UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará

Fabíola Souza da Silva

INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO HÍDRICO DOS LAGOS DE ABASTECIMENTO DE BELÉM-PA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Belém – Pará – Brasil

2022

Fabíola Souza da Silva

INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO HÍDRICO DOS LAGOS DE ABASTECIMENTO DE BELÉM-PA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração em Engenharia Hídrica linha de pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.

Belém – Pará – Brasil

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S719i Souza da Silva, Fabíola.
Influência das mudanças climáticas no balanço hídrico dos lagos de abastecimento de Belém-PA / Fabíola Souza da Silva. — 2022.
91 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Claudio José Cavalcante Blanco
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2022.

1. Mudanças Climática. 2. Balanço Hídrico de Lagos. 3. Crescimento Populacional. 4. Modelos de Circulação Geral. 5. Modelos Climáticos Regionais. I. Título.

CDD 333.91

INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO HÍDRICO DOS LAGOS DE ABASTECIMENTO DE BELÉM-PA

AUTORA:

FABÍOLA SOUZA DA SILVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL.

APROVADO EM: 06 / 05 / 2022.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Iran Lima Neto
Membro Externo (UFC)

Profa. Dra. Evanice Pinheiro Gomes
Membro Externo (UFPA)

Profa. Dra. Mariane Furtado Gonçalves
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dedico este trabalho com todo amor e carinho a duas pessoas de significados ímpares na minha vida: meu pai Silvio Ronald e minha mãe Maria Rejane. Por todo apoio e incentivo ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A vivência durante o mestrado contou com um grupo de pessoas que participou, tanto diretamente na pesquisa acadêmica, como indiretamente através de atos de amizade, carinho e companheirismo.

Sou grata a Deus por estar comigo em todos os momentos da minha vida, me direcionando, abençoando e dando forças para alcançar esta conquista tão desejada. A minha família, por sempre ter me dado uma base sólida de apoio e compreensão em todos os momentos, por todo amor e carinho que foram essenciais para me manter no caminho certo. Em especial minha mãe Maria Rejane Souza da Silva, meu pai Silvio Ronald Lima da Silva, meu irmão Felipe Souza da Silva e meus padrinhos Silvia Joelma da Silva Barroso e Assis da Silva Barroso, por estarem sempre presente em minha vida, dando apoio e incentivo em meus estudos.

Agradeço ao meu querido orientador, Professor Claudio José Cavalcante Blanco, por toda a paciência e conhecimento passado ao longo desta caminhada, que se iniciou na graduação como bolsista de iniciação científica e se prolongou até o mestrado. Por ter acreditado que eu conseguiria desenvolver o tema da pesquisa, e pela paciência neste momento tão difícil que vivemos durante a pandemia de Covid-19, que dificultou o desenvolvimento da pesquisa muitas vezes.

Agradeço aos meus queridos amigos, por sempre torcerem pelo meu sucesso, pelo apoio nos momentos de nervosismo, cansaço e sobretudo compreensão nos momentos de ausência. Em especial para Carolina Nascimento, Hugo Araújo e Juliana Duarte, por terem sido grandes amigos nesta caminhada, proporcionando momentos essenciais de alegria e apoio.

Sou grata aos grandes amigos que o grupo de pesquisa GAES me proporcionou, pois tornaram o ambiente de pesquisa mais leve e alegre, agradeço por todos os momentos de confraternização, ajuda e apoio nos momentos difíceis. Estes momentos fizeram grande falta durante a pandemia.

Enfim, o meu muito obrigada a todos.

Afinal, uma vida não passa de uma série de pequenas vidas, vividas um dia por vez, e cada um desses dias invariavelmente envolvem escolhas e consequências. Pedacinho por pedacinho, essas decisões ajudam a formar a pessoa que nos tornamos (Sparks, N. 2017).

RESUMO

As mudanças climáticas, projetam para os recursos hídricos globais, mudanças drásticas nos padrões de distribuição e disponibilidade de água. Assim, o objetivo deste estudo foi investigar os impactos que as mudanças climáticas terão no ciclo hidrológico local. E analisar, se os lagos Bolonha e Água Preta, responsáveis por abastecer parte da cidade de Belém-PA, terão capacidade para atender a demanda futura de água. Para isso, foi realizada a projeção do balanço hídrico dos lagos até o ano de 2100, utilizando os GCMs MIROC5 e HADGEM2-ES alinhados ao RCM Eta, a partir de dois cenários de emissão de gases do efeito estufa RCPs 4.5 e 8.5. Foi necessário, também, realizar a projeção da população da cidade de Belém-PA até o ano de 2100, utilizando o modelo de Gompertz. Os resultados projetaram uma grande redução no volume precipitado nos meses chuvosos, comparados aos dados históricos; e para o período de verão as projeções apontam meses mais secos que o normal. A projeção da evaporação superficial mostrou um aumento do volume superficial evaporado. As consequências das projeções sobre o balanço hídrico futuro dos lagos, foi uma grande redução no volume de ambos, dificultando a recuperação de suas capacidades máximas. As projeções de cenários futuros dos lagos mostraram que a produção atual da COSANPA não será capaz de atender demanda futura da sociedade, ocasionando uma situação de escassez hídrica até o final do século, o que levará a necessidade de aumento de bombeamento de água bruta para o manancial. Desta forma, compreender como as mudanças das variáveis hidrológicas afetarão a disponibilidade de água é uma ferramenta importante, na busca de mitigar os impactos e realizar o planejamento e gerenciamento em longo prazo deste recurso.

Palavra-Chave: Mudanças Climáticas; Balanço Hídrico de Lagos; Crescimento Populacional; Modelos de Circulação Geral; Modelos Climáticos Regionais; RCPs.

ABSTRACT

Climate change, projected for global water resources, drastic changes in patterns of distribution and availability of water. So, the objective of this study was to investigate the impacts that climate change will have on the local hydrological cycle. And analyze if the lakes Bolonha and Água Preta, responsible for supplying part of the city of Belém-PA, will be able to provide water to future demand. Then, the water balance of the lakes was projected until 2100, using the GCMs MIROC5 and HADGEM2-ES aligned to the RCM Eta, from two greenhouse gas emission scenarios RCPs 4.5 and 8.5. It was necessary to carry out the projection of the population of the city of Belém-PA until the year 2100, using the Gompertz model. The results projected a large reduction in the volume of precipitation in the rainy months compared to historical data; and for the summer period, the projections point to drier months than normal. The surface evaporation projection showed an increase in the evaporated surface volume. The consequences of the projections on the future water balance of the lakes were a high reduction in the volume of both, interfering in the recovery of their maximum capacities. The projections of future scenarios for the lakes showed that the actual production of COSANPA will not be able to meet the future demand of society, causing a situation of water scarcity until the end of the century, will lead to the need to increase the pumping of water to the lakes. In this way, understanding how changes in hydrological variables will affect water availability is an important tool in the quest to mitigate impacts and carry out long-term planning and management of this resource.

Keyword: Climate Changes; Lakes Water Balance; Population Growth; General Circulation Models; Regional Climate Models; RCPs.

LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1: Elevação da temperatura média global. 21
Figura 2: Projeções dos cenários RCPs para as emissões antropogênicas anuais de CO2. 22
Figura 3: Temperatura média e precipitação média global a partir dos cenários RCPs 2.6 e 8.5. 23
Figura 4: Taxa de desmatamento na Amazônia Legal por estado. 29
Figura 5: Esquema das variáveis envolvidas no balanço hídrico de lagos. 36
Figura 6: Fluxograma da metodologia usada. 43
Figura 7: Localização dos lagos Bolonha e Água Preta. 44
Figura 8: Perfil de elevação dos lagos Bolonha e Água Preta. 45
Figura 9: Lago Água Preta 46
Figura 10: Extravasor de água do lago Água Preta. 47
Figura 11: Extravasor de água do lago Bolonha. 48
Figura 12: Bairros abastecidos pelo Sistema Integrado da COSANPA. 49
Figura 13: interface da plataforma PROJETA para baixar os dados de projeção. 52
Figura 14: Dados de precipitação observados e projetados para sequências de 3 anos (2027-2029, 2047-2049, 2097-2099). 57
Figura 15: Dados de evaporação observados e projetados para sequências de 3 anos (2027-2029, 2047-2049, 2097-2099). 59
Figura 16: Precipitação e evaporação média mensal observada e simulada de Belém para o cenário RCP 4.5 e 8.5 projetado pelo Eta-MIROC5. 60
Figura 17: Precipitação e evaporação média mensal observada e simulada de Belém para o cenário RCP 4.5 e 8.5 projetado pelo Eta-HADGEM2-ES. 61
Figura 18: Balanço hídrico do lago Água Preta modelo Eta-MIROC5, RCPs 4.5 e 8.5. 63
Figura 19: Balanço hídrico do lago Água Preta modelo Eta-HADGEM2-ES, RCPs 4.5 e 8.5. 64
Figura 20: Balanço hídrico do lago Bolonha modelo Eta-MIROC5, RCPs 4.5 e 8.5. 66
Figura 21: Balanço hídrico do lago Bolonha modelo Eta-HADGEM2-ES, RCPs 4.5 e 8.5. 67
Figura 22: Balanço hídrico do Manancial Utinga projetado via modelo Eta-MIROC5 para os cenários RCPs 4.5 e 8.5. 69
Figura 23: Balanço hídrico do Manancial Utinga via modelo Eta-HADGEM2-ES para os cenários RCPs 4.5 e 8.5. 70
Figura 24: Cenários de projeção da população de Belém-PA. 72
Figura 25: Cenários de projeção de consumo de água em Belém-PA. 73
Figura 26: Cenários de projeções de bombeamento de água bruta para o manancial Utinga. 75

Tabela 1: Bairros abastecidos por cada setor. 50
Tabela 2: Detalhes sobre GCMs utilizados no estudo. 53

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
AR5	Fifth Assessment Report
BESM	Brazilian Earth System Model
COSANPA	Companhia de Saneamento do Pará
CMB’s	Conjuntos motor-bomba
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DOU	Diário Oficial da União
EGP	Emissions Gap Report
EP	Erro Percentual
ETA	Estação de Tratamento de Água
GEE	Gases do Efeito Estufa
GCMs	General Circulation Models
HadGEM2-ES	Hadley Center Global Environment Model
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IBGE	Instituto Brasileiro de Geográfica e Estatística
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate
MDE	Modelo Digital de Elevação
OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNA	Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
PROMABEN	Programa de Saneamento da Bacia da Estrada Nova
RCP	Representative Concentration Pathway
RCMs	Regional Climate Models
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SECOM/PA	Secretaria de Comunicação - Pará
SNM	Sistema Nacional de Meteorologia
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
UNEP	United Nations Environment Programme
WMO	World Metereological Organization
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15

1.1. OBJETIVOS **..... 17**

1.1.1. Gerais 17

1.1.2. Específicos 17

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18

2.1. O MUNDO FRENTE AOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS 18

2.1.1. Representative Concentration Pathway (RCPS) 20

2.1.2. Gerenal Circulation Models (GCMS) 24

2.1.3. O Brasil e o impacto das mudanças climáticas 27

2.2. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS **..... 31**

2.2.1 Reservatórios de água 33

2.3. CRESCIMENTO POPULACIONAL **..... 37**

2.3.1. Método utilizado no Brasil 39

2.4. GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS **. 40**

3. MATERIAL E MÉTODOS 43

3.1 ÁREA DE ESTUDO **..... 43**

3.1.1 Sistema de abastecimento de água de Belém 45

3.1.2 Setores de abastecimento de Belém 48

3.1.3 Consumo per capita 50

3.2 OBTENÇÃO DE DADOS CLIMATOLÓGICOS **..... 51**

3.2.1 Eta-MIROC5 Eta-HADGEM2-ES 52

3.3 BOX PLOT 53

3.4 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO 53

3.5 MODELO DE CRESCIMENTO POPULACIONAL DE GOMPERTZ **..55**

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 57

4.1. ANÁLISE DOS DADOS OBSERVADOS E PROJETADOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO**.....57**

4.2. MÉDIAS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO.....59

4.3. PROJEÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DOS LAGOS 62

4.3.1. Lago Água Preta.....62

4.3.2. Lago Bolonha 65

4.3.3. Manancial do Utinga (Lago Água Preta + Lago Bolonha).....68

4.4. PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO E VAZÃO DEMANDADA DOS LAGOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE BELÉM-PA.....71

5. CONCLUSÃO 77

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 79

REFERÊNCIAS.....80

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos desempenham um papel fundamental para sobrevivência dos seres humanos, desenvolvimento econômico e segurança alimentar. Numerosos estudos têm buscado analisar quais impactos as mudanças climáticas irão causar às chuvas, descargas de rios e disponibilidade de recursos hídricos (COSTA et al. 2021; FERREIRA e SOUZA 2020; CHOU et al. 2014b). Conhecer os possíveis cenários climáticos e hidrológicos futuros e suas incertezas podem auxiliar na estimativa da disponibilidade hídrica para o futuro e na definição de políticas ambientais de uso e gestão da água (MARENGO et al. 2017).

A crescente preocupação sobre os efeitos das mudanças climáticas levou em 1988 o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e a Organização Meteorológica Mundial (OMM) a lançarem o *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), com o objetivo de fornecer informações científicas em todos os níveis aos governos, para que possam ser usadas para desenvolver políticas climáticas (UNEP, 2020). O IPCC reúne cientistas vinculados aos principais centros de pesquisa em clima, para publicar relatórios sobre os possíveis cenários de emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera e os impactos nas diversas variáveis climáticas (SILVEIRA et al. 2016).

No quinto relatório do IPCC o *Fifth Assessment Report* (AR5), em 2014, foram lançados quatro cenários de mudanças na concentração de GEE até o final do século. Denominados *Representative Concentration Pathway* (RCP), os quatro cenários chamados RCP 8.5, RCP 6.0, RCP 4.5 e RCP 2.6, a numeração de cada RCP correspondem as forças radiativas até o final do século em W/m². O primeiro RCP é o mais pessimista e resulta em um aquecimento médio global no final do século XXI de cerca de 4˚C, enquanto o último RCP é o mais otimista e corresponde a um aquecimento global de cerca de 1˚C (ALEMAN et al. 2017).

As projeções climáticas para o planeta são realizadas a partir dos *General Circulation Models* (GCMs), modelos climatológicos que utilizam diversos cenários, incluindo os RCPs como condições de contorno. Os GCMs simulam muitos aspectos climáticos, como a temperatura da atmosfera, oceanos, precipitação, ventos, nuvens, correntes oceânicas e extensão do gelo marinho (IPCC, 2014). Para realizar projeções climáticas em escalas regionais devem ser utilizados os *Regional Climate Models* (RCMs). Conforme Costa et al. (2020b); Chokkavarapu & Mandla (2019) os

RCMs são modelos que reduzem as projeções dos GCMs, para obter informações climáticas mais precisas de determinada região.

Estudos como o de Shrestha et al. (2017); Kopytkovskiy et al. (2015); Chou et. Al. (2014b) realizaram projeções climáticas com GCMs, os quais apontam cenários de mudança nas variáveis climáticas. O que valida a afirmação de Schuster et al. (2020) de que as mudanças climáticas vêm alterando o comportamento das chuvas, vazão, temperatura e disponibilidade de recursos hídricos, levando a utilização de séries temporais destas variáveis a estratégias equivocadas para o futuro de obras hidráulicas. Outro fator que pode influenciar na disponibilidade é o crescimento populacional, comprometendo sua qualidade e quantidade. Para Schewe et al. (2014) este crescimento aliado às mudanças econômicas e climáticas previstas para as próximas décadas, podem gerar problemas de escassez hídrica em grande escala. Para Lima et al. (2007), o atendimento à demanda da população atual não deve comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades.

Compreender as consequências das mudanças climáticas sobre reservatórios de água tem se tornado motivação para diversos estudos, a maioria prevê uma redução no desempenho dos reservatórios e maiores requisitos de capacidade de armazenamento, devido às alterações na frequência e intensidade das precipitações (SOUNDHARAJAN et al. 2016; ARSISO et al. 2017). Pesquisas concluíram também que os lagos são importantes indicadores de mudanças no clima, pois os parâmetros que contribuem para manter o volume de armazenamento, apresentam sensibilidade às mudanças do clima (SOJA et al. 2013; SHEVNINA et al. 2018). No trabalho de Dessie et al. (2015) para o lago Tana localizado na Etiópia, os autores concluíram que a evaporação do lago é sensível às mudanças climáticas, podendo afetar o seu equilíbrio. As projeções de variáveis climáticas realizadas por Costa et al. (2021) para região amazônica apresentaram cenários desfavoráveis, decorrentes das mudanças climáticas. Para Reboita et al. (2021), na Amazônia, as projeções indicam condições mais secas em relação ao período histórico.

Diante disso, o presente estudo traz uma pesquisa importante, tratando-se de um estudo pioneiro sobre a temática para a região. No qual foi analisado os lagos Bolonha e Água Preta, que servem como reservatórios para abastecimento de parte da população de Belém–PA, buscando verificar se o sistema será capaz de atender

a demanda futura de água. O trabalho objetiva também compreender quais os parâmetros que contribuem para manter o volume dos lagos e a influência que as mudanças climáticas trarão para a dinâmica do balanço hídrico destes ambientes.

Foram utilizadas as projeções dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES alinhados aos RCPs 4.5 e 8.5, pois conforme Kundzewicz et al. (2018) a avaliação do impacto das mudanças climáticas deve ser embasada em diferentes modelos. Essa avaliação é usada para verificação dos modelos, pois os cenários projetados são incógnitas sobre o futuro do meio ambiente e sociedade. O RCP 2.6, que conforme AR5 do IPCC (2014), projeta o cenário de elevação da temperatura média global mais favorável até final do século XXI de 0,3°C a 1,7°C, não foi considerado nas projeções, pois de acordo com UNEP (2019), o mundo caminha para um aumento de temperatura de 3,2°C.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Gerais

- Efetuar o balanço hídrico atual e futuro dos lagos Bolonha e Água Preta sob a influência das mudanças climáticas; e
- E realizar a projeção da população atendida, visando analisar se o volume futuro dos lagos será capaz de atender a demanda da cidade.

1.1.2. Específicos

- Determinar o volume máximo dos lagos Bolonha e Água Preta;
- Obter dados de precipitação e evaporação atuais e futuros de Belém-PA, e calcular o volume precipitado sobre os lagos e evaporado dos mesmos;
- Realizar a projeção da população e dos balanços hídricos dos lagos;
- Analisar as alterações dos volumes dos lagos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. O MUNDO FRENTE AOS CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As mudanças a longo prazo nos padrões climáticos médios em todo o mundo, chamadas de “mudanças climáticas”, estão fazendo com que muitos eventos climáticos extremos se tornem mais intensos e frequentes, como ondas de calor, secas e inundações (MET OFFICE, 2020). Os estudos sobre as alterações climáticas iniciaram após a identificação da elevação da temperatura média da terra. As pesquisas científicas sobre o aquecimento global remetem à década de 1890, quando o cientista sueco Savante Arrhenius demonstrou em artigo a influência do dióxido de carbono no efeito estufa, porém se considera que as discussões sobre o aquecimento global no âmbito público, iniciaram-se ao final dos anos 1980 e começo dos anos 1990 (FLEURY et al. 2019).

A partir da Revolução Industrial, o homem passou a emitir quantidades significativas de GEE elevando sua concentração na atmosfera (KURAHASHI-NAKAMURA et al. 2010; FOLEY et al. 2013), tendo como consequência a elevação da temperatura média do planeta. O efeito estufa é um fenômeno natural, que foi intensificado por ações antropogênicas, correspondendo a uma camada de gases compostas principalmente por gás carbônico (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e vapor d’água. Os GEE são capazes de bloquear parte da radiação solar e são responsáveis por manter o planeta aquecido.

Ao longo dos séculos XX e XXI ocorreram diversas conferências, buscando analisar as mudanças que o clima do planeta vem sofrendo, e encontrar soluções para minimizar os impactos negativos das ações antropogênicas sobre o clima. A primeira conferência sobre o clima ocorreu em 1979, em Genebra na Suíça, chamada de Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiriça a Longa Distância, estabelecendo o primeiro instrumento juridicamente vinculante do mundo para tratar da qualidade do ar regional (UNEP, 2020). Após isso ocorreu em 1985 a conferência de Villach, a partir deste momento foi levado em consideração que o aumento das concentrações de GEE levaria ao aquecimento do clima global (FORNER; BONILLA, 2013).

Outro importante marco ocorreu em 1987, denominado Protocolo de Montreal e tratava das Substâncias que destroem a Camada de Ozônio. De acordo com Sarmiento (2019) o marco do acordo ambiental multilateral regula a produção e o

consumo de cerca de cem produtos químicos feitos pelo ser humano, chamados de substâncias destruidoras da camada de ozônio. Este Protocolo é até os dias atuais o único tratado das Nações Unidas a ser ratificado por todos os países do planeta. Em 1988 ocorreu em Toronto a primeira reunião com o objetivo de discutir as mudanças climáticas, com líderes políticos e cientistas de vários países. Onde as alterações climáticas globais foram consideradas tão sérias quanto uma guerra nuclear (GUPTA, 2010).

O ano de 1988 também foi marcado pela criação do IPCC, desenvolvido pela PNUMA e a OMM. O órgão é uma rede internacional de especialistas, encarregada de estudar, apoiar e divulgar trabalhos científicos sobre as avaliações do clima e os cenários de mudanças climáticas para o futuro, seus impactos e níveis de adaptação ao aquecimento. O IPCC elaborou relatórios em 1990, 1995, 2001, 2007 e 2014, o próximo relatório o AR6 (Six Assessment Report) sobre o clima será apresentado em 2022 (IPCC, 2020).

No Brasil ocorreu em 1992 na cidade do Rio de Janeiro a conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como Cúpula da Terra, nesta conferência foi estabelecida a Agenda 21. O objetivo da Agenda 21 foi de ser utilizada como um instrumento de planejamento para a construção de sociedades sustentáveis, em diferentes bases geográficas, conciliando métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica (MMA, 2021).

Em 1997 ocorreu a 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada em Kyoto, Japão. Onde foi definido o Protocolo de Kyoto. Foi o primeiro tratado internacional para controle da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. O protocolo estabelecia a redução de 5,2%, em relação a 1990, na emissão de poluentes como GEE, principalmente por parte dos países industrializados, no período compreendido entre 2008 e 2012 (MMA, 2021). O protocolo também estimulava a criação de formas de desenvolvimento sustentável para preservar o meio ambiente.

Ao ser adotado, o Protocolo de Kyoto foi assinado por 84 países. Os Estados Unidos, um dos países que mais emitem gases poluentes no mundo, abandonaram o Protocolo em 2001 com a justificativa de que cumprir as metas estabelecidas comprometeria seu desenvolvimento econômico. As metas de redução de gases não

são, entretanto, homogêneas entre os países que assinaram o acordo. Trinta e oito países têm níveis diferenciados nas metas de redução dos gases poluentes. Países que compõem a União Europeia, por exemplo, estabeleceram meta de 8% na redução dos GEE, enquanto o Japão fixou esse percentual em 6%. Quando os Estados Unidos aderiram ao acordo, comprometeram-se com a redução de 7% dos gases poluentes.

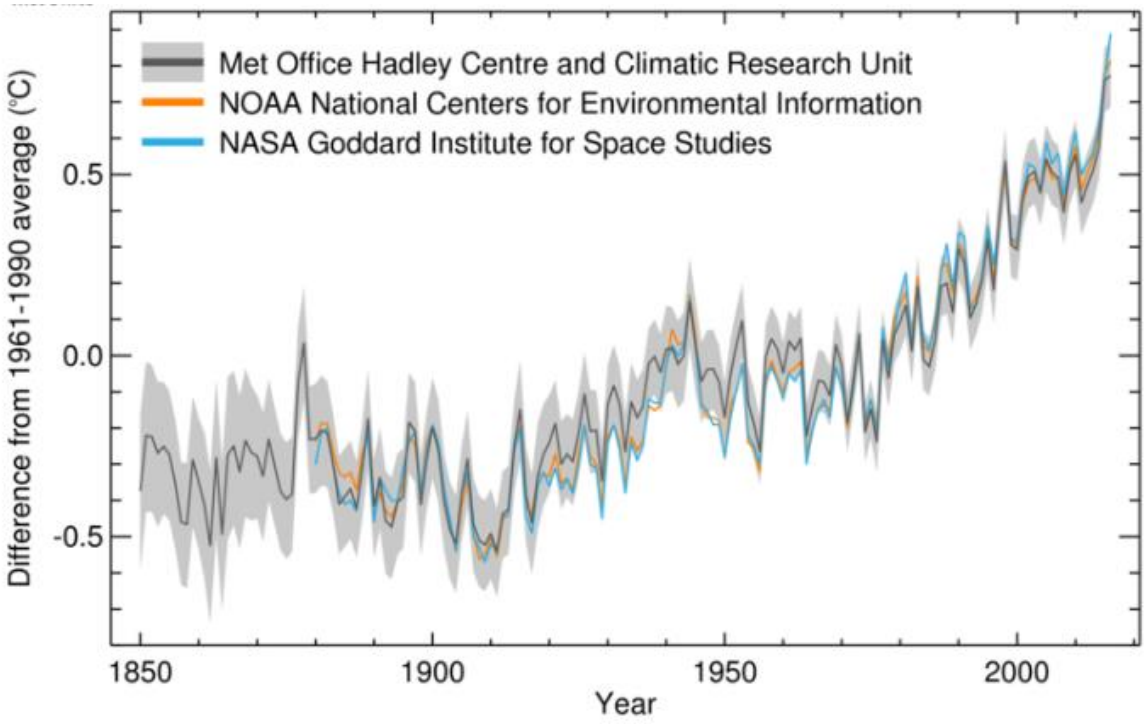
Uma conferência que elevou a política de mudança climática ao mais alto nível político foi a Conferência sobre Mudança do Clima de Copenhague que ocorreu em 2009. 115 líderes de vários países participaram do segmento de alto nível, se tornando um dos maiores encontros de lideranças mundiais já realizados fora da sede da Organização das Nações Unidas (ONU) em Nova York (UNEP, 2020). Os países participantes da Conferência concordaram em tomar nota de um documento intitulado Acordo de Copenhague, no qual foi incluída a meta de longo prazo de limitar o aumento da temperatura média global máxima a não mais do que 2ºC acima dos níveis pré-industriais. Outro importante acontecimento foi a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas em 2015, que ocorreu em uma reunião em Paris, na qual 195 países adotaram um acordo climático global universal. De acordo com Rogelj et al. (2016), os países apresentaram planos nacionais para enfrentar o desafio das mudanças climáticas após 2020.

2.1.1. Representative Concentration Pathway (RCPs)

Para o AR5 do IPCC (2014), os principais fatores que impulsionam as mudanças nas emissões antropogênicas de GEE são o crescimento econômico e populacional, estilo de vida, mudanças comportamentais, mudanças associadas ao uso de energia e uso da terra. A Figura 1 mostra a mudança de temperatura global de 1850 a 2018, em comparação com a temperatura média de 1961-1990. Sendo possível observar um acréscimo de mais de 0,5°C na temperatura global quando comparada com a temperatura média de 1961-1990. Segundo o último relatório de avaliação do IPCC, o AR5, o aumento gradual da temperatura, que presumidamente ocorrerá na maioria das regiões do planeta, é atribuído especialmente aos níveis de GEE (SCHARDONG et al. 2014). Conforme o relatório A Base da Ciência Física (2021) do grupo I do AR6, os aumentos observados nas concentrações de GEE desde 1750 são inequivocamente causados por atividades humanas. Por exemplo,

em 2019 as concentrações atmosféricas de CO_2 foram as maiores registradas no último século.

Figura 1: Elevação da temperatura média global.



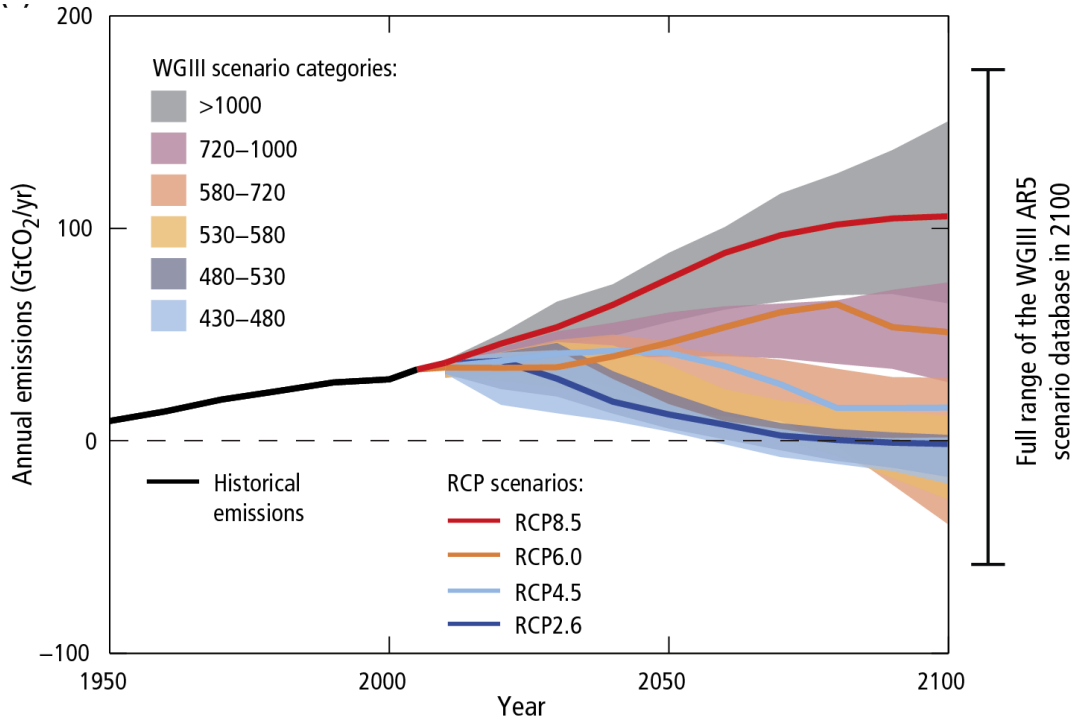
Fonte: Met Office, (2020).

A partir do AR5 do IPCC, foram definidos os RCPs, cenários futuros a longo prazo, voltados para o desenvolvimento de pesquisas e simulações sobre as mudanças climáticas futuras. De acordo com o Met Office (2018), os RCPs especificam concentrações de gases de efeito estufa até 2100. O número ligado a cada RCP está relacionado com o valor do fluxo radiativo ao final do século XXI em W/m^2 (ALEMAN et al., 2017). Os RCPs buscam abranger uma ampla faixa de futuros cenários plausíveis de emissões, esses objetivos são incorporados aos nomes dos RCPs; RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5.

Cada cenário resulta em uma faixa diferente de aumentos da temperatura média global ao longo do século XXI (Figura 2). O RCP2.6 representa um caminho em que as emissões de GEE são fortemente reduzidas, o RCP8.5 é um caminho em que as emissões de GEE continuam a crescer sem mitigação e os RCP4.5 e RCP6.0 são duas vias de estabilização média, com níveis variados de mitigação.

Para Costa et al. (2020a), os cenários RCPs mais usados para as simulações futuras (2006–2100) são o RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5, sendo o cenário RCP 2.6 o menos provável de ocorrer, enquanto o RCP 4.5 é o cenário desejado.

Figura 2: Projeções dos cenários RCPs para as emissões antropogênicas anuais de CO2.



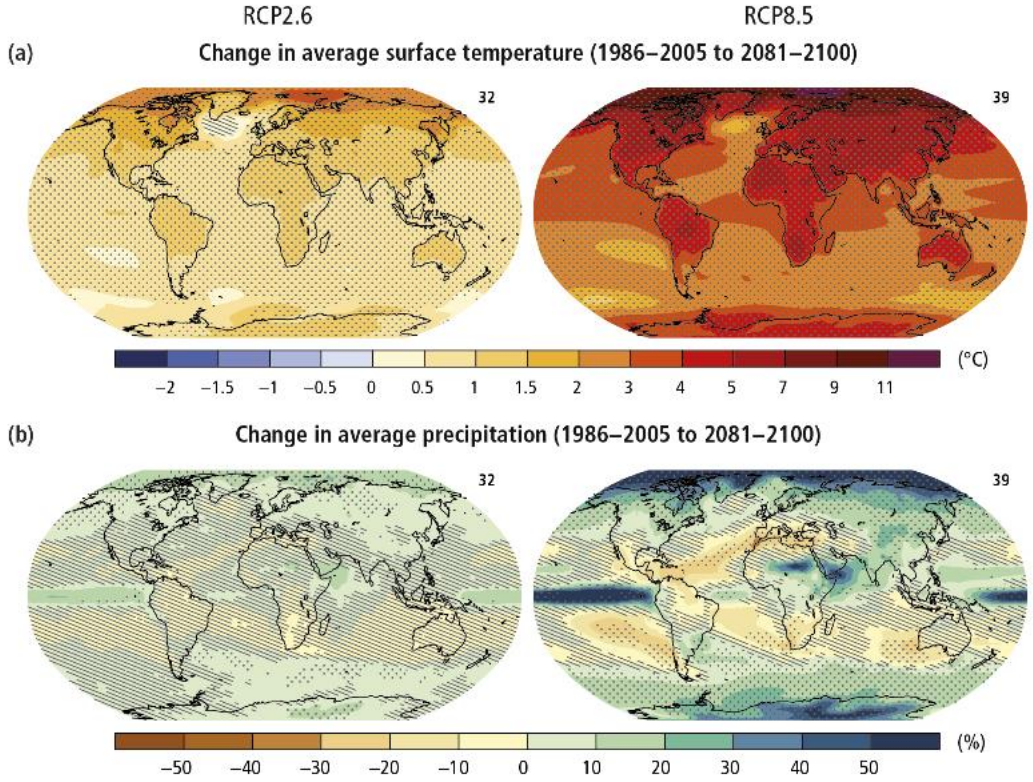
Fonte: IPCC (2014)

O cenário RCP4.5 pressupõe que o forçamento radiativo estabiliza pouco depois de 2100, sem ultrapassar o nível de radiação a longo prazo de 4,5 W/m^2 (OLIVEIRA, et al., 2020). Essa projeção é consistente com a estabilização da demanda energética mundial, programas de reflorestamento fortes e políticas climáticas rigorosas, sugerindo uma estabilização das emissões de metano associada a um leve aumento das emissões de CO_2 até 2040 (SILVEIRA, et al., 2016).

O cenário RCP8.5 é considerado o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases do efeito de estufa, levando a um forçamento radiativo de 8,5 W/m^2 até o final do século XXI. Para Silveira et al. (2016), este cenário sugere um crescimento contínuo da população, associado a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em acentuadas emissões de dióxido de carbono, sem mudanças políticas para reduzir as emissões.

Na Figura 3 são apresentadas projeções da temperatura e precipitação média global para dois cenários RCPs. O aumento da temperatura média nos polos observado na (Figura 3a), de acordo com o AR5 do IPCC (2014) levará à diminuição de algumas geleiras de 15% a 55% para o cenário RCP 2.6, para o RCP 8.5 de 35% a 85%. As mudanças nas precipitações não serão uniformes como pode ser observado na (Figura 3b). Também, conforme o AR5 do IPCC (2014), em muitas regiões úmidas de latitude média, a precipitação média provavelmente aumentará sob o cenário RCP 8.5 e em latitudes médias e regiões subtropicais secas, a precipitação média provavelmente diminuirá. Segundo o relatório A Base da Ciência Física (2021), cada uma das últimas quatro décadas foi sucessivamente mais quente do que qualquer década que a procedeu desde 1850.

Figura 3: Temperatura média e precipitação média global a partir dos cenários RCPs 2.6 e 8.5.



Fonte: IPCC, (2014)

2.1.2. Gerenal Circulation Models (GCMs)

Em 1904 Vilhelm Bjerknes conceituou a meteorologia como uma ciência atmosférica exata, e a atmosfera como um motor de circulação de massa de ar impulsionado pela radiação solar e forças gravitacionais expressas em diferenças locais de velocidade, densidade, pressão, temperatura e umidade (GRAMELSBERGER, 2010). A modelagem numérica e a simulação tornaram-se métodos centrais da ciência a partir da invenção dos computadores na década de 1940. Em 1950 Charney et al. realizaram o primeiro experimento numérico conduzido para o ramo da meteorologia, ainda na mesma década, Norman Philsips's efetuou o primeiro experimento de circulação global (GRAMELSBERGER, 2011).

Bjerknes descreveu as equações básicas para o Modelo de Circulação Global (GCM), que consiste nas três equações hidrodinâmicas de movimento, da continuidade, do estado para a atmosfera, que é uma relação finita entre densidade, pressão do ar, temperatura e umidade de qualquer massa de ar, e os dois teoremas fundamentais na teoria mecânica do calor. Isso tornou possível escrever duas relações diferenciais que especificam como a energia e a entropia de qualquer massa de ar modificam-se em uma mudança de estado.

Para executar um modelo climático numérico, as sete equações de Bjerknes devem ser transformadas em uma lista de procedimentos que divide a atmosfera em uma série de células de grade e descreve o impacto dos efeitos físicos e mecânicos nos fluidos (GRAMELSBERGER, 2011). Os GCMs são modelos matemáticos que possibilitam gerar estimativas de cenários climáticos futuros. Os GCMs devem ser parametrizados por um conjunto de condições de contorno. De acordo com o IPCC (2014), para projeções de mudanças climáticas serem determinadas, os modelos climáticos usam informações descritas nos cenários RCPs de emissão de GEE, poluentes atmosféricos e padrões de uso da terra como condições de contorno. Estes modelos resolvem equações prognósticas que representam processos climáticos físicos e dinâmicos, incluindo equações de movimento, termodinâmica, continuidade de massa e vapor de água em três dimensões (GLEICK, 1986).

De acordo com AR5 do IPCC (2014), os GCMs são representações matemáticas de processos importantes no sistema climático da Terra, simulando muitos aspectos climáticos, incluindo a temperatura da atmosfera e dos oceanos, precipitação, ventos, nuvens, correntes oceânicas e extensão do gelo marinho. Os

modelos dividem a terra, o oceano e a atmosfera em malhas para realizar o cálculo matemático. Tais modelos são capazes de prever as condições do tempo, o clima da próxima estação e simular as características mais gerais do clima futuro, na escala de décadas ou séculos, considerando as modificações antropogênicas e naturais (SAMPAIO e DIAS, 2014).

As simulações realizadas pelos GCMs começam no período industrial moderno de 1850 e vão até 2005, a parti de 2006 as projeções são realizadas usando os RCPs, que estabilizam em 2100 (CHOU et al., 2014a). Os GCMs por limitações computacionais possuem resolução espacial horizontal de centenas de quilômetros (SALES E PEREIRA, 2015). Características locais como topografia, bacias hidrográficas e linhas costeiras podem não ser suficientemente capturadas nas simulações realizadas por esses GCMs (CHOU et al. 2014b). A escala dos GCMs é um dos principais fatores que limita a aplicação direta de projeções climáticas à modelagem hidrológica para se avaliar os recursos hídricos.

Assim, para se traduzir as projeções de GCMs de larga escala para escalas mais representativas em nível de estudos regionais sobre mudanças climáticas, foram desenvolvidas técnicas matemáticas, para refinar os dados, chamadas de downscalings. Nesse caso, existem duas técnicas principais de downscaling: o estatístico e o dinâmico. O downscaling estatístico relaciona variáveis climáticas locais e resultantes de GCMs, com funções estocásticas obtidas empiricamente a partir de dados históricos. Já o downscaling dinâmico simula processos físicos em escalas mais refinadas, nas quais os cenários são derivados de Regional Climate Models (RCMs) (JUNIOR; MAUAD, 2015).

Na busca de compreender como as mudanças climáticas afetarão o futuro do planeta, centros de pesquisas de vários países desenvolveram seus próprios GCMs, para realizar projeções climáticas. O GCM desenvolvido em conjunto pelo Centro de Pesquisa do Sistema Climático da Universidade de Tóquio, Instituto Nacional de Estudos Ambientais e Agência Japonesa para Ciência e Tecnologia Marinho-Terrestre foi o *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (MIROC). A versão mais recente do GCM japonês é chamada de MIROC5. As projeções realizadas por este GCM, são mais realistas para precipitação climatológica e temperatura da superfície do mar em regiões que sofrem influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), como é o caso da região Amazônica (WATANABE et al. 2010).

O modelo *Hadley Center Global Environment Model* (HadGEM2-ES) versão 2 foi desenvolvido pelo centro de pesquisa Met Office Hadley Centre do Reino Unido. Na análise feita das projeções do HadGEM2-ES para precipitação de 6 biomas brasileiros, o modelo simulou muito bem as estações chuvosas e menos chuvosas no bioma da Amazônia, para análise média mensal a longo prazo (ALMAGRO et al. 2020).

Estes dois GCMs foram analisados por Costa et al. (2020a). Nesse caso, o modelo MIROC5 foi o que apresentou as melhores projeções quando comparado ao HadGEM2-ES, para a região da Amazônia, as projeções preveem um aumento da intensidade das chuvas diárias para ambos os modelos. Ferreira e Souza (2020) realizaram projeções para bacia hidrográfica do rio Brígida localizada em Pernambuco, utilizando o modelo MIROC5, o qual mostra cenários preocupantes de redução de precipitação, e analisou que o modelo apresentou resultados consistentes com o projetado pelo IPCC.

O GCM desenvolvido pelo Canadá, no centro de pesquisa *Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis* (CCCma), foi o GCM *Canadian Earth System Model* (CanESM), que está na sua segunda geração CanESM2. Conforme o Government of Canada (2022), este GCM representa a contribuição canadense para o Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5). Nas projeções climáticas realizadas por Costa et al. (2020a), o GCM CanESM2 não apresentou resultados satisfatórios para a região amazônica.

No Brasil foi desenvolvido o Modelo Brasileiro do Sistema Terrestre (BESM – *Brazilian Earth System Model*, na sigla em Inglês), um conjunto de programas computacionais que acopla os componentes de superfície continental, oceano, atmosfera e química globais, com o principal objetivo de gerar cenários de mudanças climáticas com perspectiva brasileira, (INPE 2021). O país foi o primeiro da América do Sul a possuir o seu próprio GCM, mas mesmo com esse grande avanço deve-se levar em consideração que o BESM ainda não fornece cenários tão detalhados como os gerados por outros modelos globais mais robustos (PIVETTA, 2013).

Quanto aos RCMs, estes desempenham um importante papel, reduzir as projeções dos GCMs em tamanhos de grades menores na área de interesse, para que os estudos de impacto possam ser realizados. Os RCMs possuem um domínio

limitado e resolução espacial na ordem de dezenas de quilômetros que permitem enxergar e resolver características do sistema terrestre não observadas nos GCMs (Sales e Pereira, 2015). Na projeção de Chou et al. (2014a), o RCM Eta alinhado aos GCMs HadGEM2-ES e MIROC5, contêm as principais características da climatologia da América do Sul e América Central.

O RCM Eta foi proposto por Mesinger (1984) e desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia. O modelo Eta tornou-se operacional no Centro Nacional de Meteorologia, Washington, D.C. em 1993 (JANJIC, 1994). O modelo Eta apresenta área limitada por pontos de grade, as simulações do modelo apresentam resolução de 20 km (Chou et al. 2014b). No Brasil, esse modelo começou a ser usado em 1996 para previsão do tempo, e operacional para previsões sazonais em 2002, desde 2010 uma versão não hidrostática passou a ser usada para estudos de mudanças climáticas (LYRA et al. 2017).

Chou et al. (2014b) utilizaram simulações de downscaling baseadas no modelo RCM Eta forçado por dois cenários RCP 4.5 e 8.5, e dois GCMs, HadGEM2-ES e o MIROC5, os resultados para América do Sul mostram que o aquecimento é projetado em todo o continente, com maior amplitude pelo modelo Eta forçado pelo cenário HadGEM2-ES RCP 8.5. Nas projeções de Souza et al. (2019) para o estado do Tocantins, o modelo Eta-MIROC5 apresenta reduções mais intensas de precipitação para o cenário RCP 8.5; e as simulações mais severas de aumento de temperatura foram do modelo Eta-HadGEM2-ES para o RCP 8.5.

2.1.3. O Brasil e o impacto das mudanças climáticas

No Brasil foram desenvolvidas algumas medidas na busca de realizar um monitoramento e gestão do clima nacional. A Lei n° 12.187, de 29 de dezembro de 2009, institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). Alguns dos instrumentos para buscar atender os objetivos da lei são: o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, os Planos de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento nos biomas, o desenvolvimento de linhas de pesquisa por agências de fomento, medidas de divulgação, educação e conscientização, monitoramento climático nacional, medidas fiscais e tributárias destinadas a estimular a redução das emissões e remoção de GEE.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA), buscando atender a PNMC, promoveu o Plano Nacional de Adaptação às Mudanças Climáticas (PNA), instituído em 10 de maio de 2016 por meio da Portaria nº 150. Visando promover a gestão e redução do risco climático no País frente aos efeitos adversos associados à mudança do clima, evitar perdas e danos e construir instrumentos que permitam a adaptação dos sistemas naturais, humanos, produtivos e de infraestrutura.

No Brasil também foi desenvolvido um GCM capaz de prever as consequências do acúmulo de GEE na atmosfera. Sendo parte de um esforço nacional coordenado para construir uma estrutura de pesquisa multidisciplinar voltada para a compreensão das causas da mudança climática global, seus efeitos e seus impactos na sociedade (NOBRE et al. 2013). O *Brazilian Earth System Model* (BESM) foi elaborado pelo INPE em cooperação com pesquisadores de várias instituições de pesquisa e ensino no Brasil e no exterior. O avanço do BESM permitiu a participação pioneira do Brasil com a geração e contribuição de cenários globais de mudanças climáticas, para o projeto Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), que constituiu a base de modelos para a elaboração AR5 do IPCC (BRASIL, 2016).

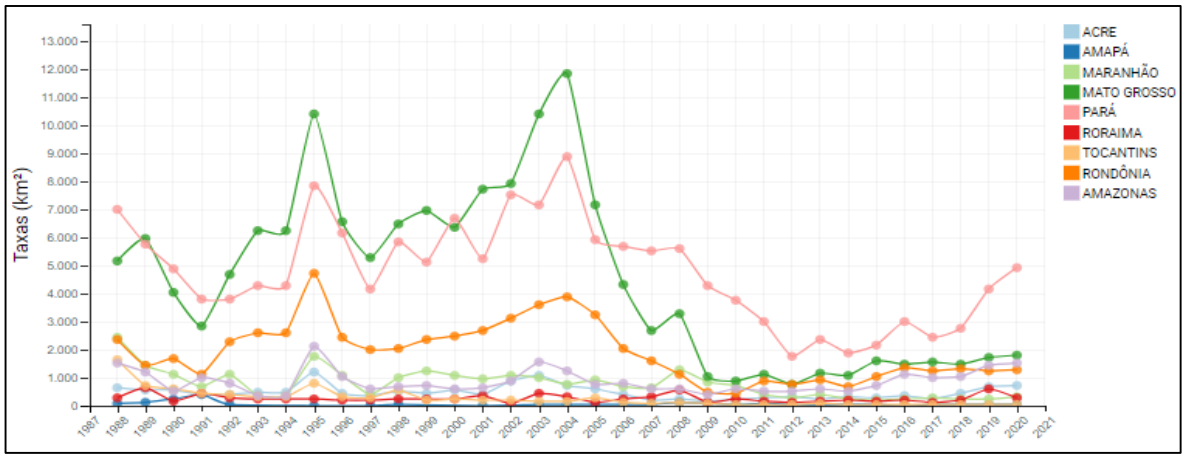
O MMA no contexto da Cooperação para o Desenvolvimento Sustentável Brasil-Alemanha, também realizou o desenvolvimento do PROJETA, uma ferramenta para acesso aos cenários de mudanças do clima regionalizados para o Brasil. O projeto conta com o apoio da Agência Alemã de Cooperação Internacional, GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit). O intuito do projeto é realizar projeções de mudanças do clima para a América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta.

O principal objetivo da plataforma PROJETA é automatizar o acesso aos dados de projeção de mudanças climáticas gerados pelo Modelo Eta no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (HÖLBIG et al. 2018). A plataforma apresenta respostas rápidas para as solicitações feitas pelo usuário, disponibilizando os dados dos cenários RCPs 4.5 e 8.5 dos modelos MIROC5, HADGEM2-ES, CANESM2 e BESM regionalizados pelo modelo Eta. Os dados podem ser baixados em diferentes formatos (CSV, JSON, XML, Geotiff e binário).

Entretanto mesmo com o desenvolvimento de instrumentos que visam mitigar os impactos das mudanças climáticas, reduzir o desmatamento e as emissões de GEE, os índices apresentados por estudos tendem a mostrar um crescimento desses fatores. Por exemplo, análises recentes do INPE (2021), divulgaram dados que apontam um crescimento de 7,13% no desmatamento da Amazônia legal no ano de 2020, quando comparado aos dados de 2019. O SEEG (2020), para o ano de 2019, indica que 44% das emissões de GEE estão ligadas ao desmatamento, principalmente o da Amazônia, sendo 28% em relação ao setor agropecuário. Ainda segundo o SEEG (2020), o país teve um aumento de 9,6% na emissão de GEE em 2019, lançando cerca de 2,17 bilhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera, contra 1,98 bilhões em 2018.

Os dados disponibilizados pelo PRODES (2021) apontam que dentro da Amazônia Legal, os estados do Pará e Mato Grosso são os que apresentam as maiores taxas de desmatamento ao longo dos anos, como pode ser observado na Figura 5. A Amazônia é a região do país que apresenta o maior índice de preservação dos recursos hídricos, porém está sendo drasticamente afetada pelo aumento da pecuária e da agricultura ao longo do chamado “arco do desmatamento” (MARENGO et al., 2017). Ainda na Figura 4 é possível analisar que nos últimos 3 anos o estado do Pará tem apresentado um crescimento na sua taxa de desmatamento, comparado aos outros estados.

Figura 4: Taxa de desmatamento na Amazônia Legal por estado.



Fonte: PRODES (2021)

Estudos apontam que o Brasil já vem sofrendo impactos negativos, causados pelas mudanças climáticas. Para Marengo (2014), ao se observar os eventos climáticos extremos dos últimos 30 anos no Brasil, percebe-se um aumento da frequência de chuvas fortes e grandes estiagens, afetando a segurança hídrica e energética do país. De acordo com Marengo et al. (2017), as chuvas intensas, podem estar associadas a enchentes e ter impactos diretos na população, porém um atraso no início da estação chuvosa pode causar impactos tremendos na agricultura e na geração de energia hidrelétrica. A OMM (2021) indicou que durante o ano 2020 uma serie de ondas de calor atingiram a região da América do Sul, induzindo a condições climáticas favoráveis aos incêndios florestais, especialmente na floresta amazônica e no Pantanal. De acordo com a ONU (2021), os incêndios registrados na América do Sul ocorreram com mais frequência em 2020 do que em 2019, causando “danos irreversíveis aos ecossistemas”.

Mesmo o Brasil dispondo de um grande volume de águas superficiais e subterrâneas, os impactos causados pelas mudanças no clima não se difere do que é observado em escala global. A crise hídrica que antes era ligada a região Nordeste do país, passou a ocorrer em outras regiões como Centro-Oeste, Sul, Sudeste. Por exemplo, a grande estiagem que ocorreu em de 2014 no estado de São Paulo, onde foi necessário realizar restrições de água para a população. Os impactos foram sentidos no setor de geração de energia elétrica, alimentos e comércio. Pelo menos 60 mil estabelecimentos industriais foram afetados (FERREIRA e SOUZA, 2020).

Em maio de 2021 o Sistema Nacional de Meteorologia (SNM) emitiu pela primeira vez um alerta de Emergência Hídrica para a Bacia do rio Paraná. De acordo com o SNM (2021), a previsão é que nos meses de maio a setembro, o volume da precipitação média mensal seja menor que 50 mm na estação seca. Uma nota de agosto de 2021 do governo do estado do Paraná informa que há cidades que estão passando por rodízio de abastecimento de água.

Para o Nordeste e a Amazônia é projeta maior frequência de períodos de estiagens mais intensos e longos, podendo tornar-se secas sazonais (MARENGO, 2014). Para Chou et. al. (2014b) a região amazônica sofre e sofrerá redução na sua precipitação média anual durante o século XXI, podendo chegar a uma redução de até 700 mm, em relação ao clima atual. E os resultados do estudo de Lopes et al.

(2017) para a região amazônica, mostram que os eventos climáticos extremos tendem a ficar mais severos no meio do século.

2.2. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS RECURSOS HÍDRICOS

A temática segurança hídrica tem ganhado força nos debates científicos e políticos, por causa do agravamento da crise hídrica em diversos países. Segundo estimativas da ONU, atualmente, mais de 1 bilhão de pessoas não têm acesso à água potável (FERREIRA; SOUZA, 2020). A combinação de menos precipitação com temperaturas mais altas indicam um potencial estresse hídrico, tornando necessárias políticas adaptativas para lidar com as mudanças projetadas (KOPYTKOVSKIY et al. 2015). De acordo com Raje e Mujumdar (2010), o crescimento econômico de muitos países, mudança no estilo de vida, industrialização e urbanização levaram a um aumento na competitividade por água, levando a um grande estresse hídrico em sistemas já sobrecarregados.

À medida que a população cresce, a influência das ações antropogênicas sobre a água aumenta, afetando a disponibilidade hídrica, porém outro fator que está crescendo e afeta diretamente a água é o impacto das mudanças climáticas. Para Arsiso et al. (2017), há uma crescente preocupação de cidades que possuem crescimento populacional e econômico rápidos, para que haja um gerenciamento sustentável de seus recursos hídricos, pois este crescimento populacional ligado às mudanças climáticas coloca em risco a disponibilidade hídrica. Conforme o *World Resources Institute* (2020), a mudança climática está pronta para modificar os padrões de precipitação, alterando o suprimento de água e intensificando inundações e secas, em contrapartida, a demanda da humanidade por água mais que dobrou desde a década de 1960. Tornando crucial compreender como as variáveis hidrológicas influenciam na disponibilidade da água, para que haja planejamento e gerenciamento de forma sustentável deste recurso.

A *Global Water Partnership* (2000) afirma que o crescimento da população, o aumento da atividade econômica e a melhoria dos padrões de vida levam ao aumento da competição e conflitos por causa dos limitados recursos hídricos. Um exemplo é Hyderabad na Índia, onde a demanda por água está aumentando a cada ano, com a mudança de estilo de vida que está ocorrendo, do alto nível de

crescimento e densidade populacional e por causa do nível de desenvolvimento comercial e industrial (GEORGE et al. 2009). Com o desenvolvimento de novas tecnologias, tem sido possível prever os impactos que as mudanças climáticas iram causar sobre os recursos hídricos. Por exemplo, os trabalhos de Soundharajan et al. (2016); Arsiso et al. (2017), que utilizaram GCMs para simular as alterações futuras que reservatórios de água podem sofrer em decorrência das mudanças climáticas.

A maioria dos estudos apontam cenários críticos de mudanças na disponibilidade de recurso hídricos. As projeções de mudanças climáticas feita por Shrestha et al. (2017) mostram que a temperatura da bacia hidrográfica do Rio Athabasca no Canadá, até o final do século, sofrerá um aumento de até 5°C, para o cenário RCP 8.5. Na pesquisa realizada por Kopytkovskiy et al. (2015), para a bacia do rio colorado nos Estados Unidos, as projeções climáticas realizadas apresentaram uma redução da vazão do rio, o que causará redução dos níveis dos reservatórios presentes na bacia.

De acordo com Junior e Mauad (2015), as mudanças climáticas acarretarão implicações consideráveis no sistema operacional e no gerenciamento das bacias hidrográficas, principalmente em países como o Brasil, onde a disponibilidade de água é bastante influenciada pelo clima. Para Wang et al. (2014), as mudanças climáticas serão uma grande ameaça aos recursos hídricos, que já estão sob pressão devido ao enorme crescimento populacional e à expansão econômica. Para Marengo et al. (2017), o setor de recursos hídricos é uma das áreas mais afetadas pelos impactos das mudanças climáticas, tanto no que se refere à quantidade quanto à qualidade.

Para Souza et al. (2019), compreender a disponibilidade hídrica futura, a partir das projeções de cenários de mudanças climáticas de aumento de temperatura e redução da precipitação, permitem concluir sobre a necessidade de planejamento de medidas mitigadoras a serem realizadas. Os dados de projeção de mudanças climáticas podem ser usados em uma variedade de áreas, aplicações como previsão de safras, disponibilidade de água e geração de eletricidade (HÖLBIG, et al. 2018). De acordo com Costa et al. (2021a), é crucial compreender os efeitos da variabilidade do clima no ciclo hidrológico para o desenvolvimento de planos do governo, pois estes impactos não afetam apenas o aspecto ambiental, mas também o aspecto socioeconômico. Nas projeções realizadas para o Nordeste por Costa et

al. (2020b), os cenários mostram uma redução significativa de precipitação nos meses chuvosos.

Os recursos hídricos não são afetados apenas pelas mudanças que estão ocorrendo no clima e que podem alterar significativamente sua disponibilidade. Mas, são afetados, também, pela demanda dos mesmos. Para com Wang et al (2014), haverá um crescimento da demanda de água principalmente na agricultura devido ao aumento na demanda para irrigação, e destacou que as práticas atuais de gestão de água são provavelmente inadequadas, frente aos cenários de mudanças climáticas. Cidades como de Yulin na China, de acordo com Xiao-jun et al. (2015), terão um aumento da demanda de água de aproximadamente 710 milhões m^3 em 2010 para mais de 1480 milhões m^3 em 2030 em todos os cenários de mudanças climáticas.

2.2.1 Reservatórios de água

O desenvolvimento das sociedades iniciou-se nos leitos dos rios e à medida que a mesma começou a compreender os sistemas hidráulicos estas civilizações migraram para o interior. De acordo com Brooks; Brandes (2009), a água é a base da sociedade, pois durante os séculos, impérios e civilizações aumentam e diminuem junto com a disponibilidade de água. A construção de barragens foi uma técnica adotada para reter a água necessária para o consumo em períodos mais secos, possibilitando o desenvolvimento de cidades. Os reservatórios construídos potencializaram a disponibilidade hídrica superficial, além de armazenar água nos períodos úmidos, podendo liberar parte do volume armazenado durante os períodos de estiagem (ANA, 2017).

Os reservatórios de água tanto naturais quanto artificiais são tidos como fontes de abastecimento para diversas cidades, tendo ajudado, assim, no seu desenvolvimento econômico. Os lagos artificias podem ser criados mediante o barramento de rios, com aparência externa e comportamento ecológico semelhantes a lagos naturais (VON SPERLING, 2006). A cidade de Hyderabad na Índia utiliza lagos artificiais para abastecimento, conforme George et al. (2009) descreveram, a cidade inicialmente foi abastecida por dois reservatórios, Osman Sagar e Himayath Sagar, construídos em 1920 e 1927, respectivamente, suprindo a necessidade de água da cidade até a década de 1950. E um exemplo de lago de ocorrência natural,

é o lago Coeur d'Alene, localizado nos Estados Unidos, o lago é mantido para fins de recreação e geração de energia hidrelétrica (NICELY; FIEDLER, 2017).

O acúmulo de água em reservatórios traz às cidades segurança hídrica nos períodos secos, permitindo o desenvolvimento de suas atividades econômicas e abastecimento da população. Como no caso do reservatório de Bocaina, que se localiza na região semiárida do Nordeste do Brasil. De acordo com Valença et al. (2017), esse reservatório possui capacidade de 106 milhões de m^3 e foi construído com o objetivo de regularizar o Rio Guaribas, para oferecer segurança hídrica para a população do sudeste piauiense. O que também ocorre no semiárido paraibano, conforme Brito et al. (2019), a região sofre frequentemente com secas prolongadas, dificultando o atendimento das demandas hídricas, onde uma das soluções encontradas foi construção de reservatórios, para armazenamento da água no período chuvoso objetivando seu uso posterior.

Com a intensificação das mudanças climáticas, os lagos que são importantes fontes de abastecimento podem sofrer grandes alterações, pois estão muito susceptíveis as modificações do ciclo hidrológico, podendo ter sua quantidade e qualidade prejudicadas. A análise de dados para sete lagos do estudo de caso de Jeppesen et al. (2015) demonstrou mudanças na hidrologia e no nível da água ao longo dos anos, por diferentes razões como mudanças na precipitação e aumento de captação, levando a um aumento na salinidade e concentração de nutrientes. Nas projeções feitas por Helfer et al. (2012) para cenários futuros da represa de Wivenhoe localizada na Austrália, foi previsto aumento na evaporação média anual, por causa da elevação da temperatura do ar na superfície, sendo provável também o aumento de 0,5 °C a 1,5 °C na temperatura média do lago. Para George et al. (2009), compreender a dinâmica de lagos é uma abordagem útil, para analisar o comportamento e os resultados do sistema sob possíveis eventos futuros.

Tornando o balanço hídrico de lagos uma ferramenta eficaz, para conhecer sob quais influências hidrológicas e antropogênicas este ambiente está submetido. Kummu et al. (2014) realizaram o balanço hídrico do lago Tonle Sap localizado no sudeste da Ásia, tornando possível identificar o principal rio que contribui para o volume do lago, o percentual de influência da precipitação e uma avaliação das variáveis de entrada e saída de água. No estudo de Pudeh et al. (2016) para uma barragem localizada no Irã, o balanço hídrico foi realizado para auxiliar em uma obra

hidráulica de túneis de transferência de água. Asfaw et al. (2020) realizaram um estudo para compreender a variação de armazenamento de um lago da bacia do vale do Rift na Etiópia a partir de imagens de satélite, mostrando que o lago vem tendo uma redução anual e já perdeu 12,75% do seu volume de armazenamento.

Entender a dinâmica dos lagos cria a possibilidade de identificar a sua capacidade em diferentes períodos do ano, evitando que seja ultrapassado o volume disponível. Para Zhang et al. (2016), o balanço hídrico de um lago é dominado principalmente pelos componentes de balanço horizontal (entrada e saída do lago) e vertical (precipitação e evaporação no lago). O balanço hídrico realizado por Nicely; Fiedler (2017) para o lago Coeur d'Alene localizado nos Estados Unidos, indicou que o principal fator de elevação dos níveis de água são as correntes dos rios, e que, as águas subterrâneas não possuem grande influência para variação do volume. Mousavi et al. (2019) realizaram o balanço hídrico para analisar fluxos de entrada e saída de reservatórios, para tornar mais eficiente um sistema de gerenciamento de energia.

Na Figura 5 é possível observar sob quais influências o balanço hídrico de um lago está submetido. Ainda há dificuldade em definir todos os parâmetros que envolvem o balanço hídrico de um lago, devido à indisponibilidade de dados, pois alguns não possuem monitoramento, levando a certo grau de incerteza dos modelos. Um dos parâmetros que dificilmente possui dados disponíveis para análise é a infiltração. O que leva muitos modelos a desconsiderarem os fluxos subterrâneos, assumindo zero como valor (SWENSON; WAHR 2009; DESSIE et al. 2015; MOUSAVI et al. 2019).

Figura 5: Esquema das variáveis envolvidas no balanço hídrico de lagos.

A variação hídrica por evaporação superficial é um parâmetro que pode ser monitorado a partir de tanques evaporimétricos tipo Classe A ou Evaporímetro de Piche. Em locais onde não há monitoramento da evaporação superficial, alguns autores como Mousavi et al. (2019) recorreram a modelos matemáticos para simular a evaporação da superfície do lago, pois são dados importantes para compreender a influência da mudança da temperatura sobre o lago.

Quanto ao acúmulo hídrico através da chuva, a alteração nos índices de precipitação ao longo de um ano hidrológico, é uma importante informação, pois a chuva é um fator que influência significativamente a mudança do volume de água de um lago. Tornando necessário quantificar o volume de chuva precipitado sobre a superfície do lago para a realização do balanço hídrico (BEZERRA et al. 2014; PUDEH et al. 2016). Não considerar a água adicionada ao reservatório devido à precipitação, aumenta consideravelmente o erro no cálculo da água armazenada (MOUSAVI et al. 2019). O monitoramento da chuva pode ser realizado por dois aparelhos o pluviógrafo e pluviômetro. Ter uma longa série histórica de precipitação e vazão é essencial para avaliar mudanças nos regimes hidrológicos sob a influência das mudanças climáticas e uso do solo (STAHLI et al. 2011). A aquisição de dados de monitoramento é um pré-requisito para um modelo preditivo bom e confiável (NWAOKORIE et al. 2013).

Para se manter o volume dos lagos em níveis aceitáveis, é importante compreender os fluxos que mantem o volume dos lagos, para que atividades

antropogênicas não interfiram nas vazões afluentes. O abastecimento por água superficial é uma solução adotada pelo poder público para lidar com problemas de escassez hídrica. Por exemplo, o Nordeste sofre com o problema da seca, e nesse caso, 67% do abastecimento público urbano é realizado por água superficial armazenada em açudes (ANA, 2017). No estudo de Valença et al. (2017) para um reservatório localizado na região semiárida do Brasil, constatou-se que ao final de cada ano o nível de água na Barragem tem diminuído, entre os fatores que influenciam esse declínio, além da diminuição da precipitação, estão os efeitos da evaporação e o uso múltiplo da água da Barragem.

Os resultados obtidos com o balanço hídrico de lagos podem ser utilizados como ferramentas para dar base à realização de outros estudos. Como no caso de Bezerra et al. (2014), que realizaram o balanço hídrico nos reservatórios Gargalheiras e Cruzeta localizados na região semiárida do Rio Grande do Norte. Os resultados obtidos foram uma importante ferramenta para auxiliar no balanço de massa dos reservatórios. E no de Hidalgo et al. (2012), que realizaram o balanço hídrico para a reservatório de Furnas localizado em Minas Gerais, buscando contribuir em um modelo de simulação de operação. Na pesquisa de Brito et al. (2019) foram analisados quatros reservatórios do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF). Os autores buscaram com o balanço hídrico destes reservatórios, identificar o volume vertido anualmente, para verificar a possibilidade de redução das perdas hídricas no sistema.

2.3. CRESCIMENTO POPULACIONAL

Em 1798, Thomas Robert Malthus (1766 - 1834), economista e demógrafo britânico, propôs, em seu livro *An Essay on the Principle of Population,* um modelo matemático de crescimento exponencial em que a população mundial aumenta a uma taxa de crescimento per capita constante, sendo pioneiro no tema de processos evolutivos. Miranda & Lima (2010) aponta que a principal falha do modelo proposto por Malthus é considerar uma taxa de crescimento populacional constante, pois leva a uma desastrosa e ilimitada explosão populacional, improvável que represente um processo sustentável.

A correção do modelo de Malthus foi proposta em 1838, por Pierre François Verhulst (1804 - 1849) (SOUZA e FILHO 2020), que apresentou um modelo no qual

a população de uma determinada espécie cresce até um limite máximo sustentável, chamado de capacidade suporte. A taxa de crescimento per capita diminui linearmente com a população, uma abordagem que mais tarde ficou conhecido como o modelo logístico. Para Miranda & Lima (2010), o crescimento da população humana, pode ser representado por uma curva em forma de S ou sigmoide, onde a população cresce até atingir uma taxa máxima de crescimento. Vários autores buscaram ao longo do século passado desenvolver modelos que tivessem o crescimento evolutivo semelhante ao de uma sigmoide como: Gompertz, Verhulst, Von Bertalanffy dentre outros.

Em 1825, Benjamin Gompertz (1779 - 1865), matemático e atuário inglês, obteve um modelo com o qual a ideia inicial era descrever a mortalidade de pessoas (algo bastante útil para sua companhia de seguros). Posteriormente, notou-se que, com alguns ajustes, tratava-se de um modelo muito bem aplicável a certas situações de crescimento populacional. Em todas elas, nota-se que a variável analisada tem um crescimento bastante rápido no início e uma aproximação lenta da capacidade suporte. Gompertz propôs um modelo com princípios semelhantes ao logístico, porém utilizando como limitador uma taxa de inibição logarítmica (THOMAS; EISERMANN, 2020).

A projeção populacional de cidades e municípios auxilia o governo na tomada de decisões, para que sua infraestrutura seja planejada para o futuro. Em análises comparativas dos modelos de Malthus, Verhulst e Gompertz, para realizar projeções populacionais, há concordância que modelos com capacidade suporte como fator limitante, são mais adequados para projeções de longo prazo (THOMAS; EISERMANN, 2020; COUTINHO, 2019). Na simulação demográfica realizada nas Filipinas por Terano, (2018) os resultados obtidos indicam o modelo de Gompertz como altamente preciso. Assim como as projeções para a população do Sri Lanka por Welagedara et al. (2019), no qual o modelo de Gompertz apresentou resultados apropriados para prever o crescimento humano.

Conforme Mckee et al. (2014), é importante quantificar a população futura de uma cidade, para o desenvolvimento urbano, localização de infraestrutura crítica ou avaliação dos impactos das mudanças climáticas, permitindo criar estratégias aprimoradas de adaptação e mitigação. De acordo com Costa et al. (2013), o diagnóstico preciso do crescimento urbano é de grande interesse para os municípios

por diversos propósitos, como planejamento urbano, manejo dos recursos terrestres e hídricos, alocação de infraestruturas e serviços.

Para Hoornweg; Pode (2017) quando as cidades são bem administradas, há a necessidade de realizar projeções populacionais, para evitar que a urbanização cause uma degradação ao ambiente**,** pois a prestação efetiva de serviços básicos permite ganhos substanciais na eficiência do consumo de recursos e gestão de resíduos. Estudos sobre dinâmica populacional são de grande relevância, além de seu caráter interdisciplinar e sua importância para os órgãos públicos na tomada de decisões, visando melhorias para população e podem ainda apontar o risco de uma superpopulação (COUTINHO, 2019).

2.3.1. Método utilizado no Brasil

No Brasil as estimativas populacionais são realizadas pelo Instituto Brasileiro de Geográfica e Estatística (IBGE). O IBGE divulga as estimativas de população estaduais e municipais desde 1975. A partir de 1992, passou a publicá-las no Diário Oficial da União (DOU), em cumprimento da Lei n° 8.443, de 1992. Em 2013, foi publicada a Lei Complementar n° 143, de 2013, estabelecendo que o órgão deveria publicar no DOU, até o dia 31 de agosto de cada ano, a relação das populações dos Municípios, e até 31 de dezembro, a relação das populações dos Estados e do Distrito Federal (IBGE, 2021).

Em 2013, o IBGE divulgou as Projeções da População, para o Brasil e para as Unidades da Federação, incorporando os resultados do Censo Demográfico 2010 e informações mais recentes sobre as componentes do crescimento demográfico. O método utilizado pelo IBGE, para realizar as projeções populacionais do país é o método das componentes demográficas. Este método interage com as variáveis demográficas analisando conjuntos de pessoas ao longo do tempo, a partir de leis de fecundidade, mortalidade e migração.

Para tanto, é necessário que se produzam levantamento, estimativas e projeções de cada um desses conjuntos (IBGE, 2018). De acordo com o IBGE (2013), os censos são realizados a cada 10 anos, por se tratar de operações gigantescas, quanto a custo e operacionalização. As projeções populacionais realizadas pelo IBGE não são feitas para nível geográfico municipal, apenas para o Brasil e as Unidades da Federação, com horizonte atual definido até 2060 (IBGE,

2021). As estimativas municipais de população publicadas anualmente, são calculadas aplicando-se o método matemático desenvolvido por Simões em 1972, denominado AiBi (IBGE, 2021).

Entre o intervalo de tempo de cada censo podem ser realizadas contagens populacionais. No ano de 2007 foi realizada uma contagem populacional, onde são contabilizados apenas o número de moradores dentro de domicílios e estimado os moradores dentro de residências fechadas. A Contagem da População é uma operação mais simples que o censo demográfico, com o objetivo de atualizar as estimativas de população, incorporando as mudanças demográficas ocorridas no Território Nacional, desde o último censo demográfico (IBGE, 2007). Diferente dos levantamentos do censo, onde são levados em consideração características dos residentes das casas.

2.4. GERENCIAMENTO SUSTENTÁVEL DOS RECURSOS HÍDRICOS

A gestão de recursos hídricos no século XX foi baseada na ampliação da oferta de água através das construções de barragens. Isso proporcionou a sociedade a redução de doenças hídricas, ampliação da geração de energia hidrelétrica e agricultura, entretanto também gerou grandes prejuízos socioambientais e econômicos (GLEICK, 2003). O conceito de desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos foi um ponto discutido e adotado na Agenda 21 em reconhecimento à importância da água. O capítulo 18 da Agenda 21 infere que os recursos hídricos devem ser protegidos, levando em conta o funcionamento dos ecossistemas aquáticos e a perenidade do recurso, a fim de satisfazer e conciliar as necessidades de água nas atividades humanas, dando prioridade à satisfação das necessidades básicas e à proteção dos ecossistemas.

O gerenciamento integrado de recursos hídricos é um processo que pode ajudar a lidar com as questões da água de maneira econômica e sustentável. A *Global Water Partnership* (2000) define que para o desenvolvimento de uma política voltada para os recursos hídricos é importante a elaboração de políticas coordenadas em todos os níveis, desde ministérios nacionais a governos locais e instituições comunitárias.

Para que se consiga alcançar o desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos de acordo com Da-ping et al. (2011), o gerenciamento da demanda de água

depende das leis e regulamentos, sendo necessário que estas sejam cumpridas. O objetivo do gerenciamento da demanda é considerar a água como um recurso ou mercadoria econômica, para que as pessoas encontrem um equilíbrio entre o suprimento e a demanda de água. Para Brooks; Brandes (2009) deve-se planejar o uso da água do futuro para o presente, para adequar as políticas a critérios de sustentabilidade. Sendo necessário compreender qual será a necessidade futura para adequar o consumo da atual população.

No Brasil uma forma de dar base legal para o planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, inserindo os princípios de sustentabilidade, foi mediante a Política Nacional de Recursos Hídricos do Brasil (PNRH), estabelecida pela Lei N° 9.433 de 1997 (Lei das Águas). Essa lei instituiu a água como um recurso natural limitado, dotado de valor econômico e de domínio público, privilegiando o uso múltiplo das águas. São objetivos da Lei das Águas, assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável, a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

Para que os órgãos reguladores possam realizar o gerenciamento dos recursos hídricos do território nacional, a PNRH estabeleceu instrumentos para auxiliar no cumprimento dos objetivos da lei, que são os Planos de Recursos Hídricos, o enquadramento dos corpos de água em classes, a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos, a cobrança pelo uso de recursos hídricos e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

No território brasileiro há a divisão irregular dos recursos hídricos, tornando essencial planejar e gerenciar estes recursos, para que regiões com menor disponibilidade não venham a favorecer apenas um tipo de uso. Um exemplo são as regiões litorâneas, que possuem apenas 3% da oferta nacional de água e 45% da população do país (ANA, 2013), mostrando assim a necessidade da atuação dos órgãos reguladores como a ANA e secretarias estaduais responsáveis por gerenciar estes recursos. Conforme Marengo et al. (2017), cerca de 80% da água doce está localizada na região amazônica, 4% no semiárido nordestino e as regiões Sul e Sudeste, onde vive 60% da população, possuíam no passado ampla reserva de

água, porém correm risco de escassez local ou generalizada devido ao crescimento econômico e à urbanização acelerada.

O monitoramento dos recursos hídricos nacionais é realizado pela ANA, através da operação contínua da Rede Hidrometeorológica Nacional (ANA, 2020). Essas informações são fundamentais, para a gestão das águas e podem ser acessadas por qualquer cidadão brasileiro, com interesse em saber as condições das águas no território nacional. A Rede Hidrometeorológica Nacional é composta por mais de 4 mil estações, que monitoram o volume de chuvas, o nível e a vazão dos rios, a quantidade de sedimentos, a evaporação e a qualidade das águas. A WMO (2008) afirma que o objetivo da coleta de dados hidrológicos, desde medições de precipitação, registros do nível da água, medições de vazão, monitoramento de águas subterrâneas e amostragem da qualidade da água, fornecem um conjunto de dados que podem ser usados para a tomada de decisões no gerenciamento de Recursos hídricos.

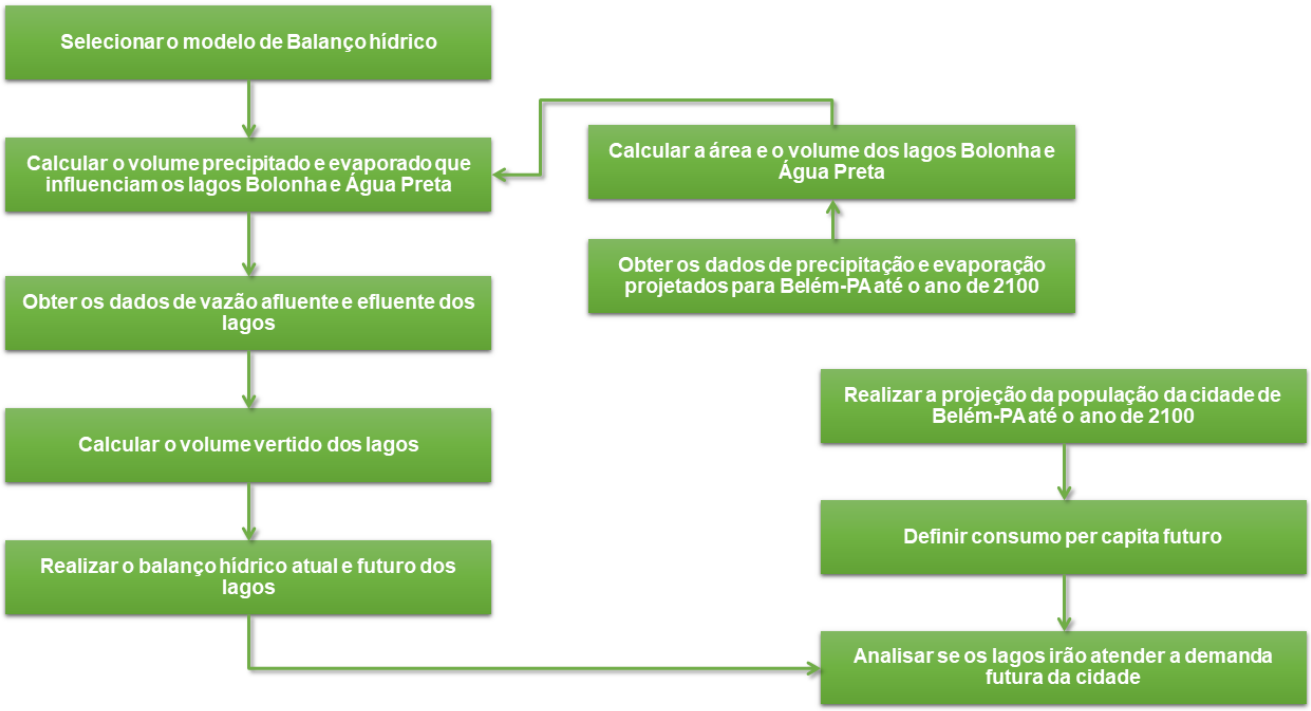
Realizar a gestão sustentável de recursos hídricos está se tornando uma crescente preocupação entre os formuladores de políticas, pois as alterações que estão ocorrendo no ambiente como consequência das mudanças climáticas aumentarão a água demandada e colocará os recursos globais de água doce sob pressão. Na análise de Wang et al. (2014) as estratégias adotadas na bacia do rio Haihe na China, aumentaramu a eficiência do consumo industrial de água, limitando altos níveis de consumo na produção, adotando tecnologia de economia de água e aumentando a proporção de novas indústrias de tecnologia que usam menos água.

Entre as problemáticas existentes sobre a questão das mudanças climáticas está a falta de avaliação dos impactos, possíveis ações para sua mitigação e adaptações a esses impactos. De acordo com Marengo et al. (2017), há a necessidade de uma abordagem institucional não apenas local, mas regional e global para tratar dos impactos que os recursos hídricos iram sofrer, sendo o maior desafio um arcabouço institucional único que permita uma gestão integrada dos recursos hídricos. Para Wang et al. (2014) e Lima et al. (2013), a gestão da demanda por água pode reduzir o consumo, sem prejudicar o desenvolvimento econômico, a necessidade da sociedade e evitar que fatores como desenvolvimento industrial, urbanização acelerada e crescimento populacional, afetem sua disponibilidade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Na (Figura 6) é possível observar o fluxograma das etapas metodológicas aplicadas para se obter os resultados do presente estudo. Na primeira etapa do trabalho foi definido o modelo de Balanço Hídrico e a área dos lagos Bolonha e Água Preta. Também foram obtidos os dados de precipitação e evaporação projetados para Belém-PA, para calcular o volume precipitado sobre os lagos e evaporado dos mesmos. Também foi calculado o volume vertido dos lagos, para posteriormente realizar a projeção de balanço hídrico dos lagos. Também foi necessário realizar a projeção da população da cidade de Belém-PA até o ano de 2100, para definir o consumo per capita da população futura da região, para poder analisar se os lagos serão capazes de atender a demanda futura da cidade.

Figura 6: Fluxograma da metodologia usada.



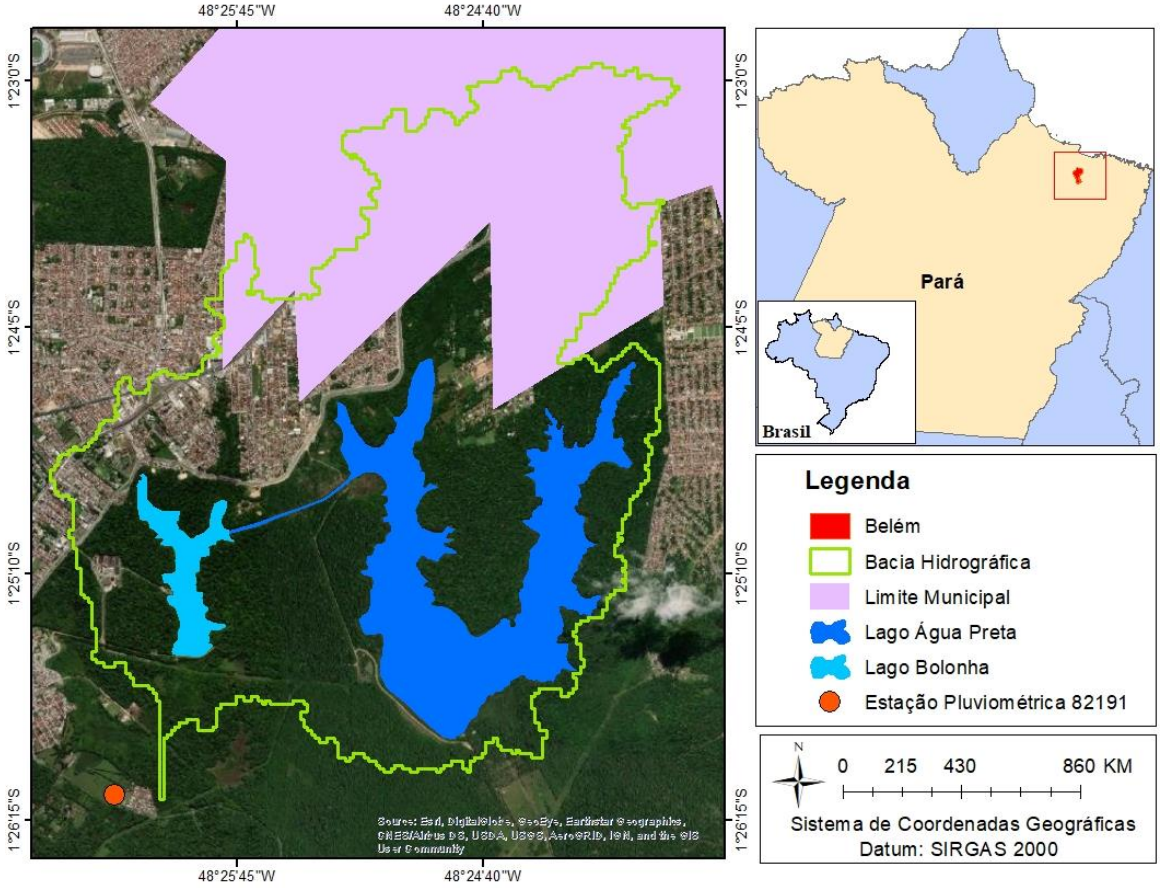
3.1 ÁREA DE ESTUDO

A região de Belém está localizada no estado do Pará, no Norte do Brasil às margens da Baía do Guajará, na confluência com o Rio Guamá, com altitude média de 12 m e inúmeros pequenos corpos de água, os quais associados à baixa latitude condicionam à região, um ambiente climático quente e úmido (EMBRAPA, 2002). A

população estimada para Belém em 2020 pelo IBGE é 1.499.641 habitantes. O objeto de estudo são os lagos Bolonha e Água Preta, a bacia hidrográfica dos lagos está localizada em Belém e no município de Ananindeua (Figura 7). Os lagos são utilizados para retenção de água para abastecer parte da cidade de Belém.

A pesquisa de Alvares et al. (2013) informa que Belém está na zona climática Af de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, tendo uma precipitação pluvial média anual de 3.000 a 4.000 mm e temperatura média anual superior a 26 °C. Segundo Bastos (1982), a região de Belém possui um clima tropical chuvoso, característico de regiões com florestas tropicais, não apresentando estação fria.

Figura 7: Localização dos lagos Bolonha e Água Preta.

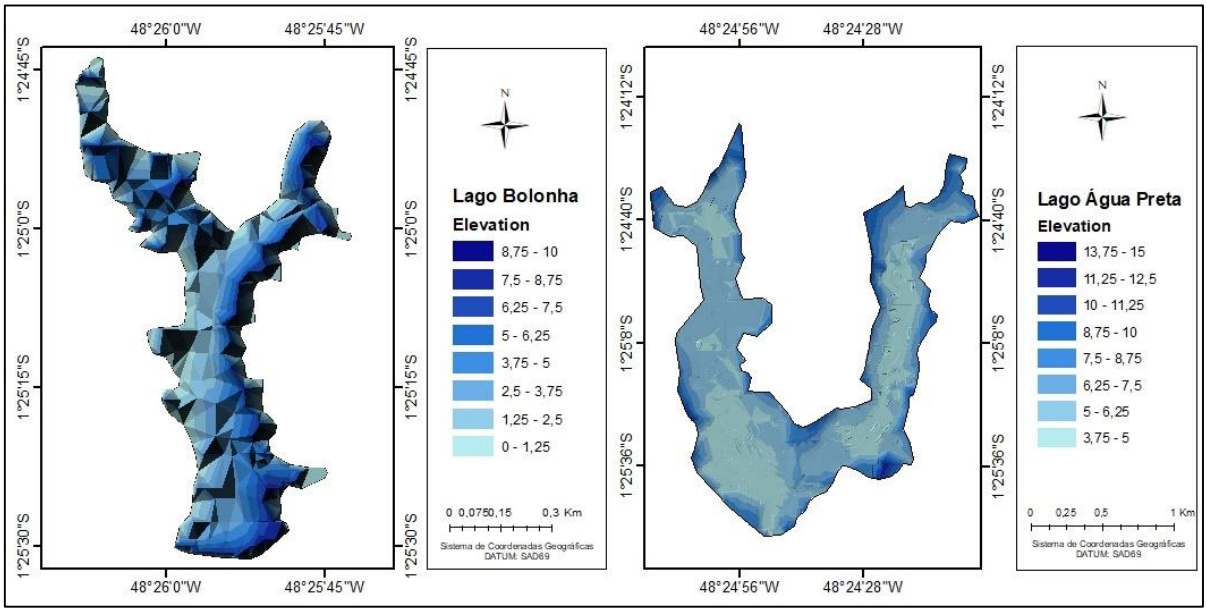


A bacia hidrográfica onde os lagos estão inseridos apresenta uma área de drenagem de 18,32 km². Para delimitar a bacia hidrográfica, foi necessário utilizar imagens altimétricas do satélite SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), a imagem possui resolução espacial de 30 m, as etapas de desenvolvimento do

modelo digital de elevação (MDE) foram realizadas utilizando o pacote ArcHydro do software ESRI ArcGIS. A partir de imagens de satélite foi determinada também a área da superfície dos lagos Bolonha e Água Preta, com o auxílio de um software SIG sendo estas iguais a 393.577 m² e 2.619.310 m², respectivamente.

O volume máximo de cada lago foi determinado com os dados de batimetria apresentados nas pesquisas de Lima et al. (2013) e Holanda et al. (2011). Tornando possível a partir da ferramenta TIN do software ArcGIS, obter o perfil de elevação dos lagos de abastecimento de Belém-PA (Figura 8), e assim, determinar qual o volume máximo para cada lago, sendo estes 9.745.336 m³ para o lago Água Preta e 2.006.565 m³ para o lago Bolonha. Conforme SECOM/PA (2019), o lago Água Preta e o lago Bolonha possuem, respectivamente, volumes iguais a 9.905.000 m³ e 1.954.000 m³. Ao comparar os resultados da técnica de geoprocessamento utilizada e os dados da SECOM/PA (2019), os desvios apresentados foram de 2,62% para o lago Bolonha e 1,61% para o lago Água Preta, validando, assim, os valores determinados.

Figura 8: Perfil de elevação dos lagos Bolonha e Água Preta.



3.1.1 Sistema de abastecimento de água de Belém

O Plano Municipal de Saneamento Básico I (PMSB I, 2014) informa que os lagos Água Preta e Bolonha foram formados por meio da construção de barragens na década de 30, o primeiro é resultante do represamento do rio Água Preta, e o

segundo foi constituído pelo represamento dos rios Bolonha-Catú e Utinga. A tipologia vegetal predominante na área dos lagos foi originalmente a Floresta Tropical Úmida Perenifólia, apresentando uma grande heterogeneidade na composição de espécies dicotiledôneas de porte médio alto e grandes variações na densidade (DIAS, 1991).

Os lagos são conectados por um canal trapezoidal, no qual a água do lago Água Preta é transferida para o lago Bolonha por gravidade. Conforme Souza (2020), os lagos estão localizados dentro dos limites da Área de Proteção Ambiental do parque do Utinga (APA-Belém). A APA Belém possui uma extensão de 7500 hectares e envolve os municípios de Belém e Ananindeua, tendo sido determinada pelo Decreto Estadual nº1551/93.

Os níveis dos lagos são mantidos por um sistema de bombeamento de uma adutora localizada às margens do rio Guamá, um dos principais tributários da baía do Guajará (OLIVEIRA et al. 2018). Composto por 5 conjuntos motor-bomba (CMB's), com capacidade máxima de 7 m³/s, o canal que transfere água do lago Água Preta para o lago Bolonha possui capacidade máxima de 13 m³/s (PMSB, 2020). De acordo com o levantamento feito por Holanda et al. (2011) o lago Água Preta (Figura 8), apresenta a vazão de captação do rio Guamá de 6 m³/s e saída pelo canal de conexão existente entre os lagos de 6 m³/s, ou seja, não há registros de saídas de fluxos líquidos no lago Água Preta.

Figura 9: Lago Água Preta

O lago Água Preta também possui um vertedouro, como pode ser visto na Figura 9. Caso ocorra um aumento de nível no lago, causado por precipitações intensas, o canal encaminha a água de volta para o Rio Guamá (PMSB, 2020).

Figura 10: Extravasor de água do lago Água Preta.

São realizadas 3 captações de água no lago Bolonha, uma para a estação de tratamento de água (ETA) Bolonha feita por 6 CMB's, com capacidade máxima de 6,7 m³/s, outra para a ETA São Brás realizada por 3 CMB's com capacidade máxima de 1,05 m³/s e para a ETA do 5° setor a captação é feita por 2 CMB's com capacidade máxima de 0,7 m³/s (PMSB, 2020). No estudo feito por Lima et al. (2013) o lago Bolonha apresentou uma vazão de entrada pelo canal de conexão de 6 m³/s, a captação feita para a ETA Bolonha de 4,2 m³/s e para ETA São Brás e 5° setor que totalizam 1,8 m³/s. O lago Bolonha possui um vertedouro em forma de tulipa de concreto com diâmetro de 8 m (Figura 10), para caso o lago atinja seu limite máximo, o excesso de água é encaminhado para o rio Guamá (PMSB, 2020).

Quanto à capacidade de produção das ETA's, a ETA Bolonha apresenta capacidade para tratar 6,4 m³/s, porém uma parte de seus módulos está passando por reformas reduzindo assim sua capacidade para 4,5 m³/s. A ETA São Brás e 5° Setor tratam 1 m³/s e 0,7 m³/s respectivamente. De acordo com o PMSB (2020), as perdas que ocorrem no sistema representam 40,54% do produzido pela companhia, a COSANPA tem o projeto de revitalização, modernização do sistema, ampliação de

reservação do município de Belém e adução de água tratada para os municípios de Ananindeua e Marituba.

Figura 11: Extravasor de água do lago Bolonha.

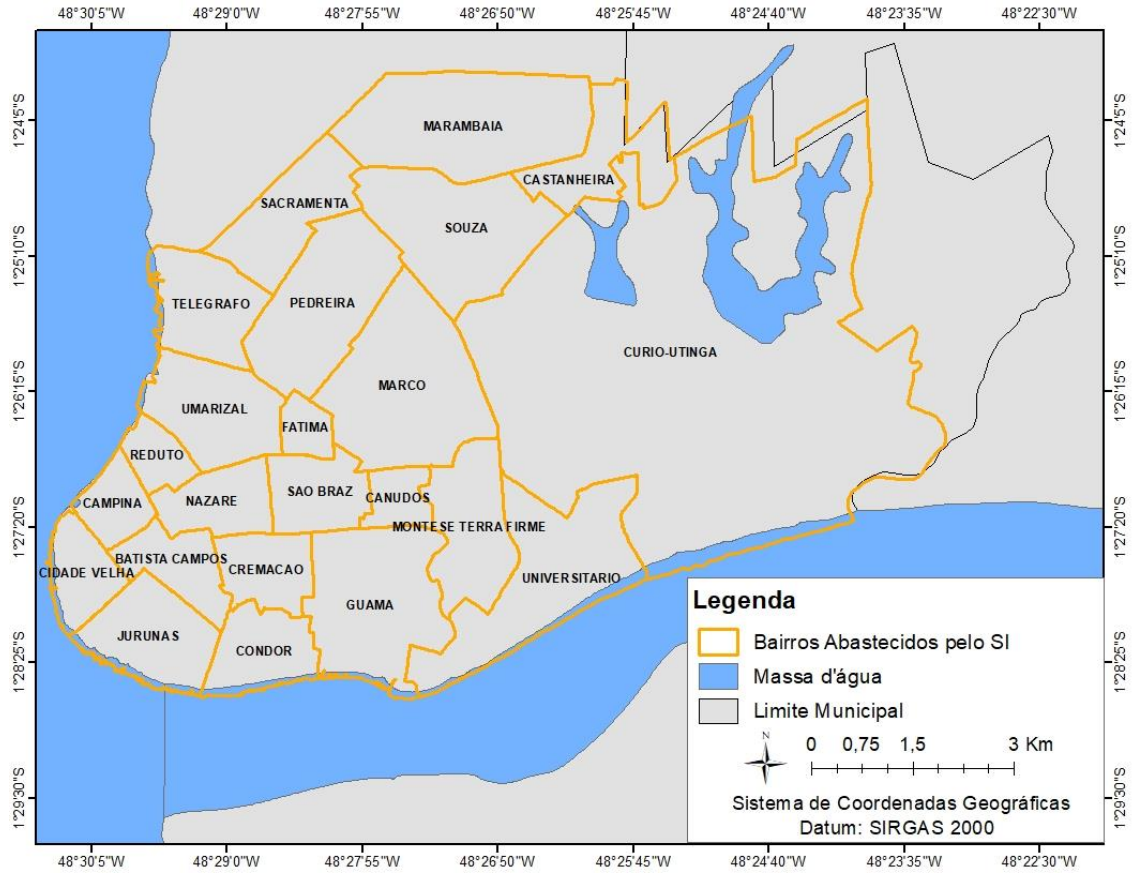
3.1.2 Setores de abastecimento de Belém

A Região metropolitana de Belém é abastecida pelo sistema Integrado, composto por mananciais superficiais, e por sistemas isolados formados por manancial subterrâneo. Sendo dividida em zona central que se localiza na cidade de Belém e zona de expansão que abrange os demais municípios da região metropolitana. O sistema de abastecimento é composto por 48 setores, sendo 12 destes abastecidos pelo sistema integrado e 36 pelos sistemas isolados. De acordo com PMSB (2020), o sistema integrado da COSANPA abastece 9 setores localizados na zona centra e 3 na zona de expansão. Os setores 1°, 2°, 3°,4°, 6°, 7°, 8° e 9° pertencem a zona central e 12° (C1), 13° (C2) e 14° (C3) estão localizados na zona de expansão.

A produção de água do sistema integrado é dividida para três estações de tratamento de água, sendo estas ETA São Braz que encaminhada a produção para os setores 1°, 2° e 3°, a ETA Bolonha abastece os setores 4°, 6°, 7°, 8°, 9°, C1, C2 e C3 e ETA 5° setor abastece o 5° setor. Os 12 setores do sistema integrado

abrangem 21 bairros da cidade de Belém. Na Figura 11 são apresentados os bairros atendidos pelo sistema integrado.

Figura 12: Bairros abastecidos pelo Sistema Integrado da COSANPA.



Na Tabela 1 são apresentados os bairros atendidos por cada setor, na qual é possível constatar que alguns bairros são atendidos por mais de um setor. E os bairros considerados da zona de expansão são Marambaia, Souza e Castanheira.

Tabela 1: Bairros abastecidos por cada setor.

1° setor	Bairros Campinas, Cidade Velha, Reduto e Nazaré
2° setor	Bairros Cidade Velha, Batista Campos e Jurunas
3° setor	Bairros Batista Campos, Nazaré, Reduto e Umarizal
4° setor	Bairros Guamá, Condor e Cremação
5° setor	Bairros Marco, Curió-Utinga e Souza
6° setor	Bairros São Brás, Umarizal, Fátima, Guamá, Canudos, Terra Firme, Marco e Pedreira
7° setor	Bairros Montese, Marco e Universitário
8° setor	Bairros Condor, Jurunas, Batista Campos e Cremação
9° setor	Bairros Pedreira, Telégrafo, Sacramenta e Souza
12° setor (C1)	Bairros Castanheira e Marambaia
13° setor (C2)	Bairros Marambaia, Souza e Castanheira
14° setor (C3)	Bairros Marambaia e Souza

Fonte: PMSB (2020).

3.1.3 Consumo per capita

Para realização de projetos, a COSANPA considerou que o coeficiente de consumo per capita de Belém-PA vária na faixa de 135,7 l/hab.dia até 193,6 l/hab.dia no período de 2014 a 2022, mantendo-se então, constante em 200 l/hab.dia a partir de 2023 até o final do plano em 2033 (PMSB II, 2014). A COSANPA leva em consideração a evolução deste parâmetro, adotando assim 200 l/hab.dia. Considerando os volumes mensais micromedidos e estimados pela COSANPA ao longo de 12 meses (julho de 2018 a junho de 2019), o consumo médio per capita de água foi de 130,98 l/hab.dia (PMSB, 2020).

Porém, ainda de acordo com o PMSB (2020), este valor fica abaixo da média nacional, mesmo o município de Belém apresentando um clima quente, o que estimula o consumo de água, e isso pode ocorrer por problemas nos aparelhos de medição e existência de ligações irregulares. Ressalta-se, também, que o regime de

distribuição de água tratada no município de Belém é realizado de modo contínuo, ou seja, sem intermitência de abastecimento.

Na análise feita pelo Instituto Trata Brasil (2020), o consumo médio de água da população paraense é de aproximadamente 152 l/hab.dia no ano de 2017, com base na projeção realizada devido às mudanças no cenário de urbanização até 2040, o consumo médio de água da população poderá variar de 203,81 l/hab.dia a 207,13 l/hab.dia. Estando em concordância com o valor do coeficiente per capita adotado pela COSANPA para elaboração dos projetos de abastecimento.

3.2 OBTENÇÃO DE DADOS CLIMATOLÓGICOS

Os dados de precipitação e evaporação foram obtidos pela plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), na estação de código 82191 do tipo convencional, para os anos 2017, 2018 e 2019 (Figura 7). O instrumento utilizado pelo INMET para realizar a medição da evaporação é o evaporímetro de piche, os dados são disponibilizados em mm, quanto à precipitação os dados são referentes à precipitação total diária em mm.

Os dados diários de precipitação e evaporação utilizados para realizar a projeção dos balanços hídricos dos lagos, foram obtidos através da plataforma PROJETA do INPE, a interface da plataforma é apresentada na Figura 12. A plataforma visa automatizar o processo de extração e disponibilização das projeções de mudanças climáticas da América do Sul com resolução de 20 km, a partir do downscaling gerado pelo modelo Eta do CPTEC/INPE (HÖLBIG et al 2018).

Os dados obtidos foram referentes a um período de futuro próximo (2027, 2028 e 2029), meio do século (2047, 2048 e 2049) e final do século (2097, 2098 e 2099). Foram utilizados dados do RCM Eta disponibilizado pelo INPE, derivados de dois GCMs, MIROC5 e HADGEM2-ES, para os cenários RCPs 4.5 e 8.5. A pesquisa de Costa et al. (2021) indicou que as simulações com o modelo MIROC5 apresentaram resultados satisfatórios, sendo possivelmente o mais adequado para a região da Amazônia. Assim como Lopes et al. (2017) que realizou um experimento para a região amazônica, utilizando os GCMs MIROC5 e HadGEM2, no qual ambos os modelos apresentaram resultados satisfatórios para a região.

Figura 13: interface da plataforma PROJETA para baixar os dados de projeção.

3.2.1 Eta-MIROC5 Eta-HADGEM2-ES

O modelo Eta foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, e se tornou operacional no National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (BLACK, 1994). Esse modelo foi instalado no CPTEC em 1996 com o objetivo de complementar a previsão numérica de tempo que vinha sendo realizada desde o início de 1995 com o modelo de circulação geral atmosférica (INPE, 2021). O modelo Eta apresenta área limitada por pontos de grade, as simulações do modelo apresentam resolução de 20 km (Chou et al. 2014b). O modelo possui coordenada vertical capaz de representar a topografia em etapas (Mesinger 1984).

O GCM MIROC5 é um modelo japonês com resolução de 1,4 graus de longitude e 1,4 graus de latitude, e possui 40 níveis atmosféricos verticais (CHOU et al. 2014a). O MIROC5 foi desenvolvido para melhor simulação do clima médio, variabilidade e mudança climática devido à força radiativa antropogênica (WATANABE et al 2010). O HadGEM2-ES é um GCM desenvolvido pelo centro de pesquisa do Reino Unido Met office Hadley Center. A resolução é de cerca de 1,875 graus de longitude e 1,275 graus de latitude e 38 níveis na atmosfera (MET OFFICE, 2021). Os processos inclusos no modelo HadGEM2-ES são superfície terrestre, hidrologia, aerossóis, oceano, gelo marinho, ciclo terrestre do carbono, biogeoquímica oceânica, química troposférica (MARTIN et al. 2011). A química troposférica afeta o forçamento radiativo através do metano e do ozônio e afeta a

taxa, na qual as emissões de dióxido de enxofre são convertidas em aerossol de sulfato (COLLINS et al. 2008).

Tabela 2: Detalhes sobre GCMs utilizados no estudo

Modelo	Nome	Intituição	País	Resolução Espacial (Log X Lat)
MIROC5	Model for Interdisciplinary Research on Climate Version 5	Center for Climate System Research	Japão	1,4° x 1,4°
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environmental Model Version	Met Office Hadley Centre	Reino Unido	1,875° x 1,25°

3.3 BOX PLOT

Para realizar a análise de distribuição dos dados de precipitação e evaporação, foi utilizada a técnica Box Plot. Pesquisas como a de Silva et al. (2017); Santos et al. (2019) utilizaram a técnica Box Plot para analisar a distribuição de dados hidrológicos. A partir da série de dados de precipitação e evaporação para o período observado e períodos projetados, foi possível elaborar o gráfico Box Plot, utilizando o software Excel, que disponibiliza a ferramenta necessária para o desenvolvimento deste modelo de gráfico. Foram utilizadas as médias mensais de precipitação e evaporação de cada período para a plotagem dos gráficos.

3.4 MODELO DE BALANÇO HÍDRICO

Na Equação 1 é apresentado o modelo, em base diária, que foi adaptado de Gomes Filho et al. (1999), para ser aplicado ao manancial do Utinga formado pelos lagos Bolonha e Água Preta, Belém-PA. Os níveis dos lagos são mantidos por um sistema de bombeamento de uma adutora localizada às margens do rio Guamá, que é um dos principais tributários da baía do Guajará (OLIVEIRA et al. 2018). Os lagos são conectados por um canal trapezoidal, no qual a água do lago Água Preta é transferida para o lago Bolonha por gravidade. O modelo buscou utilizar as principais componentes que influenciam na variação de volume de lagos (FOWE et al. 2015).

$$V_f = V_i + V_{af} + V_{ch} - V_{vert} - V_{ev} - V_{dem} \quad (1)$$

V_f – Volume final do reservatório no dia (m³);
V_i – Volume inicial do reservatório no dia (m³);
V_{af} – Volume afluente (m³);
V_{ch} – Volume de chuva sobre a área do lago (m³);
V_{vert} – Volume perdido por vertimento (m³);
V_{ev} – Volume evaporado da superfície do lago (m³);
V_{dem} – Volume demandada do reservatório (m³).

A soma desses volumes é igual ao volume máximo dos lagos.

Se $V_f > V_{máx}$, $V_f - V_{máx} = V_{vert}$ e $V_f = V_{máx}$ (2)

Vmáx – Volume máximo dos lagos (m³);
Vvert – Volume vertido (m³);

Os volumes afluentes (V_{af}) e demandados (V_{dem}) dependem, respectivamente, do bombeamento de água do rio Guamá e da produção de água potável pelo manancial. Se $V_{af} = V_{dem}$, a Equação 1, torna-se a Equação 3.

$$V_f = V_i + V_p - V_{ev} - V_{vert} \quad (3)$$

3.4.1 Estimativa de chuvas e evaporação nos lagos

A estimativa do volume de chuva precipitada diariamente sobre os lagos e o volume evaporado da superfície dos mesmos, foram calculados em função da área dos lagos conforme as Equações 4 e 5:

$V_{ch} = P \times A$ (4)

$V_{ev} = E \times A$ (5)

V_{ch} - Volume de chuva sobre a área do lago (m³);
V_{ev} - Volume evaporado da superfície do lago (m³);

P - Precipitação (m);

E - Evaporação (m);

A - Área (m²).

3.5 MODELO DE CRESCIMENTO POPULACIONAL DE GOMPERTZ

Na Equação 6 é apresentado o modelo de Gompertz, utilizado por (Terano, 2018; Dentamaro, 2019; Thomas e Eisermann, 2020) em projeções populacionais. Em 1825, Benjamin Gompertz (1779 - 1865), matemático e atuário inglês, obteve um modelo com o qual a ideia inicial era descrever a mortalidade de pessoas (algo bastante útil para sua companhia de seguros). Posteriormente, notou-se que, com alguns ajustes, tratava-se de um modelo muito bem aplicável a certas situações de crescimento populacional.

$$P(t) = K\left(\frac{P_0}{K}\right)^{e^{-\mu t}} \quad (6)$$

K = população de saturação;

P0 = população inicial; e

μ = taxa de crescimento populacional

A utilização do modelo de Gompertz, para representar o crescimento da população de Belém-PA, apresenta uma curva em forma sigmoide ou S, na qual o crescimento tende a atingir uma população de saturação. Conforme Miranda & Lima (2010) um dado processo socioeconômico ou natural é dotado de caráter evolutivo, quando o crescimento ocorre de tal forma que após atingir uma taxa máxima de crescimento a população satura. Assim como Souza; Filho (2020) que enfatizaram os crescimentos demográficos até um determinado limite, acrescentando que modelos exponenciais não representam a realidade das populações.

Para calcular a população de saturação (K) foi utilizado o método de Ford-Walford, utilizado por (DENTAMARO, 2019), apresentado na Equação 9. Para obter os parâmetros da Equação 9, foram utilizadas as Equações 7 e 8 de ajuste linear.

$$a = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - (\sum_{i=1}^{n} x_i)(\sum_{i=1}^{n} y_i)}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - a(\sum_{i=1}^{n} x_i)^2} \quad (7)$$

$$b = \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n} y_i - a\sum_{i=1}^{n} x_i) \quad (8)$$

x_i = População do censo do IBGE t_i

y_i = População do censo do IBGE t_{i+1}

$$K = \frac{b}{1-a} \quad (9)$$

A taxa de crescimento populacional foi obtida a partir da Equação 10 (utilizada para ajuste linear) e Equação 12. Foram definidos dois cenários de crescimento demográfico, um que considera 100% da taxa de crescimento populacional, sendo o cenário de alto crescimento e o segundo considerou apenas 80% da taxa de crescimento populacional, considerado o cenário de crescimento moderado da população (PROMABEN, 2021).

$$\alpha = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i z_i - (\sum_{i=1}^{n} x_i)(\sum_{i=1}^{n} z_i)}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - a(\sum_{i=1}^{n} x_i)^2} \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1}{n}(\sum_{i=1}^{n} z_i - \alpha\sum_{i=1}^{n} x_i) \quad (11)$$

Zi= População dos censos do IBGE

X = Intervalo de tempo de cada censo do IBGE

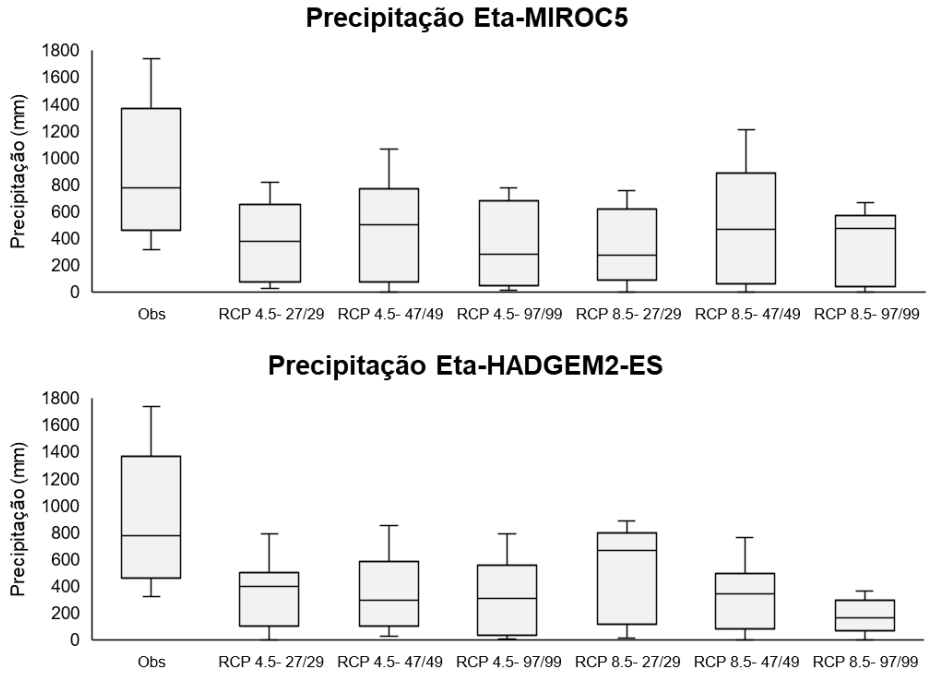
$$\alpha = -\mu \quad (12)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ANÁLISE DOS DADOS OBSERVADOS E PROJETADOS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO

Foram realizadas análises em 4 períodos de dados, para se verificar a distribuição dos dados de precipitação e evaporação. Como o período observado disponível é de 3 anos (2017, 2018 e 2019), os dados projetados foram considerados em 3 cenários também com 3 anos: futuro próximo (2027, 2028 e 2029), meio do século (2047, 2048 e 2049) e final do século (2097, 2098 e 2099). As projeções de precipitação e evaporação foram realizadas pelo Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES, para dois cenários RCPs 4.5 e 8.5. Conforme Santos et al. (2019). Para se realizar a análise via gráficos do tipo “Boxplot”, foram utilizadas as médias mensais de precipitação e evaporação de cada período estudado. Assim, analisando-se a Figura 14, é possível observar uma redução na dispersão dos dados de precipitação nos anos projetados, quando comparados ao período observado.

Figura 14: Dados de precipitação observados e projetados para sequências de 3 anos (2027-2029, 2047-2049, 2097-2099).



As projeções dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES, para os dois cenários RCPs 4.5 e 8.5, apresentam valores mínimos críticos. Pois em todos os

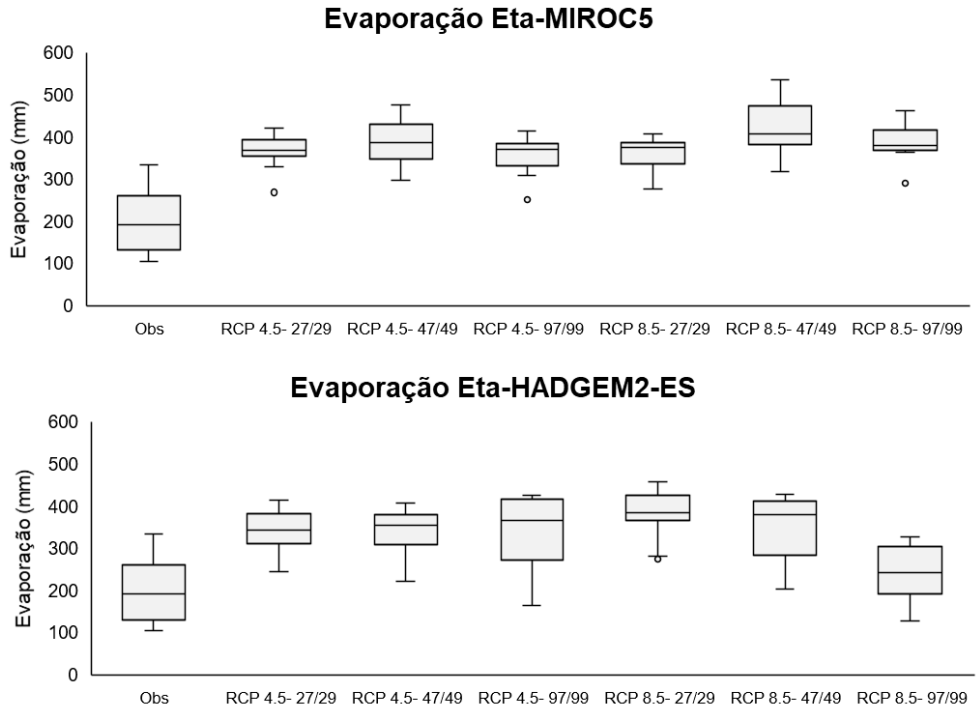
períodos e cenários projetados pelos modelos, as precipitações mínimas são baixas ou nulas, indicando que em todos os anos projetados há meses com baixo volume precipitado ou sem ocorrência de precipitação. As projeções para o futuro próximo também indicam uma redução no volume precipitado para Belém-PA.

O modelo Eta-HADGEM2-ES apresentou cenários menos úmidos para os períodos estudados, quando comparado às projeções do Eta-MIROC5. O cenário mais crítico projetado foi para o final do século pelo Eta-HADGEM2-ES (cenário RCP 8.5), no qual a dispersão de dados apresentada é pequena e o máximo precipitado não passará de 364 mm. A partir destes resultados é possível observar que a cidade de Belém terá uma redução significativa de precipitação ao longo do século XXI. Os resultados projetados concordando com a pesquisa de Chou et al. (2014b), que projetou uma redução na precipitação média anual para a região amazônica durante o século XXI.

Os dados projetados de evaporação superficial, pelos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES para os RCPs 4.5 e 8.5 (Figura 15), apresentaram uma elevação da evaporação superficial em todos os períodos estudados. Os valores máximos e mínimos, ambos apresentaram uma elevação quando comparados ao período observado. Também através da Figura 15, foi possível observar uma redução na dispersão dos dados nos anos projetados pelo Eta-MIROC5. A presença de *outliers* nas projeções do Eta-MIROC5, indicam que evaporações superficiais abaixo de 300 mm por mês são consideradas discrepantes dentro da amostra de dados. Quanto às projeções do Eta-HADGEM2-ES, os valores máximos e mínimos são menores do que às projeções Eta-MIROC5, entretanto a evaporação superficial será mais intensa nos períodos projetados, comparada aos dados observados.

Ao se analisar as variações de precipitação e evaporação, é possível observar que as projeções Eta-MIROC5 apresentam cenários de evaporação superficial mais intensos, enquanto os resultados do modelo Eta-HADGEM2-ES apresentam cenários de precipitação mais críticos. As projeções apontam que em Belém-PA, haverá uma mudança no cenário climático, motivado pelas reduções de precipitação e elevação de evaporação superficial.

Figura 15: Dados de evaporação observados e projetados para sequências de 3 anos (2027-2029, 2047-2049, 2097-2099).

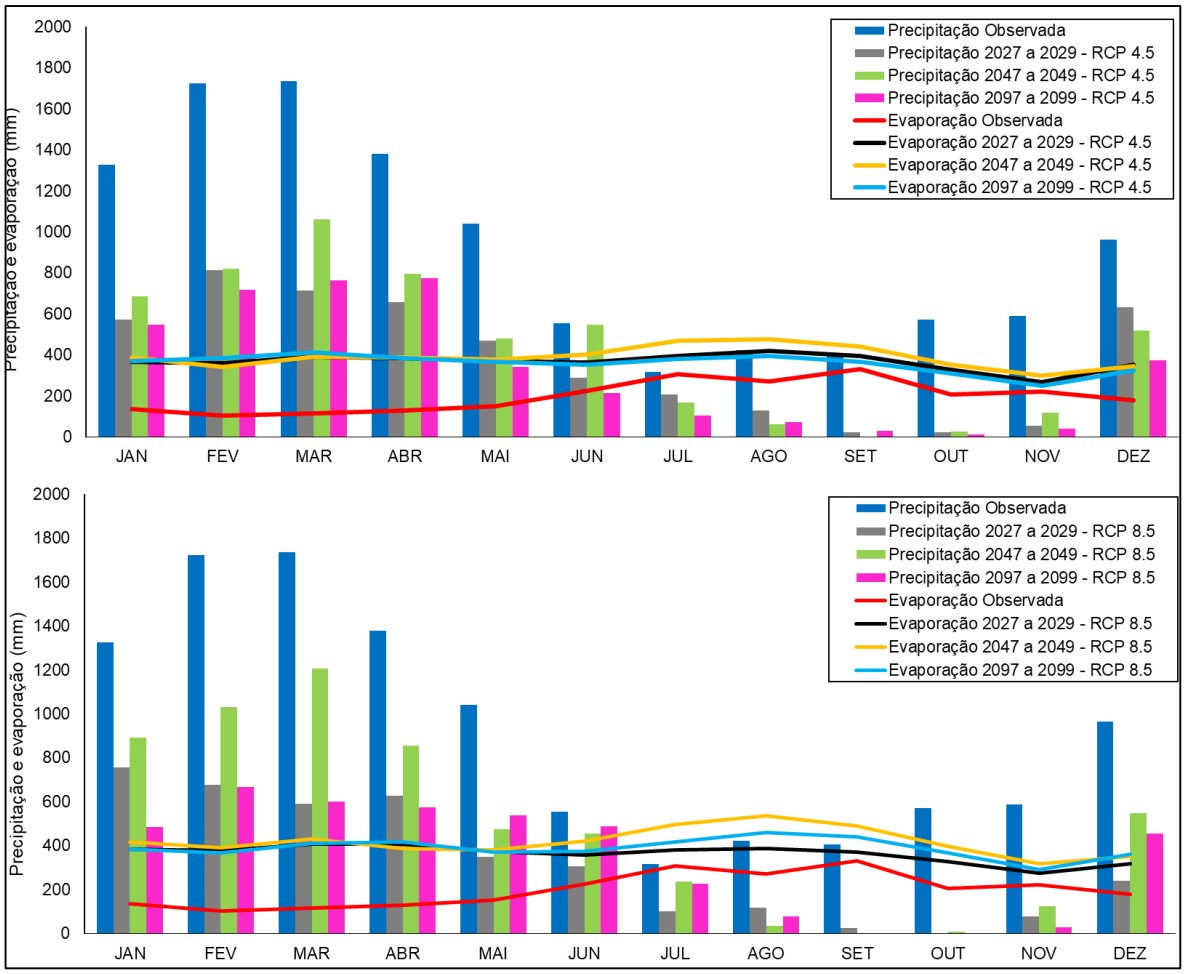


4.2. MÉDIAS MENSAIS DE PRECIPITAÇÃO E EVAPORAÇÃO

Foram realizadas quatro médias mensais de precipitação e evaporação, a primeira para o período observado (2017, 2018 e 2019). As outras três foram projetadas para um futuro próximo (2027, 2028 e 2029), o meio do século (2047, 2048 e 2049) e final do século (2097, 2098 e 2099). As projeções de precipitação e evaporação foram realizadas a partir dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES, alinhados a dois cenários de mudanças climáticas RCPs 4.5 e 8.5.

As projeções feitas pelo modelo Eta-MIROC5, a partir dos RCPs 4.5 e 8.5 apresentaram uma redução no volume de precipitação para os 12 meses do ano (Figura 16), para os três períodos projetados, quando comparados as médias mensais dos dados observados. As projeções realizadas a partir do RCP 4.5 indicaram os cenários mais críticos de precipitação no mês de outubro de 1 mm para o futuro próximo, no meio do século em setembro de 1 mm e final do século de 13 mm em outubro. Para as projeções com o cenário RCP 8.5, os menores volumes de chuva ocorrerão para o futuro próximo no mês de outubro, 1 mm; no meio do século, em setembro, não ocorrerá precipitação; e para o final do século, setembro, terá 1 mm de chuva e outubro não haverá precipitação.

Figura 16: Precipitação e evaporação média mensal observada e simulada de Belém para o cenário RCP 4.5 e 8.5 projetado pelo Eta-MIROC5.



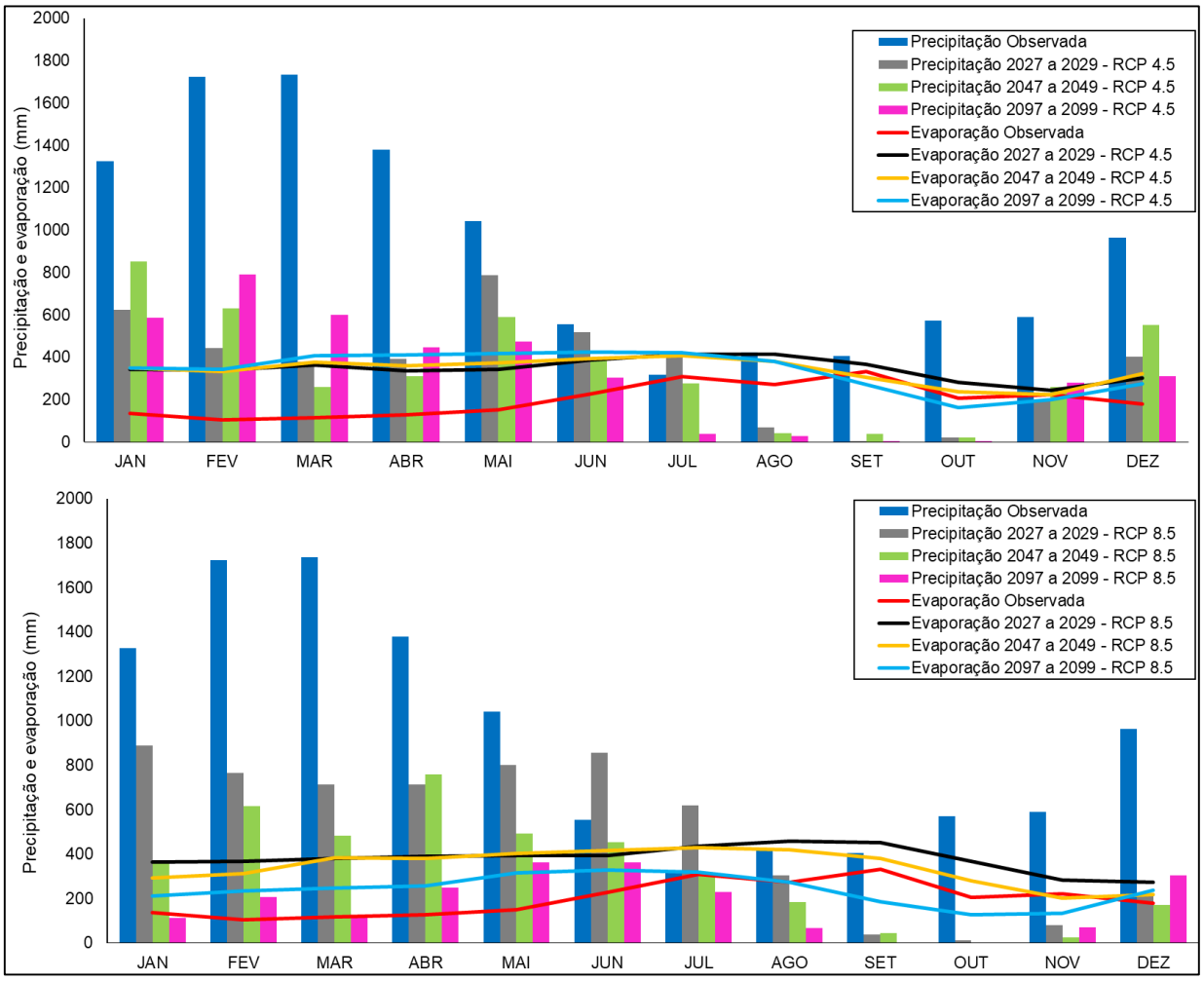
Os meses de junho a novembro, que são considerados no período observado como os meses menos úmidos da cidade de Belém-PA, tornar-se-ão mais secos, de acordo com as projeções do Eta-MIROC5 para os três períodos em ambos os cenários. Com intensificação nos meses de setembro a outubro que apresentam os cenários mais críticos de redução no volume de chuva mensal.

A evaporação superficial projetada pelo Eta-MIROC5, a partir dos RCPs 4.5 e 8.5, apresentaram cenários mais intensos de evaporação, quando comparados aos dados observados (Figura 16). O RCP 4.5 projetou a maior evaporação superficial para o meio do século, 477 mm em agosto. E o RCP 8.5 projetou a maior evaporação superficial em agosto, 536 mm no meio do século. Enquanto no período observado, a maior média de evaporação superficial é de 333 mm no mês de setembro. As intensificações da evaporação superficial nos doze meses dos anos

projetados indicam elevação da temperatura, o que está de acordo com Helfer et al. (2012).

As projeções feitas pelo modelo Eta-HADGEM2-ES, a partir dos RCPs 4.5 e 8.5, apresentaram uma redução no volume de precipitação e um incremento da evaporação superficial para os 12 meses do ano (Figura 17), para os três períodos projetados, quando comparados às médias mensais dos dados observados.

Figura 17: Precipitação e evaporação média mensal observada e simulada de Belém para o cenário RCP 4.5 e 8.5 projetado pelo Eta-HADGEM2-ES.



As projeções realizadas a partir do RCP 4.5 indicaram os cenários mais críticos de precipitação para o futuro próximo no mês de setembro, o qual não terá precipitação. No meio do século, ocorrerá em outubro, com somente 22 mm precipitados; e final do século com precipitações de 1 mm em outubro e setembro. Para as projeções com o cenário RCP 8.5, os menores volumes de chuva, ocorrerão

para o futuro próximo no mês de outubro com 11 mm. No meio do século, em outubro, não ocorrera precipitação. Para o final do século, setembro terá apenas 4 mm de chuva e em outubro não ocorrerá precipitação.

A evaporação superficial projetada pelo Eta-MIROC5, a partir dos RCPs 4.5 e 8.5 apresentaram cenários mais intensos de evaporação, quando comparados aos dados observados (Figura 17). O RCP 4.5 projetou a maior evaporação superficial para o final do século, sendo igual a 425 mm em junho. E o RCP 8.5 projetou a maior evaporação superficial em agosto, sendo igual a 457 mm para o futuro próximo. Enquanto no período observado, a maior média de evaporação superficial foi de 333 mm no mês de setembro.

Os modelos Eta-MIROC5 e Eta-HadGEM2-ES, simulados com os RCPs 4.5 e 8.5, apresentaram reduções significativa nas médias mensais de chuva e elevação da evaporação superficial em Belém-PA. Esses resultados estão de acordo com o trabalho de Chou et al. (2014a), no qual as projeções para a região Norte do Brasil, mostram redução da precipitação durante o verão.

4.3. PROJEÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DOS LAGOS

A partir dos dados projetados de precipitação e evaporação superficial obtidos através dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES e alinhados aos cenários RCPs 4.5 e 8.5, foi possível realizar a projeção do balanço hídrico dos lagos Água Preta e Bolonha, responsáveis pelo abastecimento de água da cidade de Belém-PA. Foram realizados balanços hídricos para o lago Bolonha, Água Preta e o manancial Utinga (Água Preta + Bolonha). A vazão de adução do rio Guamá, do canal de conexão e demandada pela população foram mantidas constantes e iguais a 6 m^3/s. O balanço hídrico foi realizado em quatro períodos, a partir da média dos anos, sendo período observado (2017, 2018 e 2019), um futuro próximo (2027, 2028 e 2029), meio do século (2047, 2048 e 2049) e final do século (2097, 2098 e 2099).

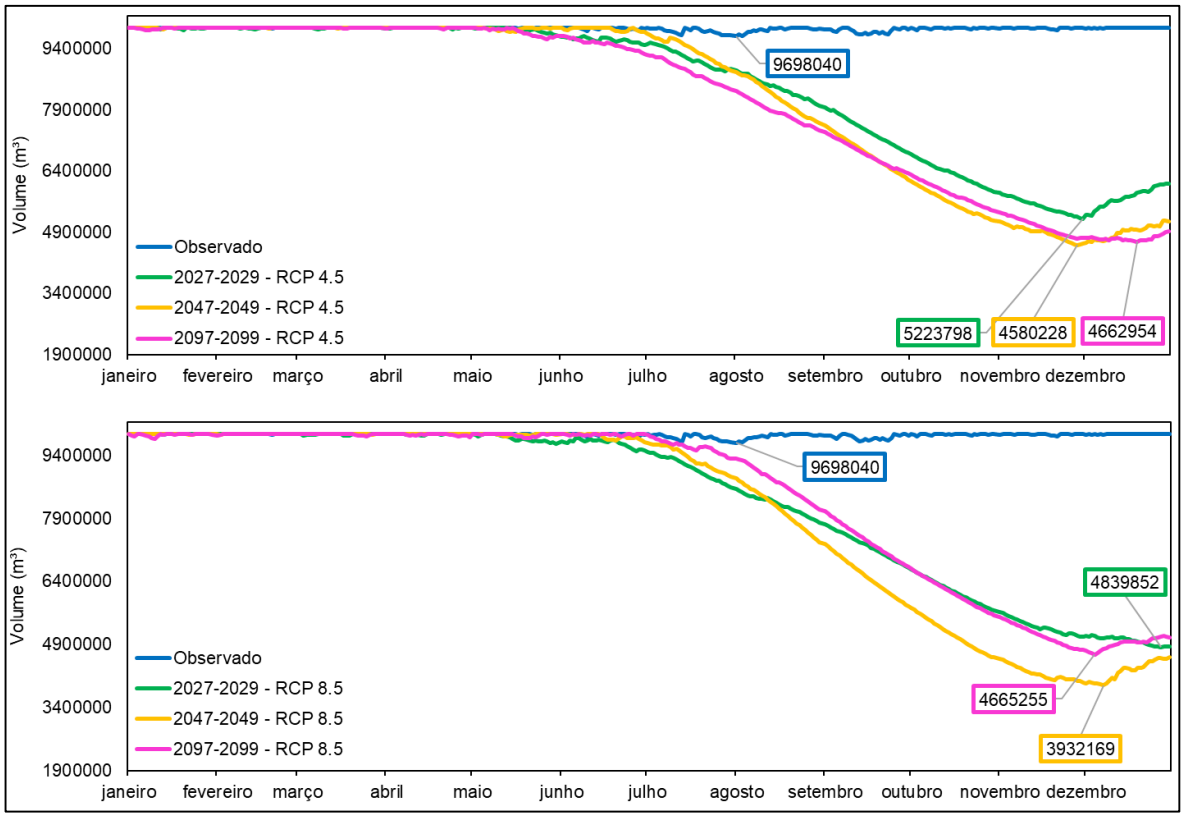
4.3.1. Lago Água Preta

Para realizar o balanço hídrico do lago Água Preta, foi utilizado como base o volume máximo de 9.905.000 m^3. A simulação do balanço hídrico para o período observado resultou no volume do lago em sua capacidade máxima na maioria dos meses (Figuras 18 e 19). Pequenas reduções ocorreram nos meses menos úmidos

do ano, que vão de junho a novembro, no qual o volume mínimo simulado foi de 9.698.040 m³, cerca de 2% a menos da capacidade máxima do lago. As simulações de balanço hídrico para o lago Água Preta pelos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES (Figuras 18 e 19) projetaram cenários de intenso estresse hídrico, para os períodos futuro próximo, meio do século e final do século.

As projeções de balanço hídrico do lago Água preta pelo modelo Eta-MIROC5, alinhados aos RCPs 4.5 e 8.5, apresentaram as reduções mais intensas nos meses menos úmidos, que vão de junho a dezembro. O RCP 8.5 projetou os menores volumes para o lago (Figura 18). Estando de acordo com Silveira et al. (2016) e Souza et al. (2019), no qual o RCP 8.5 é o pior cenário de emissões GEE. As projeções de balanço hídrico para os meses de janeiro a maio apresentaram volumes máximos do lago, pois o volume de chuva projetado para estes meses é superior ao evaporado da superfície do lago. Diferente das projeções para os meses de junho a dezembro que apresentam grandes reduções de volume, motivado pela sequência de meses com precipitações reduzidas e elevada evaporação superficial.

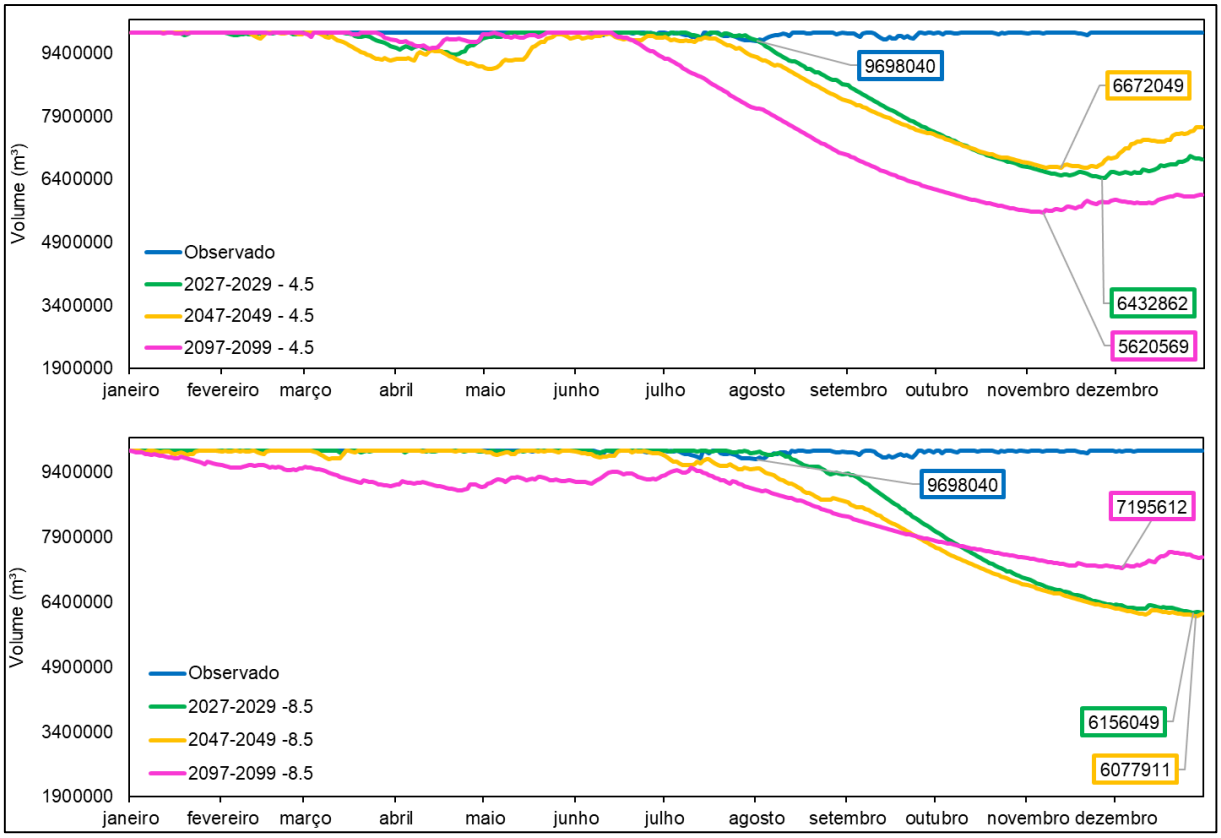
Figura 18: Balanço hídrico do lago Água Preta modelo Eta-MIROC5, RCPs 4.5 e 8.5.



As projeções mais críticas de balanço hídrico em cada período foram para o cenário de futuro próximo, projetada pelo RCP 8.5, no qual o volume mínimo do lago será de 4.839.852 m³ em dezembro, o que representa uma redução de 51% da capacidade máxima do lago. O período que apresentou a maior redução foi o meio do século, para RCP 8.5 de 3.932.169 m³, no mês de dezembro, o que representa 60% a menos de água no lago. Para o final do século, os RCPs 4.5 e 8.5 projetaram em dezembro cenários mínimos para o lago de 4.662.954 m³ e 4.665.255 m³ respectivamente, o que representa uma redução aproximada de 53% do volume de água no lago.

O balanço hídrico do lago Água Preta projetado pelo modelo Eta-HADGEM2-ES (Figura 19), também projetam cenários de grande estresse hídrico para os três períodos estudados, porém quando comparados aos resultados obtidos com o modelo Eta-MIROC5, o modelo Eta-HADGEM2-ES projetou volumes maiores.

Figura 19: Balanço hídrico do lago Água Preta modelo Eta-HADGEM2-ES, RCPs 4.5 e 8.5.



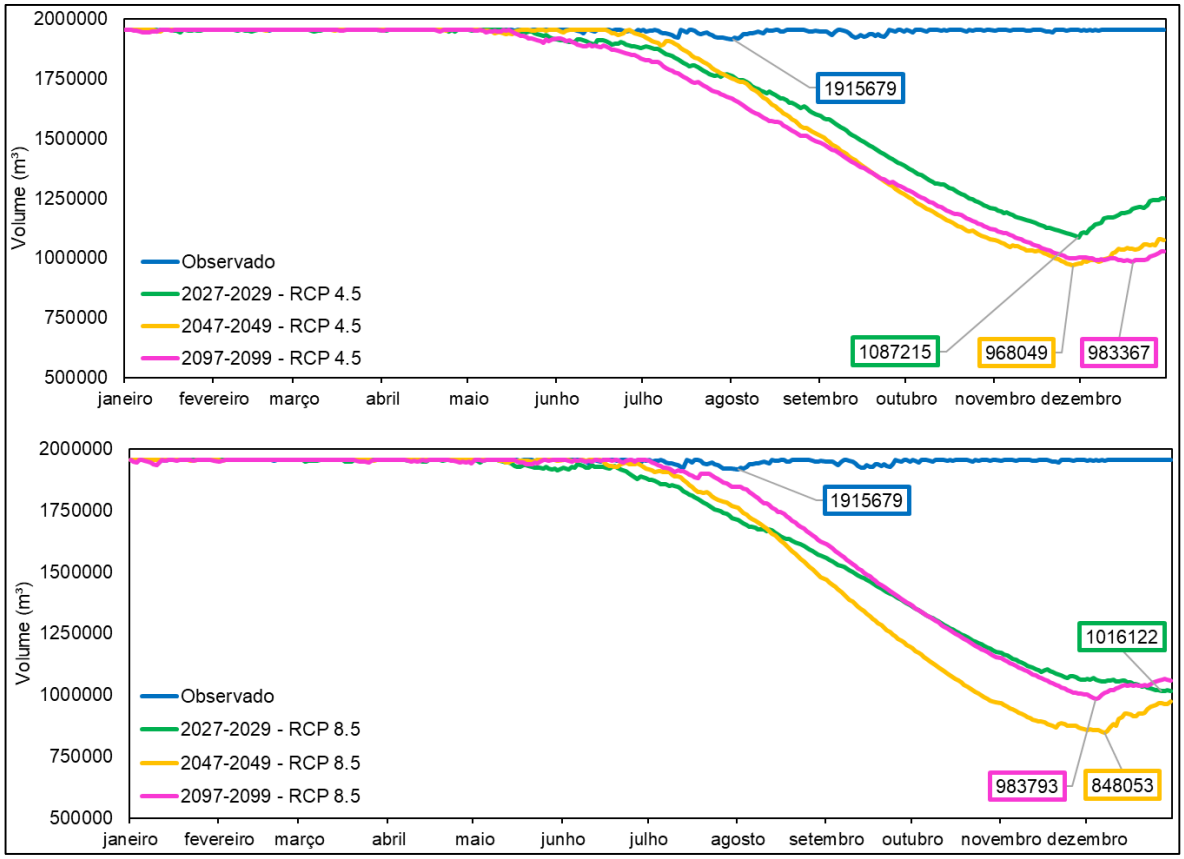
As projeções de balanço hídrico do lago Água preta pelo modelo Eta-HADGEM2-ES alinhados aos RCPs 4.5 e 8.5, apresentaram as reduções mais intensas nos meses menos úmidos. Para o RCP 4.5, o volume do lago começa a reduzir a partir do mês de março, intensificando-se no mês de julho. O RCP 8.5 projetou reduções mais intensas a partir do mês de agosto para o futuro próximo e meio do século, enquanto o final do século começa a passar por reduções em janeiro, intensificando-se no mês de julho em decorrência da evaporação superficial ser mais elevada que as médias das chuvas, na maioria dos meses.

Os cenários mais críticos foram 6.156.049 m³ em dezembro para o futuro próximo a partir do RCP 8.5, o que representa uma redução de 38% da capacidade máxima do lago. Para o meio do século, o RCP 8.5 simulou um volume mínimo 6.077.911 m³ no mês de dezembro, o que representa 39% a menos de água no lago. Para o final do século, o menor volume foi de 5.620.569 m³, a partir do RCP 4.5, o que representa uma redução aproximada de 43% de água no lago.

4.3.2. Lago Bolonha

As simulações de balanço hídrico do lago Bolonha foram realizadas utilizando como base o volume máximo de 1.954.000 m^3. A simulação do balanço hídrico do lago Bolonha para o período observado apresentou o volume do lago em sua capacidade máxima na maioria dos meses (Figuras 20 e 21). Pequenas reduções ocorreram nos meses mais secos do ano, que vão de junho a novembro, no qual o volume mínimo simulado para este período foi de 1.915.679 m³, cerca de 2% a menos da capacidade máxima do lago. O balanço hídrico realizado com os dados simulados pelos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES, projetaram para os períodos futuro próximo, meio do século e final do século cenários de intenso estresse hídrico (Figura 20).

Figura 20: Balanço hídrico do lago Bolonha modelo Eta-MIROC5, RCPs 4.5 e 8.5.



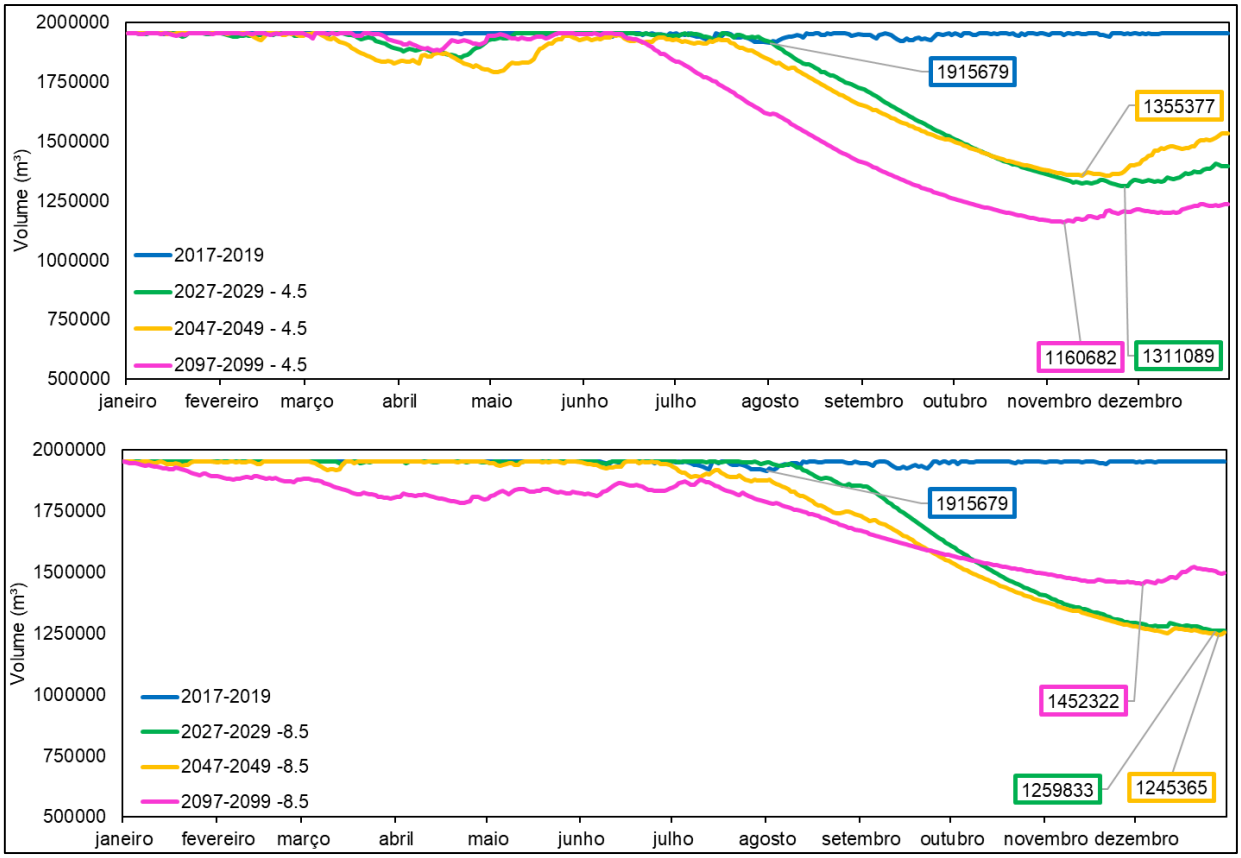
As projeções de balanço hídrico do lago Bolonha pelo modelo Eta-MIROC5 alinhados aos RCPs 4.5 e 8.5, apresentaram reduções mais intensas nos meses mais secos que vão de junho a dezembro. O RCP 8.5 projetou os menores volumes para o lago. No cenário de futuro próximo, o RCP 8.5 projetou um volume mínimo de 1.016.122 m³ em dezembro, o que representa uma redução de 48% da capacidade máxima do lago. A maior redução, de 848.053 m³, foi projetada para o meio do século com RCP 8.5 no mês de dezembro, o que representa 57% a menos de água no lago. Para o final do século, os RCPs 4.5 e 8.5 projetaram para o mês de dezembro, cenários mínimos para o lago de 983.367 m³ e 983.793 m³ respectivamente, o que representa uma redução aproximada de 50%.

O balanço hídrico do lago Bolonha projetado pelo modelo Eta-HADGEM2-ES (Figura 21), também projeta cenários de grande estresse hídrico para os três períodos estudados, porém quando comparados aos resultados obtidos com o modelo Eta-MIROC5, o Eta-HADGEM2-ES apresentou volumes maiores. As projeções de balanço hídrico do lago Bolonha pelo modelo Eta-HADGEM2-ES

alinhados aos RCPs 4.5 e 8.5, apresentaram as reduções mais intensas nos meses mais secos de junho a dezembro. Para o RCP 4.5, o volume do lago começa a reduzir a partir do mês de março, intensificando-se no mês de julho. Enquanto para o RCP 8.5, as reduções de volume mais intensas ocorreram a partir do mês de agosto para o futuro próximo e meio do século, e o cenário de fim de século começa a passar por reduções desde o início do ano, intensificando-se no mês de julho.

O cenário mais crítico para o futuro próximo foi projetado a partir do RCP 8.5, que resultou em um volume mínimo de 1.259.833 m³ em dezembro, 36% a menos da capacidade máxima do lago. Para o meio do século, o menor volume projetado foi a partir do RCP 8.5 de 1.245.365 m³, representando 36% de redução da capacidade do lago. E para o final do século, o RCP 4.5 foi o que apresentou o cenário mais crítico, com um volume mínimo de 1.160.682 m³, sendo uma redução de aproximadamente 41%, quando comparado ao volume máximo do lago.

Figura 21: Balanço hídrico do lago Bolonha modelo Eta-HADGEM2-ES, RCPs 4.5 e 8.5.



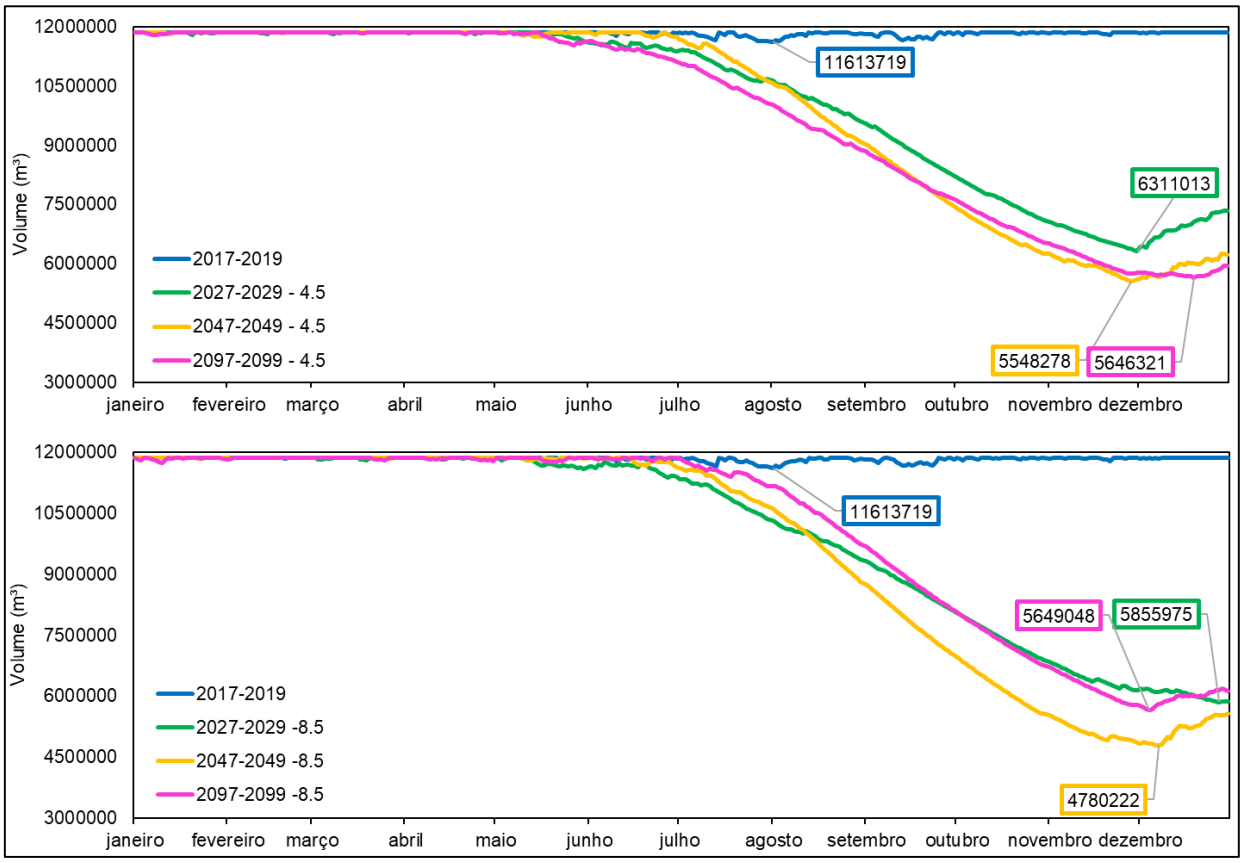
4.3.3. Manancial do Utinga (lago Água Preta + lago Bolonha)

Também, foi realizado o balanço hídrico do manancial do Utinga, no qual o volume máximo é de 11.859.000 m³. O balanço hídrico do manancial para o período observado também simulou o volume do manancial em sua capacidade máxima na maioria dos meses (Figuras 22 e 23). Pequenas reduções ocorreram nos meses menos úmidos do ano, que vão de junho a novembro, para o qual o volume mínimo simulado foi de 11.613.719 m³, cerca de 2% a menos da capacidade máxima do lago, assim como para a análise realizada individualmente dos lagos.

O balanço hídrico realizado para o manancial do Utinga pelos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES, projetaram para o cenário futuro próximo, meio do século e final do século intenso estresse hídrico. Motivado pelas projeções que apresentaram reduções no volume de chuva e elevação da evaporação superficial para a cidade de Belém-PA.

As projeções de balanço hídrico do manancial do Utinga pelo modelo Eta-MIROC5 alinhados aos RCPs 4.5 e 8.5, apresentaram as reduções mais intensas nos meses de junho a dezembro. O RCP 8.5 projetou os menores volumes para o manancial (Figura 22). No cenário de futuro próximo o RCP 8.5 projetou um volume mínimo de 5.855.975 m³ em dezembro, o que representa uma redução de 51% da capacidade máxima do lago. O período que projetou a maior redução foi o meio do século, a partir do RCP 8.5 de 4.780.222 m³ em dezembro, cerca de 60% a menos na capacidade máxima do manancial. Para o final do século, os RCPs 4.5 e 8.5 projetaram cenários mínimos para o manancial de 5.646.321 m³ e 5.649.048 m³ respectivamente, aproximadamente 52% de redução de volume.

Figura 22: Balanço hídrico do Manancial Utinga projetado via modelo Eta-MIROC5 para os cenários RCPs 4.5 e 8.5.

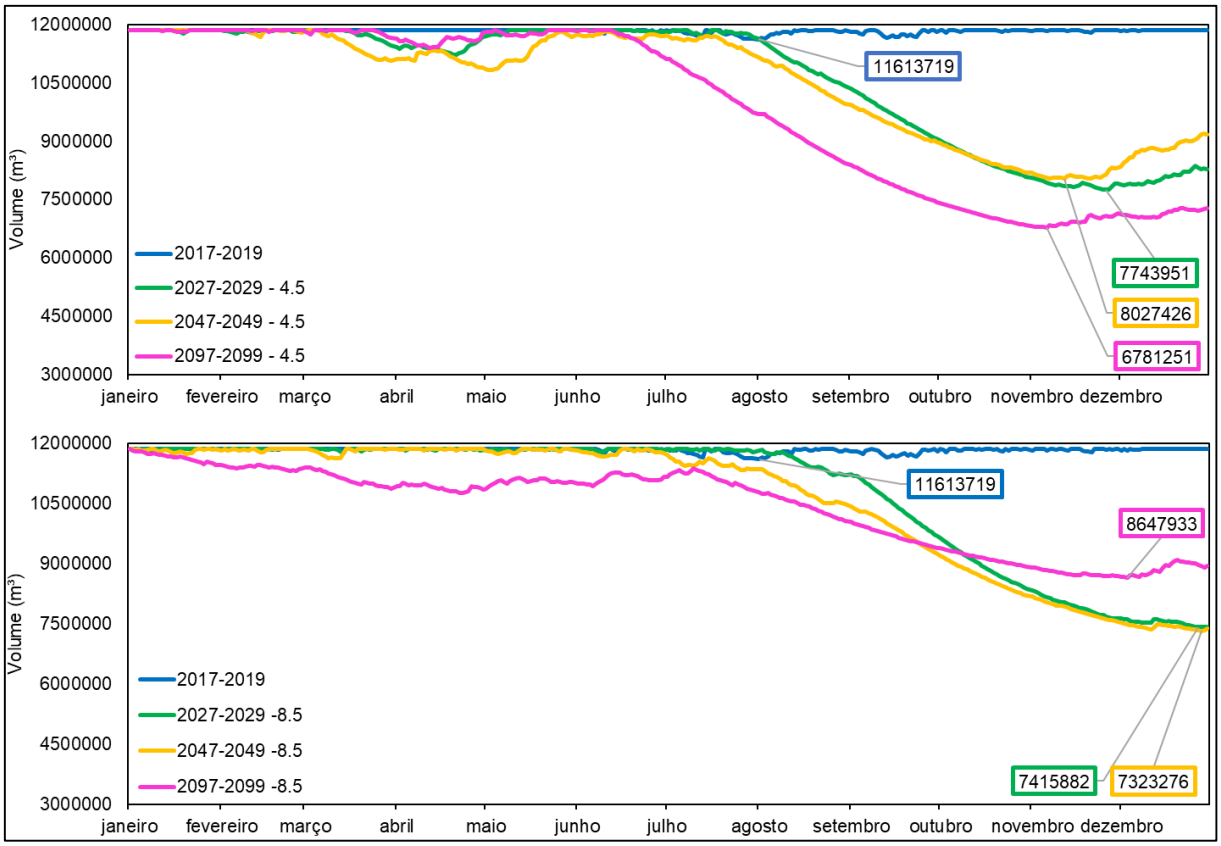


As projeções de balanço hídrico do manancial do Utinga a partir do modelo Eta-HADGEM2-ES alinhados aos RCPs 4.5 e 8.5 (Figura 23), resultaram em volumes mais elevados para o manancial nos três períodos estudados, quando comparados as projeções do Eta-MIROC5. Para o RCP 4.5, o volume do manancial começa a reduzir a partir do mês de março, intensificando-se no mês de julho. Enquanto que o RCP 8.5 projetou reduções mais intensas a partir do mês de agosto para o futuro próximo e meio do século, enquanto o final do século começa a passar por reduções desde o início do ano, intensificando-se no mês de julho.

As projeções do modelo Eta-HADGEM2-ES para o futuro próximo indicaram o menor volume de 7.415.882 m³, em dezembro, a partir do RCP 8.5, o que representa 37% a menos da capacidade máxima do manancial. Para o meio do século, o modelo projetou um volume mínimo de 7.323.276 m³, em dezembro, a partir do RCP8.5, o que representa 38% a menos de água. Para o final do século, o Eta-HADGEM2-ES alinhado ao RCP4.5 projetou cenário mínimo de 6.781.251 m³,

em novembro, aproximadamente 43% de redução, quando comparado a capacidade máxima do manancial.

Figura 23: Balanço hídrico do Manancial Utinga via modelo Eta-HADGEM2-ES para os cenários RCPs 4.5 e 8.5.



Ao analisar os balanços hídricos nos períodos estudados, para os lagos de forma individual e o manancial Utinga, os resultados das projeções realizadas a partir do modelo Eta-MIROC5 alinhado aos RCPs 4.5 e 8.5, indicam o meio do século como o momento no qual os lagos passarão pelas reduções mais intensas em seus volumes. Em quanto que, as projeções do modelo Eta-HADGEM2-ES alinhado ao RCP 4.5 indicam o final do século como o momento de maior estresse hídrico; e o modelo Eta-HADGEM2-ES alinhado ao RCP 8.5 projeta o meio do século, sendo o momento de maior redução no volume dos lagos.

Ao realizar a comparação entre os modelos, é possível observar que o Eta-MIROC5 projeta cenários mais críticos para o volume dos lagos, mesmo apresentando projeções de precipitações maiores, o que indica a forte influência da evaporação superficial sobre a redução do volume dos lagos, pois o modelo

apresenta uma evaporação superficial mais intensa do que o Eta-HADGEM2-ES. Os resultados obtidos estão de acordo com os estudos de Wang et al. (2014), que indicam que a elevação da temperatura e a precipitação variável podem reduzir o abastecimento de água, agravando o quadro de escassez de água.

4.4. PROJEÇÃO DA POPULAÇÃO E VAZÃO DEMANDADA DOS LAGOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE BELÉM-PA

Para realizar a projeção da população da cidade de Belém-PA, foram utilizados 8 anos de dados de censos realizados pelo IBGE. Esses dados estão disponíveis no banco de dados do IBGE através da plataforma SIDRA (2021). Os censos realizados pelo IBGE apresentam um intervalo de 10 anos, exceto no ano de 1991, que apresentou um intervalo de 11 anos; e no ano de 2000, que apresentou um intervalo de 9 anos. Através da Equação 6 foram obtidas as Equações 14 e 15, utilizadas para realizar a projeção populacional para a cidade de Belém-PA. A primeira considera 100% da taxa de crescimento populacional, representando um alto crescimento da população e a segunda 80% da taxa de crescimento demográfico, a qual representa o cenário de crescimento moderado.

$$P(t) = 2.477.477\left(\frac{206.331}{2.477.477}\right)^{e^{-0,0234t}} \quad (14)$$

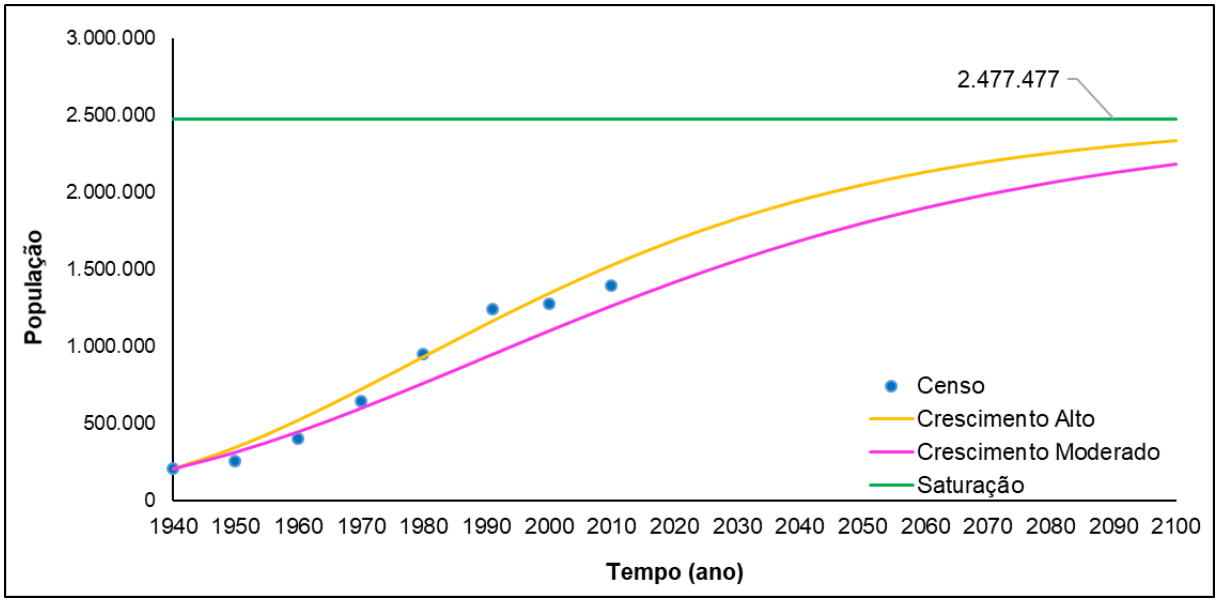
$$P(t) = 2.477.477\left(\frac{206.331}{2.477.477}\right)^{e^{-0,0187t}} \quad (15)$$

A projeção para a cidade de Belém-PA, utilizando o modelo Gompertz foi realizada até o ano de 2100, com uma variação de intervalo de 10 anos, buscando acompanhar o intervalo de dados observados. A população de saturação calculada K foi de 2.477.477 habitantes. Até o ano de 2100 os cenários de alto e moderado crescimento demográfico não atingem a população de saturação calculada para a cidade de Belém.

A população máxima projetada para o cenário de alto crescimento populacional atinge até 2100 cerca de 2.335.553 habitantes. Para o cenário de crescimento populacional moderado até o final do século a população será de

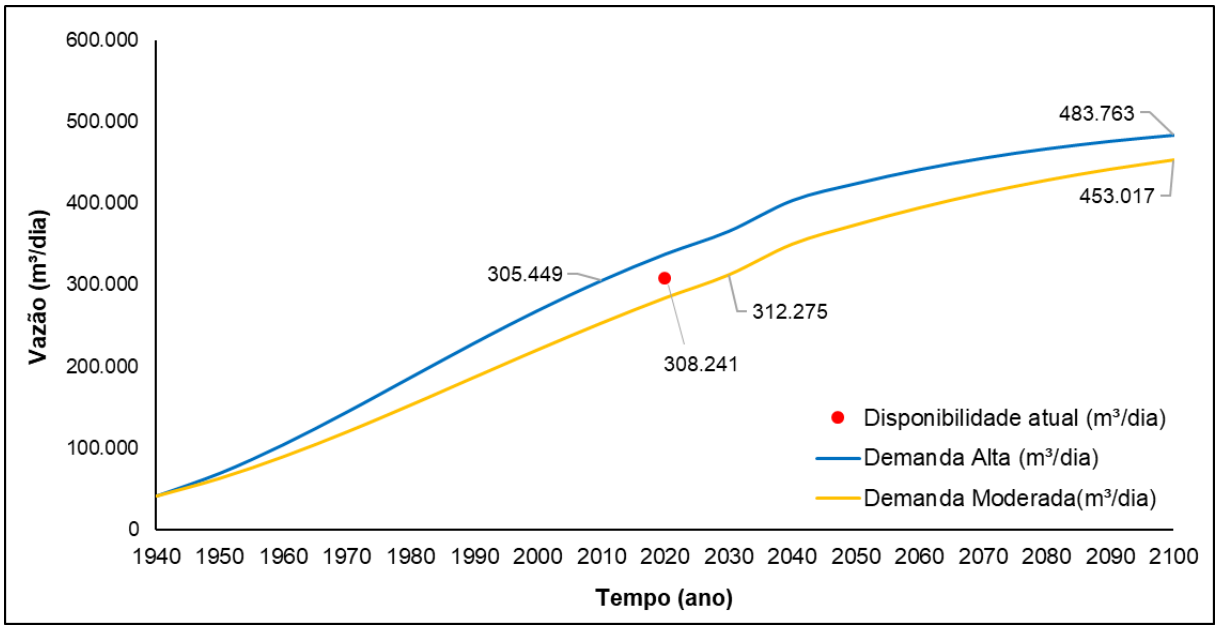
2.187.115 habitantes (Figura 24). O PMSB (2020) realizou a projeção da população de Belém até o ano de 2040 no qual a população de Belém-PA atingirá cerca de 1.596.715 habitantes, valor este próximo à população projetada pelo cenário moderado 1.689.316 habitantes, enquanto o cenário de alto crescimento projeta para o mesmo ano cerca de 1.949.051 habitantes.

Figura 24: Cenários de projeção da população de Belém-PA.



Quanto à projeção do consumo de água da população futura de Belém-PA (Figura 25), foi levado em consideração o coeficiente per capita de 200 l/hab.dia, para realizar a simulação de consumo até o ano de 2030. A COSANPA utilizou o coeficiente per capita de 200 l/hab.dia no projeto de abastecimento de Belém, no qual o período limite do projeto atual é o ano de 2030, de acordo com PMSB II (2014). A partir do ano de 2040 foi considerado o coeficiente per capita de 207 l/hab.dia, projetado pelo Instituto Trata Brasil (2020) para o estado do Pará. A produção da COSANPA é cerca de 518.400 m³/dia de acordo com Lima et al (2013). A partir de uma análise realizada pela própria COSANPA, foi constatado que a perda média do total produzido chega a 40,54% (PMSB, 2020), reduzindo a produção diária atual para 308.241 m³/dia.

Figura 25: Cenários de projeção de consumo de água em Belém-PA.



Na Figura 25 é possível observar as projeções dos cenários de abastecimento de água para cidade. Para o cenário moderado a escassez hídrica ocorrerá a partir do ano de 2030, no qual a vazão demandada será de 312.275 m³/dia, e até final do século a vazão necessária será 453.017 m³/dia. O cenário de alto crescimento populacional aponta que em 2010 a demanda de água era de 305.449 m³/dia e se elevou para 337.863 m³/dia no ano de 2020, indicando que a população já vem passando por situação de escassez hídrica, devido à ocorrência de perdas no sistema, e até o ano 2100 a vazão requerida será de 483.763 m³/dia. Constatando que a produção atual da COSANPA não será capaz de atender a demanda da população futura da cidade de Belém-PA, o que levará as futuras gerações da cidade a passar por situação de escassez hídrica.

O cenário de falta de água a partir do ano de 2020 está de acordo com o estudo de caso realizado por Aguiar (2021) para o bairro do Marco em Belém-PA, o qual constatou relatos de consumidores que informaram quantidade insuficiente de água e falta de água em alguns dias. Isso indica que o elevado percentual de perda do sistema já vem afetando a população da cidade. Atualmente existem projetos e obras para realizar a manutenção e revitalização do sistema de abastecimento de água de Belém (PMSB, 2020).

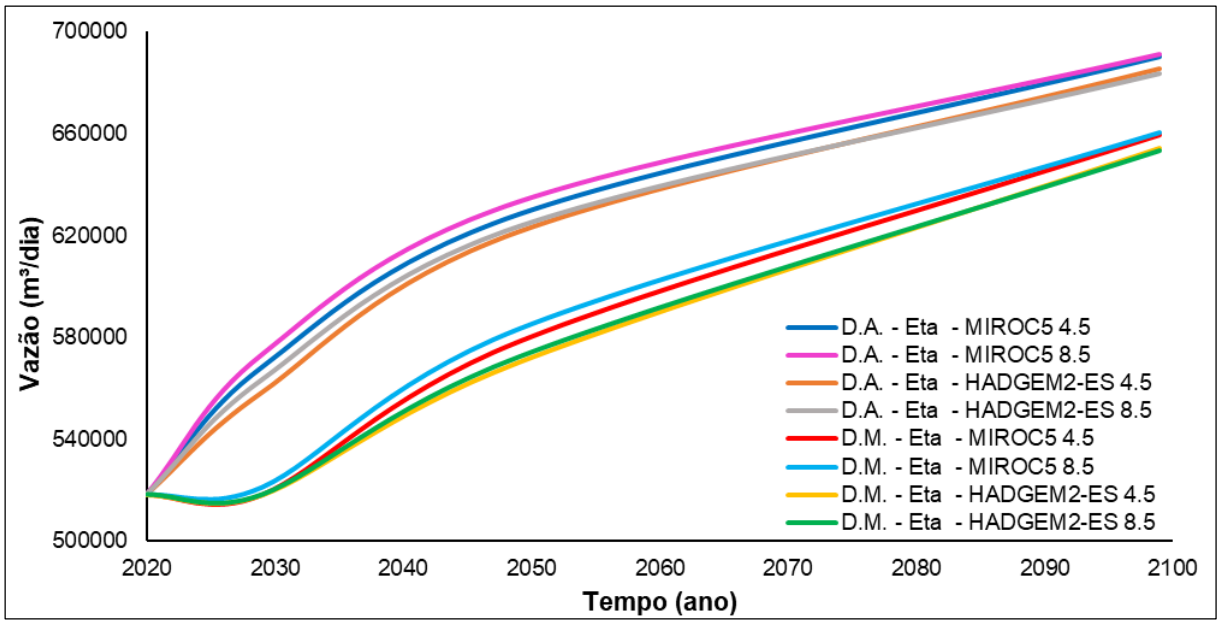
Quando combinados os cenários de crescimento populacional com o impacto das mudanças climáticas, as pressões sobre as fontes de abastecimento de água são ampliadas. Conforme Wang et al. (2014); Ferreira e Souza (2020), as mudanças climáticas e o incremento no contingente populacional elevarão a pressão sobre os recursos hídricos, tornando necessário uma gestão sustentável da água, para a adaptação aos cenários em mudanças.

As projeções para a cidade de Belém apontam um aumento de consumo ocasionado pelo crescimento da população, juntamente com a redução da disponibilidade hídrica no manancial do Utinga decorrente das mudanças climáticas, tornando necessário elevar o volume disponível de água no sistema. Para isso é necessário aumentar o bombeamento de água bruta do rio Guamá, para que este seja capaz de abastecer a demanda futura da sociedade, sem intensificar o estresse hídrico sobre o manancial.

Assim, foram realizadas projeções de bombeamento de água do rio Guamá para o manancial Utinga até o ano de 2100. Fazendo uso da Equação 1, foi calculada a vazão de bombeamento de água bruta necessária para que o sistema seja capaz de atender o aumento do consumo de água. Nesse caso, foi substituído, na equação, o consumo atual pelas projeções de demanda alta e moderada de água dos anos de 2030, 2050 e 2100. Alinhando o aumento de consumo as projeções de balanço hídrico dos modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES para os cenários RCPs 4.5 e 8.5, nos períodos futuro próximo, meio do século e final do século. Tendo como base situações como as crises hídricas que ocorreram no sistema Cantareira em 2014 e sistema de abastecimento integrado de Curitiba no ano de 2020, onde de acordo com Porto et al. (2014) e a SANEPAR (2022), o armazenamento disponível ficou 50% a baixo da capacidade dos sistemas, tornando necessário tomar medidas de racionamento de água. Logo, no presente estudo, foi verificada a vazão afluente necessária para que o sistema mantenha aproximadamente 50% de sua capacidade máxima, visando o atendimento da população futura. Esse percentual visa manter a segurança hídrica, uma condição indispensável para o desenvolvimento social e econômico, especialmente quando se verificam os impactos causados pelos eventos hidrológicos extremos ocorridos na atual década no Brasil (ANA, 2019). Na Figura 26 são mostrados os oito cenários de bombeamento. A partir dessa figura, é possível analisar que o cenário de demanda

alta (D.A.) necessitaria de mais bombeamento de água a partir do ano de 2020. Quanto ao cenário de demanda moderada (D.M.), será necessário aumentar o bombeamento a partir do ano de 2030.

Figura 26: Cenários de projeções de bombeamento de água bruta para o manancial Utinga.



O modelo Eta-MIROC5 alinhado ao RCP 8.5 juntamente com a demanda de água do crescimento elevado da população, será o cenário que necessitará do bombeamento mais elevado para suprir a necessidade futura da população, ou seja, 691.400 m³/dia até o ano de 2100. E o modelo Eta-HADGEM2-ES para os RCP 4.5 e 8.5, alinhados ao consumo do crescimento moderado da população, são os cenários que demandarão um bombeamento menor de água bruta, 654.400 m³/dia e 653.400 m³/dia até final do século respectivamente.

O modelo Eta-MIROC5 comparado ao Eta-HADGEM2-ES apresentou os cenários de bombeamento mais elevados, estando de acordo com os resultados de balanço hídrico do manancial. Já que a projeção do balanço hídrico dos lagos a partir do modelo Eta-MIROC5 apresentou as maiores reduções no volume do sistema. E os resultados de bombeamentos mais elevados estão vinculados ao RCP 8.5, pois este é o cenário mais intenso de mudanças climáticas, conforme Silveira et al. (2016), no qual as emissões de GEE continuam a crescer sem restrições.

Para que o manancial Utinga atenda a demanda futura da cidade, será necessário eliminar as perdas apresentadas atualmente pelo sistema e elevar a capacidade de bombeamento de água bruta do rio Guamá. Na busca de mitigar os efeitos das mudanças climáticas e crescimento populacional nos lagos de abastecimento da cidade. Será também necessário ampliar o sistema de recalque que leva a água bruta bombeada até o lago Água Preta. Essa redução no volume do manancial resultará em um aumento importante nos custos de bombeamento. O levantamento feito pelo PMSB (2020) informa que o acionamento dos conjuntos moto bomba dá-se por sistema de partida direta, modelo este pouco eficiente e que resulta em elevados gastos com energia elétrica.

5. CONCLUSÃO

As mudanças climáticas projetadas para a região de Belém-PA apontam uma forte alteração nas variáveis hidroclimatológicas da cidade. Os modelos Eta-MIROC5 e Eta-HADGEM2-ES alinhados aos RCPs 4.5 e 8.5 projetaram uma redução significativa de precipitação até o final do século. Os meses de setembro e outubro foram projetados em todos os cenários, com um volume precipitado baixo ou sem a ocorrência de chuva. Quanto à evaporação superficial, foi projetado por ambos os modelos e cenários uma elevação das médias mensais desta variável até o final do século XXI. Mesmo para o período futuro próximo, às projeções apontam uma redução nas médias mensais de chuvas e elevação da evaporação superficial.

As projeções de Balanço Hídrico dos lagos indicam que em certos momentos, as médias mensais de evaporação superficial são superiores as médias mensais de precipitação, acarretando redução do volume dos lagos. O modelo Eta-MIROC5 apresentou as projeções de reduções hídricas mais intensas do manancial Utinga, comparadas as projeções do modelo Eta-HADGEM2-ES. As projeções indicam o meio do século como o momento de maior estresse hídrico para os lagos, com exceção da projeção do Eta-HADGEM2-ES alinhado ao RCP 4.5, que indicou o final do século. As projeções para o futuro próximo também apontam reduções intensas no volume dos lagos.

A projeção demográfica para a cidade de Belém até o ano de 2100 não atingiu a população de saturação calculada para a cidade. Também foi possível constatar que o sistema que abastece parte da cidade de Belém não será capaz de atender as demandas futuras de água. O que levará a população a passar por situação de escassez hídrica ao longo do século XXI. O cenário de alto crescimento populacional indicou que, atualmente, parte da população já passa por situação de escassez hídrica; e o cenário de crescimento moderado projetou que até o ano de 2030 a demanda de água não será totalmente atendida.

A análise de bombeamento futuro de água para o manancial Utinga indicou que será necessário ampliar o sistema de captação do rio Guamá, para fornecer água à demanda futura da cidade, aumentando com isso os custos de energia para alimentação do sistema. O cenário de crescimento elevado da população, ligado ao modelo Eta-MIROC5 e RCP 8.5, foi o que apresentou o maior aumento de bombeamento até final do século. Uma das limitações apresentadas pelo modelo de

balanço hídrico utilizado, foi não apresentar uma variável para as macrófitas presentes na superfície dos lagos.

Para que cenários de escassez hídrica não ocorram, são necessários que medidas como a redução das perdas do sistema e aumento de bombeamento de água sejam tomadas. O impacto das mudanças climáticas sobre o manancial do Utinga pode ser mitigado através da busca de novas formas de atendimento ao público, como por exemplo, a utilização de manancial subterrâneo e aproveitamento de água da chuva para atender a demanda futura.

Desta forma, compreender como as mudanças das variáveis hidrológicas afetarão a disponibilidade de água, é uma ferramenta importante, na busca de mitigar os impactos e realizar o planejamento e gerenciamento a longo prazo deste recurso. Assim, os órgãos responsáveis podem tomar as medidas necessárias, para modificar o provável cenário futuro de abastecimento de água em Belém do Pará.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se que sejam realizadas pesquisas futuras para analisar o custo que terá a ampliação do sistema de captação de água do rio Guamá, para manter a capacidade máxima do manancial Utinga, mesmo sob o efeito das mudanças climáticas; analisar fontes alternativas de abastecimento de água, para suprir a população futura da cidade de Belém-PA; e estudar o custo da ampliação do sistema de tratamento de água, para fornecer água potável para a população futura da cidade; Analisar alternativas para mitigar o impacto das mudanças climáticas sobre as fontes de recursos hídricos da região.

REFERÊNCIAS

ALEMAN, J. C.; BLARQUEZ, O.; GOURLET-FLEURY, S.; BREMOND, L.; FAVIER, C. Tree cover in Central Africa: determinants and sensitivity under contrasted scenarios of global change. Scientific Reports, v. 7, p. 41393, 2017.

ALMAGRO, A., OLIVEIRA, P. T. S., ROSOLEM, R., HAGEMANN, S., & NOBRE, C. A. Performance evaluation of Eta/HadGEM2-ES and Eta/MIROC5 precipitation simulations over Brazil. **Atmospheric Research**, 244, 105053. 2020.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.LM.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22(6), 711-728, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. ANA. Plano Nacional de Segurança Hídrica. Brasília. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: **Relatório Pleno**. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Disponível em: https://www.ana.gov.br/noticias-antigas/o-risco-de-escassez-de-a-gua-doce.2019-03-15.4724785357. Acesso: Abr/2020. 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Disponível em: https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua.
Acesso: Mai/2020. 2020.

AGENDA 21. Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, Rio de Janeiro, Nações Unidas, 1992.

AGUIAR JUNIOR, L. F. A. Análise Comparativa da Gestão do Abastecimento de Água com Base no Plano Diretor do Município de Belém: Estudo de Caso. RCT-Revista de Ciência e Tecnologia, 7. 2021.

ARSISO, B.K.; TSIDU, G.M.; STOFFBERG, G. H.; TADESSE, T. Climate change and population growth impacts on surface water supply and demand of Addis Ababa, Ethiopia. **Climate Risk Management**, v. 18, p. 21-33, 2017.

ASFAW, W.; HAILE, A. T.; RIENTJES, T. Combining multisource satellite data to estimate storage variation of a lake in the Rift Valley Basin, Ethiopia. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 89, p. 102095, 2020.

BASTOS, T.X. O clima da Amazônia Brasileira segundo Köppen. Belém: **EMBRAPA-CPATU**, 1982.

BELÉM. Plano municipal de saneamento básico de abastecimento de água e esgotamento sanitário de Belém – Pará/Volume I. PMSB I. Belém: Prefeitura Municipal de Belém do Pará, 2014.

BELÉM. Plano municipal de saneamento básico de abastecimento de água e esgotamento sanitário de Belém – Pará/Volume II. PMSB II. Belém: Prefeitura Municipal de Belém do Pará, 2014.

BELÉM. Plano municipal de saneamento básico de Belém – Pará. PMSB. Belém: Prefeitura Municipal de Belém do Pará, 2020.

BEZERRA, A. F.M.; BECKER, V.; MATTOS, A. Balanço de Massa de Fósforo Total e o Estado Trófico em Reservatórios do Semiárido Brasileiro. **RBRH—Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 67-76, 2014.

BROOKS, D.B.; BRANDES, O.M.; Why a Water Soft Path, Why Now and What Then?. **International Journal of Water Resources Development**, 27:02, 315-344, 2011.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente**. Portaria nº 150 instituído em 10 de maio de 2016.** Brasília, 2016.

BRASIL. **Lei n° 12.187 instituído em 29 de dezembro de 2009.** Política Nacional sobre Mudança do Clima. Brasília, 2009.

BRASIL. **Lei nº 9.433 instituído em 8 de janeiro 1997**. Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, 1997.

BRASIL – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Modelagem Climática e Vulnerabilidades Setoriais à Mudança do Clima no Brasil. Brasília, p. 590, 2016.

BRITO, V. C.; SANTOS, V. S.; CURI, W. F.; NEPOMUCENO, T. C.; DA COSTA NETO, F. D. A. Perdas hídricas e desempenho dos reservatórios receptores do PISF na bacia do Rio Paraíba**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, 10(5), 114-127, 2019.

BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. **Wea. and Forecasting**, 9, 265-278. 1994.

CHOU, S. C., LYRA, A., MOURÃO, C., DERECZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., ... & CHAGAS, D. Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, 3(05), 438. 2014a.

CHOU, S. C., LYRA, A., MOURÃO, C., DERECZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., ... & MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, 3(05), 512. 2014.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. SANEPAR. https://site.sanepar.com.br/noticias/rodizio-no-abastecimento-da-rmc-trouxe-economia-de-quase-90-bilhoes-de-litros-de-agua . Acesso: mar/2022.2022.

COSTA, C. E. A. S.; BLANCO, C. J. C.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. **Climatic Change**, 166(3), 1-22. 2021.

COSTA, C. E. A. S, BLANCO, C. J. C., & DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. IDF curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil. **Journal of Water and Climate Change**, *11*(3), 760-770. 2020a.

COSTA, R. L., GOMES, H. B., SILVA, F. D. D. S., BAPTISTA, G. M. D. M., ROCHA, R. L. D., HERDIES, D. L., & SILVA, V. D. P. R. D. Cenários de Mudanças Climáticas para a Região Nordeste do Brasil por meio da Técnica de Downscaling Estatístico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 35, 785-801. 2020b.

COUTINHO, E. S. S. Modelagem populacional utilizando regressões com Solver: aplicação para Petrópolis/RJ. **REMAT: Revista Eletrônica da Matemática**, 5(2), 225-240. 2019.

COLLINS, W.J., N. BELLOUIN, M. DOUTRIAUX-BOUCHER, N. GEDNEY, T. HINTON, C. D. JONES, S. LIDDICOAT, G. MARTIN, F. O'CONNOR, J. RAE, C. SENIOR, I. TOTTERDELL, S. WOODWARD, T. REICHLER, J. KIM. Evaluation of the HadGEM2 model. Met Office Hadley Centre Technical Note no. HCTN 74, available from Met Office, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB http://www.metoffice.gov.uk/publications/HCTN/index.html. 2008.

CHOKKAVARAPU, N., & MANDLA, V. R. Comparative study of GCMs, RCMs, downscaling and hydrological models: a review toward future climate change impact estimation. **SN Applied Sciences**, 1(12), 1-15. 2019.

DA-PING, X.; HONG-YU, G.; DAN, H. Discussion on the demand management of water resources. **Procedia Environmental Sciences**, 10, 1173-1176, 2011.

DESSIE, M.; VERHOEST, N. E.; PAUWELS, V. R.; ADGO, E.; DECKERS, J.; POESEN, J.; NYSSEN, J. Water balance of a lake with floodplain buffering: Lake Tana, Blue Nile Basin, Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 174-186, 2015.

DEMORY, M. E., BERTHOU, S., FERNÁNDEZ, J., SØRLAND, S. L., BROGLI, R., ROBERTS, M. J., VAUTARD, R, et al. European daily precipitation according to EURO-CORDEX regional climate models (RCMs) and high-resolution global climate models (GCMs) from the High-Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP). **Geoscientific Model Development**, 13(11), 5485-5506. 2020.

DENTAMARO, A. A. Estudo da evolução de modelos de crescimento populacional e métodos para obtenção de parâmetros. 2019.

DIAS S. F. Estudo ambiental no Utinga: vida útil do sistema de abastecimento d'água de Belém. IDESP. 1991.
EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. Disponível em:<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/389773/1/OrientalDoc128.pdf>. 2002. Acesso em: Abr/2020.

FERREIRA, P. S.; SOUZA, W. M. Modelagem hidroclimática e demográfica para estimativa da disponibilidade hídrica na bacia hidrográfica do rio Brígida. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020.

FLEURY, L. C., MIGUEL, J. C. H., & TADDEI, R. Mudanças climáticas, ciência e sociedade. **Sociologias,** 21, 18-42. 2019.

FOLEY, S.F.; GRONENBORN, D.; ANDREAE, M.O.; KADEREIT, J.W.; ESPER, J.; SCHOLZ, D.; VÖTT, A. The Palaeoanthropocene–The beginnings of anthropogenic environmental change. **Anthropocene**, v. 3, p. 83-88, 2013.

FORNER, L.M.; BONILLA, J.Z. El debate sobre el cambio climático interpretado como un juego de persuasión (The climate change debate as a persuasion game). THEORIA. **An International Journal for Theory, History and Foundations of Science**, 28(1), 77-96. 2013.

FOWE, T.; KARAMBIRI, H.; PATUREL, J. E.; POUSSIN, J. C.; CECCHI, P. 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.

GEORGE, B.A.; MALANO, H.M.; KHAN, A.R.; GAUR, A.; DAVIDSON, B. Urban Water Supply Strategies for Hyderabad, India – Future Scenarios. **Environ Model Assess** 14, 691, 2009. https://doi.org/10.1007/s10666-008-9170-6.

GOMES FILHO, M. F.; ARAGÃO, J. O.; SRINIVASAN, V. S. Relações entre as TSM's Globais e os volumes dos principais reservatórios de água da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 3(1), 74-81, 1999.

GOVERNO DO ESTADO DO PARANÁ
https://www.aen.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=113133. Acesso em: Ago/2021. 2021.

GLEICK, P. H. Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century. **Science**. 302:524–528, 2003.

GLEICK, P. H. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. **Journal of hydrology**, 88(1-2), 97-116, 1986.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP. GWP. Technical Advisory Committee. Integrated water resources management. TAC Background Paper, nº 4, Stockholm, Sweden, 71p., 2000.

GRAMELSBERGER, G. Conceiving processes in atmospheric models—general equations, subscale parameterizations, and 'superparameterizations'. **Studies in History and Philosophy of Modern Physics**, v. 41, p. 233–241, 2010.

GRAMELSBERGER, G. What do numerical (climate) models really represent? **Studies in History and Philosophy of Science**, v. 42, n. 2, p. 296-302, 2011.

GOVERNMENT OF CANADA
https://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2 . 2021. Acesso: Mai/2022.

GUPTA, J. A history of international climate change policy. Wiley Interdisciplinary Reviews: **Climate Change**, 1(5), 636-653. 2010.

HELFER, F.; LEMCKERT, C.; ZHANG, H. Impactos das mudanças climáticas na temperatura e evaporação de um grande reservatório na Austrália. **Journal of hydrology**, 475, 365-378, 2012.

HIDALGO, I. G.; FONTANE, D. G.; SOARES FILHO, S.; CICOGNA, M. A.; LOPES, J. E. G. Procedimentos para Consolidação de Dados de Usinas Hidrelétricas Baseados nas Informações Registradas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 17, 9-21, 2012.

HOLANDA, P. D. S.; BLANCO, C. J. C.; CRUZ, D. O. D. A.; LOPES, D. F.; BARP, A. R. B.; SECRETAN, Y. Hydrodynamic modeling and morphological analysis of Lake Água Preta: one of the water sources of Belém-PA-Brazil. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, 33(2), 117-124, 2011.

HÖLBIG, C. A., MAZZONETTO, A., BORELLA, F., PAVAN, W., FERNANDES, J. M. C., CHAGAS, D. J., ... & CHOU, S. C. PROJETA platform: accessing high resolution climate change projections over Central and South America using the Eta model. **Embrapa Trigo-Artigo em periódico indexado (ALICE)**. 2018.

ISLAM, M. A., & AHMED, P. Prediction of the Population of Bangladesh Using Logistic Model. **International Journal of Applied Mathematics & Statistical Sciences (IJAMSS)**. 6(6), 37-50. 2017.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Demanda futura por água tratada nas cidades brasileiras 2017 a 2040. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAS. INPE. Site: http://etamodel.cptec.inpe.br/history/. Acesso Out/2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE. Site: http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5811. Acesso: Ago/2021. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE. http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/27.html. Acesso: set/2021.

INSITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE. http://www.inpe.br/besm/modelo-besm/. Acesso: Mai/2022

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). Projeção da População Brasil e Unidades da Federação. Revisão 2018. Rio de Janeiro; 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (IBGE). Projeção da População Brasil e Unidades da Federação. Rio de Janeiro; 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA. IBGE. https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=o-que-e. Acesso jul/2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama, acesso: Abr/2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. IBGE. Aspectos da Contagem da População 2007. 2007.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/?r=bdmep/bdmep&gt, acesso: Fev/2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. IPCC. Disponível: https://www.ipcc.ch/. Acesso: Jun/2020.

JANJIC, Z. I., The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. **Mon. Wea. Rev.,** 122, 927-945. 1994.

JEPPESEN, E.; BRUCET, S.; NASELLI-FLORES, L.; PAPASTERGIADOU, E.; STEFANIDIS, K.; NOGES, T.; NOGES, P.; ATTAYDE, J.L.; ZOHARY, T.; COPPENS, J.; BUCAK, T.; MENEZES, R.F.; FREITAS, F.R.S.; KERNAN, M.; SONDERGAARD, M.; BEKLIOGLU, M. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. **Hydrobiologia**, 750(1), 201-227, 2015.

JUNIOR, P., & MAUAD, F. Simulação dos Impactos das Mudanças Climáticas na Vazão da Bacia do Ribeirão do Feijão—SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 20(3), 741-751. 2015.

KUNDZEWICZ, Z. W., KRYSANOVA, V., BENESTAD, R. E., HOV, Ø., PINIEWSKI, M., & OTTO, I. M. Uncertainty in climate change impacts on water resources. **Environmental Science & Policy,** 79, 1-8. (2018).

KURAHASHI-NAKAMURA, T.; ABE-OUCHI, A.; YAMANAKA, Y. Effects of physical changes in the ocean on the atmospheric pCO 2: glacial-interglacial cycles. **Climate Dynamics**, v. 35, n. 4, p. 713-719, 2010.

KOPYTKOVSKIY, M.; GEZA, M.; MCCRAY, J. E. Climate-change impacts on water resources and hydropower potential in the Upper Colorado River Basin. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 3, p. 473-493, 2015.

KUMMU, M.; TES, S.; YIN, S.; ADAMSON, P.; JÓZSA, J.; KOPONEN, J.; SARKKULA, J. Water balance analysis for the Tonle Sap Lake–floodplain system. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 4, p. 1722-1733, 2014.

LIMA, C. A. G.; CURI, W. F.; CURI, R. C. Marco Regulatório para a Gestão do Sistema Curema-Açu e as Disponibilidades Hídricas do Reservatório Curema-Mãe D'Água. **RBRH—Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 73-86, 2007.

LIMA, N. S.; BLANCO, C. J. C.; DA SILVA HOLANDA, P.; LOPES, D. F.; BARP, A. R. B.; SECRETAN, Y. Hydrodynamic modeling and morphological analysis of lake Bolonha: a water source in Belém, Pará State, Brazil. **Acta Scientiarum**. 35(1), 59-67, 2013.

LYRA, A., TAVARES, P., CHOU, S. C., SUEIRO, G., DERECZYNSKI, C., SONDERMANN, M., ... & GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theor Appl Climatol** 132, 663–682. 2017.

LOPES, L. G., RODRIGUEZ, D. A., JÚNIOR, J. L. S., & MOHOR, G. S. Projeções de descargas extremas sob impactos das mudanças climáticas na região amazônica. **Revista Brasileira de Cartografia**, 69(1). 2017.

MARTIN, G.M., BELLOUIN, N., COLLINS, W.J., CULVERWELL, I.D., HALLORAN, P.R., HARDIMAN, S.C., ET AL. The HadGEM2 Family of Met Office Unified Model Climate Configurations. **Geoscientific Model Development**, 4, 723-757. 2011.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 25-32, 2014.

MARENGO, J. A., TOMASELLA, J., & NOBRE, C. A. Climate change and water resources. **In Waters of Brazil (pp. 171-186). Springer, Cham.** (2017).

MESINGER, F., A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Riv. Meteor. Aeronautica**, 44, 195-202. 1984.

MET OFFICE HADLEY CENTRE. Representative Concentration Pathways. Disponivel:https://www.metoffice.gov.uk/binaries/content/assets/metofficegovuk/pdf/research/ukcp/ukcp18-guidance---representative-concentration-pathways.pdf. Acesso: Jun/2020. 2018.

MET OFFICE HADLEY CENTRE. Disponível:https://www.metoffice.gov.uk/weather/climate-change/what-is-climate-change . Acesso: Mai/2020. 2020.

MET OFFICE HADLEY CENTRE. https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem2. Acesso: set/2021.

MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. **Riv Meteorol Aeronautica, Bethesda**, v. 44, p. 195-202, 1984.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. MMA. https://antigo.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global.html. Acesso: Ago/2021. 2021.

MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. MMA. Site: https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/protocolo-de-quioto.html. Acesso: Outubro/2021.

MIRANDA, L. C. M., & LIMA, C. A. S. On the logistic modeling and forecasting of evolutionary processes: Application to human population dynamics. **Technological Forecasting and Social Change**, 77(5), 699-711. 2010.

MOUSAVI, N.; KOTHAPALLI, G.; HABIBI, D.; KHIADANI, M.; DAS, C. K. An improved mathematical model for a pumped hydro storage system considering electrical, mechanical, and hydraulic losses. **Applied energy**, 247, 228-236, 2019.

NWAOKORIE, C.; UKAUKU, I.; EMELLE, C. Material Balance Modelling of Hydraulically Connected Reservoirs in a Single System: Case Studies. In SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. **Society of Petroleum Engineers**. 2013.

NICELY, D. R. H.; FIEDLER, F. Development of a system-based water balance model to assess interrelated physical and anthropogenic constraints in lake and reservoir watersheds, applied to Coeur d'Alene Lake, Idaho, USA. **Lakes & Reservoirs: Research & Management**, 22(3), 215-228, 2017.

NOBRE, P., SIQUEIRA, L. S., DE ALMEIDA, R. A., MALAGUTTI, M., GIAROLLA, E., CASTELÃO, G. P., ... & MARCONDES, G. G. Climate simulation and change in the Brazilian climate model. **Journal of Climate**, 26(17), 6716-6732. 2013.

OLIVEIRA, L. P. M. D., SILVA, F. D. D. S., COSTA, R. L., ROCHA JÚNIOR, R. L. D., GOMES, H. B., PEREIRA, M. P. S., ... & SILVA, V. D. P. R. D. Impacto das Mudanças Climáticas na Produtividade da Cana de Açúcar em Maceió. **Revista Brasileira de Meteorologia**, (AHEAD). 2020.

OLIVEIRA, G. M. T. S. D.; OLIVEIRA, E. S. D.; SANTOS, M. D. L. S.; MELO, N. F. A. C. D.; KRAG, M. N. Concentrações de metais pesados nos sedimentos do lago Água Preta (Pará, Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 23(3), 599-605, 2018.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. ONU. https://news.un.org/pt/story/2021/08/1760132. Acesso: Ago/2021. 2021.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAS DE METEOROLOGIA. OMM. Relatório: State of the Climate in Latin America and the Caribbean 2020. 2021.

PIVETTA, Marcos. Extremos do clima. Pesquisa FAPESP, v. 210, p. 16-20, 2013.

PORTO, R. L., PORTO, M. F., & PALERMO, M. A ressurreição do volume morto do Sistema Cantareira na Quaresma. Revista DAE, 197(197), 18-25. (2014).

PRODES. COORDENAÇÃO-GERAL DE OBSERVAÇÃO DA TERRA. Site: http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/app/dashboard/deforestation/biomes/legal_amazon/rates. Acesso: Ago/2021. 2021.

PROJETA. Site: https://projeta.cptec.inpe.br/#/about. Acesso: Ago/2021.

PUDEH, H. T.; MANSOURI, R.; HAGHIABI, A. H.; YONESI, H. A. Optimization of hydraulic-hydrologic complex system of reservoirs and connecting tunnel. **Water resources management**, 30(14), 5177-5191, 2016.

REBOITA, M. S., KUKI, C. A. C., MARRAFON, V. H., DE SOUZA, C. A., FERREIRA, G. W. S., TEODORO, T., & LIMA, J. W. M. South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. **Climate Dynamics**, 1-27. 2021.

Programa da Bacia da Estrada Nova – PROMABEN II. RELATÓRIO DE CONTROLE AMBIENTAL. P4M004-003. Belém-PA. 2021.

ROGELJ, J.; DEN ELZEN, M.; HÖHNE, N.; FRANSEN, T.; FEKETE, H.; WINKLER, H.; MEINSHAUSEN, M. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 C. Nature, v. 534, n. 7609, p. 631, 2016.

SALES, D. C., COSTA, A. A., SILVA, E. M. D., VASCONCELOS, F. D. C., CAVALCANTE, A. D. M. B., MEDEIROS, S. D. S., ... & PEREIRA, J. M. R. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste Brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. Revista Brasileira de Meteorologia, 30, 435-456. 2015.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. S. Evolução dos Modelos Climáticos e de Previsão de Tempo e Clima. **Revista USP**, n. 103, p. 41-54, 2014.

SANTOS, V. C. D., BLANCO, C., & OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. D. Distribution of rainfall probability in the Tapajos River Basin, Amazonia, Brazil. Revista Ambiente & Água, 14. 2019.

SARMIENTO, J. P. Protocolo de Montreal y el Convenio de Viena,¿ un caso exitoso en Derecho Internacional de protección global del medio ambiente?. **Revista de Derecho**, (52), 6-12. 2019.

SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P.; GARCIA, J. I. O possível efeito de mudanças climáticas e suas incertezas sobre afluências em sistemas de recursos hídricos, 2014.

SECRETARIA DE COMUNICAÇÃO PARÁ. SECOM-PA. https://agenciapara.com.br/noticia/12602/. Acesso: Jul/2021.

SISTEMA IBGE DE RECUPERAÇÃO AUTOMÁTICA. SIDRA. Site: https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasil. Acesso: Dez/2021.

SILVA, M.R., MOURA, F. P., JARDIM, C. H. O diagrama de caixa (Box Plot) aplicado à análise da distribuição temporal das chuvas em Januária, Belo Horizonte e Sete Lagoas, Minas Gerais-Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física, 10(01), 023-040. 2017.

SILVEIRA, C. D. S., SOUZA, F. D. A. D., MARTINS, E. S. P. R., OLIVEIRA, J. L., COSTA, A. C., NOBREGA, M. T., ... & SILVA, R. F. V. Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **RBRH,** 21, 416-428. 2016.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. SEEG. Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas do clima do Brasil 1970-2019. ALBUQUERQUE, I. et al. 2020.

SISTEMA NACIONAL DE METEOROLOGIA. SNM. https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/FINAL_NOTA_Emerge%CC%82ncia_Hi%CC%81drica_FINAL1.pdf#page=1&zoom=auto,-99,842. Acesso: Ago/2021. 2021.

SWENSON, S.E.; WAHR, J. Monitoring the water balance of Lake Victoria, East Africa, from space. **Journal of Hydrology**, 370(1-4), 163-176, 2009.

SCHEWE, J.; HEINKE, J.; GERDEN, D.; HADDELAND, I.; ARNELL, N. W.; CLARK, D. B.; DANKERS, R.; EISNER, S.; FEKETE, B. M.; CÓLON-GONAZÁLEZ, F. J.; GOSLING, S. N.; MASAKI, Y.; PORTMANN, F.T.; SATOH, Y.; TANG, Q.; WADA, Y.; WISSER, D.; FRIELER, K.; WARSZAWSKI, L.; KABAT, P.; Multimodel assessment

of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, PNAS, v. 111, n. 9, p.3245–3250, 2014.

SCHUSTER, R. C., FAN, F. M., & COLLISCHONN, W. Scenarios of climate change effects in water availability within the patos Lagoon's Basin. **RBRH**, 25. 2020.

SHEVNINA, E.; KOURZENEVA, E.; NURUZZAMA, M. Water Balance and Thermal Regime of Lakes in Antarctic Oases. **Antarctica-A Key To Global Change**. IntechOpen, 2018.

SHRESTHA, N. K., DU, X., & WANG, J. Assessing climate change impacts on fresh water resources of the Athabasca River Basin, Canada. **Science of the total environment**, 601, 425-440. 2017.

SOJA, G.; ZÜGER, J.; KNOFLACHER, M; KINNER, P.; SOJA, A. M. Climate impacts on water balance of a shallow steppe lake in Eastern Austria (Lake Neusiedl). **Journal of Hydrology**, v. 480, p. 115-124, 2013.

SOUNDHARAJAN, B. S.; ADELOYE, A. J.; REMESAN, R. Evaluating the variability in surface water reservoir planning characteristics during climate change impacts assessment. **Journal of Hydrology**, v. 538, p. 625-639, 2016.

SOUZA, C. B. G. Conflitos territoriais na gestão de parques urbanos na Amazônia: O caso do Parque Estadual do Utinga–Belém/PA/. **Brazilian Journal of Development**, 6(1), 1377-1394, 2020.

SOUZA, F. B.; DA SILVA FILHO, A. C. Equações diferenciais e o crescimento populacional: uma comparação entre a curva de Gompertz e o modelo Logístico. **Revista Eletrônica do Curso de Licenciatura em Matemática**, 1(1). 2020.

SOUZA, R. M., VIOLA, M. R., CHOU, S. C., ALVES, M. V. G., & AVANZI, J. C. Projeções climáticas regionalizadas para o estado do Tocantins, Brasil, nos cenários RCP 4.5 E RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, 24. 2019.

STAHLI, M.; BADOUX, A.; LUDWIG, A.; STEINER, K.; ZAPPA, M.; HEGG, C.; One century of hydrological monitoring in two small catchments with different forest coverage. **Environmental Monitoring Assessment**, v. 174, p. 91-106. 2011.

TERANO, H. J. R. Analysis of mathematical models of population dynamics applied to Philippine population growth. **Far East Journal of Mathematical Sciences (FJMS)**, 103(3), 561-571. 2018.

THOMAS, G. C., & EISERMANN, J. I. Equações Diferenciais Aplicadas à Dinâmica Populacional do Município de Santa Rosa/RS1/Differential Equations Applied to Population Dynamics of the Municipality of Santa Rosa/RS**. Brazilian Journal of Development**, 6(7), 44612-44616. 2020.

ULLAH, M. S., MOSTAFA, G., JAHAN, N., & KHAN, M. A. H. Analyzing and Projection of Future Bangladesh Population Using Logistic Growth Model. **International Journal of Modern Nonlinear Theory and Application**, 8(3), 53-61. 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Chokkavarapu. Environmental milestones: Timeline of the 75 years of the UN. https://www.unep.org/pt-br/news-and-stories/story/environmental-moments-un75-timeline. Acesso: jul/2021. 2020.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. UNEP. Emissions Gap Report 2019. Nairobi. 2019.

VALENÇA, J. M. M. S.; CABRAL, J. J. S. P.; SANTOS, S. M.; NETO FONSECA, G.; GIL, M. L. Análise integrada do nível de água subterrânea e superficial na região da barragem de bocaina. **Rega - Revista De Gestão De Água Da América Latina**, V. 14, P. 1-14, 2017.

VON SPERLING, E. Afinal, quanta água temos no planeta. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 189-199, 2006.

XIAO-JUN, W., JIAN-YUN, Z., SHAMSUDDIN, S., RUI-MIN, H., XING-HUI, X., & XIN-LI, M. Potential impact of climate change on future water demand in Yulin city, Northwest China. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 20(1), 1-19. 2015.

WANG, X. J., ZHANG, J. Y., SHAHID, S., GUAN, E. H., WU, Y. X., GAO, J., & HE, R. M. Adaptation to climate change impacts on water demand. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, 21(1), 81-99. 2014.

WATANABE, M., SUZUKI, T., O'ISHI, R., KOMURO, Y., WATANABE, S., EMORI, S., ... & KIMOTO, M. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, 23(23), 6312-6335. 2010.

WELAGEDARA, W. A. D. M., NAWARATHNA, L. S., & NAWARATHNA, R. D. Forecasting the Sri Lankan Population with the Gompertz and Verhulst Logistic Growth Models. **SLJER**, 1. 2019.

WORLD METEREOLOGICAL ORGANIZATION - WMO. Guide to hydrological Practices, v.1, **Hydrology – From Measurement to Hydrological Information**, 296 p., 2008.

WORLD RESOURCES INSTITUTE. Domestic Water Use Grew 600% Over the Past 50 Years. Site: https://www.wri.org/blog/2020/02/growth-domestic-water-use. Acesso: Abr/2020, 2020.

ZHANG, Z.; HUANG, Y.; XU, C. Y.; CHEN, X.; MOSS, E. M.; JIN, Q.; BAILEY, A. M. Analysis of Poyang Lake water balance and its indication of river–lake interaction. **SpringerPlus**, v. 5, n. 1, p. 1555, 2016.