1779, 2016.

ALBANO, Gustavo Doratioto. **Integração de um modelo matemático de quantidade de água em rede de fluxo (ACQUANET) com um modelo matemático de qualidade de água em represas (CE-QUAL-R1)-Estudo de Caso: Represa Jaguari-Jacareí-Sistema Cantareira**. 2004. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

AMORIM NETO, M. da S. Balanço hídrico segundo Thornthwaite & Mather (1955). **Embrapa Semiárido-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 1989.

AMORIM, Eduardo Lucena Cavalcante; DE OLIVEIRA NETTO, Antonio Pedro; MARIO, Eduardo. Estudo de métodos para regionalização de vazão. 2005.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Sistema para Visualização de Fichas de Campo. Permite acesso a quase dois milhões de cópias eletrônicas de fontes primárias de registros de séries históricas de dados da rede hidrometeorológica da ANA. Brasília, 2010. Disponível em: < <https://www.snirh.gov.br/fichadecampo/restrito/principal.jsf> >

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Manual de Políticas e Práticas de Segurança de Barragens para Entidades Fiscalizadoras. Brasília – DF: ANA, 2017.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Relatório de Segurança de Barragens 2020. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <<https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2020/rsb-2020.pdf>> Acesso em 20 de março de 2022.

Agência Nacional de Águas (ANA), **HIDROWEB**, www.ana.gov.br, acesso em outubro de 2022. Disponível em: < <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>>

BRASIL. Resolução nº 144, de 10 de junho de 2012. Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. Brasília, 2012.

BUENO, Eduardo de Oliveira; MELLO, Carlos Rogério de; ALVES, Geovane Junqueira. Evaporação do reservatório da usina hidrelétrica de Camargos: caracterização da pegada hídrica. **RBRH**, v. 21, p. 570-575, 2016.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. Hidrologia para engenharia e ciências ambientais. **Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1, p. 336, 2013.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rultinéia. Introduzindo hidrologia. 2008.

DONATELLI, Gustavo Daniel; KONRATH, Andrea Cristina. Simulação de Monte Carlo na avaliação de incertezas de medição. 2005.

DULKAR, Emre; ŞEN, Kevser; LILLYWHITE, Jason. Development of Risk-Based Reservoir Operating Rules Using Stochastic Inflow Forecasts. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2020: Water Resources Planning and Management and Irrigation and Drainage**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 138-153.

ELSEVIER. Scopus – Guia de Referência Rápida. 2015. Disponível em < https://www.periodicos.capes.gov.br/images/documents/Scopus_Guia%20de%20refer%C3%Aancia%20r%C3%A1pida_10.08.2016.pdf> Acesso em 09 de outubro de 2021.

FANTOZZI, Marco et al. Some international experiences in promoting the recent advances in practical leakage management. **Water Practice and Technology**, v. 1, n. 2, 2006.

FOWE, T. et al. Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 99-109, 2015.

GALVANI, Emerson et al. Estudo comparativo dos elementos do Balanço Hídrico Climatológico para cidades de São Paulo e para Paris. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 4, 2008.

GASQUES, Ana Carla Fernandes et al. REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS: BREVE REVISÃO TEÓRICA [Regionalization of minimum flows: brief theoretical review]. **REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 14, n. 2, 2018.

GOMES, Luis Henrique. **Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GOLDSIM TECHNOLOGY GROUP. GoldSim Probabilistic Simulation Environment. Student application. Versão 12.1, 2022, Washington, USA. Disponível em: < <https://www.goldsim.com/>> Acesso em: 20 de março de 2022.

GOLDSIM. Using GoldSim and Dynamic Simulation to Support Integrated Water Resources Management. White Paper, GoldSim Technology Group, 2017. Disponível em:

<<https://media.goldsim.com/Documents/WhitePapers/IntegratedWaterResourcesManagement.pdf>> Acesso em: 20 de março de 2022.

GOLDSIM. Probabilistic Simulation Environment. User's Guide. USA, GoldSim Technology Group, 2021, 1268 p.

HALTON, John H. A retrospective and prospective survey of the Monte Carlo method. **Siam review**, v. 12, n. 1, p. 1-63, 1970.

HIPÓLITO, João Reis; VAZ, A. C. Hidrologia e recursos hídricos. **Editora Universitária do Instituto Superior Técnico, Lisboa**, 2011.

IBGE. Paraisópolis (MG)|Cidades e Estados. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg/paraisopolis.html>>. Acesso em: outubro de 2021.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia - **BDMEP**. 2022. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>> Acesso em outubro de 2021.

ISLAM, Nazrul et al. CalLite: California Central Valley water management screening model. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 137, n. 1, p. 123-133, 2011.

JACCON, Gilbert; CUDO, K. J. Hidrologia-curva-chave: análise e traçado. 1989.

JAKOB, Alberto Augusto Eichman; YOUNG, Andrea Ferraz. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. **Anais**, p. 1-22, 2016.

KLIPSCH, Joan D.; EVANS, Thomas A. Reservoir operations modeling with HEC-ResSim. In: **Proceedings of the 3rd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Reno, NV, USA**. 2006.

LABSID. Laboratório de Sistemas de Suporte a Decisões. Disponível em: <<http://www.labsid.eng.br/software.aspx?id=17>>. Acesso em: 9 agosto de 2022.

LOPES, Walszon Terlizzie Araújo et al. Sistema para análise de dados hidrológicos–SIADH. **Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves**, 2013.

LINACRE, Edward T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural meteorology**, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

L'ECUYER, Pierre. Efficient and portable combined random number generators. **Communications of the ACM**, v. 31, n. 6, p. 742-751, 1988.

MACHIWAL, Deepesh; DAYAL, Devi; KUMAR, Sanjay. Estimating water balance of small reservoirs in arid regions: a case study from Kachchh, India. **Agricultural Research**, v. 6, n. 1, p. 57-65, 2017.

MATTAR, Fauze Najib. Pesquisa de Marketing. 2 volumes. **São Paulo: Atlas**, 1996.

MCBURNEY, Melissa K.; NOVAK, Pamela L. What is bibliometrics and why should you care?. In: **Proceedings. IEEE international professional communication conference**. IEEE, 2002. p. 108-114.

NOS, TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO E. INFORMAÇÃO. Marcelo Peske Hartwig. 2012.

OMETTO, José C. Bioclimatologia vegetal. 1981.

PANIGRAHI, B.; PANDA, Sudhindra N. Field test of a soil water balance simulation model. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 3, p. 223-240, 2003.

PENMAN, Howard Latimer. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 193, n. 1032, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, Antônio Roberto; NOVA, Nílson Augusto Villa; SEDIYAMA, Gilberto Chohaku. **Evapo (transpi) razão**. Piracicaba: Fealq, 1997.

PINHEIRO, Mário Cicareli. Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração. **Porto Alegre: ABRH**, 2011.

PISCOYA, R. C. C. C. et al. Análise de consistência de dados fluviométricos de estações de monitoramento da ANA localizadas nas sub-bacias hidrográficas 10 (Rios Solimões, Javari e Itaquai) e 11 (rios Solimões, Içá e Jandiatuba). **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2013.

ROLIM, Glauco de Souza; SENTELHAS, Paulo Cesar; BARBIERI, Valter. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Rev. Bras. Agrometeorol**, v. 6, p. 133-137, 1998.

QGIS Development Team, 2021. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: < https://www.qgis.org/pt_BR/site/index.html > Acesso em outubro de 2021.

SEARCY, James Kincheon; HARDISON, Clayton H. **Double-mass curves**. US Government Printing Office, 1960.

SAAE PARAISÓPOLIS. Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Paraisópolis Estação de Tratamento de Água. 2022. Disponível em: < <https://www.saaeparaisopolis.mg.gov.br/estacao-de-tratamento-de-agua> > Acesso em: Acesso em janeiro de 2022.

SANTOS, Allita Rezende et al. Regionalization of average flow: a brief review of the literature. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 23, p. 41, 2019.

SCHÄFER, Rossana Ferrari. Precipitação e evapotranspiração de referência estimadas com metodologia alternativa, voltadas à realização do balanço hídrico diário. 2009.

SENTELHAS, Paulo Cesar et al. BHBRASIL: balanços hídricos climatológicos de 500 localidades brasileiras. **Piracicaba: ESALQ**, 1998.

SOUZA, JLM de. Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro. **Piracicaba. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, 2001.

TE, Chow Ven; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. Applied hydrology. **Water Resources Handbook**, 1988.

TUCCI, Carlos EM. Hidrologia: ciência e aplicação. rev. **da Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 1993.

TUCCI, Carlos EM. **Regionalização de vazões**. Editora da Universidade/UFRGS, 2002.

USACE, U.S. Army Corps of Engineers. HEC-ResSIM. Disponível em: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ressim/>>. Acesso em: 9 agosto. 2022.

USACE (2021). HEC-ResSim 3.3 Reservoir System Simulation, User manual. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineers Center.

VANDERKELEN, Inne; VAN LIPZIG, Nicole PM; THIERY, Wim. Modelling the water balance of Lake Victoria (East Africa)–part 1: observational analysis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, n. 10, p. 5509-5525, 2018.

VENTURA, Thiago Meirelles et al. ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA PREENCHIMENTO DE FALHAS EM DADOS METEOROLÓGICOS (ANALYSIS METHODS OF APPLICATION FOR STATISTICAL DATA IN METEOROLOGY). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2016.

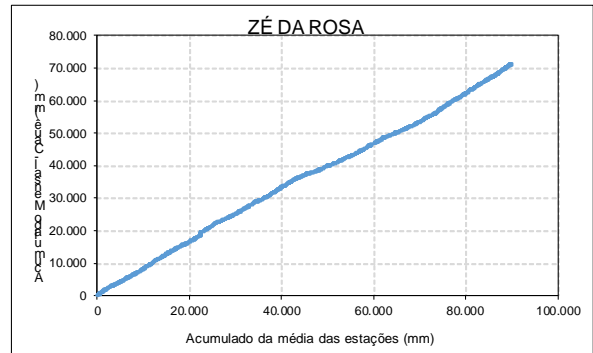
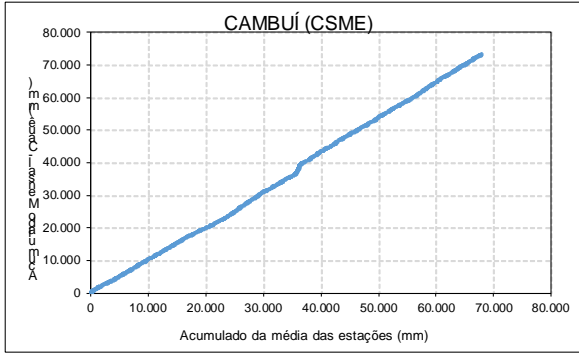
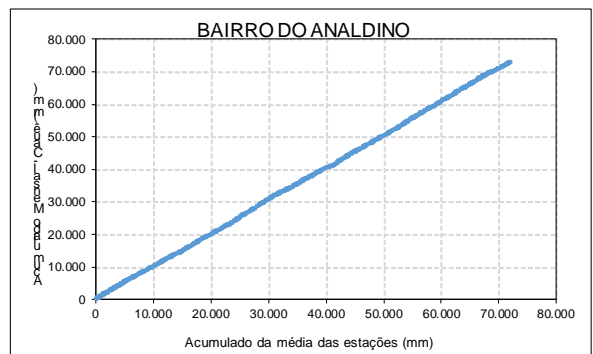
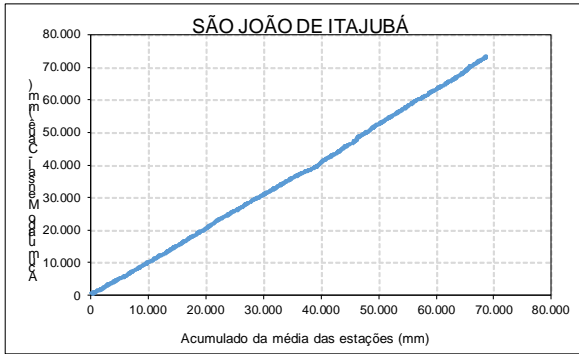
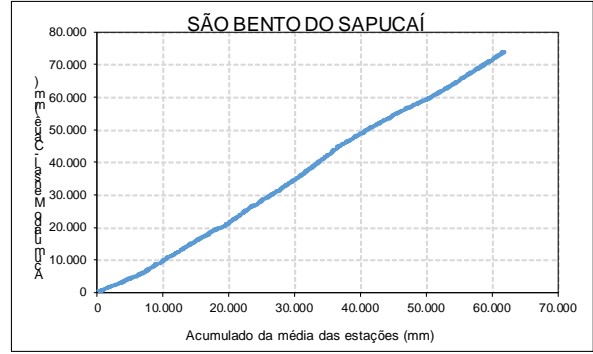
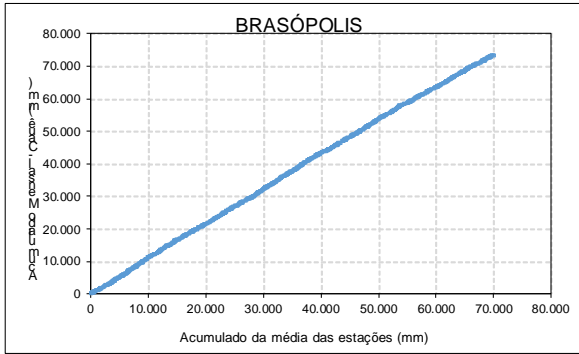
VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur. **Hidrologia aplicada**. Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975.

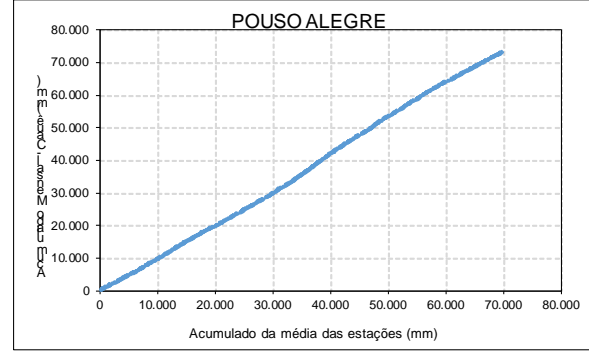
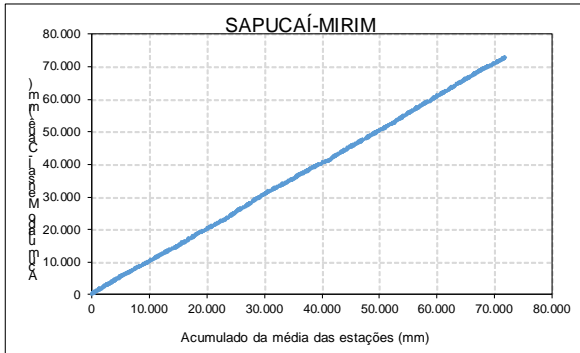
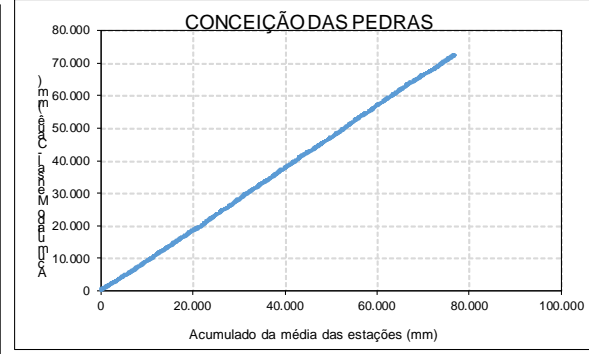
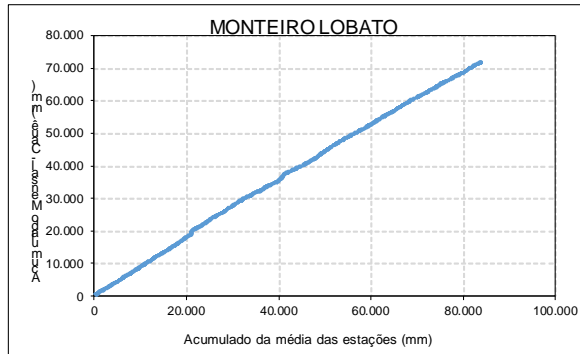
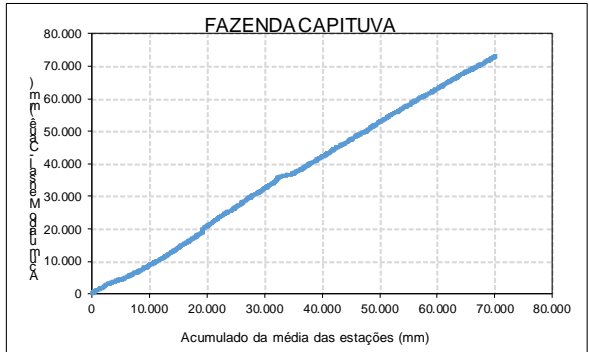
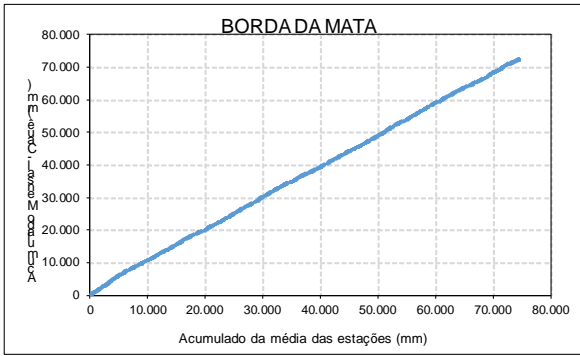
WADE, Lisa. **A probabilistic water balance**. Montana Tech of The University of Montana, 2014.

WILLMOTT, Cort J.; ROWE, Clinton M.; MINTZ, Yale. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v. 5, n. 6, p. 589-606, 1985.

YORIYAZ, Hélio. Método de Monte Carlo: princípios e aplicações em Física Médica. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 3, n. 1, p. 141-149, 2009.

APÊNDICE A – GRÁFICOS DE DUPLA MASSA





APÊNDICE B – MÉDIAS MENSIS DE PRECIPITAÇÃO - BAIRRO ANALDINO

Apêndice A – Médias mensais de precipitação em mm para estação Bairro do Analdino (2245084).

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1968	30,5	22,3	8,7	3,6	9,7	0,0	4,1	3,4	3,7	14,9	206,7	135,4
1969	27,7	13,7	10,4	5,9	4,6	3,0	0,5	4,7	2,3	20,1	35,6	18,6
1970	41,4	26,8	4,8	5,8	4,1	4,5	3,2	6,5	5,7	19,3	8,8	25,2
1971	16,4	7,1	37,5	11,3	5,3	15,3	1,2	0,0	7,2	33,9	0,0	0,0
1972	32,7	39,2	7,3	8,2	7,9	0,5	8,9	14,7	9,3	23,8	21,8	273,8
1973	245,0	60,1	113,0	84,2	41,8	8,1	31,1	8,5	26,4	154,3	129,9	473,4
1974	262,6	49,3	195,0	54,0	13,5	77,8	0,0	0,4	9,5	146,1	163,9	394,6
1975	151,8	258,5	65,0	65,7	20,0	8,8	31,6	0,0	36,0	168,7	254,3	194,6
1976	180,0	562,5	142,0	114,4	123,5	49,0	117,3	122,6	205,7	130,0	158,7	199,9
1977	359,4	42,2	253,4	120,4	0,0	67,0	14,2	10,6	104,3	106,2	159,0	287,2
1978	205,0	148,8	173,9	33,7	47,0	51,6	65,2	0,0	20,1	125,3	202,0	226,1
1979	228,9	194,0	132,0	54,2	87,6	0,0	44,6	80,8	102,9	152,2	176,8	315,4
1980	340,4	184,4	55,6	190,8	30,4	94,8	0,0	26,0	105,8	63,8	143,2	393,6
1981	437,2	58,8	175,6	40,8	5,2	75,8	18,4	31,6	10,2	333,8	277,4	394,4
1982	336,6	171,0	374,8	40,8	39,6	198,6	67,6	34,6	10,2	237,0	173,0	609,4
1983	388,0	300,0	421,6	178,6	154,0	160,8	69,2	5,2	400,4	275,2	164,6	438,0
1984	166,4	41,0	128,4	53,8	48,6	0,0	10,2	132,8	89,7	10,1	126,5	309,9
1985	318,0	210,8	264,3	50,3	24,7	7,1	0,0	22,6	111,2	160,2	195,1	535,9
1986	313,4	483,1	200,8	96,0	168,6	0,0	26,5	164,0	36,2	127,8	97,2	717,0
1987	513,2	130,6	161,6	105,2	200,0	61,0	12,6	6,0	150,1	71,4	100,1	159,0
1988	322,3	216,0	188,4	105,6	105,0	43,0	5,8	0,0	33,6	254,7	111,3	169,2
1989	303,5	294,2	134,4	40,5	22,0	23,0	72,0	31,0	89,0	39,0	145,0	288,0
1990	215,8	152,0	205,6	67,6	51,9	3,1	100,1	49,3	88,3	129,3	51,6	228,9
1991	282,5	240,4	358,7	139,8	39,0	30,0	16,7	0,0	52,7	195,9	48,6	295,4
1992	147,2	148,3	64,2	92,5	99,7	0,0	85,3	45,6	178,4	181,8	191,7	97,9
1993	145,0	319,1	139,6	46,0	62,5	33,6	13,5	35,2	93,4	156,2	122,7	129,7
1994	213,8	113,4	81,4	112,2	142,7	19,0	0,0	2,1	0,0	141,7	132,6	233,4
1995	112,3	505,9	110,0	73,4	60,6	15,0	67,3	2,3	29,4	237,7	138,3	202,3
1996	315,8	143,2	293,4	89,5	33,4	8,1	0,0	44,2	143,8	178,5	218,9	281,9
1997	343,2	95,9	71,7	42,1	45,1	170,9	16,3	6,4	120,3	170,4	190,4	182,0
1998	187,3	361,7	162,1	60,7	135,2	4,2	0,0	4,7	87,5	199,7	52,5	272,7
1999	433,9	306,5	75,8	24,8	33,0	65,4	1,3	0,0	46,4	54,2	88,6	221,8
2000	374,4	286,5	128,3	11,0	19,0	3,0	7,2	69,4	99,4	39,2	161,7	171,2
2001	142,1	190,2	69,8	3,9	41,5	10,6	7,2	42,8	90,2	177,6	197,2	378,4
2002	200,9	226,9	122,1	19,3	33,0	0,0	9,8	44,2	90,7	39,1	138,4	312,0
2003	413,2	75,9	149,7	40,8	28,9	9,3	14,4	10,0	0,8	69,2	142,0	207,0
2004	189,8	351,4	85,6	161,5	105,1	91,3	73,6	15,8	14,7	78,1	133,4	90,1
2005	375,7	124,4	158,5	39,9	113,2	27,5	26,8	14,6	77,1	110,4	110,4	140,8
2006	183,5	265,8	148,3	7,4	13,8	13,3	20,7	2,7	85,1	66,7	204,6	211,6
2007	420,8	64,7	109,6	64,9	36,9	17,2	125,6	0,0	26,8	106,7	158,9	129,5
2008	213,4	168,0	179,9	135,6	37,8	48,8	0,0	124,1	64,4	99,1	175,2	152,6
2009	293,6	245,1	100,8	48,4	48,8	38,3	58,6	39,8	136,5	89,8	130,2	364,2
2010	250,9	16,1	168,2	39,7	21,1	28,5	28,6	0,0	76,1	95,2	109,6	133,5
2011	328,6	72,3	123,0	96,8	19,3	27,7	0,2	11,4	11,3	92,8	147,8	223,8

Apêndice A – Médias mensais de precipitação em mm para estação Bairro do Analdino (2245084).

2012	291,7	111,4	120,7	48,0	41,2	79,7	12,8	10,3	22,0	65,0	116,2	117,9
2013	234,8	138,2	203,8	62,1	59,9	32,2	66,9	6,0	45,1	137,1	74,1	130,5
2014	81,5	32,2	95,7	26,4	22,8	41,2	23,3	3,3	48,8	34,3	126,7	119,2
2015	66,3	181,6	130,9	9,1	41,0	51,5	33,8	15,8	107,2	20,5	98,8	287,3
2016	282,1	141,5	146,0	21,3	30,2	81,3	0,0	13,6	0,0	84,7	55,6	93,7
2017	197,3	70,7	122,8	10,8	29,1	31,0	0,0	34,2	28,6	65,2	130,0	103,2

APÊNDICE C – MÉDIAS MENSAS DE VAZÃO - BAIRRO ANALDINO

Apêndice B – Médias mensais de vazão em m³/s para estação Bairro do Analdino (61343000)

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1966											7,0	13,3
1967	18,5	18,7	13,5	8,4	6,2	5,4	4,1	3,0	2,5	3,5	5,8	5,1
1968	10,4	6,1	6,1	4,1	3,1	2,5	2,1	2,1	1,8	2,2	1,8	3,7
1969	4,3	4,7	4,0	3,1	2,4	2,2	1,8	1,9	1,5	2,4	6,8	6,1
1970	10,1	15,6	12,0	6,7	5,2	3,8	3,3	3,7	4,3	4,1	5,4	4,5
1971	3,9	2,6	6,0	4,2	3,3	3,9	3,0	2,2	2,4	4,6	4,1	7,9
1972	7,9	12,8	10,0	6,7	4,7	3,5	3,5	3,3	2,7	4,4	4,9	6,4
1973	7,8	9,4	6,4	8,3	5,2	3,8	3,3	2,5	2,3	2,8	3,8	12,2
1974	15,1	8,6	10,8	7,6	5,2	4,5	3,4	2,7	2,3	2,4	2,7	8,4
1975	8,9	10,3	7,2	5,0	3,9	3,0	2,6	1,9	1,7	2,5	4,6	6,0
1976	7,9	15,3	14,5	9,7	7,3	6,2	6,5	5,7	7,4	6,2	6,5	9,7
1977	12,3	12,7	7,9	6,8	4,3	3,9	2,9	2,4	2,4	3,0	3,9	9,9
1978	7,5	6,8	9,7	5,7	4,4	4,6	3,5	2,7	2,4	2,3	4,3	6,1
1979	7,6	9,9	7,7	5,9	5,5	3,9	3,7	3,9	3,8	4,4	6,9	9,7
1980	14,2	11,5	9,3	13,0	7,6	5,8	4,4	4,0	3,5	2,9	3,0	8,8
1981	19,5	9,6	7,6	6,2	4,3	3,5	3,1	2,6	1,9	4,0	8,5	10,8
1982	13,5	13,9	13,6	9,3	6,8	6,0	5,2	3,7	2,9	4,5	4,4	16,1
1983	24,2	27,3	21,2	14,1	10,8	16,8	9,3	6,4	10,0	10,0	9,2	13,8
1984	12,6	7,4	6,0	5,2	4,0	3,1	2,6	3,3	3,2	2,3	2,7	4,9
1985	7,4	7,3	9,3	5,6	4,2	3,5	2,9	2,5	3,2	3,0	4,8	7,5
1986	9,5	10,0	10,2	7,5	6,6	4,4	3,7	4,1	2,9	2,7	2,9	12,4
1987	13,5	13,3	9,7	7,0	6,4	5,4	4,0	3,2	3,6	2,9	3,4	4,2
1988	9,1	8,0	9,5	6,9	5,9	5,8	3,9	3,1	2,7	4,6	4,7	8,5
1989	14,2	14,7	11,6	8,1	6,1	5,1	4,8	3,2	3,5	2,9	3,9	8,9
1990	15,2	6,3	8,5	5,9	5,0	3,9	4,5	4,1	3,6	4,3	3,3	4,0
1991	12,1	13,4	13,9	12,2	8,0	5,8	4,7	3,4	2,9	5,6	4,1	5,6
1992	6,0	10,4	5,7	5,7	4,9	3,7	3,9	3,1	4,4	6,2	10,0	7,9
1993	8,9	14,8	14,0	10,5	6,9	5,8	3,6	3,6	3,7	5,2	4,2	4,6
1994	7,1	6,0	4,3	4,3	4,8	3,4	2,5	2,2	1,9	2,8	3,5	5,9
1995	7,7	24,5	12,5	9,4	6,0	3,9	4,1	3,3	3,0	7,0	4,9	4,9
1996	15,7	11,0	12,5	10,2	6,3	4,8	3,7	3,5	4,6	4,1	7,0	8,2
1997	12,2	9,9	7,1	5,8	4,0	6,4	3,6	2,8	3,0	3,4	4,6	5,8
1998	6,4	9,1	9,0	6,1	5,6	4,2	3,2	2,6	2,4	3,7	2,9	6,8
1999	14,7	12,7	12,1	7,1	5,1	4,5	3,4	2,6	2,4	2,0	2,2	3,7
2000	13,3	13,4	8,1	5,4	4,0	3,2	3,1	2,8	3,1	2,3	3,1	5,3
2001	5,2	5,9	4,1	3,2	3,2	2,9	2,7	2,5	2,3	3,4	4,0	9,1
2002	14,7	17,5	13,4	7,9	5,9	4,2	3,3	3,0	3,5	2,1	3,4	4,4
2003	12,5	11,1	8,4	5,4	4,2	3,2	2,8	2,2	1,8	2,2	2,9	4,4

Apêndice B – Médias mensais de vazão em m³/s para estação Bairro do Analdino (61343000)

2004	5,0	9,9	8,5	6,5	6,4	6,0	4,8	3,6	2,5	3,8	4,7	5,1
2005	17,4	11,1	10,3	7,4	6,9	5,1	4,0	3,1	3,8	3,5	3,5	4,4
2006	8,1	13,3	9,6	6,2	4,5	3,5	3,0	2,5	2,9	2,7	6,5	9,2
2007	26,3	13,4	9,1	6,1	4,8	3,9	4,8	3,2	2,7	3,0	5,6	6,8
2008	6,5	9,4	9,9	10,8	6,7	5,3	3,9	4,5	3,2	3,2	4,4	5,2
2009	9,9	18,2	12,4	8,1	6,1	4,9	4,8	4,0	4,7	4,7	4,4	13,5
2010	13,3	8,0	9,2	6,1	4,5	4,5	3,5	2,6	2,6	2,7	3,3	4,5
2011	18,2	7,5	10,0	8,4	5,4	4,5	3,3	2,9	2,6	3,0	3,1	3,1
2012	6,3	5,6	4,4	3,6	4,0	4,7	3,6	2,5	2,1	1,9	2,9	2,7
2013	7,7	8,1	8,7	6,8	4,8	4,1	3,7	2,5	2,2	3,6	3,5	5,1
2014	3,5	3,7	2,8	2,7	2,0	2,2	2,6	1,7	1,4	1,3	1,9	

APÊNDICE D – MÉDIAS MENSAIS DE VAZÃO BREJO GRANDE

Apêndice B – Médias mensais de vazão em m³/s na Barragem Brejo Grande.

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
1968	0,051	0,030	0,030	0,020	0,015	0,012	0,010	0,010	0,009	0,011	0,009	0,018
1969	0,021	0,023	0,020	0,015	0,012	0,011	0,009	0,009	0,007	0,012	0,034	0,030
1970	0,050	0,077	0,059	0,033	0,026	0,019	0,016	0,018	0,021	0,020	0,027	0,022
1971	0,019	0,013	0,029	0,021	0,016	0,019	0,015	0,011	0,012	0,023	0,020	0,039
1972	0,039	0,063	0,049	0,033	0,023	0,017	0,017	0,016	0,013	0,022	0,024	0,031
1973	0,038	0,046	0,032	0,041	0,025	0,019	0,016	0,012	0,011	0,014	0,019	0,060
1974	0,074	0,042	0,053	0,038	0,026	0,022	0,017	0,013	0,011	0,012	0,013	0,041
1975	0,044	0,051	0,035	0,024	0,019	0,015	0,013	0,010	0,008	0,012	0,022	0,029
1976	0,039	0,076	0,072	0,048	0,036	0,031	0,032	0,028	0,036	0,031	0,032	0,048
1977	0,060	0,063	0,039	0,033	0,021	0,019	0,014	0,012	0,012	0,015	0,019	0,049
1978	0,037	0,034	0,048	0,028	0,022	0,023	0,017	0,013	0,012	0,011	0,021	0,030
1979	0,037	0,049	0,038	0,029	0,027	0,019	0,018	0,019	0,019	0,022	0,034	0,048
1980	0,070	0,057	0,046	0,064	0,038	0,029	0,021	0,020	0,017	0,014	0,015	0,043
1981	0,096	0,047	0,037	0,031	0,021	0,017	0,015	0,013	0,010	0,020	0,042	0,053
1982	0,067	0,068	0,067	0,046	0,034	0,030	0,025	0,018	0,014	0,022	0,022	0,079
1983	0,119	0,134	0,104	0,069	0,053	0,083	0,046	0,032	0,049	0,049	0,045	0,068
1984	0,062	0,036	0,030	0,025	0,020	0,015	0,013	0,016	0,016	0,011	0,013	0,024
1985	0,037	0,036	0,046	0,027	0,021	0,017	0,014	0,012	0,016	0,015	0,023	0,037
1986	0,047	0,049	0,050	0,037	0,033	0,022	0,018	0,020	0,014	0,013	0,014	0,061
1987	0,066	0,065	0,048	0,034	0,032	0,027	0,020	0,016	0,018	0,014	0,017	0,021
1988	0,045	0,039	0,047	0,034	0,029	0,028	0,019	0,015	0,013	0,022	0,023	0,042
1989	0,070	0,072	0,057	0,040	0,030	0,025	0,023	0,016	0,017	0,014	0,019	0,044
1990	0,075	0,031	0,042	0,029	0,024	0,019	0,022	0,020	0,018	0,021	0,016	0,020
1991	0,060	0,066	0,069	0,060	0,039	0,028	0,023	0,017	0,014	0,028	0,020	0,028
1992	0,029	0,051	0,028	0,028	0,024	0,018	0,019	0,015	0,022	0,030	0,049	0,039
1993	0,044	0,073	0,069	0,052	0,034	0,029	0,018	0,018	0,018	0,026	0,020	0,023
1994	0,035	0,029	0,021	0,021	0,024	0,017	0,012	0,011	0,009	0,014	0,017	0,029
1995	0,038	0,121	0,062	0,046	0,029	0,019	0,020	0,016	0,015	0,035	0,024	0,024
1996	0,077	0,054	0,062	0,050	0,031	0,023	0,018	0,017	0,023	0,020	0,035	0,040
1997	0,060	0,049	0,035	0,028	0,020	0,032	0,018	0,014	0,015	0,017	0,022	0,029
1998	0,031	0,045	0,044	0,030	0,028	0,021	0,016	0,013	0,012	0,018	0,015	0,033
1999	0,072	0,062	0,060	0,035	0,025	0,022	0,017	0,013	0,012	0,010	0,011	0,018
2000	0,065	0,066	0,040	0,026	0,020	0,016	0,015	0,014	0,015	0,011	0,015	0,026
2001	0,025	0,029	0,020	0,016	0,016	0,014	0,013	0,012	0,011	0,017	0,020	0,045
2002	0,073	0,086	0,066	0,039	0,029	0,021	0,016	0,015	0,017	0,010	0,017	0,021
2003	0,062	0,055	0,041	0,027	0,021	0,016	0,014	0,011	0,009	0,011	0,014	0,022
2004	0,025	0,049	0,042	0,032	0,031	0,029	0,024	0,018	0,012	0,019	0,023	0,025
2005	0,086	0,055	0,051	0,036	0,034	0,025	0,020	0,015	0,019	0,017	0,017	0,022

Apêndice B – Médias mensais de vazão em m³/s na Barragem Brejo Grande.

2006	0,040	0,065	0,047	0,031	0,022	0,017	0,015	0,012	0,014	0,013	0,032	0,045
2007	0,129	0,066	0,045	0,030	0,023	0,019	0,023	0,016	0,013	0,015	0,028	0,033
2008	0,032	0,046	0,049	0,053	0,033	0,026	0,019	0,022	0,016	0,016	0,021	0,026
2009	0,048	0,090	0,061	0,040	0,030	0,024	0,024	0,020	0,023	0,023	0,022	0,067
2010	0,065	0,040	0,045	0,030	0,022	0,022	0,017	0,013	0,013	0,013	0,016	0,022
2011	0,090	0,037	0,049	0,041	0,026	0,022	0,016	0,014	0,013	0,015	0,015	0,015
2012	0,031	0,028	0,022	0,018	0,020	0,023	0,018	0,013	0,010	0,009	0,014	0,013
2013	0,038	0,040	0,043	0,033	0,023	0,020	0,018	0,012	0,011	0,018	0,017	0,025
2014	0,017	0,018	0,014	0,013	0,010	0,011	0,013	0,008	0,007	0,007	0,009	0,035

APÊNDICE E – MÉDIAS MENSAIS DE EVAPORAÇÃO EM BREJO GRANDE

Ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
2007						73,6	81,9	100,5	118,8	129,0	84,6	109,3
2008	101,0	90,5	98,3	86,8	74,5	70,6	83,5	95,7	97,6	107,2	91,8	98,7
2009	97,2	91,9	99,8	86,7	79,1	67,7	79,5	91,3	93,1	92,4	104,6	100,4
2010	103,2	102,8	102,7	90,0	82,3	74,3	86,5	104,4	111,1	100,7	99,8	106,6
2011	102,6	100,5	97,8	90,2	77,8	69,9	86,1	107,3	119,1	108,3	97,3	102,8
2012	97,8	104,2	100,5	91,1	76,9	74,3	79,4	88,7	110,7	127,0	102,5	111,3
2013	99,2	94,6	91,1	85,1	76,9	74,0	76,8	91,0	99,1	98,3	98,8	105,3
2014	120,5	118,0	112,5	92,5	83,0	76,7	77,8	101,3	113,4	131,9	104,9	110,9
2015	121,9	93,4	96,8	91,5	77,8	75,2	83,3	94,1	103,9	127,7	103,6	106,5
2016	105,4	100,3	101,2	99,4	81,0	70,7	89,5	97,4	111,5	108,0	100,6	112,4
2017	104,3	103,3	101,5	89,6	78,4	74,5	75,9	94,5	127,9	113,9	99,4	106,6
2018	103,3	93,6	106,6	81,3	76,4	44,3	83,4	85,8	101,0	100,3	96,0	110,4
2019	115,3	95,8	102,7	93,4	84,3	74,3	81,2	87,4	105,8	113,6	102,4	106,6
2020	104,2	89,8	98,6	84,7	77,8	78,9	84,7	96,5	131,2	116,0	108,2	101,2
Média	105,8	98,4	100,8	89,4	78,9	71,4	82,1	95,4	110,3	112,5	99,6	106,3