



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

SOFIA MIDAUAR GONDIM ROCHA

IMPACTO DA VARIABILIDADE HIDROCLIMÁTICA NA HIDRODINÂMICA
DE UM RESERVATÓRIO URBANO EM FORTALEZA/CE

FORTALEZA

2019

SOFIA MIDAUAR GONDIM ROCHA

IMPACTO DA VARIABILIDADE HIDROCLIMÁTICA NA HIDRODINÂMICA DE
UM RESERVATÓRIO URBANO EM FORTALEZA/CE

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Iran Eduardo Lima Neto, PhD.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R576i Rocha, Sofia Midauar Gondim.
Impacto da variabilidade hidroclimática na hidrodinâmica de um reservatório urbano em Fortaleza/CE /
Sofia Midauar Gondim Rocha. – 2019.
88 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.
1. Hidrodinâmica. 2. Qualidade de água. 3. CE-QUAL-W2. I. Título.

CDD 620

SOFIA MIDAUAR GONDIM ROCHA

IMPACTO DAS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS NA HIDRODINÂMICA DE UM
RESERVATÓRIO URBANO EM FORTALEZA/CE

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 30/08/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Msc. Arthur Jordan de Azevedo Toné
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Quixadá (IFCE)

A Deus.

A minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial meus pais, Maria e Maia, a quem devo quem sou e onde estou, que me apoiaram e me deram forças incondicionalmente ao longo da minha trajetória. Aos meus irmãos, Vitor e Bruno, que me mostram a vida por lados que não enxergaria sozinha.

Ao professor Iran, que me incentiva a perseguir meus sonhos, a quem tenho imensa admiração e em quem me espelho. Obrigada pela excelente orientação e pelos incontáveis ensinamentos.

Às minhas amigas que me acompanham desde o ensino fundamental, Mimi, Amanda, Isadora, Sara, Bianca, Lara e Dinis, pelo suporte imprescindível.

Aos meus amigos Arthur, Bárbara, Lara, Leo, Racine, Tallys e Thaís (em ordem alfabética, claro), sem vocês esse trabalho não seria possível. Obrigada por tornarem a dificuldade agradável, obrigada pelos inúmeros estudos em grupo, obrigada pela força para não desistir nunca.

Ao Juan, que me ajudou a manter a serenidade na reta final do processo, trazendo grandes felicidades e me incentivando a sempre valorizar o presente.

À Luísa, amiga e companheira de trabalho, pelas experiências e conselhos divididos. À Janine, pelas intermináveis dúvidas respondidas e pela experiência compartilhada.

A todos os professores e professoras da Universidade Federal do Ceará que de alguma forma estiveram presentes nesses anos de engenharia, a vocês devo minha formação, em especial àqueles que buscaram inovar em sala de aula e valorizar o aluno para além do estudante, professores Felipe Loureiro, Francisco de Assis, Áurea Holanda e Verônica Castelo Branco.

RESUMO

Tendo em vista a carência do estudo da hidrodinâmica de reservatórios utilizando modelos dinâmicos no Nordeste brasileiro, o objetivo do presente estudo foi realizar uma avaliação do histórico climático da região, analisar o impacto da evaporação no tempo de residência (TR) e avaliar a influência das condições climáticas nas forçantes hidrodinâmicas relacionadas à qualidade da água do reservatório Santo Anastácio (ASA), localizado em Fortaleza/CE, usando modelo 2D hidrodinâmico e de qualidade de água CE-QUAL-W2. Também foi finalidade do presente estudo a elaboração de um manual auxiliar para a realização da análise dos dados gerados pelo modelo. Foram utilizados dados meteorológicos da região para inserir as informações referentes ao lago estudado, e então realizada a observação do histórico climático e desenvolvido o modelo chuva-vazão para a região, prosseguindo-se para as simulações desejadas para os anos de 2009 a 2018. Observou-se uma diferença considerável da evaporação no TR quando utilizados os coeficientes da equação do vento calibrados para a região em estudo, principalmente no segundo semestre do ano (período seco). Os resultados mostraram uma resposta mais clara do TR quando avaliada a sazonalidade, com um aumento entre 2 e 3 vezes do período chuvoso para o seco. Já a variabilidade interanual influenciou o TR de forma menos expressiva e apenas nos anos em que as precipitações foram bem abaixo da média. Assim, concluiu-se a relevância em considerar a evaporação calculada com a equação do vento ajustada para a região e a notabilidade da variabilidade sazonal do TR em comparação com sua variação interanual.

Palavras-chave: Hidrodinâmica. Qualidade de água. CE-QUAL-W2.

ABSTRACT

Provided there is a lack of studies focusing on the reservoir hydrodynamics using dynamic models on the Northeast Brazil, this project aimed to evaluate the region climate characteristics for the last 10 years, to analyze the impact of evaporation losses on the residence time (RT) and to evaluate the influence of climate changes on hydrodynamic parameters related to water quality in reservoir Santo Anastácio (ASA), located at Fortaleza/CE, Brazil, using the 2D hydrodynamic and water quality model CE-QUAL-W2. This study also aimed to develop an auxiliary manual for making data analysis from the model. Meteorological data from the region was used to analyze the climate history and to insert the lake characteristics on the model, so then a rain-flow model was developed and the modelling completed. A considerable impact of evaporation losses on RT was observed when this was calculated using the wind equation coefficients calibrated, especially on the second semester (drought season). The results showed a higher impact on RT when the intra-annual variability was evaluated, with RT over 2-3 times higher in the rainy season than in the dry season. However, the inter-annual variability was less expressive and was observed only for the years with precipitation values below the average. Therefore, it was concluded that it is important to consider evaporation with calibrated coefficients on the ASA water budget and the notability of seasonal variability when compared with the inter-annual one.

Keywords: Hydrodynamics. Water Quality. CE-QUAL-W2.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Precipitação média anual, em mm, calculada entre 1979 e 1995.....	17
Figura 2 – Área de distribuição do mês em que a precipitação média mensal atinge um máximo	18
Figura 3 – Índice de seca avaliado historicamente a partir de 2010	19
Figura 4 – Perdas diárias médias por evaporação no Cerrado brasileiro, dados medidos entre 2010 e 2011	20
Figura 5 – Taxa de evaporação média para um lago localizado no Egito	21
Figura 6 – Discretização computacional do lago Maumelle, localizado na China	26
Figura 7 – Vista em planta e pontos de amostragem do lago Maumelle, localizado na China.....	27
Figura 8 – Segmentação do reservatório Cedar Creek, localizado nos Estados Unidos..	27
Figura 9 – Vista em planta do reservatório Cedar Creek, localizado nos Estados Unidos	28
Figura 10 – Localização do Açude Santo Anastácio – ASA em Fortaleza/CE, Brasil	31
Figura 11 – Planilha intermediária para a inserção da batimetria no modelo	34
Figura 12 – Verificação de volume realizada pela planilha intermediária de batimetria	35
Figura 13 – Exportação da batimetria para o formato desejado	35
Figura 14 – Exportação das séries temporais para o formato “.dat”	36
Figura 15 – Destaque para as características da estrutura a serem definidas.....	37
Figura 16 – Esquema de retirada à jusante	38
Figura 17 – Esquema de retirada lateral.....	39
Figura 18 – Comparativo entre parâmetros para os anos úmido, seco e típico.....	49
Figura 19 – Visão em planta do ASA, com a segmentação adotada no CE-QUAL-W2...51	
Figura 20 – Corte longitudinal do ASA, com a segmentação adotada no CE-QUAL-W2	51
Figura 21 – Captura de tela do modelo indicando os coeficientes para o cálculo da evaporação calibrados.....	52
Figura 22 – Segmentação do ASA sobreposta ao mapa da cidade de Fortaleza	53
Figura 23 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2009	57
Figura 24 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2010	57
Figura 25 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o	

ano de 2011	58
Figura 26 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2012	58
Figura 27 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2013	58
Figura 28 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2014	59
Figura 29 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2015	59
Figura 30 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2016	59
Figura 31 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2017	60
Figura 32 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2018	60

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histórico de precipitações (a) mensal e (b) anual entre 2009 e 2018	40
Gráfico 2 – Histórico de evaporações (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018.....	42
Gráfico 3 – Histórico de temperaturas (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018.....	43
Gráfico 4 – Histórico de insolação (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018.....	45
Gráfico 5 – Histórico de nebulosidades (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018.....	46
Gráfico 6 – Histórico de velocidade do vento (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018	47
Gráfico 7 – Ilustração da correlação entre a precipitação e a vazão de entrada no reservatório	50
Gráfico 8 – Ilustração da correlação entre a precipitação e a vazão de entrada no reservatório	50
Gráfico 9 – Avaliação do impacto da evaporação no TR para os anos 2009, 2013 e 2016	54
Gráfico 10 – Comparativo esquemático do impacto da evaporação no TR para 2009, 2013 e 2016, em que: a – período chuvoso e b – período seco.....	55
Gráfico 11 – Comparativo intra e interanual do TR entre 2009 e 2018	61
Gráfico 12 – Comparativo intra-anual do TR e das precipitações para o período avaliado (2009-2018).....	62
Gráfico 13 – Comparativo interanual do TR para o período chuvoso dos anos 2009 a 2018	64
Gráfico 14 – Comparativo interanual do TR para o período seco dos anos 2009 a 2018	65
Gráfico 15 – Comparativo interanual entre 2009 e 2018 para os períodos a – úmido e b – seco	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo das diferenças percentuais entre os casos avaliados por período
.....55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Contextualização.....	14
1.2 Problema de pesquisa.....	15
1.3 Justificativa	15
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral.....	15
2.2 Objetivos específicos.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Meteorologia.....	16
3.1 Qualidade da água e hidrodinâmica em reservatórios.....	21
3.2 Fatores condicionantes para a qualidade da água em reservatórios	22
3.3 Modelos.....	22
3.3.1 Modelos unidimensionais	23
3.3.2 Modelos bidimensionais	24
3.3.3 Modelos tridimensionais	24
3.3.4 Modelos dinâmicos	25
3.4 CE-QUAL-W2	25
3.4.1 Capacidades e limitações do modelo.....	25
3.4.2 Principais equações do modelo.....	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 Reservatório analisado	31
4.2 Análise de histórico climático	32
4.2.1 Escolha dos parâmetros a serem analisados	32
4.2.2 Análise de dados.....	32
4.4 Modelagem utilizando o CE-QUAL-W2	33
4.4.1 Preparação dos dados meteorológicos para a inserção no modelo	33
4.4.2 Batimetria e meteorologia.....	34
4.4.3 Dados de vazão de entrada e saída.....	36
4.4.4 Arquivo controle do modelo.....	36
4.4.5 Simulação	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 Análise da meteorologia da região.....	40

5.1.1 Resultados por parâmetro	40
5.1.2 Comparativo entre parâmetros para anos seco, típico e úmido.....	48
5.2 Vazões afluentes e efluentes ao reservatório.....	49
5.3 Análise de resultados CE-QUAL-W2	51
5.2.1 Avaliação do impacto da evaporação no TR	54
5.2.2 Avaliação do impacto da sazonalidade no TR.....	56
5.4 Manual para análise de resultados do CE-QUAL-W2.....	65
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	67
REFERÊNCIAS	68
APÊNDICE A – MANUAL PARA ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS COM O CE-QUAL-W2	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Como argumenta Souza Filho (2013), a água é um recurso indispensável ao desenvolvimento quando vista sob uma perspectiva socioeconômica. Ela tem preocupado a humanidade em termos qualitativos, dado sua escassez; especialmente ao serem analisadas as regiões áridas e semiáridas. O estudo dessa dinâmica é substancial para o Nordeste brasileiro, região que possui apenas 4% dos recursos hídricos do país, ainda que abrigue 35% da população brasileira.

Lemos (2015) estudou o impacto causado por mudanças na meteorologia e o comportamento hidrodinâmico, com foco nas avaliações de temperatura, de um reservatório no semiárido brasileiro utilizando modelos climáticos, hidrológicos, hidrodinâmicos e de balanço de energia, em cascata; além de ressaltar a importância da utilização de modelos no auxílio ao gerenciamento de recursos hídricos.

Zhao e Gae (2019) avaliam as perdas por evaporação em reservatórios dos Estados Unidos, sabendo-se que, a nível global, estima-se que essas perdas sejam maiores que o consumo combinado das indústrias e do uso doméstico, situação que evidencia a importância do estudo desse fenômeno nas análises envolvendo recursos hídricos. Quando essa conjuntura é trazida para o Nordeste brasileiro, seu entendimento se torna imprescindível. Barros *et al.* (2019) apontam as altas taxas evaporativas em período seco na região Nordeste do Brasil como um fator que impacta nos processos de florações exacerbadas de cianobactérias em reservatórios do Ceará. Zhang *et al.* (2018) ressaltam a intensa evaporação, associada à má distribuição das chuvas e ao consumo de água, como determinantes para as altas variações nos volumes dos corpos hídricos no Nordeste.

Nesse contexto, a situação de baixa qualidade de água também é crítica em lagos urbanos, os quais muitas vezes são destino de ligações clandestinas de esgoto. Este cenário é realidade para o Açude Santo Anastácio (ASA), localizado em Fortaleza-CE, onde o descarte de esgotos domésticos é efetuado ao canal de drenagem pluvial que leva ao açude (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Além disso, como evidenciado por Jones e Elliott (2007), entre as variáveis de maior importância para a qualidade da água em reservatórios está o tempo de residência. Wiegand *et al.* (2016) também afirmam que ele está relacionado à retenção de fósforo no corpo hídrico, o que indica maior vulnerabilidade do lago à eutrofização.

Com isso, tendo em vista que as condições ambientais em um corpo d'água naturalmente variam ao longo do tempo, Sperling (2007) afirma que, para representar as variações que ocorrem em cada local, são necessários modelos dinâmicos, nos quais é incorporada a variabilidade espacial e temporal. Souza Filho (2013) complementa ao dizer que o comportamento hidrodinâmico do lago condiciona sua capacidade de suporte e conseqüentemente uso e manejo sustentável deste recurso.

Assim, é evidenciada a importância do presente estudo, o qual visa à modelagem hidrodinâmica, com foco na avaliação do tempo de residência, utilizando um modelo bidimensional, de um açude urbano em Fortaleza-CE, além da análise de dados meteorológicos dos últimos dez anos para a região.

1.2 Problema de pesquisa

A hidrodinâmica de reservatórios é amplamente estudada internacionalmente. Entretanto, seu entendimento utilizando modelos dinâmicos ainda é uma lacuna a ser preenchida no Brasil. Essa carência é ainda mais acentuada ao ser analisada a região nordeste brasileira, visto que, quando contrastada com outras regiões, ela ainda possui poucos estudos que aprofundam seu conhecimento.

1.3 Justificativa

Tendo em vista o recorrente problema da escassez de água em boas condições para consumo no nordeste brasileiro, além da carência de estudos envolvendo modelagem hidrodinâmica em reservatórios do semiárido, optou-se por um tema com relevância para a área e que pudesse agregar social e cientificamente.

O uso de um modelo hidrodinâmico permite uma representação mais fidedigna da realidade, proporcionando um entendimento melhor e mais completo da dinâmica dos reservatórios. Com isso, o estudo dessas simulações se torna um excelente instrumento para o auxílio na gestão de recursos hídricos, principalmente no nordeste brasileiro.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar a influência das condições climáticas nas

forçantes hidrodinâmicas relacionadas à qualidade da água de um reservatório localizado em Fortaleza/CE, usando o modelo 2D hidrodinâmico e de qualidade de água CE-QUAL-W2.

2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar dados meteorológicos dos últimos 10 anos para a bacia hidrográfica do reservatório Santo Anastácio em Fortaleza/CE;
- b) Determinar as vazões afluentes ao reservatório para os anos em estudo, a partir de modelo chuva-vazão;
- c) Determinar as vazões efluentes do reservatório para os anos em estudo, a partir de modelo chuva-vazão;
- d) Realizar modelagem hidrodinâmica dos cenários desejados para o período selecionado utilizando o modelo CE-QUAL-W2;
- e) Avaliar o impacto da evaporação no tempo de residência do reservatório em estudo;
- f) Avaliar o impacto da utilização de coeficientes ajustados na equação do vento para a região em estudo;
- g) Analisar o impacto das condições climáticas no tempo de residência hidráulica do reservatório;
- h) Desenvolver um manual para auxílio nas análises de dados gerados pelas simulações utilizando o CE-QUAL-W2.

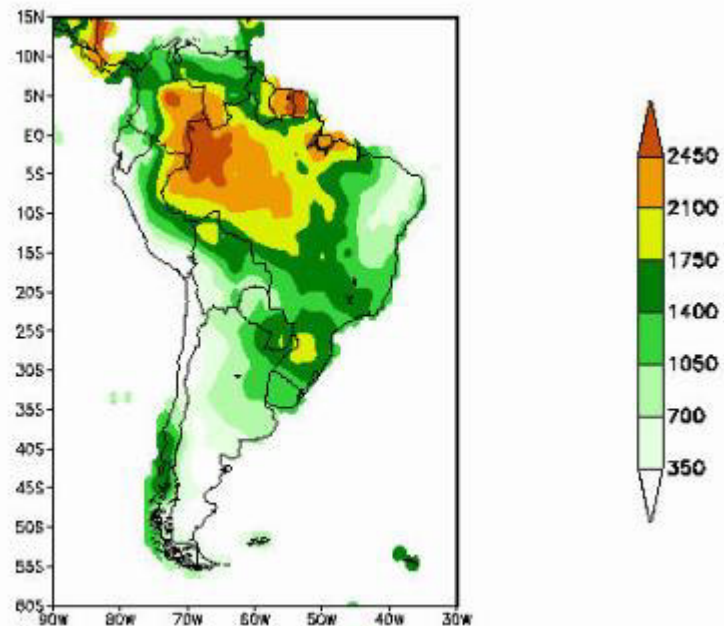
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Meteorologia

O estudo científico dos fenômenos atmosféricos envolve diversos parâmetros, como precipitação, evaporação, temperatura, radiação, nebulosidade e outros, com destaque para a precipitação e a evaporação.

Os valores acumulados de precipitação são distintos ao longo do continente sul americano, com extremos encontrados na mesma latitude. Devido às condições de larga escala e topografia, regiões como o nordeste brasileiro possuem um forte déficit hídrico. (DE SOUZA FILHO e SILVEIRA, 2015) A Figura 1 ilustra a precipitação média anual na América do Sul, em mm, calculada entre 1979 e 1995.

Figura 1 – Precipitação média anual, em mm, calculada entre 1979 e 1995



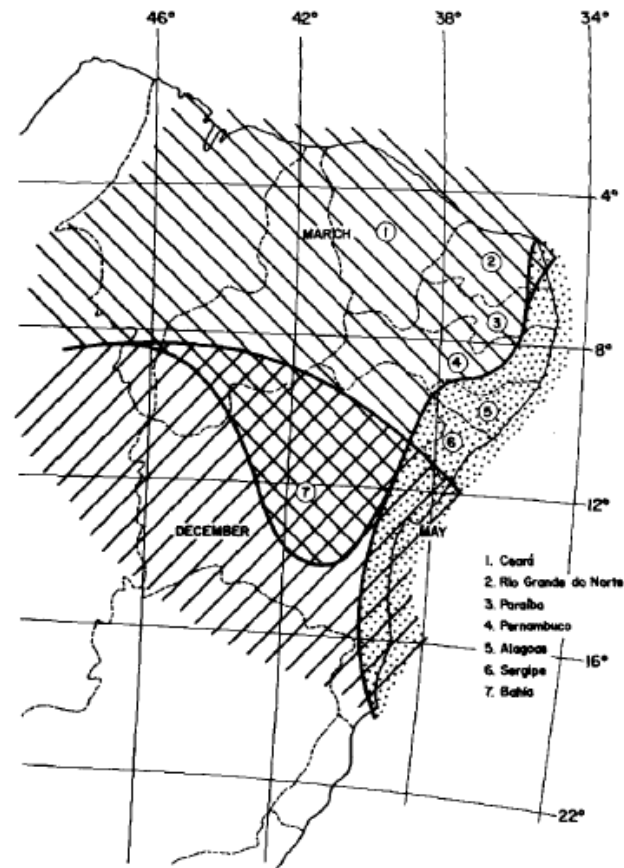
Fonte: SHI *et al.* (2000)

A região nordeste brasileira possui uma alta variabilidade intra e interanual do clima, e entre os principais fatores climáticos que determinam os seus fatores e a sua variação sazonal estão sua posição geográfica, seu relevo, a natureza da sua superfície e os sistemas de pressão atuantes na região. Essas oscilações interanuais são também resposta ao fenômeno do El-Nino – Oscilação Sul no pacífico Equatorial. (CAVALCANTI *et al.*, 2009; DE SOUZA FILHO e SILVEIRA, 2015)

As precipitações na região nordeste se dão notadamente no período da “quadra-chuvosa”, que engloba os meses de fevereiro, março, abril e maio, com picos de chuva geralmente ocorrendo em março e abril. Ocorrem também chuvas menos intensas nos meses da pré-estação chuvosa, sendo estes dezembro e janeiro. (VASCONCELOS JUNIOR, 2014)

A Figura 2 apresenta, para a região nordeste do Brasil, a área de distribuição do mês em que a precipitação média mensal atinge um máximo, com dados obtidos entre 1931 e 1960.

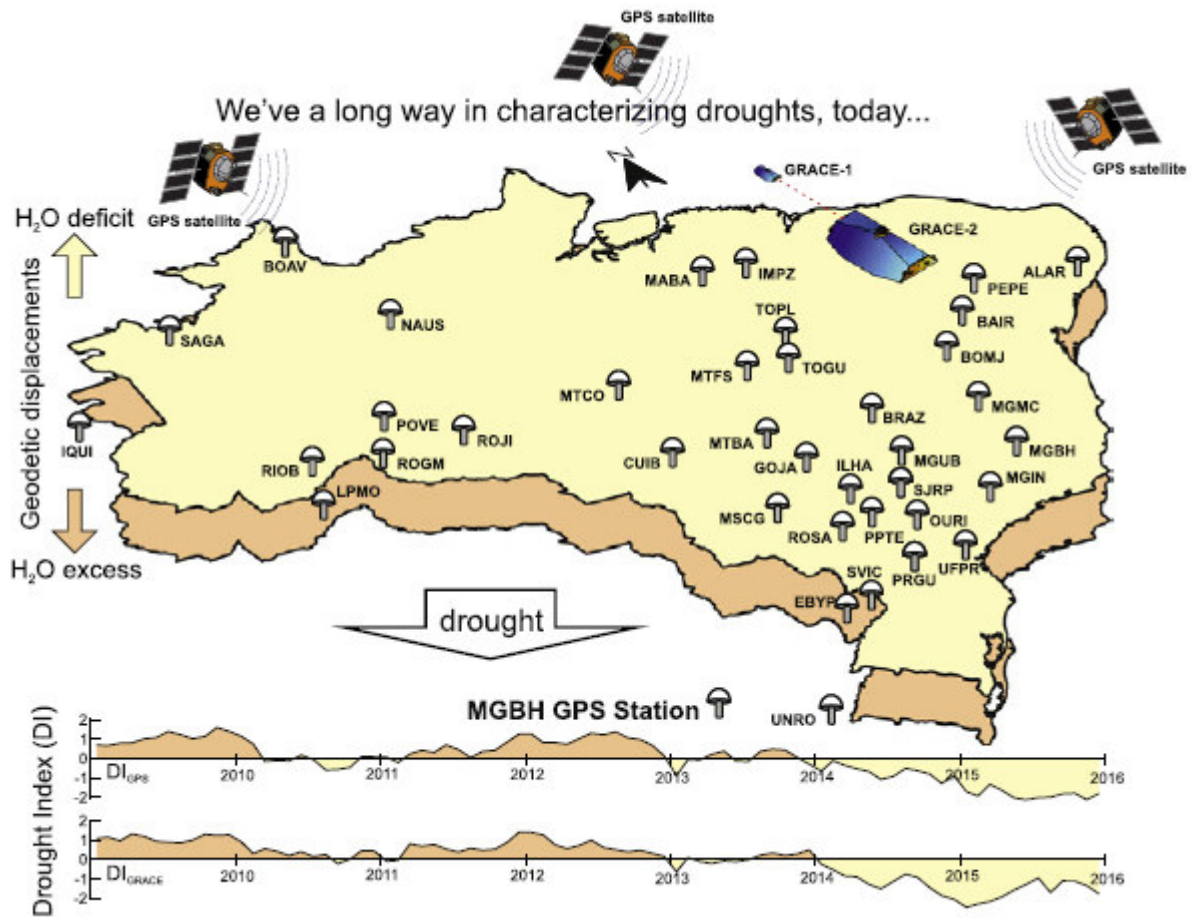
Figura 2 – Área de distribuição do mês em que a precipitação média mensal atinge um máximo



Fonte: Kousky (1979)

A região nordeste é periodicamente assolada por secas, Awange *et al.* (2016) afirmam que, ao serem observadas secas severas e extremas em escala de curto prazo, tem-se uma frequência de eventos severos em 1 a cada 12 anos e, para os extremos, esse número cai para 1 a cada 66 anos, analisando-se dados no Brasil. Ferreira *et al.* (2018) analisam a utilização de índices de seca como ferramenta para prever a ocorrência desses eventos, e avaliou tal aplicação para a última década no Brasil, resultando na Figura 3, em que o índice sinaliza a ocorrência de seca em períodos do intervalo estudado.

Figura 3 – Índice de seca avaliado historicamente a partir de 2010



Fonte: Ferreira *et al.* (2018)

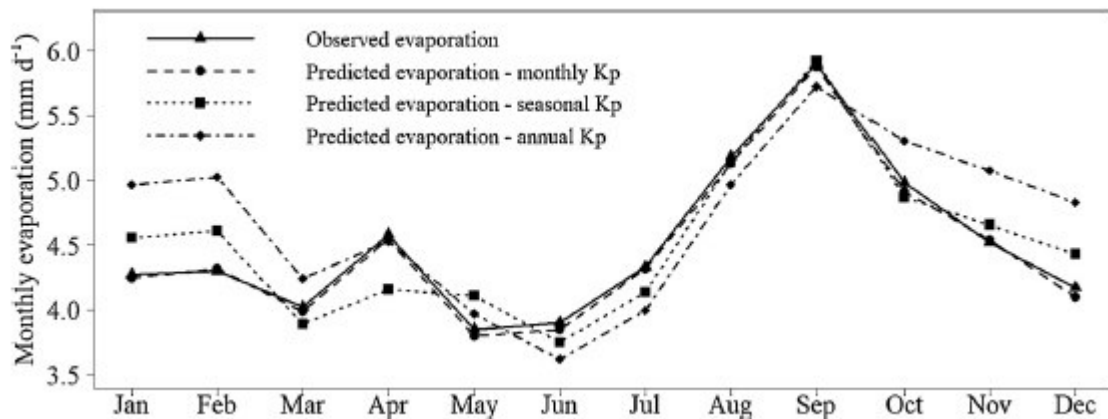
Martins *et al.* (2015) avaliam o histórico de secas da região nordeste, com um relato da recente variabilidade climática nesta região; onde é destacado que, avaliando-se os desvios médios de pluviosidade para um período de quatro anos, o período entre julho de 2011 e junho de 2015 é o mais crítico da história em termos totais de chuva desde 1911.

No que tange à evaporação, este é um importante parâmetro no balanço hídrico dos reservatórios e, sabendo-se das dificuldades em serem estimadas as perdas devido a esse fenômeno, diversos estudos avaliam diferentes formas de facilitar esse processo mantendo a qualidade dos dados. (ALTHOFF *et al.*, 2019; HASSAN *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2017)

Os impactos da evaporação são ainda mais severos quando são enfrentados períodos de seca, e, em estudo realizado no Texas/EUA no ano de 2010, as perdas por evaporação nos reservatórios da região foi estimada em 7,53 bilhões de m³/ano, o equivalente à 61% do volume hídrico utilizado na agricultura e à 126% do volume total de água utilizado nos municípios do estado. (WURBS e AYALA, 2014)

Althoff *et al.* (2019) avaliaram as perdas por evaporação no Cerrado do Brasil entre os anos de 2010 e 2011, desenvolvendo equações para estimar essas perdas em reservatórios a partir de variáveis climáticas. A Figura 4 ilustra os dados observados no referido estudo, com uma média diária máxima de cerca de 6,0 mm e uma média diária mínima de cerca de 3,7mm. Tais valores, quando convertidos para a escala mensal, chegam à 180,0 mm e 111,0 mm, respectivamente.

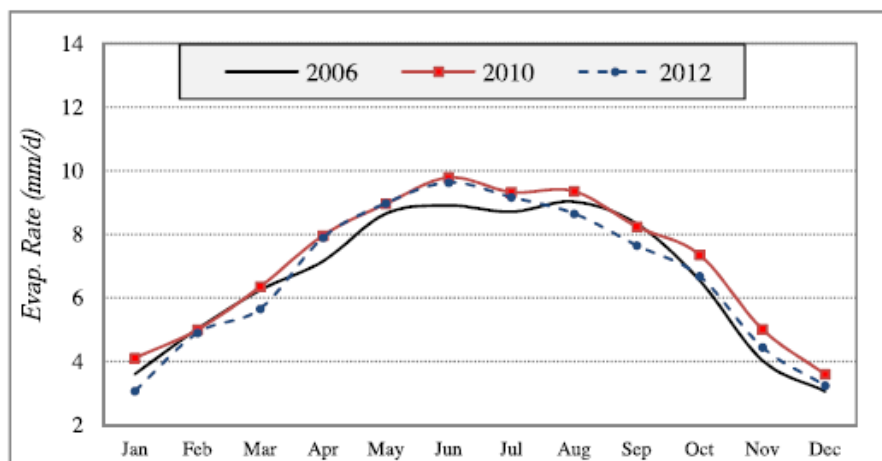
Figura 4 – Perdas diárias médias por evaporação no Cerrado brasileiro, dados medidos entre 2010 e 2011



Fonte: Althoff *et al.* (2019)

Hassan *et al.* (2017) avaliaram comparativamente diferentes métodos para calcular a evaporação em um lago no Egito, com a verificação da confiabilidade de seus dados. Foi concluído que, embora os dados medidos reflitam a realidade, estes não cobrem toda a superfície do lago e possuem falhas em alguns períodos do ano. Assim, é sugerida como abordagem alternativa a aplicação de algoritmos de balanço de energia baseados em dados de sensoriamento remoto. A Figura 5 mostra as médias diárias das perdas por evaporação na região do estudo citado. Observa-se uma máxima de 10 mm/dia, o que equivale à 300mm/mês, média bem superior à verificada para o cerrado brasileiro por Althoff *et al.* (2019).

Figura 5 – Taxa de evaporação média para um lago localizado no Egito



Fonte: Hassan *et al.* (2017)

3.1 Qualidade da água e hidrodinâmica em reservatórios

A água é um recurso indispensável ao desenvolvimento socioeconômico e, de acordo com a Lei Federal nº 9.433/1997 – a “Lei das Águas”, este é um recurso que deve ser assegurado à atual e às futuras gerações, em padrões de qualidade adequados.

A qualidade das águas está em evidência não só no Brasil. Seelen *et al.* (2019), ao realizarem uma pesquisa sobre o consumo de água e alternativas para a melhoria hídrica com pessoas oriundas de 23 países, salientam a importância do papel social no contexto estudado. Chigor *et al.* (2011) ressaltam o potencial danoso de corpos hídricos com qualidade de água comprometida por meio da realização de ensaios laboratoriais com mais de 200 amostras de fontes hídricas superficiais na Nigéria.

Souza Filho (2013) afirma que, por qualidade, entende-se todas as características físicas, químicas e biológicas apresentadas pelas águas, e complementa ao evidenciar que o comportamento hidrodinâmico do lago condiciona sua capacidade de suporte e, consequentemente, uso e manejo sustentável deste recurso. Song *et al.* (2018) ressaltam a influência da hidrodinâmica na qualidade da água em reservatórios.

O conhecimento da dinâmica da qualidade das águas de um açude é de grande importância para a sua correta gestão. Muitos estudos são realizados tendo como escopo o entendimento desta realidade (PACHECO *et al.*, 2016; CALMON *et al.*, 2016).

Nesse contexto, diversos estudos avaliam o impacto da hidrodinâmica, área da ciência que estuda as forças atuantes em fluidos, em geral líquidos, dos reservatórios na qualidade de suas águas (YANG *et al.*, 2018; SONG *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018).

Desse modo, a modelagem é uma alternativa para integrar diferentes parâmetros que podem vir a influenciar a qualidade das águas. Esta permite a verificação da influência da sazonalidade nas condições do reservatório, mediante, por exemplo, a averiguação da relação entre eventos de seca e cheia na situação hídrica. (FERREIRA *et al.*, 2019; KIM *et al.*, 2019)

3.2 Fatores condicionantes para a qualidade da água em reservatórios

Entre as variáveis de maior importância no que tange aos componentes de qualidade da água em reservatórios, pode ser citado o tempo de residência (TR), visto que ele está relacionado à retenção de fósforo no corpo hídrico, o que indica maior vulnerabilidade do lago à eutrofização (JONES e ELLIOTT, 2007; KOIV *et al.*, 2011; WIEGAND *et al.*, 2016).

Em períodos de seca, quando o TR aumenta, é notória a mudança nos parâmetros de transparência e profundidade de zona eufótica, assim como na eutrofização (BOUVY *et al.*, 1999). De forma geral, as condições físicas de um lago, assim como suas características hidrometeorológicas (e.g. temperatura, velocidade dos ventos) influenciam diretamente a qualidade de suas águas. Esta realidade está presente principalmente em lagos rasos, podendo causar processos de bloom de cianobactérias (COVENEY *et al.*, 2005; JONES e ELLIOTT, 2007; DANTAS *et al.*, 2011; KOIV *et al.*, 2011; LONDE *et al.*, 2016). Rocha e Lima Neto (2018) avaliaram o impacto da diminuição da carga afluente a um reservatório urbano na concentração de clorofila a, com a não ocorrência do processo de bloom para uma redução da carga em 80%.

3.3 Modelos

Muitos estudos de reservatórios são realizados utilizando aproximações de regime permanente. Ferreira *et al.* (2016) discutem a importância do estudo hidrodinâmico em corpos hídricos, principalmente aqueles inseridos em meios urbanos, tendo em vista suas dinâmicas de alta variabilidade sazonal. Feng *et al.* (2018) também relatam os diferenciados processos que ocorrem em lagos rasos ao discutir a influência de diferentes variáveis climáticas, tais como luz, temperatura e radiação, na formação de florações de cianobactérias, além de reforçar o fósforo como nutriente limitante em estágios mais avançados desses eventos.

Em uma avaliação realizada por Birch e McCaskie (1999) é proposta uma metodologia de análise de lagos rasos, a qual fornece informações a respeito de importantes processos ecológicos no reservatório, a forma como os problemas de gerenciamento surgem e

as opções disponíveis para a sua prevenção e solução, o que evidencia a importância do entendimento da dinâmica e da correta gestão de reservatórios urbanos.

Esses fenômenos são verificados com o auxílio de softwares de modelagem, que podem ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais, e permitem a melhor compreensão dos fenômenos de forma integrada. Com isso, modelos dinâmicos são essenciais para incorporar este cenário. (SPERLING, 2007; HUANG e LIU, 2008; LASPIDOU *et al.*, 2017) Também podem ser utilizadas técnicas de acoplamento de modelos, afim de analisar os corpos hídricos de forma completa com um menor esforço computacional, como realizado por Lyubimova *et al.* (2018).

Nesse contexto, Dunalska *et al.* (2015) sugerem alternativas para a melhoria da qualidade das águas desses corpos hídricos, dentre as quais está a eliminação de cargas pontuais, não pontuais ou difusas de poluição diretas ao canal que conduz ao reservatório, remoção ou inativação de sedimento, além de inativação do fósforo junto a ações de suporte na forma de biomanipulação.

A escolha do modelo a ser utilizado em determinado estudo está relacionada com o grau de detalhamento e complexidade que se deseja. Coutinho (2015) comparou o uso do modelo hidráulico HEC-RAS 1D com o HEC-RAS 2D 5.0, chegando à conclusão de que a simulação unidimensional é vantajosa pela sua simplicidade de construção, enquanto a bidimensional obteve vantagem no que diz respeito à possibilidade de detalhamento das informações, reforçando a ideia de que a escolha do método depende dos objetivos do estudo e dos dados disponíveis para realizar as simulações e suas calibrações. (TSCHEIKNER-GRATL *et al.*, 2019)

3.3.1 Modelos unidimensionais

Nesses modelos, pode-se apenas simular a evolução da qualidade da água ao longo de uma direção, longitudinal ou vertical, sendo necessário simplificar os demais processos físicos que ocorrem no corpo hídrico, que pode ser um rio ou um reservatório. (LI *et al.*, 2018)

Wang *et al.* (2009) desenvolveram um estudo no rio que deságua na Hidrelétrica das Três Gargantas, localizada na China, utilizando um modelo unidimensional, a fim de determinar a influência das condições hidrodinâmicas na taxa de crescimento primária das algas. Os resultados obtidos foram satisfatoriamente validados, apesar da simplicidade do modelo adotado. Nesta mesma área de estudo, outros trabalhos também utilizaram modelo 1D

para descrever a hidrodinâmica do corpo hídrico, acoplando este a modelos de transporte de fósforo e sedimento. (HUANG *et al.*, 2015a, b)

3.3.2 Modelos bidimensionais

Modelos bidimensionais são bastante utilizados para simular hidrodinâmica e qualidade de água. Estes são uma boa alternativa por considerar diversos parâmetros simultaneamente e por não exigir um esforço computacional grande como os tridimensionais. Diferentes modelos 2D utilizam elementos finitos como base para as simulações, gerando uma malha de elementos de volume que compõem a seção longitudinal do reservatório. (KURUP *et al.*, 2000; SADEGHIAN *et al.*, 2018)

Terry *et al.* (2018) analisaram os desafios de simular um reservatório raso de planície com formação de camada de gelo periódica, e para isso utilizou um modelo bidimensional, a fim de representar de forma mais completa os efeitos das diferentes dinâmicas na qualidade da água do corpo hídrico. Ostfeld e Salomons (2005) desenvolveram um algoritmo para melhorar o desempenho da calibração de um modelo 2D, diminuindo o esforço computacional usualmente exigido. Deus *et al.* (2013) avaliaram o impacto da piscicultura em um reservatório localizado na região Norte do Brasil, também por meio de um software de modelagem hidrodinâmica e de qualidade de água bidimensional.

3.3.3 Modelos tridimensionais

Os modelos tridimensionais geralmente possuem maior acurácia em seus resultados, tendo em vista a maior complexidade de suas simulações, que abrange uma grande variedade de parâmetros e suas interações. Junto a isso, esses exigem também uma maior quantidade de dados, que devem ser cuidadosamente medidos e inseridos, para não mascarar resultados.

Xu *et al.* (2017) utilizaram modelo 3D para melhor entender a dinâmica do destino e transporte dos constituintes em um estuário localizado na China. Já Fang e Wang (2000) aplicaram a ferramenta a fim de verificar a aplicação de equações matemáticas para descrever o fluxo de entrada de água com sedimentos no reservatório da Hidrelétrica de Três Gargantas, também na China. Ambos os estudos recorreram ao modelo para compor mais detalhadamente as dinâmicas que ocorrem na natureza, de forma a auxiliar a gestão e a tomada de decisão no que tange à temática de recursos hídricos e saneamento.

3.3.4 Modelos dinâmicos

Os modelos dinâmicos surgem em oposição aos modelos estacionários. Estes descrevem o fenômeno em determinado momento, nos quais os parâmetros não variam com o tempo, enquanto aqueles descrevem os eventos em um intervalo de tempo, considerando que os critérios variam em função do tempo. (MARINHO FILHO *et al.*, 2012)

Com isso, tendo em vista a alta complexidade dos processos que ocorrem nos reservatórios, modelos hidrodinâmicos são uma alternativa pouco onerosa que representa bem os diferentes processos correntes em um corpo hídrico. Eles surgem em contrapartida aos modelos “Caixa-preta”, que não possibilitam conhecimento detalhado das variações dentro do lago. (TEIXEIRA *et al.*, 2007)

3.4 CE-QUAL-W2

O CE-QUAL-W2 é um modelo 2D, longitudinal/vertical, hidrodinâmico e de qualidade de água. (COLE e WELLS, 2017) Este foi desenvolvido na Universidade de Portland, nos Estados Unidos, pelo Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, e é amplamente aceito e indicado para a modelagem hidrodinâmica e de qualidade de água de reservatórios.

A modelagem por este realizada é mais adequada para corpos hídricos que sejam relativamente longos e estreitos, os quais tenham gradientes de qualidade de água verticais e longitudinais (COLE e WELLS, 2017). Isso ocorre tendo em vista que o software assume homogeneidade lateral do reservatório.

O software exige uma série de parâmetros, sendo estes meteorológicos, de qualidade de água, quantidade de água, fluxos afluente e vertente; além da batimetria atualizada do lago, para então ser realizado um estudo 2D conjunto de todos esses dados (DELIMAN e GERALD, 2002; DEBELE *et al.*, 2006; HUANG e LIU, 2008).

3.4.1 Capacidades e limitações do modelo

3.4.1.1 Capacidades

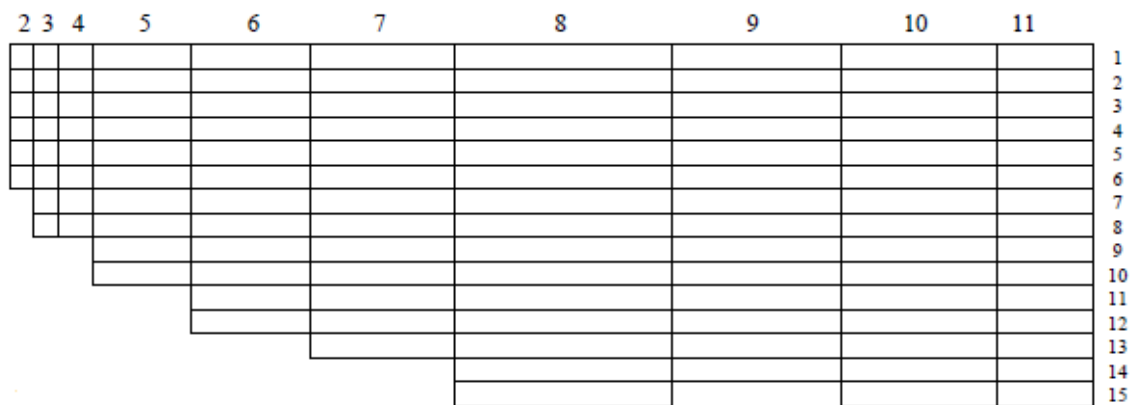
No que tange à hidrodinâmica, são simuladas a elevação da superfície da água, as velocidades longitudinais e verticais e a temperatura no reservatório. A modelagem da qualidade da água é realizada após a computação hidrodinâmica, permitindo um retorno entre

as variáveis de qualidade e hidrodinâmicas. (COLE e WELLS, 2017)

Já no que diz respeito à qualidade da água, qualquer combinação de constituintes pode ser incluída ou excluída da simulação, tendo por base a disponibilidade de dados do usuário. O algoritmo do software é modular, o que permite que sejam inseridos constituintes como sub-rotinas adicionais ao modelo. Este utiliza uma série de parâmetros hidráulicos e cinéticos que podem ser ajustados nas variáveis para a simulação hidrodinâmica e de qualidade. (HUANG e LIU, 2008)

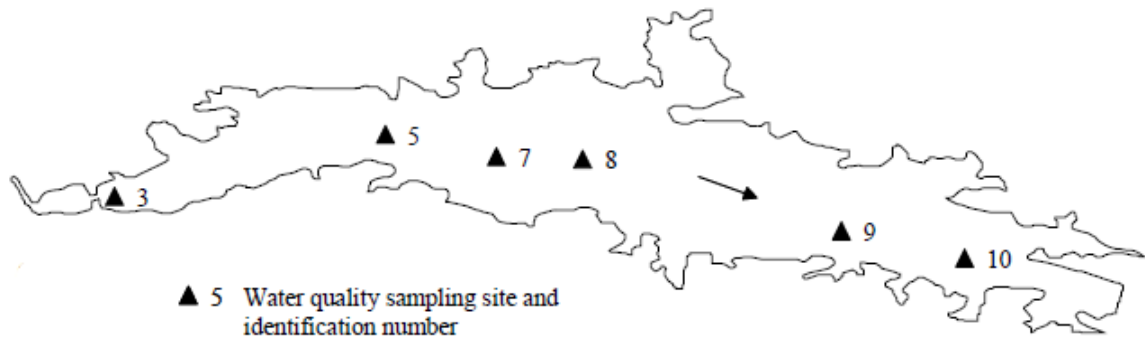
A Figura 6 apresenta um exemplo de discretização computacional do lago Maumelle, localizado na China e desenvolvida por Huang e Liu (2008). A vista em planta do reservatório está apresentada na Figura 7, que também indica os pontos de amostra utilizados. Nesse estudo, foi desenvolvida uma análise de sensibilidade para os parâmetros modelados com o CE-QUAL-W2 nas simulações para temperatura, amônio, nitrato-nitrito, oxigênio dissolvido, fósforo total e clorofila a. Os 96 parâmetros do modelo foram primeiramente avaliados, dos quais 51 foram descobertos sensíveis. A sensibilidade destes foi investigada, e os resultados mostraram que cada um destes era fortemente influenciado por uma diferente gama de parâmetros, e os mais sensíveis exibiram relações não lineares com as saídas do modelo ou fortes correlações com outros parâmetros.

Figura 6 – Discretização computacional do lago Maumelle, localizado na China



Fonte: Huang e Liu (2008)

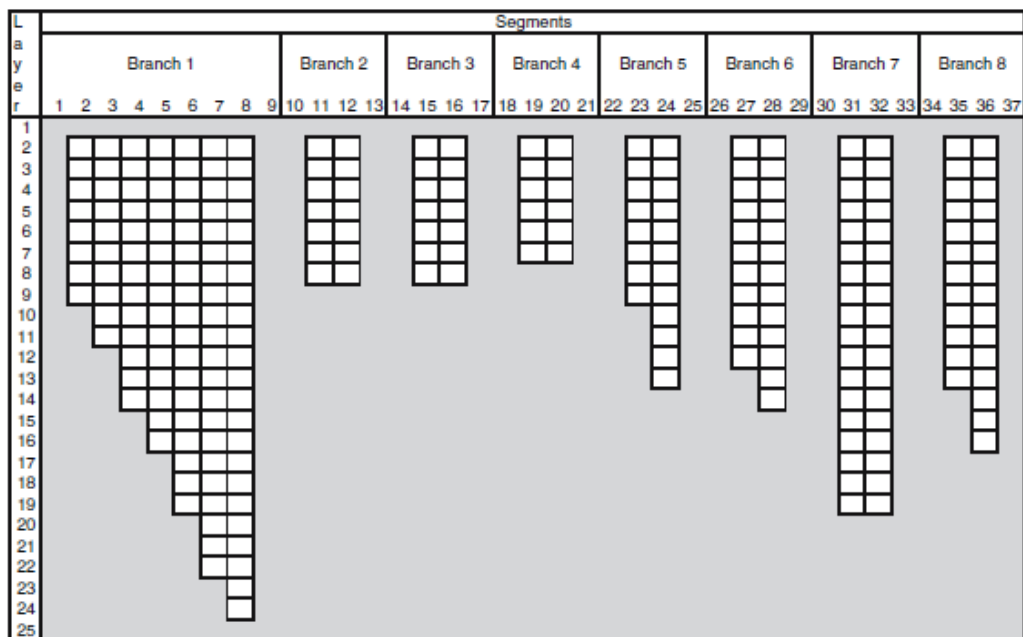
Figura 7 – Vista em planta e pontos de amostragem do lago Maumelle, localizado na China



Fonte: Huang e Liu (2008)

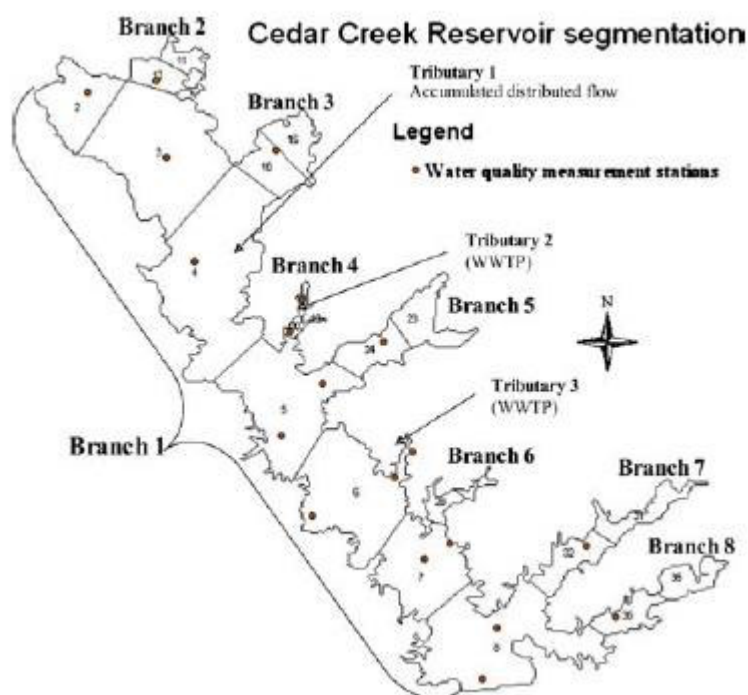
A Figura 8 mostra outro exemplo de segmentação computacional de uma modelagem utilizando o CE-QUAL-W2, agora no reservatório Cedar Creek, localizado nos Estados Unidos (DEBELE *et al.*, 2006). Este corpo hídrico é mais complexo que o anterior, já que possui diversos braços interligados, como apresentado na Figura 9. Neste estudo foi realizado o acoplamento de duas grandes ferramentas de modelagem hidrológica e de qualidade de água, o SWAT e o CE-QUAL-W2, afim de melhor gerir os recursos hídricos de bacias hidrográficas complexas. Os resultados foram positivos, mostrando compatibilidade entre os dois programas e sua boa aplicabilidade.

Figura 8 – Segmentação do reservatório Cedar Creek, localizado nos Estados Unidos



Fonte: Debele *et al.* (2006)

Figura 9 – Vista em planta do reservatório Cedar Creek, localizado nos Estados Unidos



Fonte: Debele *et al.* (2006)

O CE-QUAL-W2 representa bem simulações de longo prazo, pois como a elevação da superfície da água é resolvida implicitamente, é possível simular grandes espaços temporais com menores esforços computacionais (e.g. menor tempo de simulação). O software permite a modelagem de diferentes corpos hídricos, tais como estuários, rios, reservatórios ou partes de um reservatório. (COLE e WELLS, 2017) Pode-se também inserir múltiplos braços, como mostrado na Figura 9, reservatórios, rios e estuários em série, além de variados esquemas de turbulência.

Outra vantagem observada é a possibilidade de variar o tamanho da segmentação de acordo com a resolução desejada, ou seja, é possível ter uma malha menor em locais do corpo hídrico onde se deseja maior resolução, como realizado por Huang e Liu (2008) e mostrado na Figura 6.

Além disso, a modelagem de qualidade da água é independente da hidrodinâmica, de forma que os dados de qualidade podem ser implementados com uma frequência menor que a hidrodinâmica, reduzindo o esforço computacional requerido. O programa possui também o chamado “*autostepping*”, um algoritmo a partir do qual garante-se que as condições de estabilidade requeridas não sejam violadas.

Dessa forma, foram apresentadas as principais capacidades do modelo, e ressalta-

se que outras diversas vantagens e possibilidades de simulação são disponibilizadas no Manual do Usuário (2017).

3.4.1.2 Limitações potenciais

Segundo Coles e Wells (2017), as limitações potenciais do modelo podem ser advindas da teoria utilizada, da discretização ou dos dados de entrada da simulação.

No que diz respeito às limitações teóricas, ressalta-se que o modelo assume homogeneidade lateral, o que implica a não adequação de corpos hídricos muito largos. O usuário deve decidir, dentre variados esquemas de turbulência vertical, o mais apropriado para o tipo de reservatório simulado. Como o momento vertical não é considerado, quando há aceleração vertical significativa o modelo pode gerar resultados imprecisos. Ressalta-se ainda as simplificações necessariamente realizadas nas simulações de qualidade de água, tendo em vista a extrema complexidade dos sistemas aquáticos presentes na natureza; além das limitações no que tange à demanda de oxigênio do sedimento.

Já quanto à discretização, erros podem ser induzidos quando a dimensão das células dos elementos finitos aumenta e quando há aumento no espaçamento dos passos temporais utilizados. Nesse contexto surgem as limitações computacionais, visto que, dependendo do modelo representado, se é um reservatório ou um rio, por exemplo, o tempo de simulação pode passar de alguns minutos para dias, exigindo uma memória menor ou maior do computador utilizado.

Finalmente, tem-se as limitações ocasionadas pelos dados de entrada, que não pode ser tratada como uma limitação do *software* em si. Dados de entrada de baixa qualidade ou insuficientes são frequentemente fatores limitantes na aplicação do modelo.

3.4.2 Principais equações do modelo

De acordo com Wells *et al.* (2017), o CE-QUAL-W2 utiliza as equações do movimento lateralmente constantes derivadas das equações tridimensionais de continuidade e de Reynolds. As seguintes considerações são realizadas: o fluido é incompressível, a aceleração centrípeta é uma pequena correção da gravidade (aproximação de Boussinesq) e todas as velocidades e pressões são consideradas a soma das médias de tempo turbulento e desvios da média. As Equações 1, 2 e 3 são as governantes do modelo após as devidas simplificações, sendo, respectivamente, as equações de continuidade e de quantidade de

movimento em x e z.

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial t_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{xz}}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{w}}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial t_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial t_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Em que:

\bar{u} – Velocidade média na direção longitudinal (x)

\bar{w} – Velocidade média na direção vertical (z)

\bar{p} – Pressão média

g – Constante gravitacional

ρ – Massa específica da água

μ – Viscosidade dinâmica

t_{xx} – Tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção x na face x do volume de controle

t_{xz} – Tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção x na face z do volume de controle

t_{zx} – Tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção z na face x do volume de controle

t_{zz} – Tensão de cisalhamento relativa à turbulência atuando na direção z na face z do volume de controle

As trocas de calor na superfície são realizadas pela equação abaixo, a partir da qual simula-se a transferência de calor ao longo das coordenadas x e z através da equação bidimensional de convecção e difusão turbulenta:

$$H_n = H_s + H_a + H_e + H_c - (H_{sr} + H_{ar} + H_{br}) \quad (4)$$

Sendo:

H_n – Taxa líquida de troca de calor na superfície da água, em Wm^{-2}

H_s – Radiação incidente de ondas longas, em Wm^{-2}

h_a – Radiação incidente de ondas curtas, em Wm^{-2}

H_{sr} – Radiação de ondas curtas refletida, em Wm^{-2}

H_{ar} – Radiação de ondas longas refletida, em Wm^{-2}

H_{br} – Radiação de volta da superfície da água, em Wm^{-2}

H_e – Calor perdido na evaporação, em Wm^{-2}

H_c – Condução de calor, em Wm^{-2}

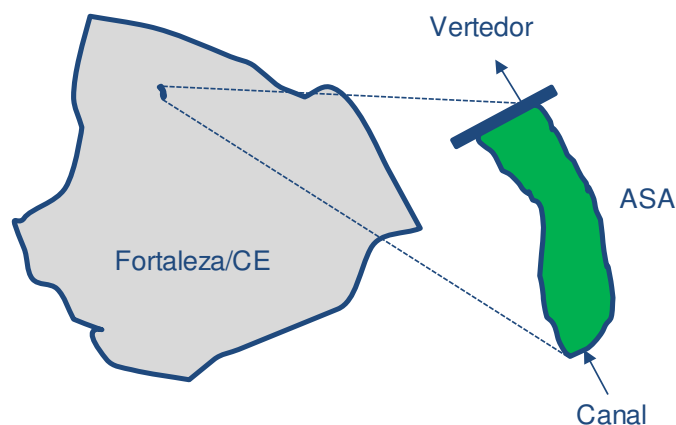
Por fim, as equações do movimento e transferência de calor supracitadas são resolvidas utilizando o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ e os esquemas numéricos do tipo *Ultimate/Quickest*, conforme detalhado por Wells *et al.* (2017).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Reservatório analisado

O objeto do presente estudo é o Açude Santo Anastácio – ASA, localizado em Fortaleza/CE, conforme apresentado esquematicamente na Figura 10. Este é um lago urbano e hipereutrófico (ARAÚJO *et al.*, 2016). O reservatório se caracteriza por um volume de cerca de $0,3 \text{ hm}^3$, possuindo sua maior dimensão (longitudinal), de aproximadamente 900 metros, cerca de cinco vezes o tamanho da sua menor dimensão (lateral), esta com uma média de 185 metros. Por isto, o corpo hídrico enquadra-se bem ao modelo 2D CE-QUAL-W2, o qual assume que as variações laterais (e.g. variações no sentido transversal) no açude são insignificantes.

Figura 10 – Localização do Açude Santo Anastácio
– ASA em Fortaleza/CE, Brasil



4.2 Análise de histórico climático

4.2.1 Escolha dos parâmetros a serem analisados

Foram escolhidos parâmetros com relevância notória na hidrodinâmica de um reservatório e que mostrassem tendências climáticas da região. Com isso, foram selecionados os seguintes elementos:

- a) Chuva;
- b) Evaporação;
- c) Temperatura;
- d) Insolação;
- e) Nebulosidade;
- f) Velocidade dos ventos.

4.2.2 Análise de dados

Inicialmente foram solicitados ao Departamento de Agronomia da UFC os mapas meteorológicos dos últimos 10 anos disponíveis na estação meteorológica do Campus do Pici. Os dados foram tratados objetivando sua análise sistemática a partir dos gráficos descritos abaixo.

- Precipitação:
 - a. Apresentação das precipitações mensais acumuladas em comparação com a precipitação acumulada média mensal interanual;
 - b. Apresentação das precipitações acumuladas anuais em comparação com a precipitação acumulada média interanual.
- Evaporação
 - a. Apresentação das evaporações mensais acumuladas em comparação com a evaporação acumulada média mensal interanual;
 - b. Apresentação das evaporações acumuladas anuais em comparação com a evaporação acumulada média interanual.
- Temperatura
 - a. Apresentação das temperaturas médias mensais ao longo dos anos, em comparação com a temperatura média mensal interanual;

- b. Apresentação das médias anuais de temperatura ao longo dos anos, em comparação com a temperatura média interanual.
- Insolação
 - a. Apresentação das médias mensais de insolação ao longo dos anos, em comparação com a insolação média mensal interanual;
 - b. Apresentação das médias anuais de insolação ao longo dos anos, em comparação com a insolação média interanual.
- Nebulosidade
 - a. Apresentação das nebulosidades médias mensais ao longo dos anos, em comparação com a nebulosidade média mensal interanual;
 - b. Apresentação das médias anuais de nebulosidade ao longo dos anos, em comparação com a nebulosidade média interanual.
- Velocidade dos ventos
 - a. Apresentação das velocidades médias mensais ao longo dos anos, em comparação com a velocidade média mensal interanual;
 - b. Apresentação das médias anuais de velocidade dos ventos ao longo dos anos, em comparação com a velocidade média interanual.

Em seguida, foram escolhidos três anos base para as análises de sensibilidade quanto à evaporação, baseando a seleção no volume de chuva anual. Optou-se por um ano típico, com precipitação próxima à média da série temporal; um ano seco e um ano úmido. Deseja-se que as diferenças de precipitação sejam cerca de 50% em relação ao ano típico.

Tendo escolhido os anos base, foram plotados os parâmetros analisados comparando as tendências inter e intra-anuais.

4.4 Modelagem utilizando o CE-QUAL-W2

4.4.1 Preparação dos dados meteorológicos para a inserção no modelo

Desenvolveu-se uma planilha automatizada, com auxílio do software MS Excel, para a compilação dos dados meteorológicos para os anos em estudo. No que tange à exportação dos dados para a formatação exigida pelo modelo, foi utilizada planilha disponibilizada pelos autores.

4.4.2 Batimetria e meteorologia

Foi utilizada a batimetria realizada em um estudo realizado por Araújo (2016) para validar os dados inseridos no modelo. Inicialmente, efetuou-se a segmentação do lago tanto vertical quanto longitudinalmente, de forma a compatibilizar o açude com a metodologia de análise utilizada pelo software. A quantidade de segmentos horizontais e verticais (direções x e z, respectivamente), foi definida para se obter uma boa precisão sem a necessidade de um esforço computacional exagerado.

Em seguida foi calculado o volume modelado do açude, a fim de compará-lo ao volume medido esperado, validando a batimetria inserida. As Figuras 11 e 12 apresentam as planilhas utilizadas para realizar a inserção da batimetria e para calcular o volume a partir dos dados inseridos, estas disponibilizadas pelos desenvolvedores do software, e a Figura 13 apresenta na planilha a sequência realizada para exportar os dados para o formato exigido pelo programa.

Figura 11 – Planilha intermediária para a inserção da batimetria no modelo

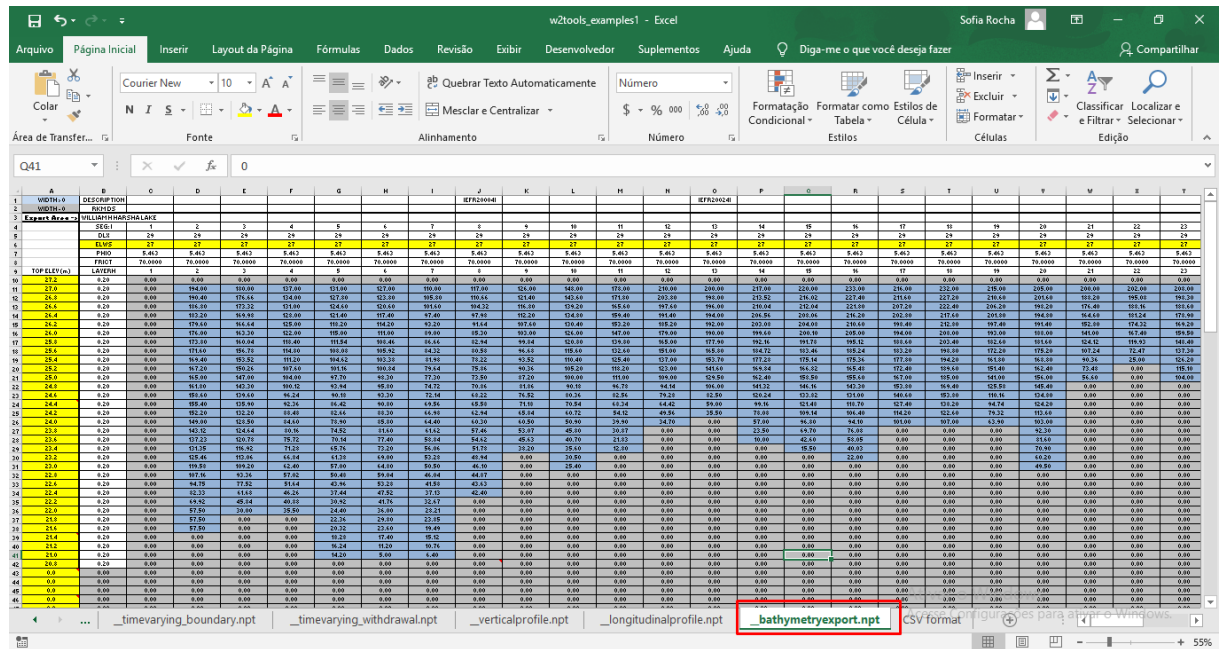


Figura 12 – Verificação de volume realizada pela planilha intermediária de batimetria

72	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO
73	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	69						
74	K LAYER VOL (m³) ACCUM VOL (m³) ACCUM VOL (1.0E6 m³) MCM VOL W2 Area														
75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1	0	0	0	0.00000000	150255	
76	1182.80	1009.20	1036.60	980.20	823.60	236.06	165.30	0.00	2	30051	358907	0.35890673	0.30000000	144329	
77	1180.98	987.16	1019.84	942.80	616.64	236.06	165.30	0.00	3	29246	328756	0.32875577	0.27600000	142404	
78	1108.96	965.12	1001.08	845.40	809.68	236.06	165.30	0.00	4	29481	395490	0.39548990	0.28200000	142404	
79	1097.04	948.08	998.32	928.00	902.72	236.06	165.30	0.00	5	27696	271009	0.27100911	0.28000000	138478	
80	965.12	921.04	975.66	910.60	795.76	236.06	165.30	0.00	6	26911	248313	0.24831342	0.20400000	138478	
81	893.20	899.00	962.80	899.20	788.80	236.06	165.30	0.00	7	26126	216403	0.21640281	0.18000000	130628	
82	774.88	829.17	863.04	789.73	678.83	0.00	0.00	0.00	8	22918	190277	0.19027729	0.16200000	114592	
83	656.56	759.34	763.28	686.26	568.86	0.00	0.00	0.00	9	21319	167359	0.16735896	0.14400000	106595	
84	301.60	699.80	683.52	582.78	458.30	0.00	0.00	0.00	10	19483	146040	0.14604076	0.12600000	97416	
85	0.00	619.67	603.76	479.21	248.50	0.00	0.00	0.00	11	17993	124718	0.12471864	0.10800000	92164	
86	0.00	549.84	464.00	375.84	238.56	0.00	0.00	0.00	12	16625	109726	0.10972581	0.09000000	89126	
87	0.00	452.40	452.40	273.76	0.00	0.00	0.00	0.00	13	13686	92101	0.09210069	0.07800000	84930	
88	0.00	0.00	440.80	171.68	0.00	0.00	0.00	0.00	14	12467	78415	0.07841466	0.06600000	82336	
89	0.00	0.00	429.20	69.60	0.00	0.00	0.00	0.00	15	11248	65947	0.06594744	0.05400000	80242	
90	0.00	0.00	417.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	16	11106	54699	0.05469904	0.04200000	78528	
91	0.00	0.00	406.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17	8976	43593	0.04359398	0.03000000	44379	
92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	18	5994	34718	0.03471864	0.02200000	29418	
93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	19	5192	28934	0.02893398	0.01500000	25959	
94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20	4820	23642	0.02364212	0.00700000	22602	
95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21	3774	19122	0.01912175	0.00000000	18869	
96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	22	3390	15348	0.01534790	0.00000000	16950	
97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	23	2656	11958	0.01195792	0.00000000	13281	
98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24	2357	9302	0.00930168	0.00000000	154	
99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	25	2058	6945	0.00694476	0.00000000	144	
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26	1807	4807	0.00480716	0.00000000	124	
101	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	27	1227	3368	0.00336765	0.00000000	117	
102	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	28	774	2140	0.00214032	0.00000000	116	
103	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29	701	1366	0.00136697	0.00000000	107	
104	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	30	295	665	0.00066471	0.00000000	99	
105	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	31	222	370	0.00037005	0.00000000	91	
106	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32	148	148	0.00014848	0.00000000	84	
107	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	33	0	0	0	0.00000000	77	
108	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34	0	0	0	0.00000000	70	
109										358907				0	

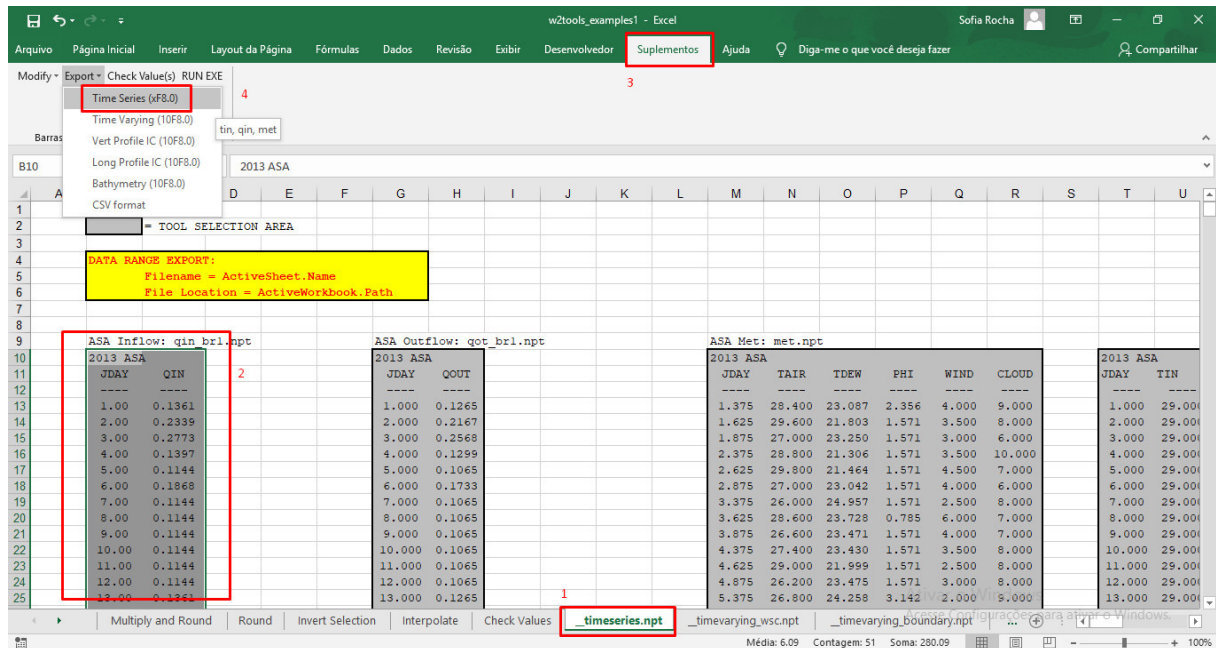
Figura 13 – Exportação da batimetria para o formato desejado

The screenshot shows the Microsoft Excel interface with the 'Suplementos' (Add-ins) menu open. The 'Bathymetry (10F8.0)' add-in is selected and highlighted with a red box. Below the menu, a large spreadsheet is visible, showing a grid of data. The columns are labeled 'E' through 'T' and the rows are numbered 1 through 44. A red box highlights the 'Bathymetry (10F8.0)' option in the Add-ins list. The spreadsheet data appears to be a grid of numerical values, likely representing bathymetric data, with some cells containing text like 'E' and 'T'.

No que tange à meteorologia, são necessários para o modelo os dados de temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho, direção e velocidade dos ventos e nebulosidade. Estes foram enquadrados no modelo na forma de séries temporais, com sua frequência de acordo com a disponibilidade de dados. Para o cálculo da temperatura de ponto de orvalho, foi utilizada a metodologia proposta por Dingman (2002).

Para a exportação dos dados para o formato “.dat”, compatível com o modelo, foi utilizada planilha intermediária disponibilizada pelos desenvolvedores do software, seguindo a ordem como mostrado na Figura 14.

Figura 14 – Exportação das séries temporais para o formato “.dat”



4.4.3 Dados de vazão de entrada e saída

Sabendo-se das baixas variações de volume ao longo do ano, tendo em vista a pequena variabilidade do aporte do reservatório (Araújo, 2016), foi possível ajustar equações que relacionam precipitação com as vazões de entrada e saída. Como a equação de saída representa a vazão de entrada menos a evaporação, que pode ser admitida constante, justificase usar as vazões como função da precipitação. Estas também foram inseridas em formato de séries temporais, com frequência diária.

4.4.4 Arquivo controle do modelo

No arquivo controle, foram inseridas latitude, longitude e elevação do fundo do reservatório, além do ano da simulação. Foram estudadas as influências dos parâmetros hidráulicos nas simulações, a fim de verificar a possibilidade ou não de serem usados valores padrões.

Como os valores-padrão do modelo foram desenvolvidos para uma região de

clima temperado, optou-se por fazer a calibração, ainda que de forma simplificada, dos coeficientes da equação do vento do modelo, usada no cálculo da evaporação, para a região em estudo. Os valores dos coeficientes hidráulicos foram mantidos de acordo com o padrão.

No que tange às condições iniciais da modelagem, a temperatura inicial foi inserida de acordo com Araújo (2016).

O reservatório em estudo possui duas estruturas vertentes idênticas. Ambas foram inseridas no modelo com os coeficientes calculados a partir da equação do vertedouro, apresentada na Equação 4. A Figura 15 apresenta as informações que precisam ser determinadas para a correta inserção da estrutura.

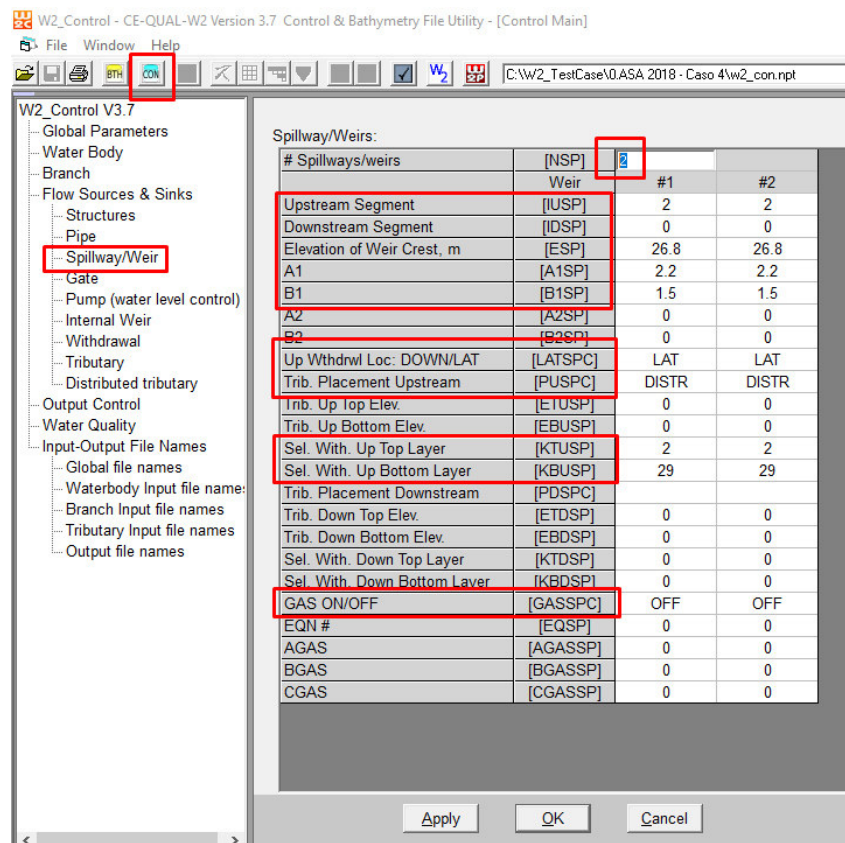
$$Q = 2,2 \times 1,0 \times h^{3/2} \quad (4)$$

Em que:

Q – Vazão que passa no vertedor;

h – Altura da lâmina d'água acima do vertedor.

Figura 15 – Destaque para as características da estrutura a serem definidas

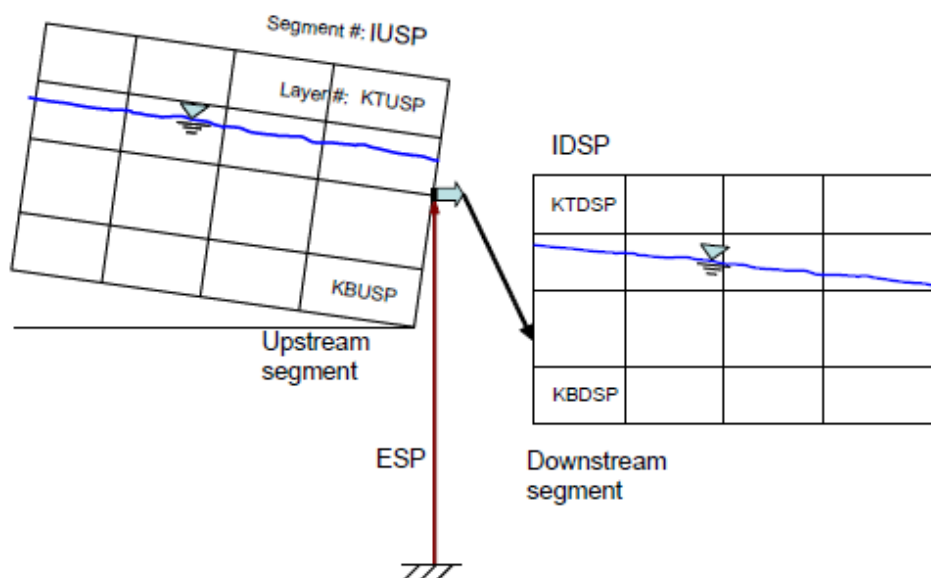


Inicialmente é necessário determinar a quantidade de vertedouros do corpo hídrico, para então inserir os segmentos à montante e à jusante, este devendo ser zerado quando a água vertente for para fora do sistema, como é o caso do ASA. Em seguida deve ser inserida a elevação da soleira e os coeficientes A1 e B1, determinados a partir da equação da estrutura. Os coeficientes A2 e B2 são utilizados para condições em que a estrutura está submersa.

Dando prosseguimento, é preciso selecionar qual será a característica da retirada de água, podendo esta ser à jusante (DOWN) ou lateral (LAT), conforme mostrado nas Figuras 16 e 17. Também é preciso inserir como o fluxo entra no segmento à montante da estrutura. Caso este seja selecionado como a opção “SPECIFY”, é necessário indicar quais os segmentos-limite através dos quais transpassará fluxo, caso seja a opção “DISTR” ou “DENSITY”, não é preciso alterar esses parâmetros.

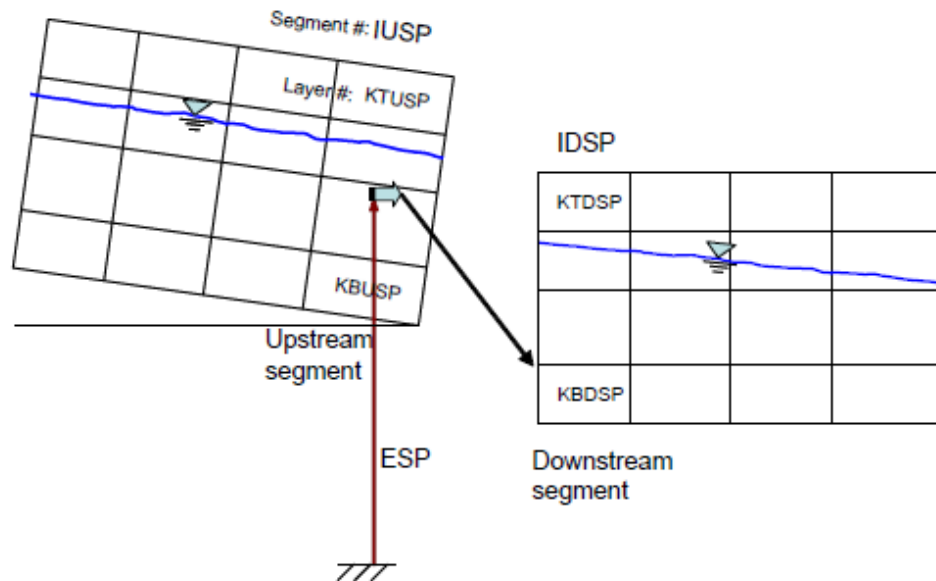
O parâmetro relacionado à como o fluxo chega no segmento à jusante da estrutura não precisa ser preenchido no caso de vertimento livre. As demais características dependem se o fluxo continua ou não no sistema, para a determinação dos segmentos-limite através dos quais ocorrerá fluxo; se há retiradas nas camadas superior e inferior do segmento à montante da estrutura e se devem ser realizadas simulações incluindo gases dissolvidos.

Figura 16 – Esquema de retirada à jusante



Fonte: Cole e Wells (2017)

Figura 17 – Esquema de retirada lateral



Fonte: Cole e Wells (2017)

Ressalta-se a importância de, ao longo da inserção das características do reservatório, serem realizadas simulações utilizando o pré-processador, o qual identifica possíveis erros nos dados ou alguma instabilidade do modelo e, dependendo do problema, sinaliza como resolvê-lo. (COLE e WELLS, 2017)

4.4.5 Simulação

Com todos os parâmetros necessários corretamente inseridos, foi efetuada a modelagem hidrodinâmica do reservatório em estudo, para então ser avaliada a influência da sazonalidade no tempo de residência do reservatório em questão.

Para avaliar o impacto da evaporação no tempo de residência, foram simulados os seguintes cenários para os anos seco, típico e úmido:

- a) Caso 1
 - a. Simulação sem considerar a evaporação.
- b) Caso 2
 - a. Simulação considerando a evaporação no modo padrão do modelo.
- c) Caso 3
 - a. Simulação considerando a evaporação com os coeficientes da equação do vento calibrados para a região em estudo.

Em seguida, para avaliar a influência da sazonalidade no tempo de residência do reservatório, foram realizadas as simulações por ano para o período entre 2009 e 2018.

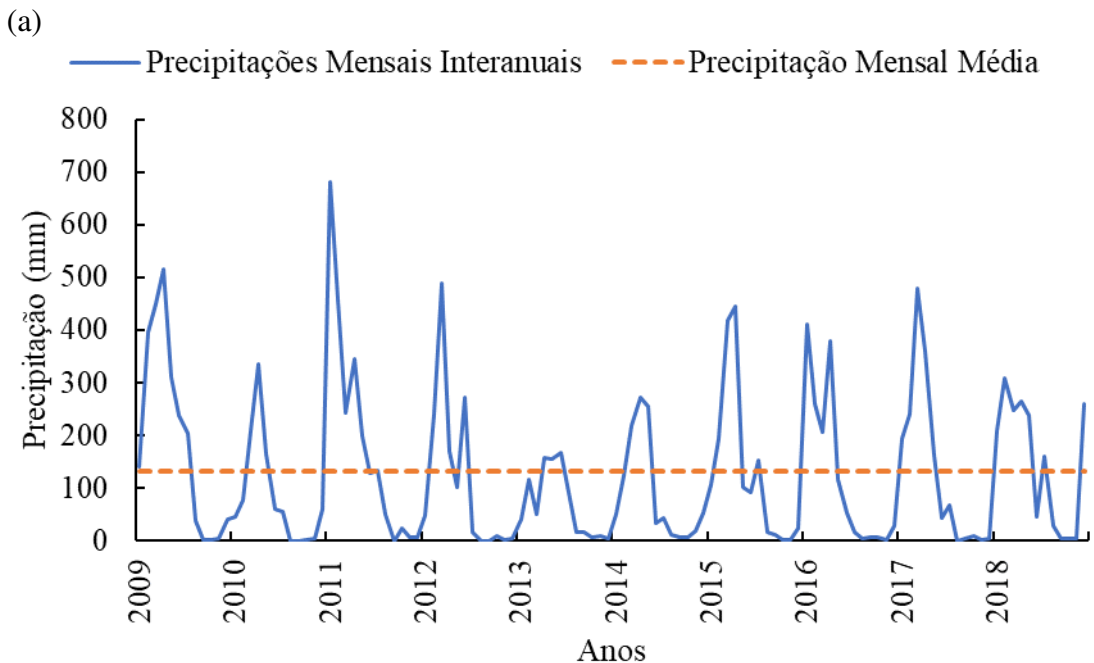
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

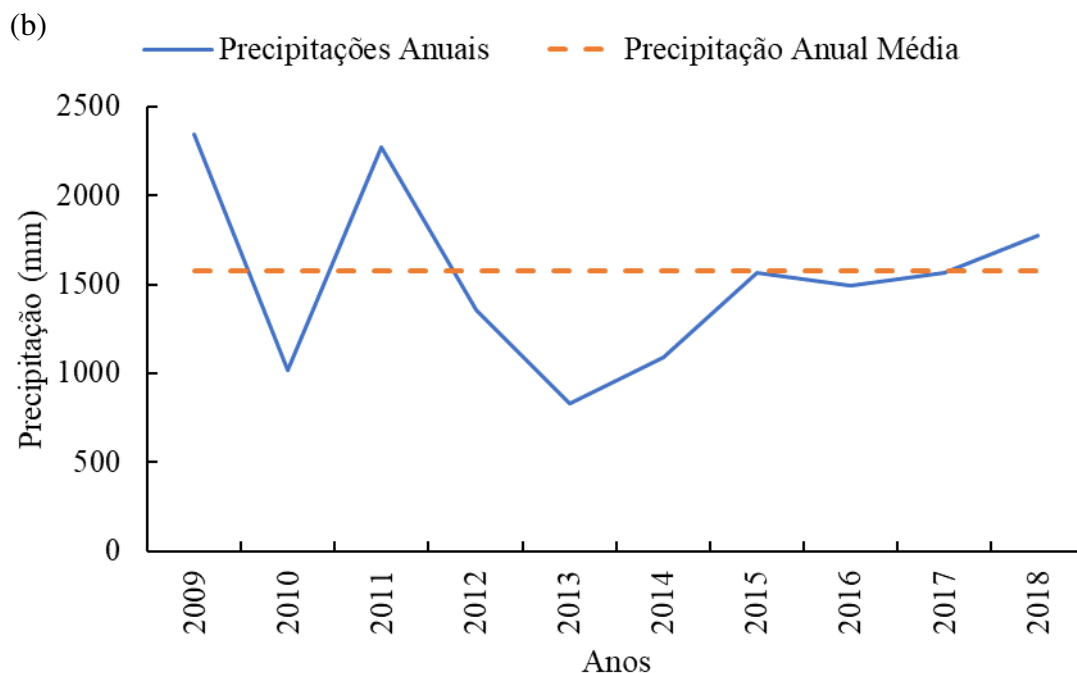
5.1 Análise da meteorologia da região

5.1.1 Resultados por parâmetro

A região em estudo possui um clima tropical (Cavalcanti *et al.*, 2009), o qual é caracterizado pela sazonalidade de chuvas, que ocorrem no primeiro semestre do ano (período úmido), geralmente entre os meses de fevereiro e maio, intervalo conhecido como “Quadra chuvosa”; sendo o segundo semestre marcado por uma estação de estiagem (período seco). O Gráfico 1 (a) e (b) apresenta o histórico de precipitação dos últimos 10 anos, com as precipitações mensais e anuais, respectivamente.

Gráfico 1 – Histórico de precipitações (a) mensal e (b) anual entre 2009 e 2018





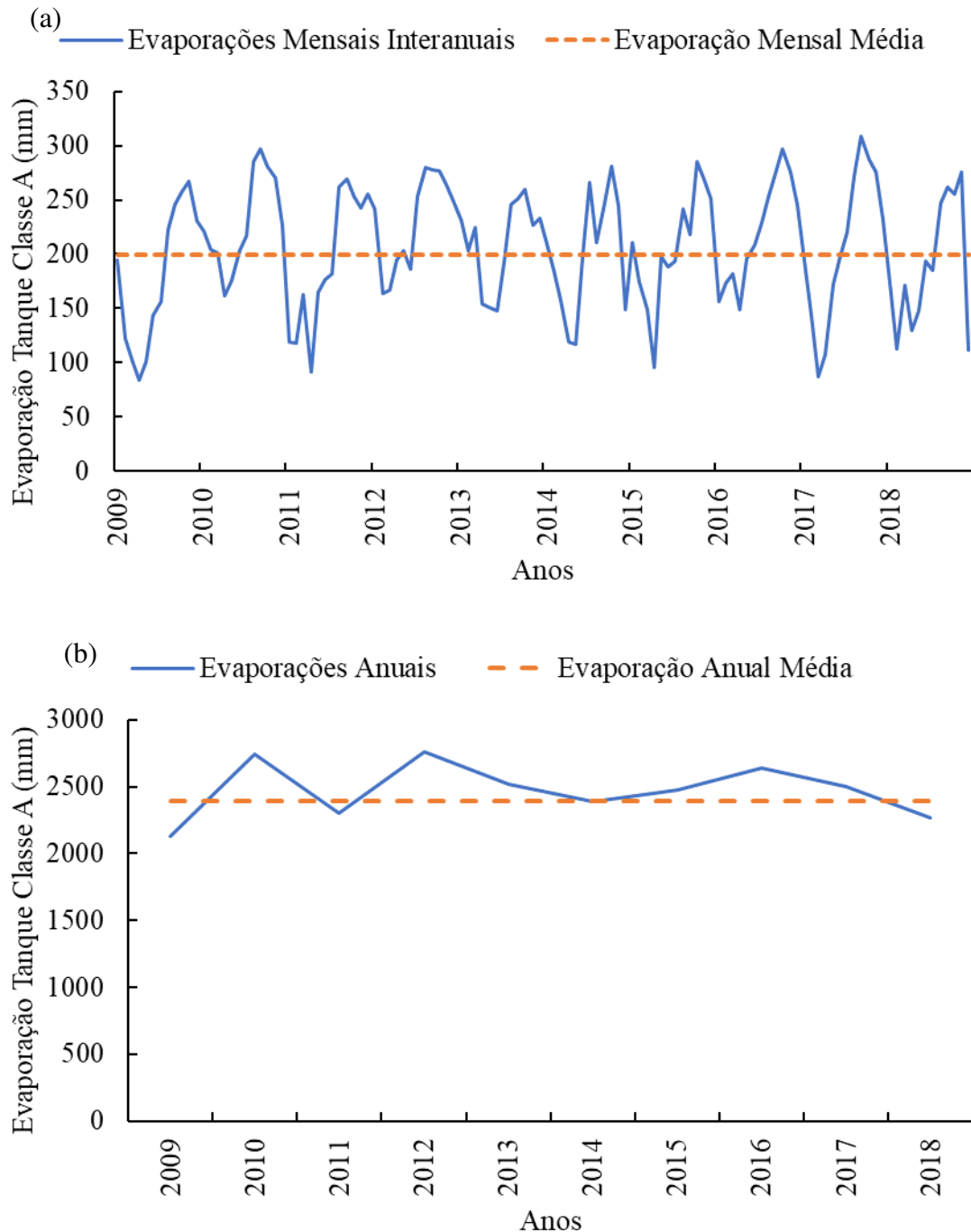
É possível observar as tendências descritas no Gráfico 1 (a), com os picos de chuva no início dos anos. A precipitação máxima mensal da série temporal em estudo foi de 681,6 mm, relativa ao mês de janeiro de 2011. É interessante ressaltar a irregularidade de chuvas na região e a discrepância entre anos com a comparação da chuva máxima mensal, ocorrida em 2011, com a chuva anual total ocorrida no ano mais seco da série analisada (2013), igual à 832,7 mm. Observa-se que, em apenas um mês, choveu o equivalente a cerca de 80% da precipitação total anual relativa à 2013. Ainda reforçando essa situação, foi observado que a média de chuva acumulada no segundo semestre dos anos corresponde a menos de 10% da média de chuva acumulada na dita “quadra chuvosa”, de acordo com o esperado para a região (VASCONCELOS JUNIOR, 2014). Esse é um dos grandes desafios envolvendo a gestão de recursos hídricos do estado do Ceará, com precipitações que, além de escassas, são altamente irregulares e imprevisíveis.

Ao ser avaliado o Gráfico 1 (b), é possível observar a série de anos com precipitações abaixo da média a partir de 2012, reflexo do período de estiagem que ocorreu na região Nordeste exatamente neste período (FERREIRA *et al.*, 2018). A precipitação média para o período avaliado foi de 1.530,75 mm, e a máxima observada foi no ano de 2009, com um total de 2.344,6 mm, dos quais 87% se concentrou no primeiro semestre.

Já ao ser analisada a evaporação para esse intervalo de anos, percebe-se que a tendência desta é contrária à observada para a precipitação, como mostrado no Gráfico 2 (a) e (b), com as evaporações mensais e anuais, respectivamente.

Analisando-se o Gráfico 2 (a), nota-se que a evaporação média mensal para a região em estudo, a partir dos dados da estação meteorológica avaliados, é de 205 mm, enquanto a média para o primeiro semestre do ano é de cerca de 165 mm e a média para o segundo semestre do é de 247 mm, observando-se um aumento de quase 50% com a mudança de período. Nesse gráfico ficam bem evidenciados os picos de perdas por evaporação em períodos de chuva e de estiagem.

Gráfico 2 – Histórico de evaporações (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018



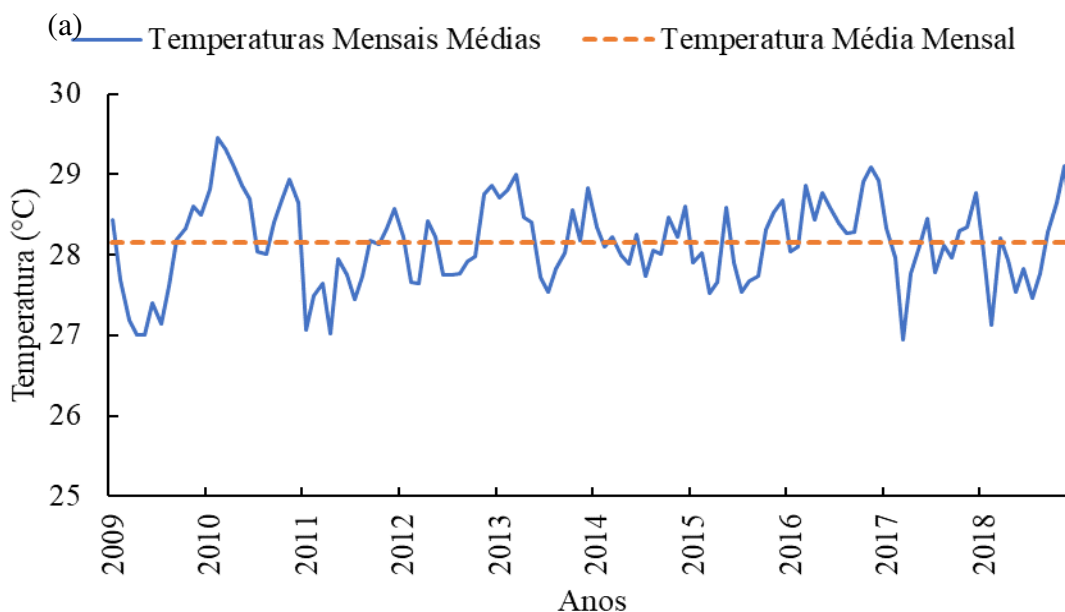
Ao serem avaliados os dados anuais, com o Gráfico 2 (b), pode-se observar que se tem picos de evaporação altos quando comparados a outras regiões (ALTHOFF *et al.*, 2019). É notório um pico de evaporação no primeiro ano da seca registrada no Nordeste, 2012, com cerca de 2700 mm de evaporação acumulada. Os demais anos foram mais estáveis sob essa ótica, com valores próximos à média, esta igual à 2471 mm.

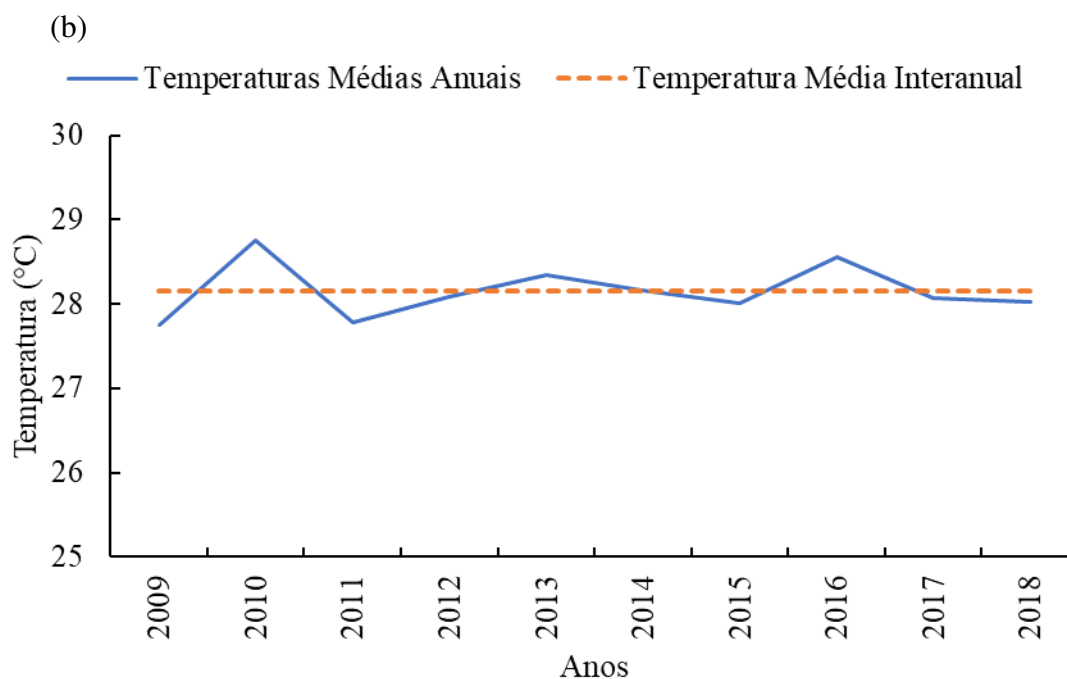
Ressalta-se que os dados de evaporação da estação meteorológica do Campus do Pici são coletados utilizando o Tanque Classe A, o qual superestima os valores encontrados, visto que há, além das perdas pela superfície do reservatório, perdas laterais devido ao formato e material do tanque (COLLISCHONN e DORNELLES, 2013)

No que tange à temperatura, ao ser observado o Gráfico 3 (a) e (b), com as temperaturas mensais e anuais, respectivamente, percebe-se que se tem pouca variação, ainda que seja possível verificar valores levemente menores – cerca de 1°C – no primeiro semestre dos anos, ao ser analisado o Gráfico 3 (a).

Com a análise do Gráfico 3 (b), pode ser observada uma baixa variabilidade interanual das médias das temperaturas. É possível verificar que no ano de 2010, caracterizado por baixas precipitações, quando comparado com os demais anos da série, e alta evaporação, houve um pico de temperatura, com sua média chegando próximo de 29°C, enquanto os demais anos tiveram uma média em torno de 28°C. É notório que, ainda que tenha ocorrido esse pico, este representa um desvio que não chega à 5% em relação ao esperado.

Gráfico 3 – Histórico de temperaturas (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018

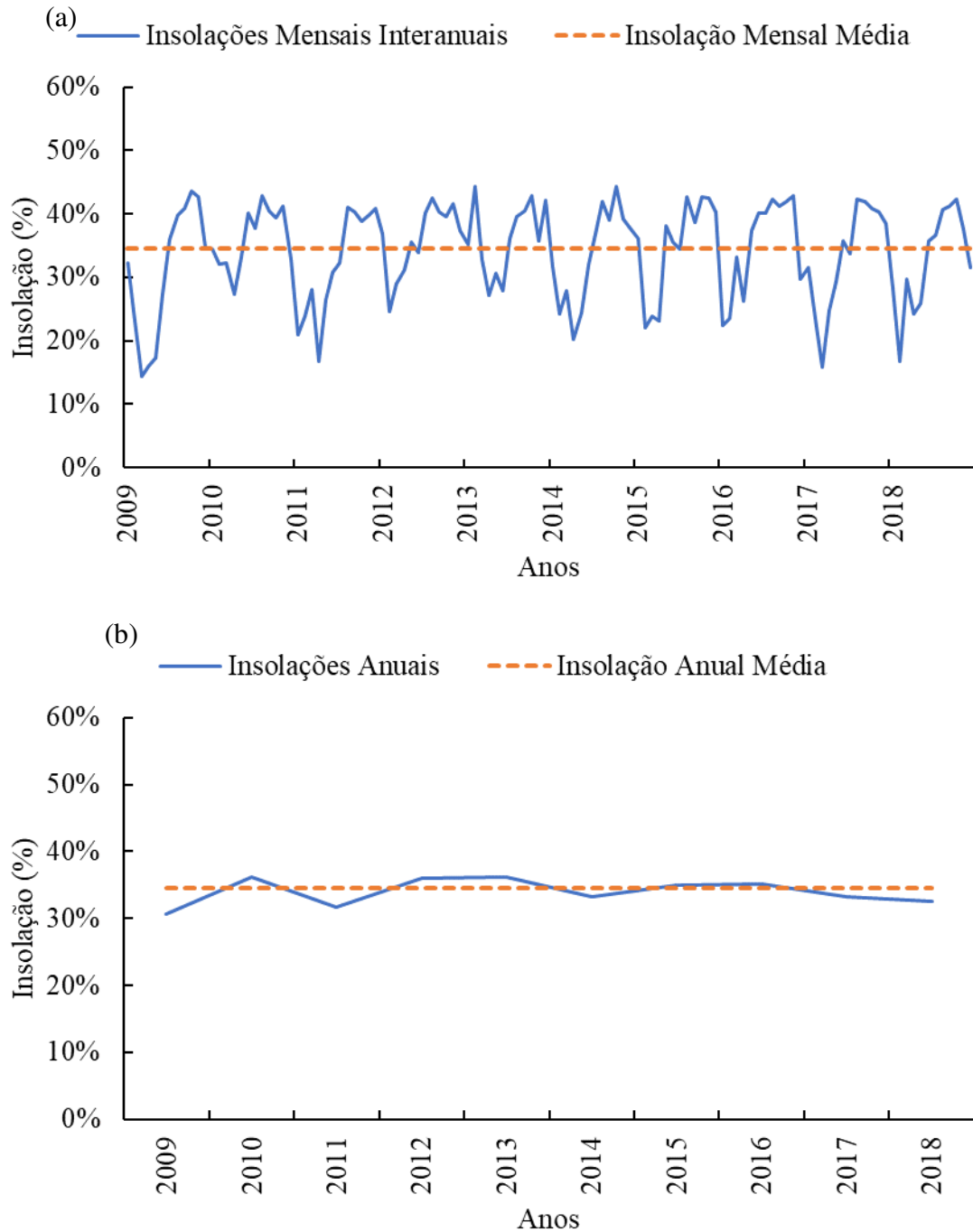




No que diz respeito à insolação, o Gráfico 4 (a) e (b) apresenta as médias mensais e anuais, respectivamente. É possível verificar, ao ser avaliado o Gráfico 4 (a), uma tendência semelhante à observada para a precipitação, com picos no segundo semestre dos anos, notadamente o período de estiagem, tendo em vista uma menor nebulosidade, como mostrado no Gráfico 5 (a) e (b). Nos primeiros semestres dos anos, a exposição ao sol média por dia é cerca de 7 horas, enquanto, nos períodos secos, esse valor chega à aproximadamente 9 horas e meia, o que corresponde a um aumento de cerca de 40%.

Ao ser analisado o Gráfico 4 (b), percebe-se também uma baixa variabilidade interanual do número de horas de exposição ao sol, com uma média de 35% do tempo, o que equivale à cerca de 8 horas e meia por dia.

Gráfico 4 – Histórico de insolação (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018



Com isso, prossegue-se para a avaliação do histórico de nebulosidades mensais e anuais apresentado no Gráfico 5 (a) e (b), respectivamente. Conforme discutido, observa-se no Gráfico 5 (a) nebulosidades notadamente maiores nos primeiros semestres do ano, coerente com a ocorrência das precipitações no mesmo período, enquanto no segundo semestre é tida uma queda nestes valores. A nebulosidade média diária para o período úmido é aproximadamente 6, enquanto para o período seco este valor cai para cerca de 4,3, o que

representa uma queda de 25%.

Ao ser analisado o Gráfico 5 (b), é notória uma baixa variabilidade entre os anos, com uma maior discrepância, ainda que esta não seja tão significativa, tendo em vista a grandeza das variações, para os primeiros anos da série. Em 2009 foi tida uma grande precipitação, enquanto o ano de 2010 foi um ano de seca e 2011 foi novamente um ano de boas precipitações. Tal cenário reflete os dados avaliados no Gráfico 5 (b).

Gráfico 5 – Histórico de nebulosidades (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018

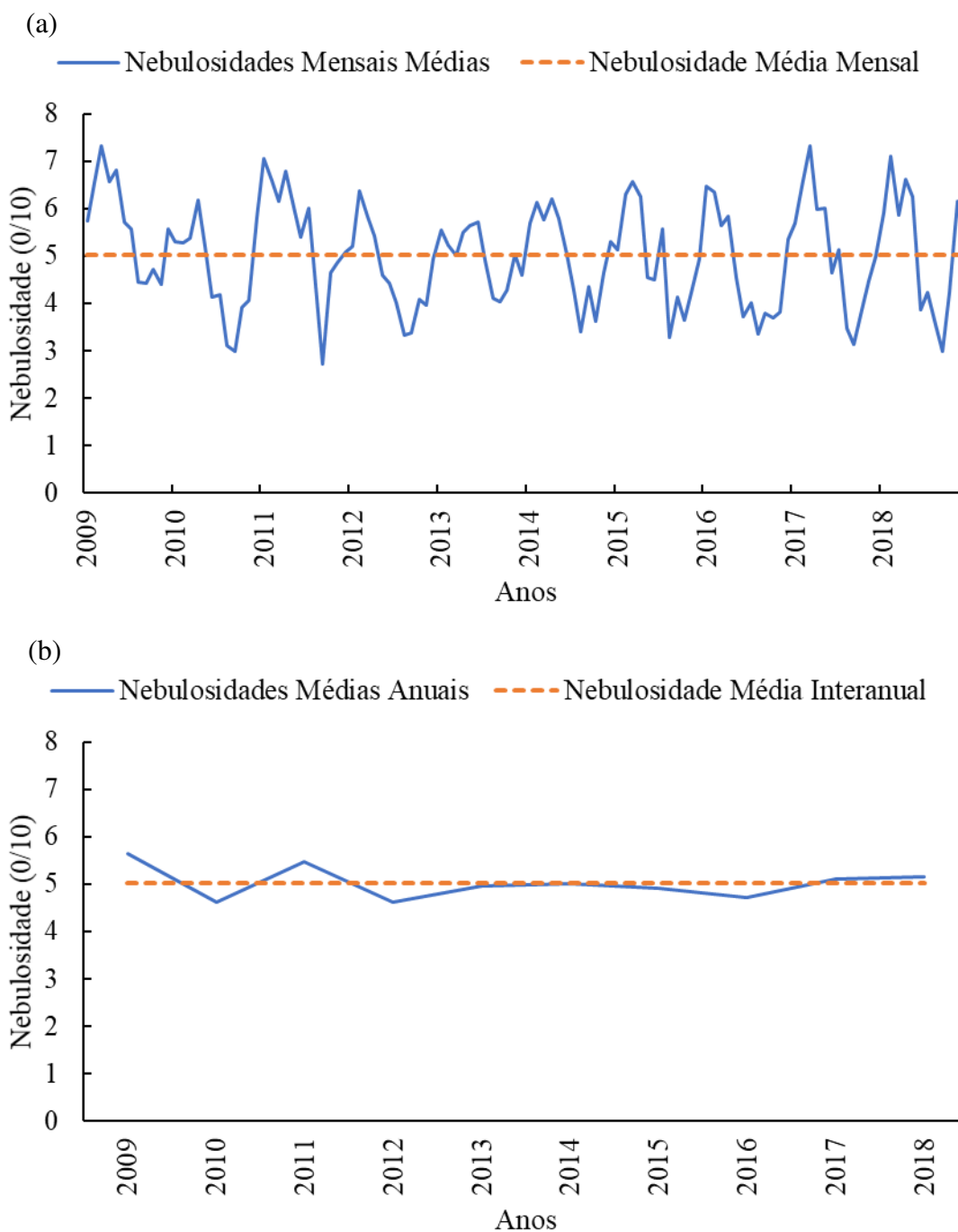
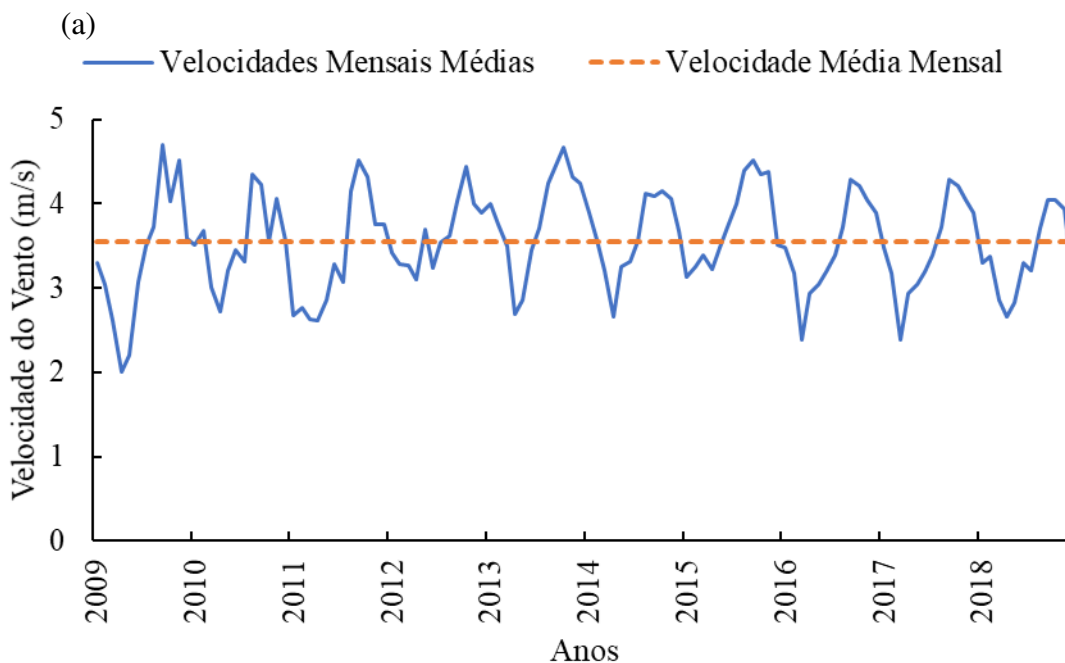
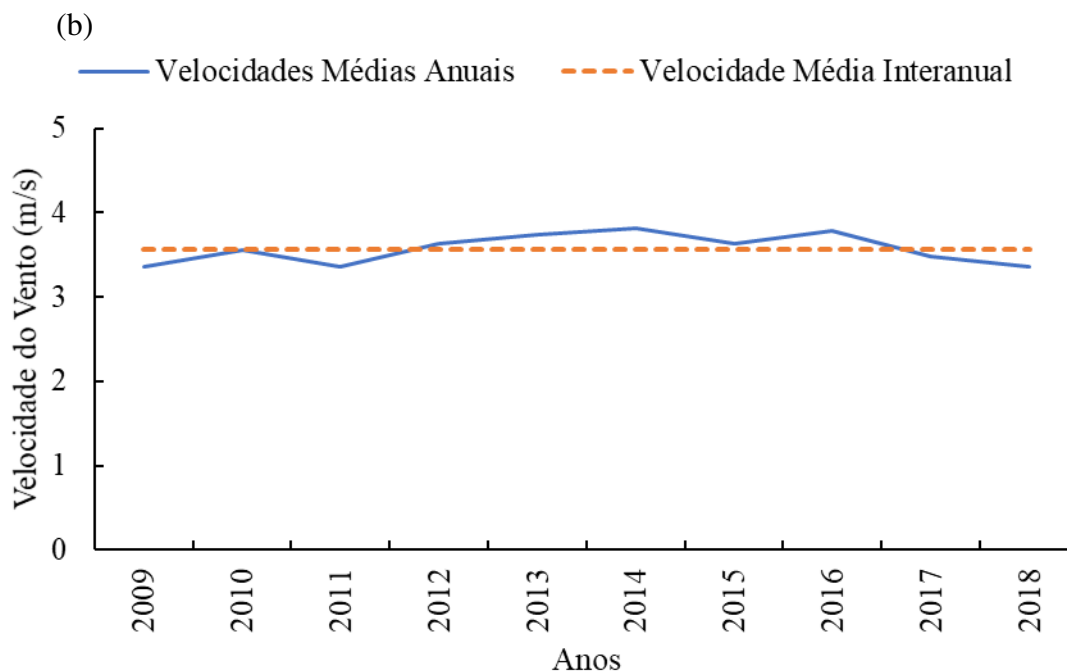


Gráfico 6 (a) e (b) apresenta as velocidades dos ventos mensais e anuais, respectivamente. Avaliando-se o histórico mostrado no Gráfico 6 (a), verifica-se uma clara tendência intra-anual de maiores valores no segundo semestre do ano, o qual possui baixas precipitações, altas taxas evaporativas, altas temperaturas, alta exposição ao sol e baixa nebulosidade. No período úmido, a média das velocidades dos ventos é de cerca de 3 m/s, enquanto no período seco este valor sobe para aproximadamente 4 m/s, o que representa um aumento de 26%.

Ao ser avaliado o Gráfico 6 (b), mantém-se a baixa variabilidade interanual observada nos demais parâmetros. É interessante observar a relação da velocidade dos ventos com a precipitação, ao verificar-se que, nos anos em que choveu mais, tem-se a velocidade dos ventos anual abaixo da média, enquanto nos anos com baixas precipitações, notadamente entre 2012 e 2016, a velocidade anual permanece acima da média.

Gráfico 6 – Histórico de velocidade do vento (a) mensais e (b) anuais entre 2009 e 2018



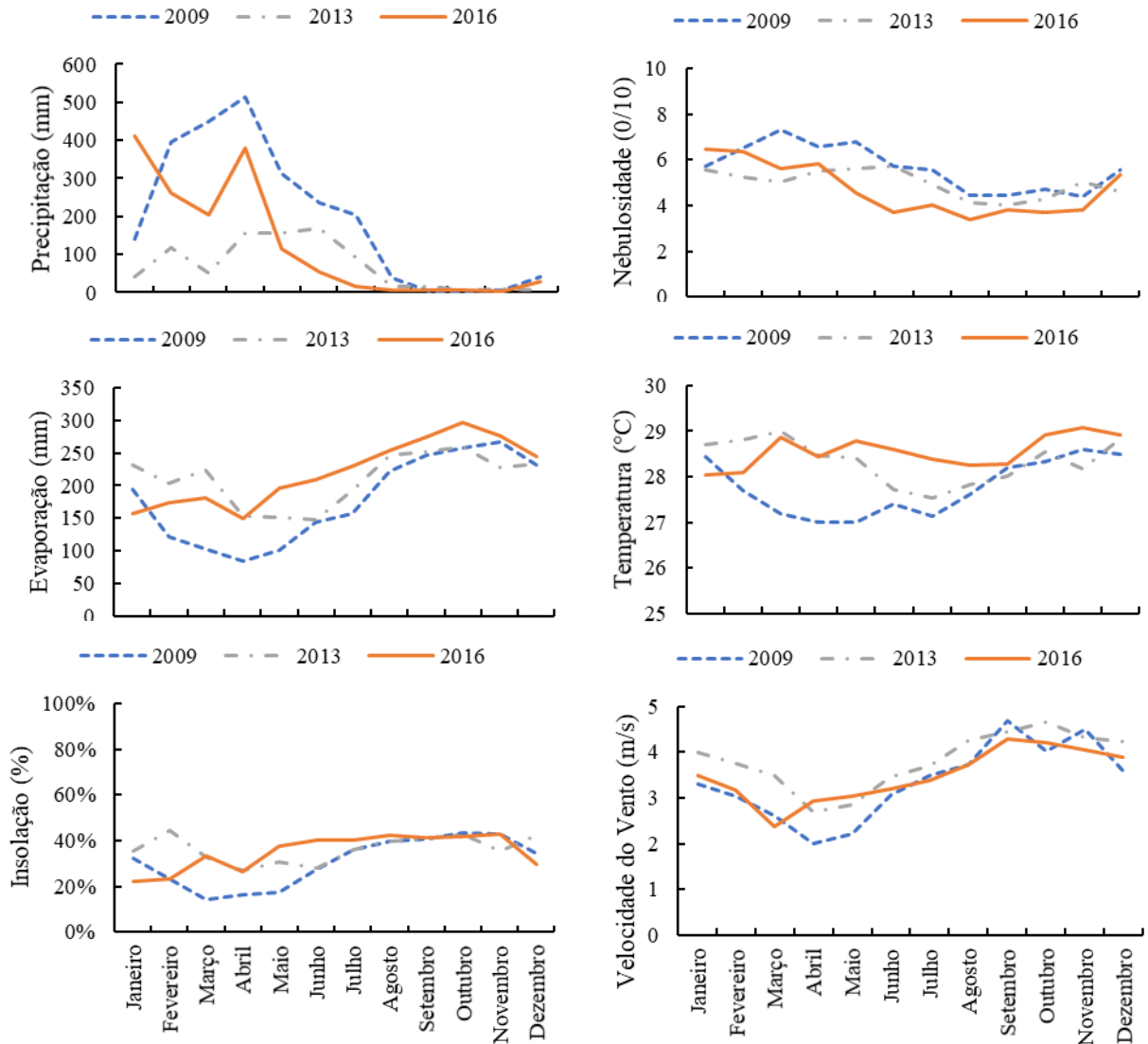


5.1.2 Comparativo entre parâmetros para anos seco, típico e úmido

Ao ser analisado o histórico de precipitações entre 2009 e 2018, é notório o pico de precipitações em 2009, com um total de 2.345 mm, enquanto 2013 foi o ano mais seco da série, com apenas 833 mm precipitados. Assim, os anos escolhidos para a realização da comparação sistemática dos parâmetros e para a análise de sensibilidade utilizando o CE-QUAL-W2 foram 2009, 2013 e 2016, respectivamente: ano úmido, ano seco e ano típico, este com uma precipitação igual à 1.490 mm, valor bem próximo à média da série. Observa-se que o desvio das precipitações dos anos úmido e seco em relação à média é igual à 57% e 44%, respectivamente.

A Figura 18 apresenta os gráficos comparativos dos parâmetros para os três anos analisados. É interessante observar que, para todos os parâmetros, no início dos anos é tida uma maior discrepância entre os valores, porém eles seguem a mesma tendência para o segundo semestre, com a convergência das curvas avaliadas.

Figura 18 – Comparativo entre parâmetros para os anos úmido, seco e típico



5.2 Vazões afluentes e efluentes ao reservatório

As vazões afluentes e efluentes ao reservatório foram obtidas a partir da transformação chuva-vazão realizada para o ano de 2013, o qual possui disponibilidade de dados para ser feito o ajuste (Araújo, 2016). As correlações foram desenvolvidas e estão apresentadas nos Gráficos 7 e 8, com coeficientes de correlação iguais à, aproximadamente, 0,93. As equações 5 e 6 mostram as correlações avaliadas.

Gráfico 7 – Ilustração da correlação entre a precipitação e a vazão de entrada no reservatório

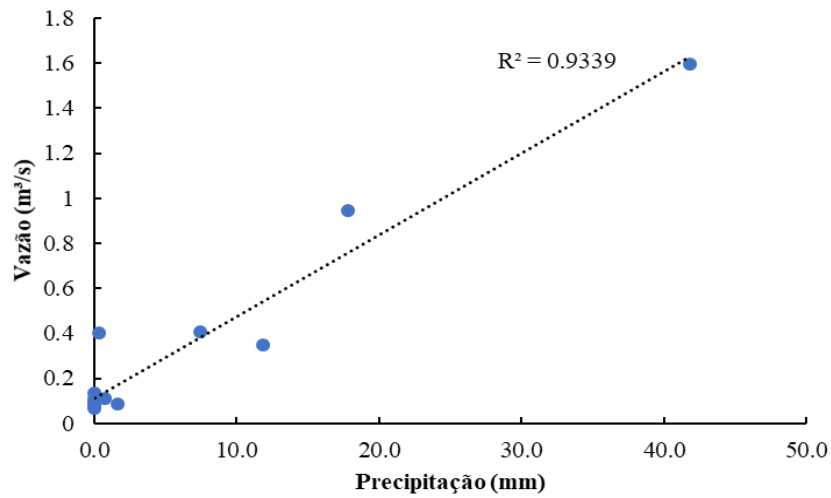
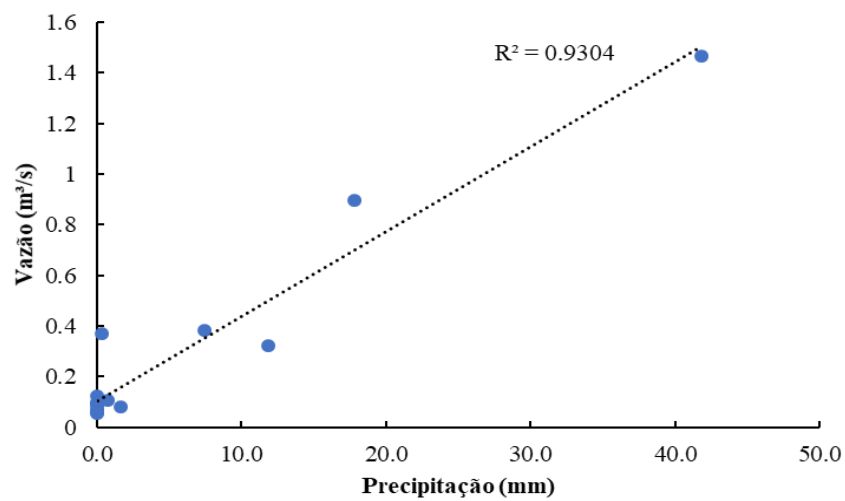


Gráfico 8 – Ilustração da correlação entre a precipitação e a vazão de entrada no reservatório



$$Q = 0,0362 \times P + 0,1144 \quad (5)$$

$$Q = 0,0334 \times P + 0,1065 \quad (6)$$

Onde:

Q – Vazão, em m³/s; e

P – Precipitação, em mm.

5.3 Análise de resultados CE-QUAL-W2

As Figuras 19 e 20 apresentam a visão em planta e o corte longitudinal do Açude Santo Anastácio (ASA), respectivamente, explicitando os elementos de análise do CE-QUAL-W2 obtidos pelo processo de discretização. A Figura 19 apresenta a segmentação horizontal do reservatório, enquanto a Figura 20 exibe essa junto à divisão vertical.

Figura 19 – Visão em planta do ASA, com a segmentação adotada no CE-QUAL-W2

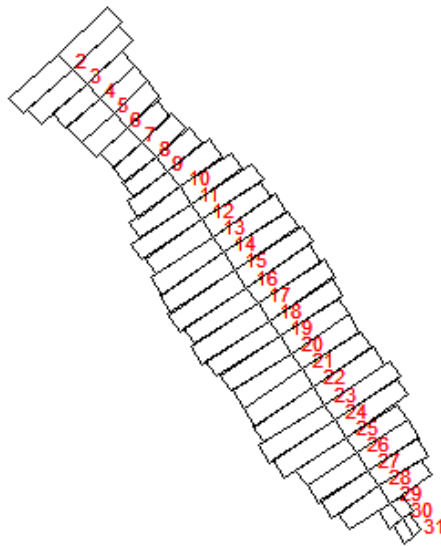
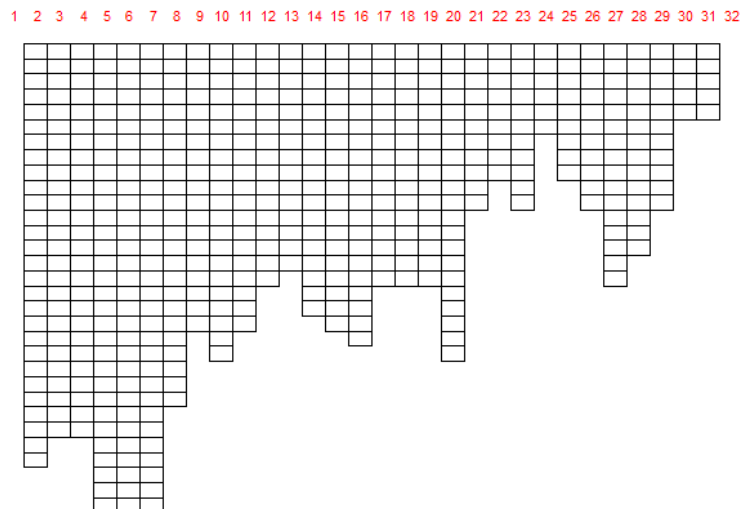


Figura 20 – Corte longitudinal do ASA, com a segmentação adotada no CE-QUAL-W2



Em seguida foi calculado o volume resultante da segmentação mostrada, igual à 0,36 hm³. Araújo (2016) aponta um volume esperado de 0,31 hm³, o qual difere em cerca de 16% do valor modelado. Com isso, a batimetria inserida pode ser considerada satisfatória para o presente estudo.

De acordo com a calibração dos coeficientes da equação do vento para a região em estudo, os valores que melhor se adequaram à realidade do modelo atualmente estão indicados na Figura 21, sendo a, b e c, respectivamente: 3,0, 3,5 e 0,5.

Figura 21 – Captura de tela do modelo indicando os coeficientes para o cálculo da evaporação calibrados

		Default Values	WB #1
Ice Cover Algorithm	[ICEC]		OFF
Simple or Detailed Computation Method	[SLICEC]	DETAIL	DETAIL
Albedo (Reflection/Incident)	[ALBEDO]	0.25	0.25
Coefficient of water-ice heat exchange	[HWICE]	10.0	10
Fraction Radiation Absorbed by Ice	[BICE]	0.6	0.6
Solar Radiation Extinction Coefficient [m-1]	[GICE]	0.07	0.07
Minimum Ice Thickness before ice formation [m]	[ICEMIN]	0.03	0.05
Temperature above which ice does not form [C]	[ICET2]	3	3
Term-by-term or Equilibrium Temp Method	[SLHTC]	TERM	ET
Read Solar Radiation Data	[SROC]		OFF
Evaporation Coefficient A	[AFW]	9.2	3
Evaporation Coefficient B	[BFW]	0.46	3.5
Evaporation Coefficient C	[CFW]	2	0.5
Wind speed measuring height [m]	[WINDH]	2	10
Ryan-Harleman Evaporation Formula	[RHEVAP]	OFF	OFF
Fetch Correction to Wind_10m Fang&Stefan	[FETCHC]	OFF	OFF
Meteorological Data Interpolation	[METIC]	ON	ON

Inserida a batimetria do modelo, junto aos dados de meteorologia e vazão, foi possível dar início aos testes usando o pré-processador, sem erros significativos acusados. Uma observação resultante desta avaliação foi com relação ao valor dos coeficientes de dispersão horizontal para o momento e para a temperatura/constituintes. Segundo Coles e Wells (2017), diversas análises de sensibilidade mostraram que o modelo é relativamente insensível a variações nos valores padrões desses coeficientes para reservatórios, cabendo ao usuário ajustá-los ou não. No presente estudo foram utilizados os coeficientes calculados internamente pelo modelo, mostrados ao ser simulado o pré-processador.

A Figura 22 apresenta o modelo da segmentação horizontal do reservatório sobreposta no mapa da cidade de Fortaleza. Por esta imagem, é possível observar um bom ajuste do modelo.

Figura 22 – Segmentação do ASA sobreposta ao mapa da cidade de Fortaleza



5.2.1 Avaliação do impacto da evaporação no TR

Os Gráficos 9 e 10 apresentam os resultados das avaliações do impacto da evaporação no tempo de residência do ASA, realizadas por meio dos casos 1, 2 e 3, respectivamente: situação sem evaporação, situação considerando a evaporação calculada com a equação do vento no modo padrão do modelo e situação com os coeficientes da equação do vento ajustados para a região em estudo. A Tabela 1 apresenta os desvios percentuais entre os casos simplificados (casos 1 e 2) e o caso completo (caso 3).

Gráfico 9 – Avaliação do impacto da evaporação no TR para os anos 2009, 2013 e 2016

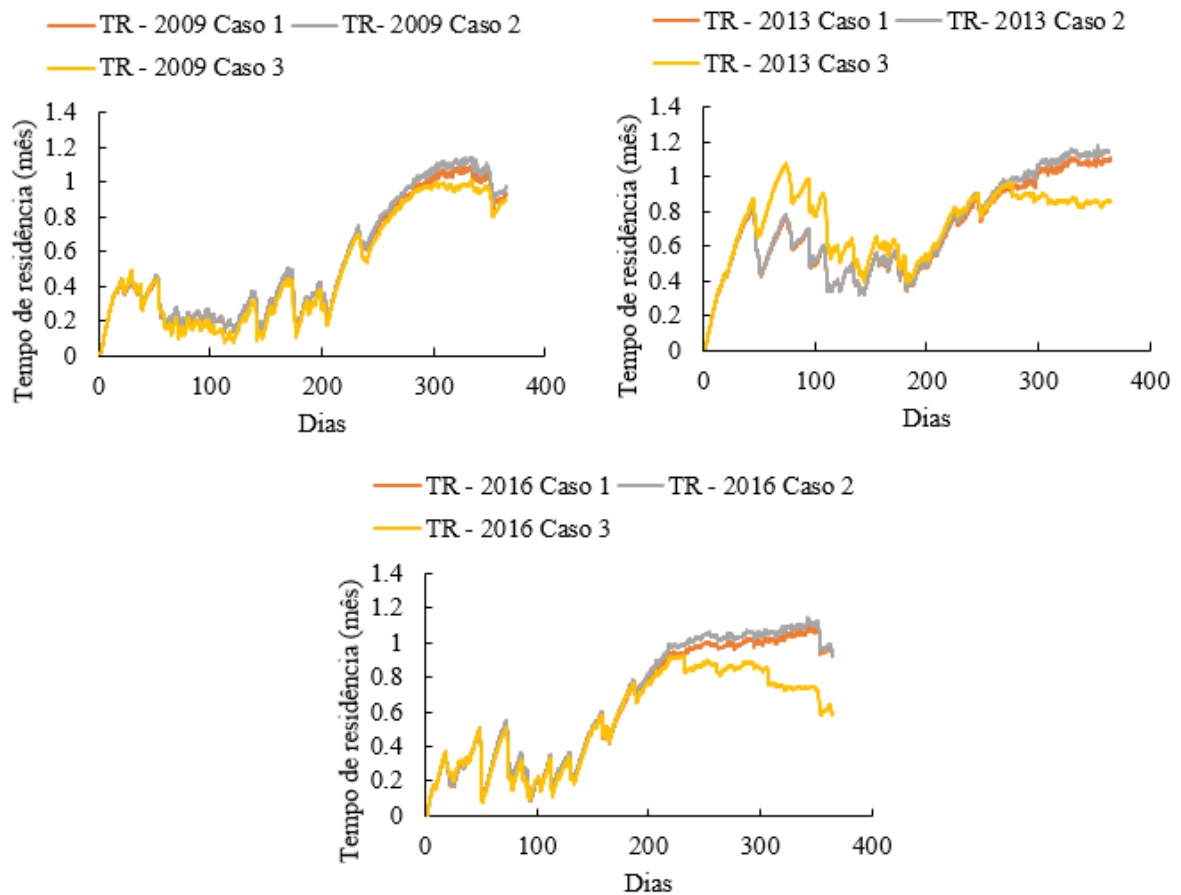


Gráfico 10 – Comparativo esquemático do impacto da evaporação no TR para 2009, 2013 e 2016, em que: a – período chuvoso e b – período seco

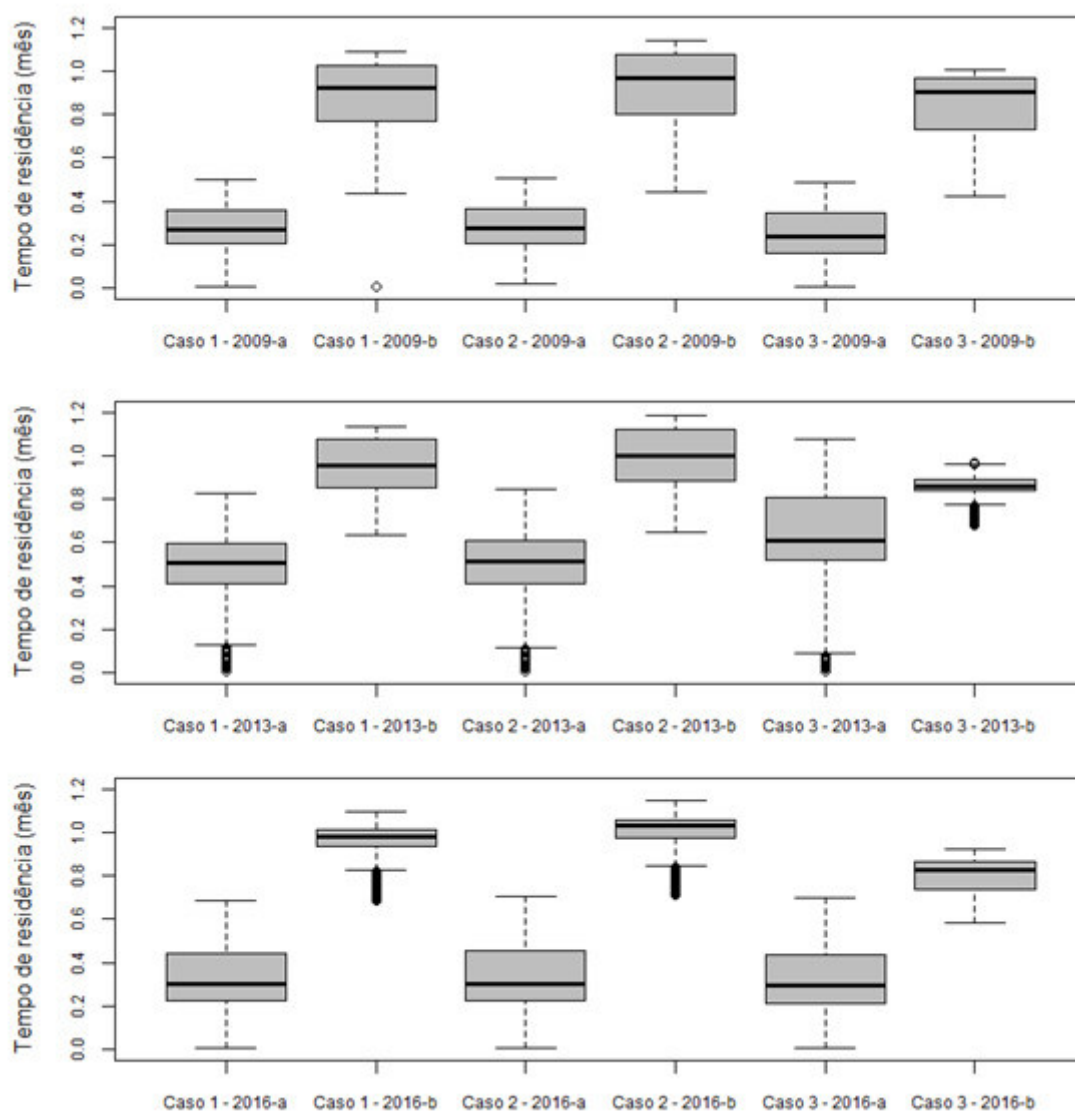


Tabela 1 – Comparativo das diferenças percentuais entre os casos avaliados por período

Ano	Média dos desvios percentuais					
	Média geral		Média período chuvoso		Média período seco	
	Casos 1 e 3	Casos 2 e 3	Casos 1 e 3	Casos 2 e 3	Casos 1 e 3	Casos 2 e 3
2009	14%	17%	24%	25%	8%	11%
2013	16%	17%	22%	21%	13%	15%
2016	15%	18%	11%	11%	18%	22%

Ao serem analisados os Gráficos 9 e 10 e a Tabela 1, percebe-se que a variação mais acentuada do TR se dá nos períodos chuvosos de 2013 e 2009 – anos seco e úmido,

respectivamente, com valores se sobrepondo para o intervalo de transição. Tal resultado está de acordo com o esperado, tendo em vista que o impacto da precipitação se dá no período chuvoso, sabendo-se que no período seco historicamente não há chuvas, ocorrendo a convergência das séries avaliadas. Notadamente a evaporação possui um maior impacto no tempo de residência quando calculada de acordo com os parâmetros calibrados para a região em estudo, o que ressalta a importância desse fator para a região.

É importante considerar, com a análise do Gráfico 10, que o TR aumenta entre 2 e 3 vezes do período chuvoso para o seco, o que é um indicativo de que as variabilidades sazonais são consideravelmente mais importantes que as interanuais.

Observa-se, também, que, para o ano de 2009 – ano úmido, os três casos avaliados são semelhantes, sem grandes variações. Tal situação mostra a influência, ainda que menos expressiva que a da sazonalidade, da variação interanual na hidrodinâmica do reservatório, tendo em vista que o maior impacto da inclusão da evaporação se dá nos períodos secos da análise, sendo eles os dois semestres de 2013 e o segundo semestre do ano típico.

5.2.2 Avaliação do impacto da sazonalidade no TR

As Figuras 23 a 32 apresentam a variação do TR dentro do reservatório para dias típicos de alta e baixa vazão por ano, representando, respectivamente, os períodos chuvoso e seco. É notório que nos dias de alta vazão tem-se um reservatório mais homogêneo, com um comportamento se aproximando do modelo simplificado de mistura completa. Tal condição também foi observada por Dantas *et al.* (2011), com a desestratificação da coluna d'água no período chuvoso, e por Lemos (2015), com a verificação de alterações na hidrodinâmica de um reservatório no semiárido brasileiro com mudanças na vazão de entrada do reservatório.

Ao ser analisado o intervalo de baixa vazão, o TR já se comporta de forma diferente, com valores bem heterogêneos no reservatório, variando entre 8 e 80 dias. Os máximos são observados nas zonas mortas, localizadas no fundo do lago, e tais resultados diminuem ao chegarem próximos à superfície. Bouvy *et al.* (1999) e Laspidou *et al.* (2017) discutem que essa situação é favorável para a formação de florações de cianobactérias, as quais se desenvolvem preferencialmente em ambientes estáveis, o que contribui para o transtorno na qualidade da água do ASA.

Ao serem avaliados os resultados, conclui-se a possibilidade dessa estratificação do TR acontecer em decorrência do gradiente de densidade do reservatório. Entretanto, ressalta-se a necessidade de serem realizados estudos que avaliem diferentes parâmetros

conjuntamente para explicar este fenômeno.

Em estudo realizado em um lago urbano chinês por Li-Kun *et al.* (2017) foi verificado um aumento na concentração de parâmetros associados à eutrofização no verão do ano modelado, podendo estar relacionados ao aumento no TR do reservatório. Ainda nesse contexto, Jones e Elliott (2007) relatam mudanças nas florações de cianobactérias apenas com alterações no tempo de residência de um pequeno lago.

É interessante observar que os anos notadamente com menores precipitações registradas possuem uma heterogeneidade no TR ao longo da coluna d'água já no período teoricamente úmido. Essa condição é claramente avaliada no ano de 2013, o mais seco da série em estudo.

Figura 23 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2009

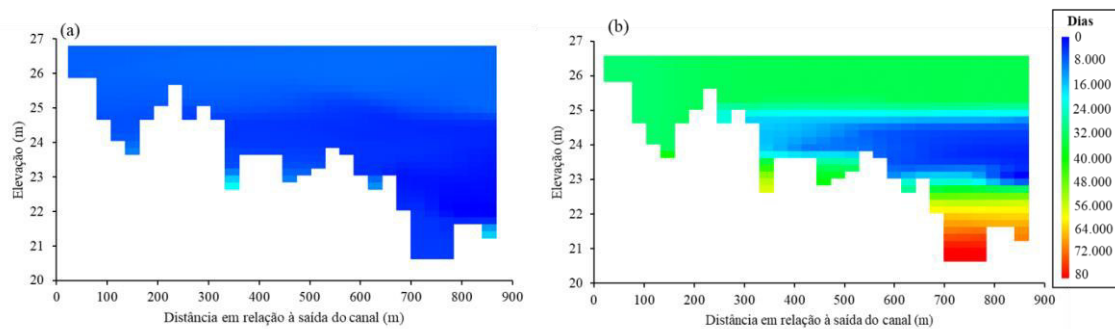


Figura 24 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2010

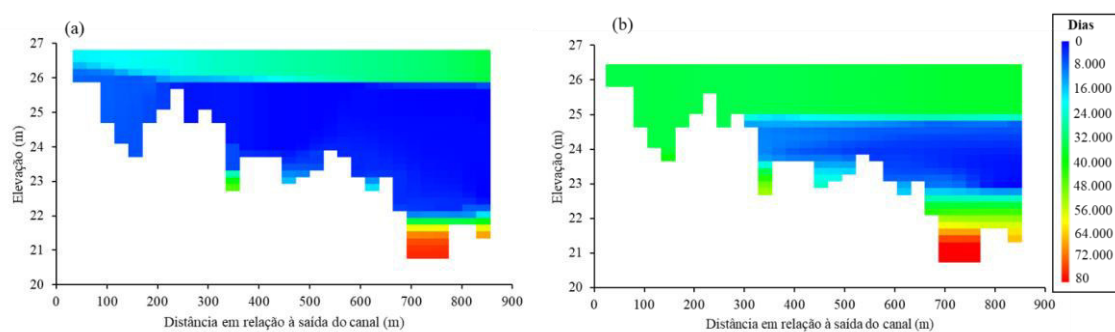


Figura 25 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2011

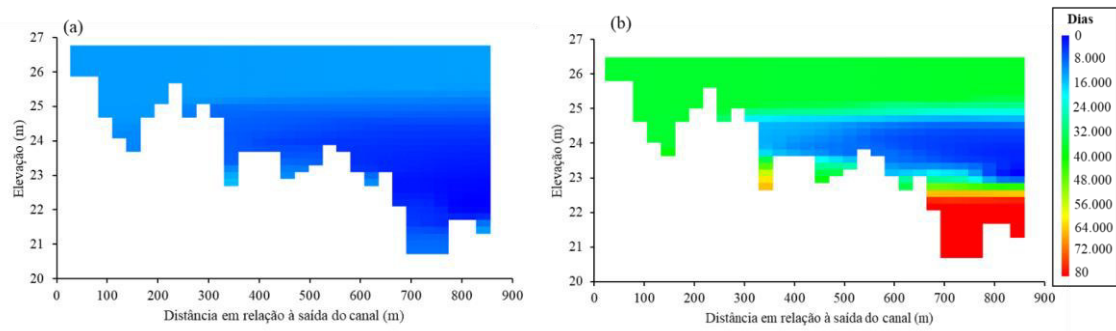


Figura 26 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2012

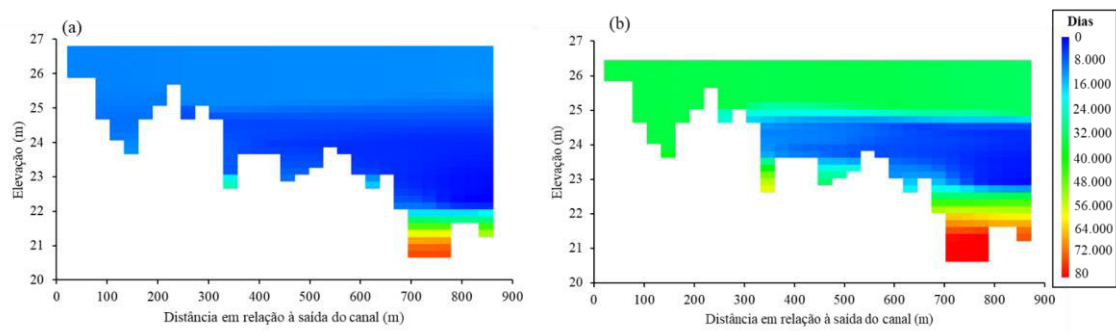


Figura 27 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2013

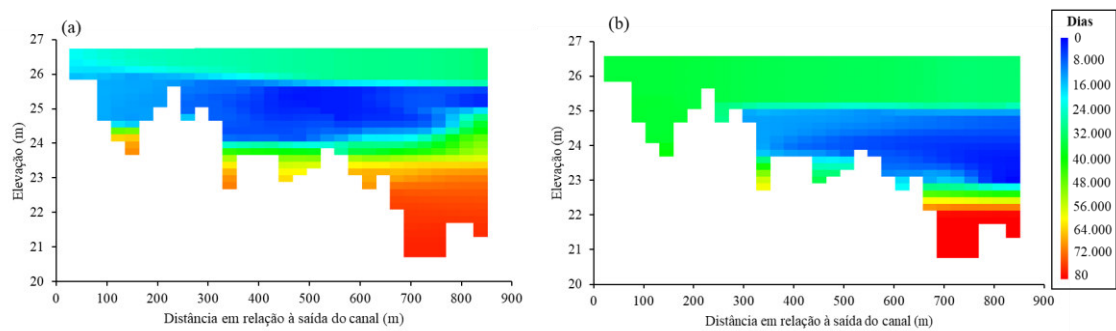


Figura 28 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2014

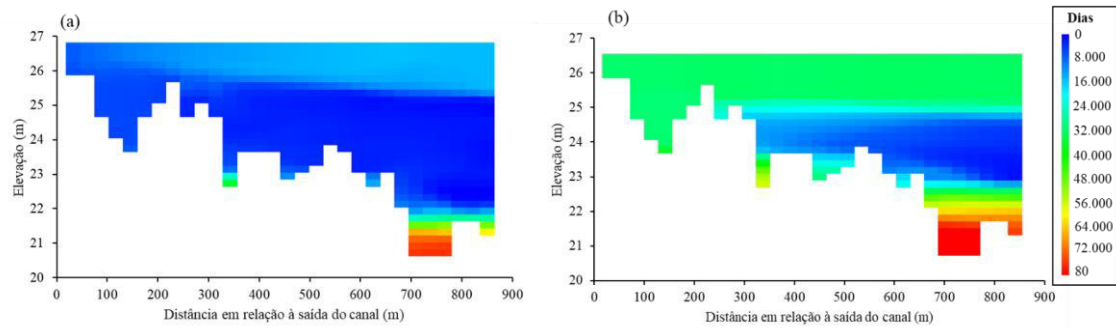


Figura 29 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2015

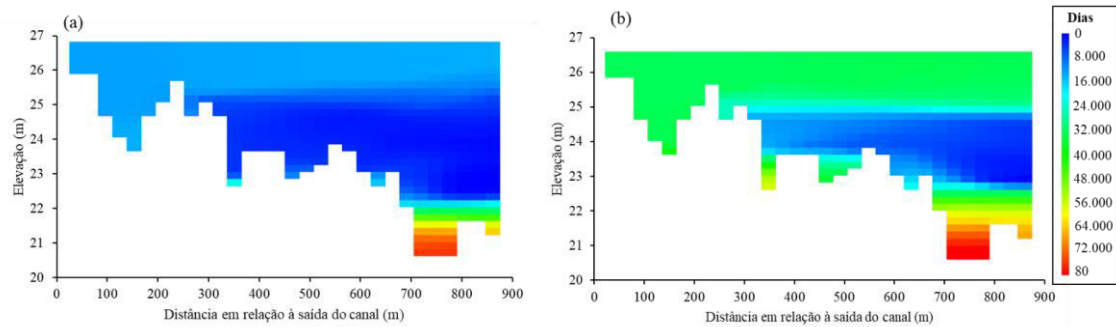


Figura 30 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2016

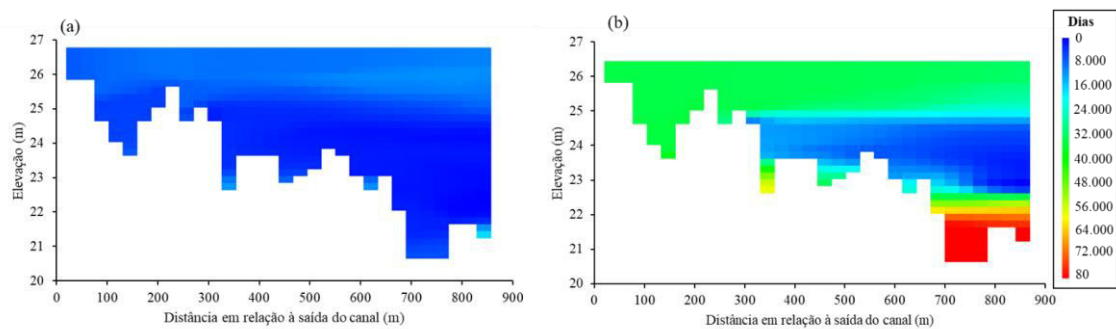


Figura 31 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2017

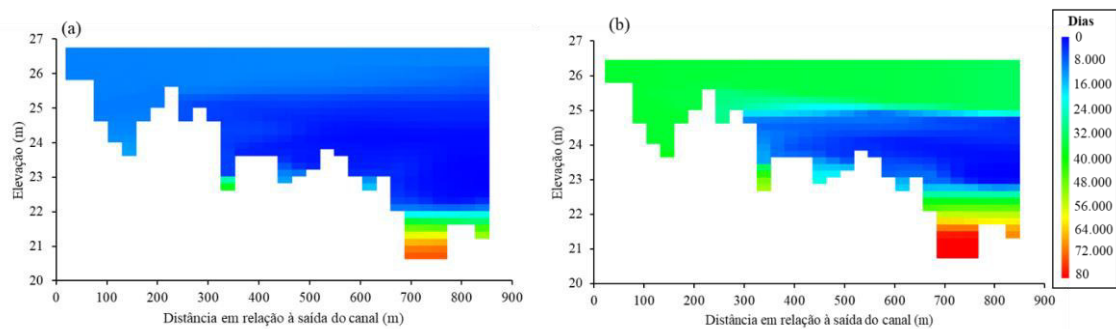
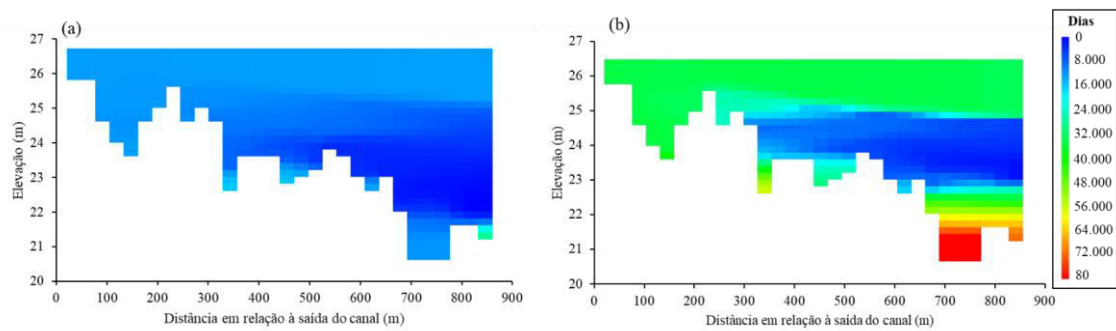


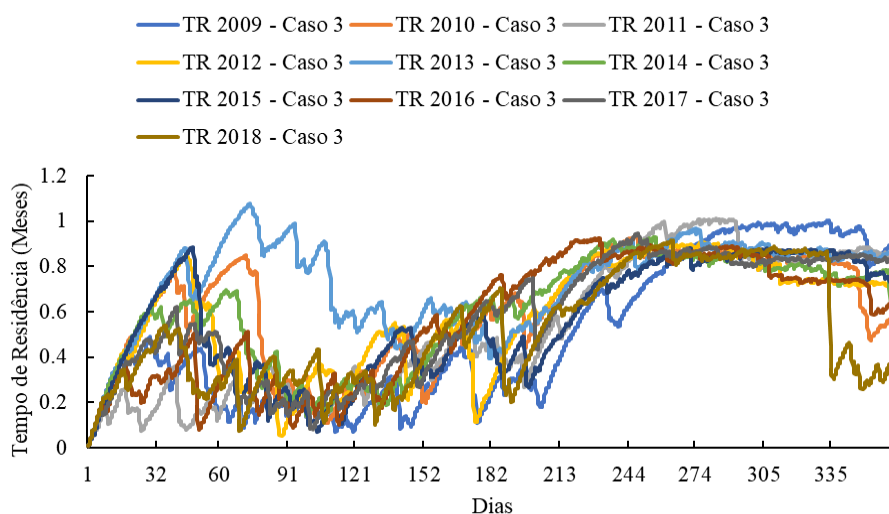
Figura 32 – Comparativo entre dias típicos dos períodos (a) chuvoso e (b) seco para o ano de 2018



O Gráfico 11 apresenta o comparativo das tendências intra-anuais do período avaliado, mostrando que, ainda que ocorram variações interanuais, 100% da série segue a tendência esperada, com valores menores de TR para o período chuvoso e uma ascendência com a diminuição das precipitações, com valores maiores entre 2 e 3 vezes do período chuvoso para o seco, conforme previamente avaliado e melhor destacado no Gráfico 12. Tal resultado está conforme o esperado, sabendo-se que o TR é função inversa da vazão (CHAPRA, 1997) e, portanto, da precipitação.

Toné (2016) avalia o coeficiente de decaimento do fósforo em regiões semiáridas comparativamente a este em regiões tropicais e temperadas, com seu cálculo realizado a partir do tempo de residência dos reservatórios analisados. Concluiu-se que o decaimento desse nutriente no semiárido brasileiro é, respectivamente, duas e quatro vezes maior que o mesmo nas regiões tropicais e temperadas. Este estudo evidencia a importância do estudo do tempo de residência dos corpos hídricos e sua variabilidade de acordo com as características hidrometeorológicas de cada região, em especial quando são analisados reservatórios como o ASA, o qual apresenta notórias variações sazonais na qualidade da água.

Gráfico 11 – Comparativo intra e interanual do TR entre 2009 e 2018



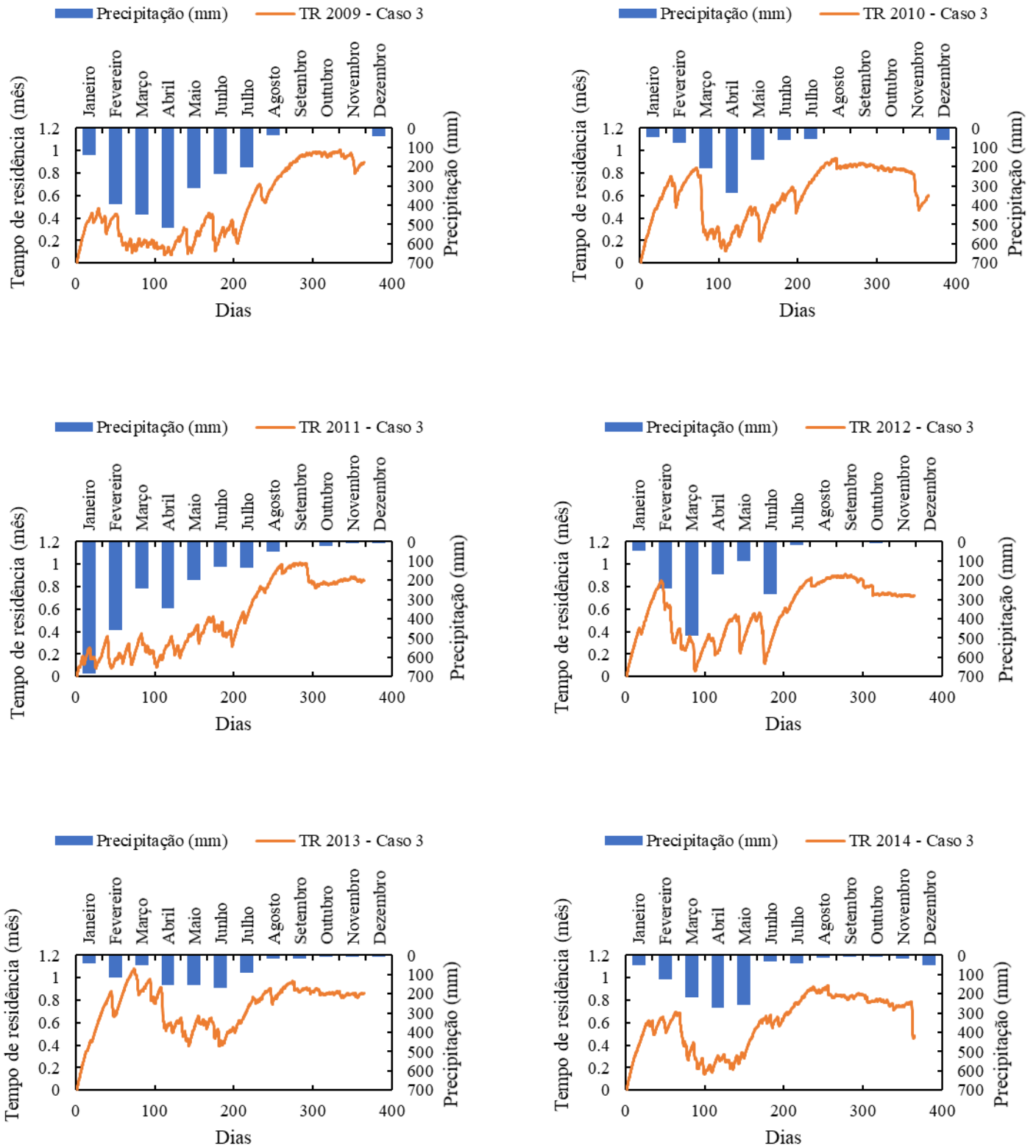
Ao ser avaliado o Gráfico 12, pode ser observado que os anos da série com precipitações homogêneas, como 2009, possuem tempos de residência hidráulica menos discrepantes, enquanto anos como 2012, em que ocorreram grandes variações nas chuvas de um mês para o outro, possuem tempos de residência com picos mais acentuados.

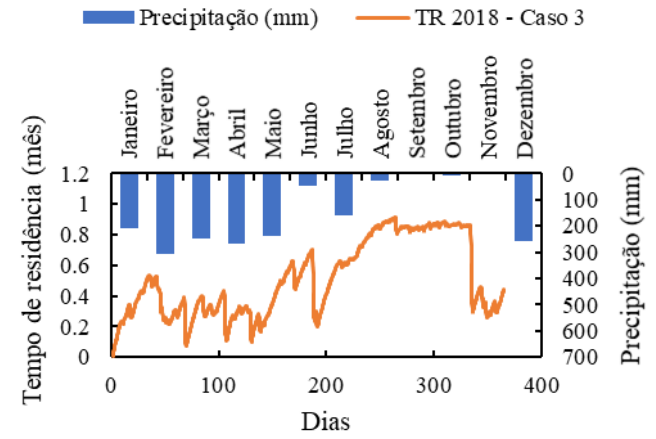
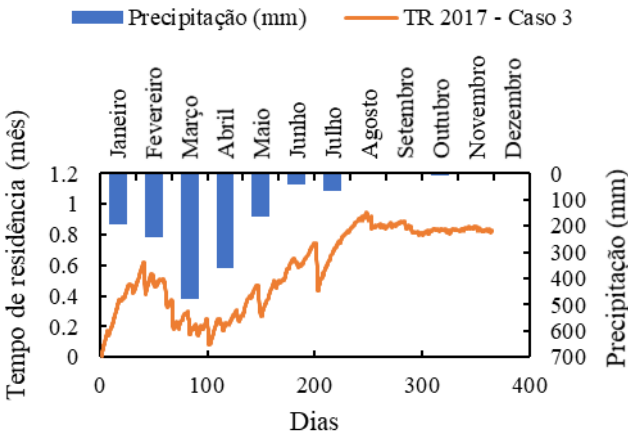
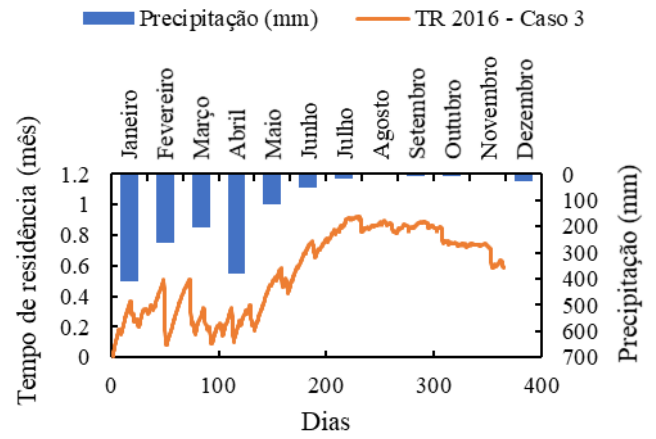
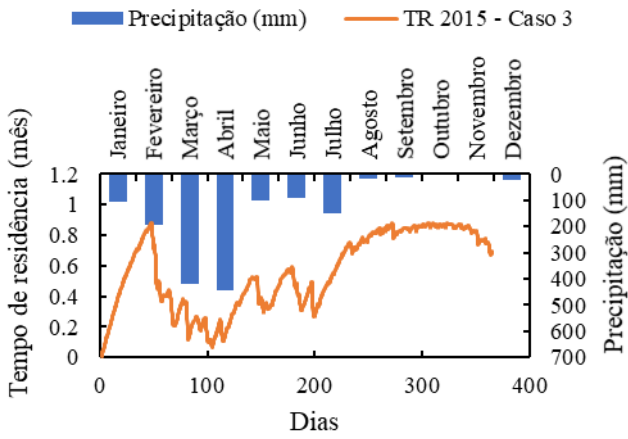
É interessante analisar comparativamente a variabilidade dos dados com o Gráfico 10. É notório que, para o ano úmido, são tidos dados mais consistentes, sem outliers e com uma menor espacialidade dos valores, especialmente no período chuvoso, em que o intervalo entre quartis varia um máximo de seis dias (0,2 mês). Já quando é observado este mesmo período para o ano seco, o intervalo entre quartis varia um máximo de 30 dias.

A importância das ações antrópicas na dinâmica de um corpo hídrico é evidenciada por Laspidou *et al.* (2017), ao ser analisado um lago raso no Mediterrâneo. Neste estudo de caso, por não existir fluxo de saída do lago e, em épocas de secas, também ser pequeno o fluxo afluente, o TR do reservatório estudado tende ao infinito, sabendo-se que este é inversamente proporcional à vazão. Este cenário confirma a coerência dos resultados obtidos para o ASA, o qual, embora tenha uma vazão de saída controlada, em períodos de seca possui uma queda notória na sua afluência, causando um aumento considerável em seu TR.

Birch e McCaskie (1999) relatam a diferente dinâmica dos lagos urbanos, como o ASA, e as dificuldades para estes serem geridos, tendo em vista o maior contato humano com essa categoria de corpos hídricos. Tal cenário pode ser observado para o ASA, sabendo-se da constante afluência de esgotos advindos de ligações clandestinas nas galerias de drenagem que levam ao açude (Araújo, 2016).

Gráfico 12 – Comparativo intra-anual do TR e das precipitações para o período avaliado (2009-2018)

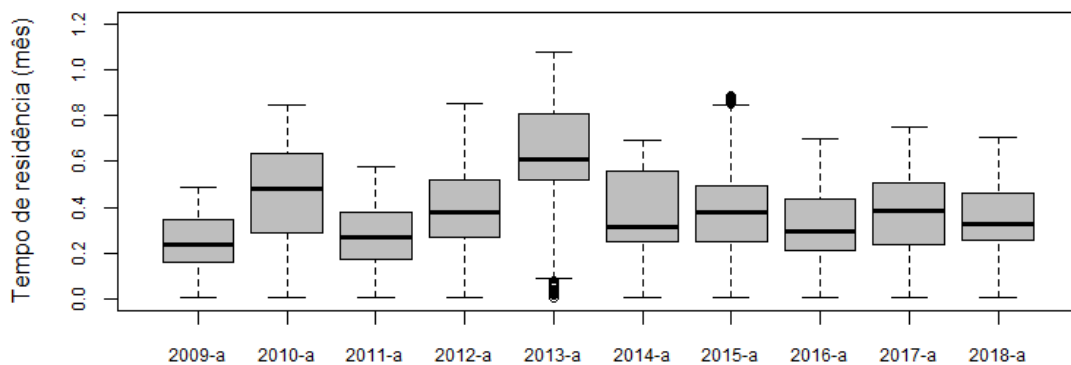




Os Gráficos 13 e 14 ilustram a influência da sazonalidade no TR dos anos avaliados, com um comparativo para o período chuvoso e seco, respectivamente. Conforme previamente discutido, observa-se uma maior variação dos dados entre os anos para o período chuvoso, com um aumento gradual no TR entre 2011 e 2013, sabendo-se, pelo Gráfico 12, que as precipitações foram decrescendo com o passar destes anos.

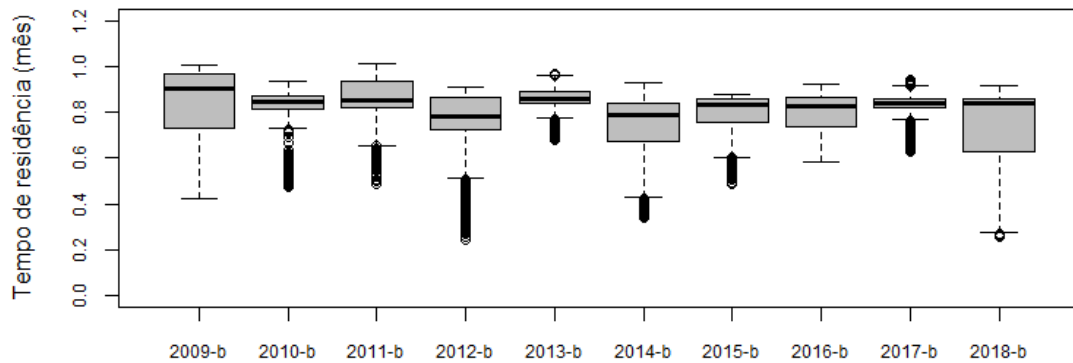
Quando é avaliado o Gráfico 12 em comparação com o Gráfico 13, é evidente a resposta do TR em razão da ocorrência maior ou menor de precipitações. Lemos (2015) corrobora esse resultado ao afirmar o notório impacto das condições meteorológicas nas forçantes hidrodinâmicas de um reservatório no semiárido brasileiro. Tal tendência é notada de forma clara ao ser analisado o período entre 2009 e 2013, já que em 2009 foi registrada uma precipitação bem acima da média, com um TR menor; em 2010 as chuvas já foram mais escassas, com um TR notadamente maior e com alta variabilidade; em 2011 foram registradas maiores precipitações, ainda que menos expressivas que no ano de 2009, com menores TR, e em 2012 e 2013 foram tidas precipitações bem abaixo da média, com uma reflexão direta observada no TR, o qual aumentou expressivamente. Os anos entre 2014 e 2018, ainda que com baixa pluviosidade, tiveram registros de chuva, ocorrendo assim uma estabilização dos TR para tal período.

Gráfico 13 – Comparativo interanual do TR para o período chuvoso dos anos 2009 a 2018



O Gráfico 14 aponta uma baixa variabilidade interanual para o TR nos períodos secos, tendo em vista que neste período não há ocorrência expressiva de chuvas, pois, ainda que seja avaliado um ano úmido, suas precipitações se concentram no primeiro semestre do ano, conforme previamente discutido.

Gráfico 14 – Comparativo interanual do TR para o período seco dos anos 2009 a 2018

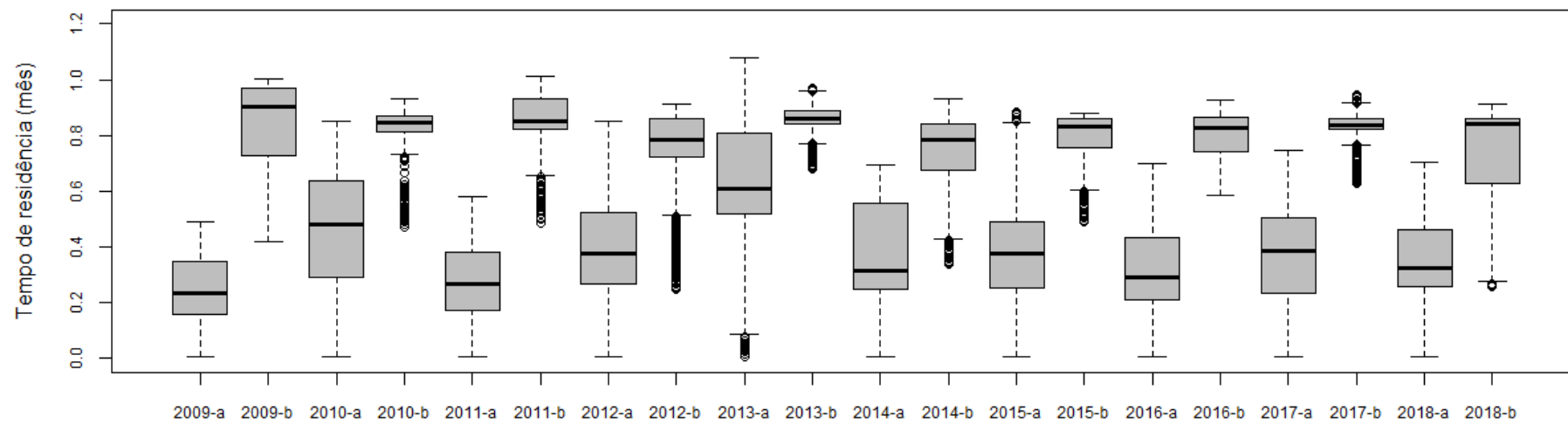


O Gráfico 15 aponta esquematicamente o comparativo interanual conjunto dos períodos chuvoso e seco para o intervalo em estudo. Com essa disposição é possível notar a clara discrepância entre o TR nos meses secos e úmidos, além de uma variabilidade mais discreta entre os anos, a qual é notada de forma clara apenas no período de seca, em que as precipitações foram quase nulas, confirmando a ideia de que a variabilidade sazonal é consideravelmente mais importante que a interanual.

5.4 Manual para análise de resultados do CE-QUAL-W2

Foi desenvolvido um manual para auxiliar a exportação e análise de dados modelados utilizando o CE-QUAL-W2, apresentado no Apêndice 1.

Gráfico 15 – Comparativo interanual entre 2009 e 2018 para os períodos a – úmido e b – seco



6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi realizada uma avaliação geral da meteorologia da região em estudo, sendo bem destacada a variabilidade sazonal das precipitações, com chuvas concentradas no primeiro semestre do ano e escassas no segundo, além da evaporação com tendências contrárias àquelas observadas para a precipitação, conforme o esperado. Os resultados obtidos para temperatura, insolação, nebulosidade e velocidade dos ventos também foram condizentes com o esperado para a região.

Foram determinadas as vazões afluentes e efluentes para o ASA, a partir de modelo chuva-vazão desenvolvido para a região, e realizada a modelagem hidrodinâmica para o período desejado utilizando o modelo 2D CE-QUAL-W2. Observou-se uma leve estratificação ao final do ano para o TR, visto que neste período foram notados máximos de até 80 dias nas zonas mortas e até oito dias na região central do ASA, enquanto no início do ano, caracterizado historicamente por ter maiores precipitações, o modelo apresentou o reservatório homogêneo, com TR médio de 10 dias.

Concluiu-se, a partir da análise da influência da evaporação no TR, que o maior impacto desta se deu com a modelagem utilizando os coeficientes da equação do vento calibrados para a região em estudo e no período úmido, notadamente no ano de 2013. Ao ser avaliada a influência da sazonalidade em comparação com a variabilidade interanual para os anos 2009 a 2018, concluiu-se que as variações sazonais são mais importantes que as interanuais, tendo em vista o aumento do TR entre 2 e 3 vezes do período chuvoso para o seco, contraposto a uma mudança bem menos expressiva entre os anos, a qual foi observada apenas para o intervalo chuvoso entre os anos 2012 e 2014, período da seca da região. Por fim, foi desenvolvido um manual auxiliar para realização da análise dos dados gerados por meio da modelagem utilizando o CE-QUAL-W2.

Para trabalhos futuros, indica-se a modelagem contínua para o período desejado, de forma a determinar a variabilidade interanual mais precisamente, a fim de obter uma análise de dados sistemática. Além disso, pode ser realizada a modelagem de parâmetros de qualidade da água e a avaliação de diferentes cenários, verificando, por exemplo, o enquadramento do corpo hídrico na legislação vigente e testando a sensibilidade dos diversos parâmetros disponíveis no modelo, de forma a analisar o sistema de forma mais detalhada.

REFERÊNCIAS

ALTHOFF, D.; RODRIGUES, L. N.; DA SILVA, D. D.; BAZAME, H. C. Improving methods for estimating small reservoir evaporation in the Brazilian Savanna. **Agricultural Water Management**, v. 216, p. 105-112, 2019.

ARAÚJO, G. M.; LIMA NETO, I. E.; BECKER, H. Estado trófico em reservatório urbano raso – estudo de caso; açude Santo Anastácio, Fortaleza (CE). **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 9, n. 2, p. 212 – 228, 2016.

ARAÚJO, Germário Marcos. **Análise e modelagem integrada da qualidade da água em um sistema urbano canal-reservatório eutrofizado, localizado em Fortaleza/CE**. 2016. Tese (Doutorado em Saneamento Ambiental) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

AWANGE, J. L.; MPELASOKA, F.; GONCALVES, R. M. When every drop counts: Analysis of droughts in Brazil for the 1901-2013 period. **Science of The Total Environment**, v. 566-567, p. 1472-1488, 2016.

BARROS, M. U. G., WILSON, A. E., LEITÃO, J. I. R., PEREIRA, S. P., BULEY, R. P., FERNANDEZ-FIGUEROA, E. G., CAPELO-NETO, J. Environmental factors associated with toxic cyanobacterial blooms across 20 drinking water reservoirs in a semi-arid region of Brazil. **Harmful Algae**, v. 86, p. 128-137, 2019.

BIRCH, S., MCCASKIE, J. Shallow urban lakes: a challenge for lake management. **Hydrobiologia**, p. 365-377, 1999.

BOUVY, M., MOLICA, R., DE OLIVEIRA, S., MARINHO, M., BEKER, B. Dynamics of a toxic cyanobacterial bloom (*Cylindrospermopsis raciborskii*) in a shallow reservoir in the semi-arid region of northeast Brazil. **Aquatic Microbial Ecology**, v. 20, p. 285-297, 1999.

CALMON, A. P. S., SOUZA, J. C., DOS REIS, J. A. T., MENDONÇA, A. S. F. Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2016.

CAVALCANTI, Iracema Fonseca de Albuquerque; FERREIRA, N. J.; DA SILVA, M. G. A.; DIAS, M. A. F. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CHAPRA, S. C. **Surface water quality modeling**. Waveland Press, 1997. 844 p.

CHIGOR, V. N., UMOH, V. J., OKUOFY, C. A., AMEH, J. B., IGBINOSA, E. O., OKOH, A. I. Water quality assessment: surface water sources used for drinking and irrigation in Zaria, Nigeria are public health hazard. **Environ Monit Assess**, v. 184, p. 3389-3400, 2012.

COLE, T.M.; WELLS, S. A. (2017) **CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydro-dynamic and water quality model**, version 4.1, Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR.

COLLISCHONN, Walter, DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para Engenharias e Ciências Ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013.

COUTINHO, Marlon Marques. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. 2015. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

COVENEY, M. F., LOWE, E. F., BATTOE, L. E., MARZOLF, E. R., CONROW, R. Response of a eutrophic, shallow subtropical lake to reduced nutrient loading. **Freshwater Biology**, v. 50, p. 1718-1730, 2005.

DANTAS, E. W., MOURA, A. N., BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. do C. Cyanobacterial blooms in stratified and destratified eutrophic reservoirs in semi-arid region of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 83, n. 4, p. 1327-1338, 2011.

DE SOUZA FILHO, Francisco de Assis; CAMPOS, J. N. B.; DE AQUINO, S. H. S.

Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2013.

DE SOUZA FILHO, Francisco de Assis; SILVEIRA, C. S. **Uso da informação climática em múltiplas escalas temporais para o planejamento do setor hidroelétrico brasileiro.** Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2015.

DEBELE, B., SRINIVASAN, R., PARLANGE, J. -Y. Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins. **Environ Model Assess**, v. 13, p. 135-153, 2008.

DELIMAN, P. N., GERALD, J. A. Application of the Two-Dimensional Hydrothermal and Water Quality Model, CE-QUAL-W2, to the Chesapeake Bay – Conowingo Reservoir. **Lake and Reservoir Management**, v. 18, n. 1, p. 10-19, 2002.

DEUS, R., BRITO, D., MATEUS, M., KENOV, I., FORNARO, A., NEVES, R., ALVES, C. N. Impact evaluation of a pisciculture in the Tucurí reservoir (Pará, Brazil) using a two-dimensional water quality model. **Journal of Hydrology**, v. 487, p. 1-12, 2013.

DINGMAN, S. L. Physical Hydrology. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002. 646p

DUNALSKA, J. A., GROCHOWSKA, J., WISNIEWSKI, G., NAPIORKOWSKA-KRZEBIETKE, A. Can we restore badly degraded urban lakes? **Ecological Engineering**, v. 82, p. 432-441, 2015.

FANG, H. -W., WANG, G. -Q. Three-dimensional mathematical model of suspended-sediment transport. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 126, p. 578-592, 2000.

FENG, T., WANG, C., WANG, P., QIAN, J., WANG, X. How physiological and physical processes contribute to the phenology of cyanobacterial blooms in large shallow lakes: A new Euler-Lagrangian coupled model. **Water Research**, v. 140, p. 34-43, 2018.

FERREIRA, D. M., FERNANDES, C. V. S., KAVISKI, E. Curvas de permanência de qualidade da água como subsídio para o enquadramento de corpos d'água a partir de modelagem matemática em regime não permanente. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 479-492, 2016.

FERREIRA, D. M., FERNANDES, C. V. S., KAVISKI, E., FONTANE, D. Water quality modelling under unsteady state analysis: Strategies for planning and management. **Journal of Environmental Management**, v. 239, p. 150-158, 2019.

FERREIRA, V. G.; MONTECINO, H. C.; NDEHEDEHE, C. E.; HECK, B.; GONG, Z.; DE FREITAS, S. R. C.; WESTERHAUS, M. Space-based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 644, p. 256-273, 2018.

HASSAN, A.; ISMAIL, S. S.; ELMOUSTAFA, A.; KHALAF, S. Evaluating evaporation rate from high Aswan Dam Reservoir using RS and GIS techniques. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 21, p. 285-293, 2017.

HUANG, L., FANG, H., FAZELI, M., CHEN, Y., HE, G., CHEN, D. Mobility of phosphorus induced by sediment resuspension in the Three Gorges Reservoir by flume experiment. **Chemosphere**, v. 134, p. 374-379, 2015b.

HUANG, L., FANG, H., REIBLE, D. Mathematical model for interactions and transport of phosphorus and sediment in the Three Gorges Reservoir. **Water Research**, v. 85, p. 393-403, 2015a.

HUANG, Y. T., LIU, L. A hybrid perturbation and Morris approach for identifying sensitive parameters in surface water quality models. **Journal of Environmental Informatics**, v. 12, n. 2, p. 150-159, 2008.

JONES, I. D., ELLIOTT, J. A. Modelling the effects of changing retention time on abundance and composition of phytoplankton species in a small lake. **Freshwater Biology**, v. 52, n. 6, p. 988-997, 2007.

JONES, I. D., ELLIOTT, J. A. Modelling the effects of changing retention time on abundance and composition of phytoplankton species in a small lake. **Freshwater Biology**, v. 52, p. 988-997, 2007.

KIM, J. -S., JAIN, S., LEE, J. -H., CHEN, H., PARK, S. -Y. Quantitative vulnerability assessment of water quality to extreme drought in a changing climate. **Ecological Indicators**, v. 103, p. 688-697, 2019.

KOIV, T., NÖGES, T., LAAS, A. Phosphorus retention as a function of external loading, hydraulic turnover time, area and relative depth in 54 lakes and reservoirs. **Hydrobiologia**, v. 660, p. 105-115, 2011.

KOUSKY, V. E. Frontal influences on northeast Brazil. **Monthly Weather Review**, v. 107, p. 1140-1153, 1979.

KURUP, R. G., HAMILTON, D. P., PHILIPS, R. L. Comparison of two 2-dimensional, laterally averaged hydrodynamic model applications to the Swan River Estuary. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 51, p. 627-638, 2000.

LASPIDOU, C., KOFINAS, D., MELLIOS, N., LATINOPOULOS, D., PAPADIMITRIOU, T. Investigation of factors affecting the trophic state of a shallow Mediterranean reconstructed lake. **Ecological Engineering**, v. 103, p. 154-163, 2017.

LEMOS, Wictor Edney Dajtenko. **Previsão climática sazonal do regime térmico e hidrodinâmico de reservatório**. 2015. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza, 2015.

LI, J., YANG, W., LI, W., MU, L., JIN, Z. Coupled hydrodynamic and water quality simulation of algal bloom in the Three Gorges Reservoir, China. **Ecological Engineering**, v. 119, p. 97-108, 2018.

LONDE, L. R., NOVO, E. M. L. M., BARBOSA, C., ARAUJO, C. A. S. Water residence time affecting phytoplankton blooms: study case in Ibitinga Reservoirs (São Paulo, Brazil) using Landsat/TM images. **Braz. J. Bio.**, v. 76, n. 3, p. 664-672, 2016.

LYUBIMOVA, T., LEPIKHIN, A., PARSHAKOVA, Y., LYAKHIN, Y., TIUNOV, A. The modelling of the formation of technogenic thermal pollution zones in large reservoirs. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 126, p. 342-352, 2018.

MARINHO FILHO, G. M., ANDRADE, R. da S., ZUKOWSKI JUNIOR, J. C., MAGALHÃES FILHO, L. N. L. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MARTINS, Eduardo Sávio P. R.; DE NYS, E.; MOLEJÓN, C.; BIAZETO, B.; SILVA, R. F. V.; ENGLE, N. **Monitor de secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**. Brasília: BIRD – Banco Mundial, 2015.

OSTFELD, A., SALOMONS, S. A hybrid genetic-instance based learning algorithm for CE-QUAL-W2 calibration. **Journal of Hydrology**, v. 310, p. 122-142, 2005.

PACHECO, C. H. A., DE CEBALLOS, B. S. O., LIMA NETO, I. E. Uma análise de regressão para determinação do nível de eutrofização de um reservatório do semiárido brasileiro. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, v. 9, n. 2, p. 274-289, 2016.

ROCHA, S. M. G., LIMA NETO, I. E. Simulação da concentração de clorofila a em um lago urbano usando o CE-QUAL-W2. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 14., 2018, Maceió. **Anais XIV SRHNE**. Maceió: ABRHidro, 2018. Disponível em: < <http://anais.abrhidro.org.br/works/4416>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

SADEGHIAN, A., CHAPRA, S. C., HUDSON, J., WHEATER, H., LINDENSCHMIDT, K. - R. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a/algal biomass ratios. **Environmental Modelling & Software**, v. 101, p. 73-85, 2018.

SEELEN, L. M. S., FLAIM, G., JENNINGS, E., DAMIS, L. N. de S. Saving water for the future: Public awareness of water usage and water quality. **Journal of Environmental Management**, v. 242, p. 246-257, 2019.

SHI, W.; HIGGINS, R. W.; YAROSH, E.; KOUSKY, V. E. The annual cycle and variability of precipitation in Brazil. NCEP/Climate Prediction Center ATLAS nº 9, 2000. Disponível em: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/research_papers/ncep_cpc_atlas/9/toc.html> Acesso em: 6 ago. 2019.

SONG, Y., ZHANG, L. -L., LI, J., CHEN, M., ZHANG, Y. -W. Mechanism of the influence of hydrodynamics on *Microcystis aeruginosa*, a dominant bloom species in reservoirs. **Science of the Total Environment**, v. 636, p. 230-239, 2018.

TEIXEIRA, E. C., CHACALTANA, J. T. A., SIQUEIRA, R. do N., PACHECO, C. G. Proposta de calibração de modelos hidrodinâmicos aplicados a unidades de contato utilizando uma função de distribuição de tempos de residência. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 12, n. 1, p. 79-89, 2007.

TERRY, J. A., SADEGHIAN, A., BAULCH, H. M., CHAPRA, S. C. Challenges of modelling water quality in a shallow prairie lake with seasonal ice cover. **Ecological Modelling**, v. 384, p. 43-52, 2018.

TONÉ, Arthur Jordan de Azevedo. **Análise e modelagem de fósforo em reservatórios localizados em regiões semiáridas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

TSCHEIKNER-GRATL, F., BELLOS, V., SCHELLART, A., MORENO-RODENAS, A., MUTHUSAMY, M., LANGEVELD, J., CLEMENS, F., BENEDETTI, L., RICO-RAMIREZ, M. A., DE CARVALHO, R. F., BREUER, L., SHUCKSMITH, J., HEUVELINK, G. B. M., TAIT, S. Recent insights on uncertainties present in integrated catchment water quality modelling. **Water Research**, v. 150, p. 368-379, 2019.

VASCONCELOS JÚNIOR, Francisco das Chagas. **Pré-estação chuvosa e a estação chuvosa do norte do nordeste brasileiro: aspectos interanuais, intrasazonais e extremos**. 2014.

Tese (Doutorado) – Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

VON SPERLING, M. (2007) **Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios**.

Universidade Federal de Minas Gerais 588 p. – (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.7)

WANG, L. -L., YU, Z. -Z., DAI, H. -C., CAI, Q. -I. Eutrophication model for river type reservoir tributaries and its applications. **Water Science and Engineering**, v. 2, n. 1, p. 16-24, 2009.

WELLS, S. A.; COLE, T. M.; BERGER, C.; ANNEAR, R.; GOULD, S.; BUCHAK, E.; GOODWIN, A. (2017) Appendix A Hydrodynamics and Transport. In Cole, T. M., Wells, S. A. (Eds.), **CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model**, Version 4.1, Portland State University, Portland, A-1-A-5.

WIEGAND, M. C., PIEDRA, J. I. G., de ARAÚJO, J. C. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 415-424, 2016.

WIEGAND, M. C., PIEDRA, J. I. G., DE ARAÚJO, J. C. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brazil). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 415-424, 2016.

WURBS, R. A.; AYALA, R. A. Reservoir evaporation in Texas, USA. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 1-9, 2014.

XU, C., ZHANG, J., BI, X., XU, Z., HE, Y., GIN, K. Y. -H. Developing an integrated 3D-hydrodynamic and emerging contaminant model for assessing water quality in a Yangtze Estuary. **Chemosphere**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2017.08.121.

YANG, Z., XU, P., LIU, D., MA, J., JI, D., CUI, Y. Hydrodynamic mechanisms underlying periodic algal blooms in the tributary bay of a subtropical reservoir. **Ecological Engineering**, v. 120, p. 6-13, 2018.

ZHANG, H.; GORELICK, S. M.; ZIMBA, P. V.; ZHANG, X. A remote sensing method for estimating regional reservoir area and evaporative loss. **Journal of Hydrology**, v. 555, p. 213-227, 2017.

**APÊNDICE A – MANUAL PARA ANÁLISE DE RESULTADOS OBTIDOS COM O
CE-QUAL-W2**

PASSO A PASSO ANÁLISES CE-QUAL-W2

SOFIA MIDAUAR

ANÁLISES

- ESTA ETAPA DEVE SER INICIADA APÓS A SIMULAÇÃO DESEJADA JÁ TER SIDO EFETUADA

- PASSO I:

- ABRIR W2P (ÍCONE VERMELHO)



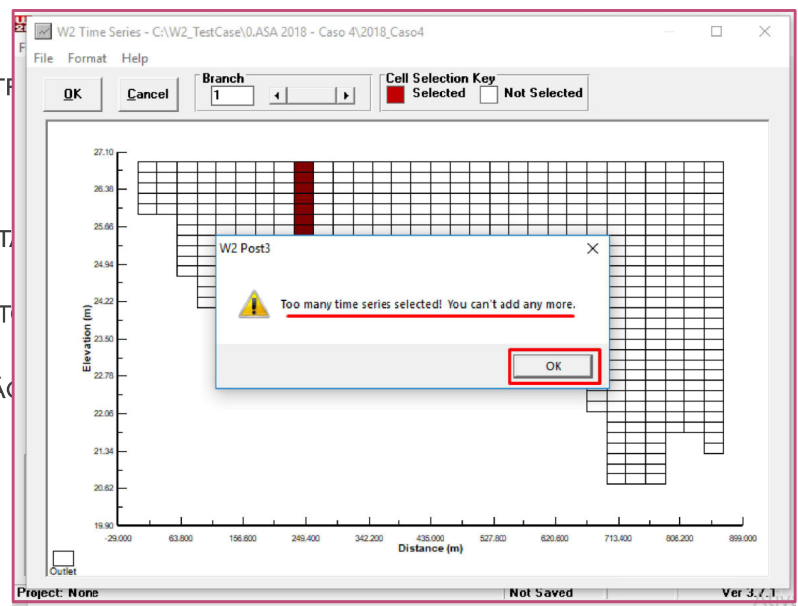
ANÁLISES

- PASSO 2:
 - EXPORTAR A SÉRIE TEMPORAL DO PARÂMETRO DESEJADO PARA O FORMADO “.DAT” (COMPATÍVEL COM O BLOCO DE NOTAS)
- OBSERVAÇÕES
 - O MODELO SÓ PERMITE QUE SEJAM EXPORTADOS NO MÁXIMO 10 ELEMENTOS POR VEZ, ASSIM É IMPORTANTE SEGUIR UMA ORDEM
 - O EXCEL DEVE ESTAR SEPARADO POR PONTO, PARA QUE A IMPORTAÇÃO DOS DADOS DE TEXTO FUNCIONE DA FORMA AQUI DESCRITA
 - AS PLANILHAS SÃO MUITO GRANDES, ENTÃO É IMPORTANTE REALIZAR AS ANÁLISES EM UM COMPUTADOR QUE POSSUA UM BOM PROCESSADOR

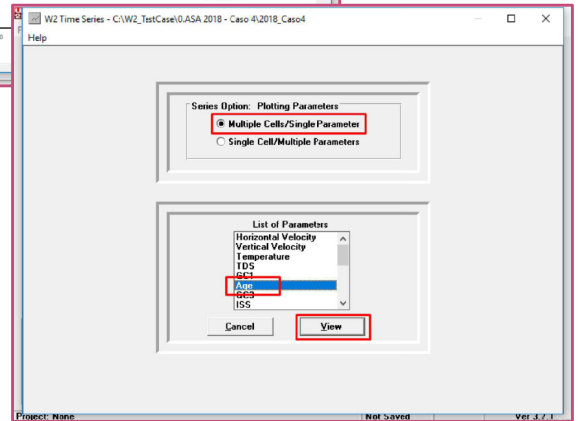
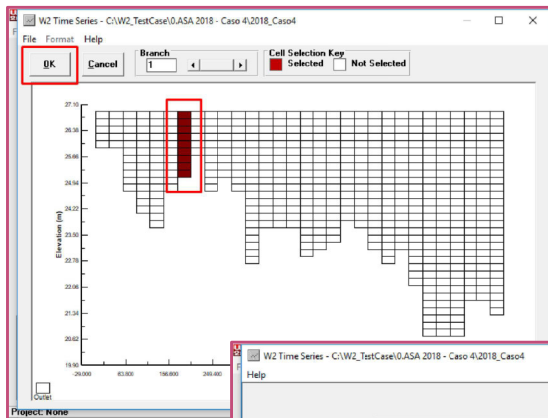
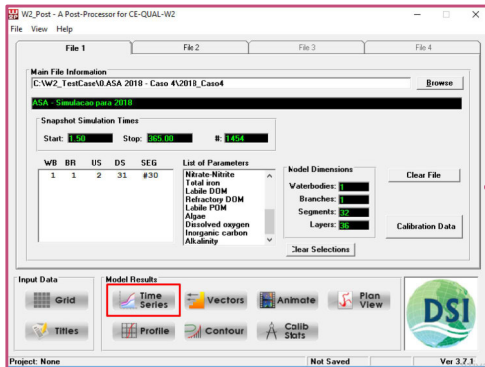
ANÁLISES

- PASSO 2:
 - EXPORTAR A SÉRIE TEMPORAL DO PARÂMETRO DESEJADO PARA O FORMADO “.DAT” (COMPATÍVEL COM O BLOCO DE NOTAS)
- OBSERVAÇÕES
 - O MODELO SÓ PERMITE QUE SEJAM EXPORTADOS NO MÁXIMO 10 ELEMENTOS POR VEZ, ASSIM É IMPORTANTE SEGUIR UMA ORDEM
 - O EXCEL DEVE ESTAR SEPARADO POR PONTO, PARA QUE A IMPORTAÇÃO DOS DADOS DE TEXTO FUNCIONE DA FORMA AQUI DESCRITA
 - AS PLANILHAS SÃO MUITO GRANDES, ENTÃO É IMPORTANTE REALIZAR AS ANÁLISES EM UM COMPUTADOR QUE POSSUA UM BOM PROCESSADOR

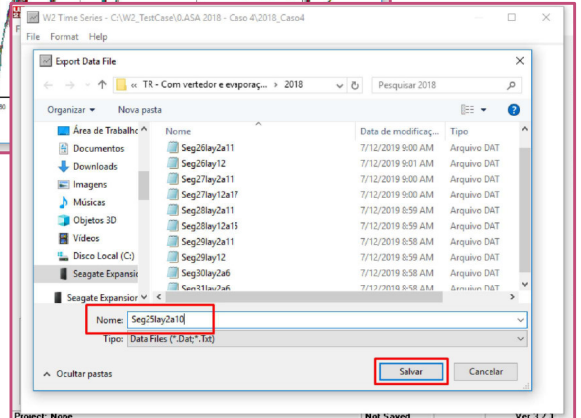
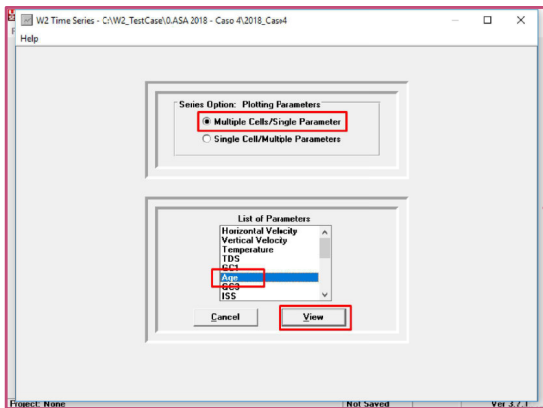
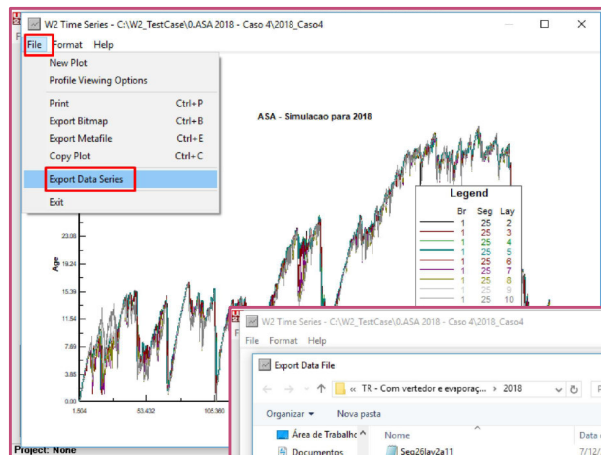
- **AVISO QUANDO SÃO SELECIONADOS MAIS ELEMENTOS QUE O PERMITIDO**



ANÁLISES



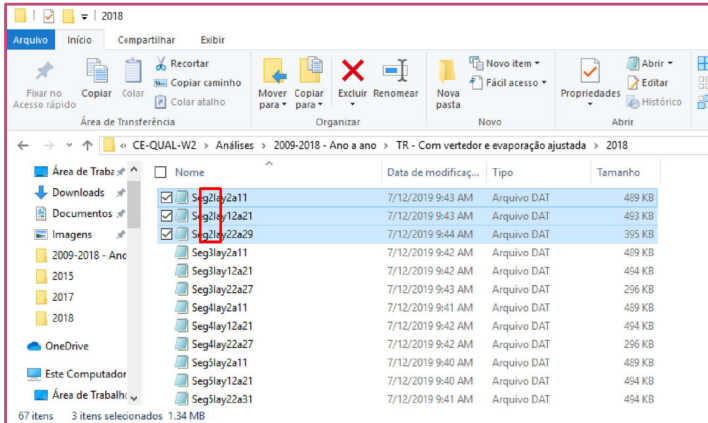
ANÁLISES



ANÁLISES

■ PASSO 3:

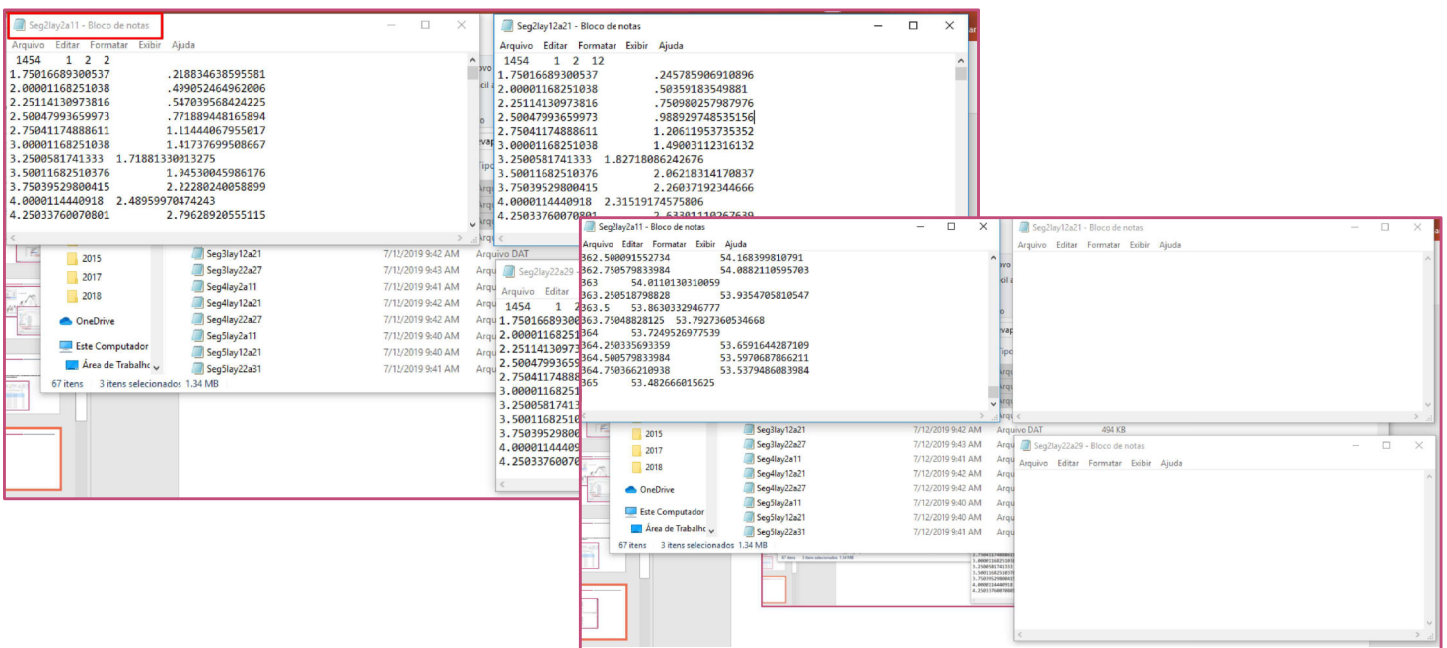
- JUNTAR OS DADOS DE CADA SEGMENTO EM APENAS UM ARQUIVO DE BLOCO DE NOTAS (NO MOMENTO TEM-SE UM MÁXIMO DE 10 CAMADAS DE CADA SEGMENTO POR ARQUIVO, DEVIDO À LIMITAÇÃO DO MODELO).



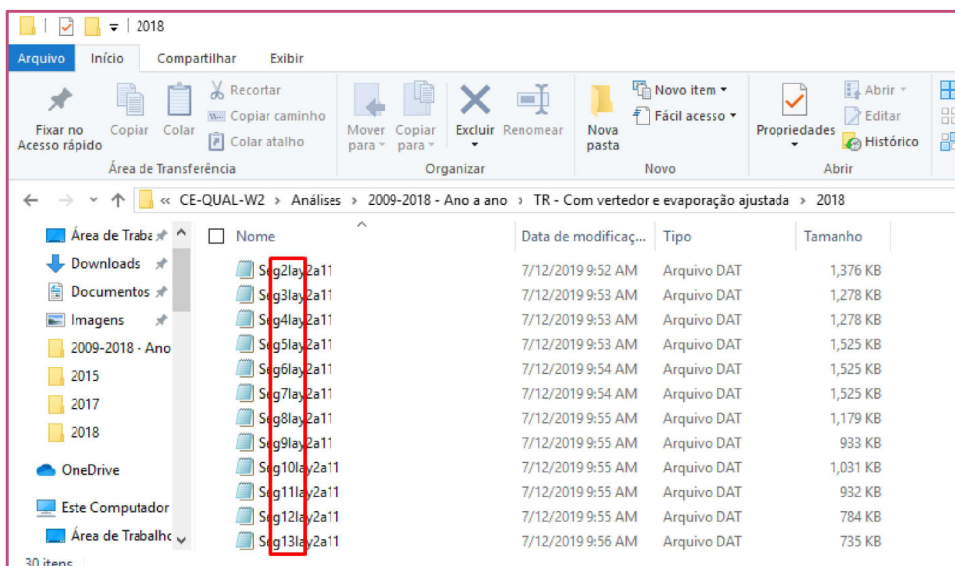
■ COMO OTIMIZAR:

- CTRL + A (PARA SELECIONAR TUDO DO BLOCO DE NOTAS)
- CTRL + X (PARA RECORTAR O QUE FOI SELECIONADO)
- CTRL + V (COLAR OS DADOS NA ORDEM DAS CAMADAS, PARA FACILITAR POSSÍVEIS ANÁLISES DE ESTRATIFICAÇÃO)
- REPETIR ATÉ ESTAREM TODOS EM UM ARQUIVO SÓ, FECHAR E SALVAR
- APAGAR OS ARQUIVOS QUE NÃO POSSUEM MAIS DADOS DA PASTA

ANÁLISES



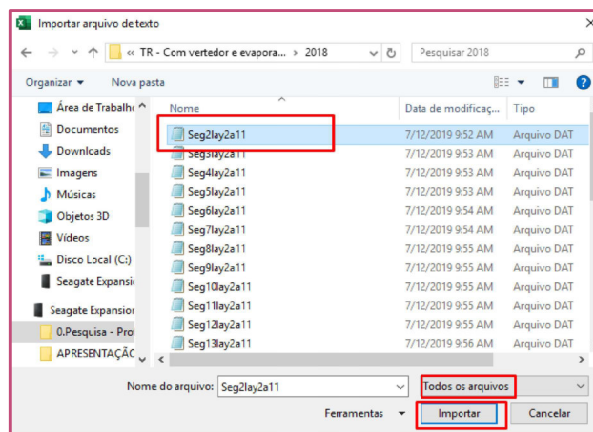
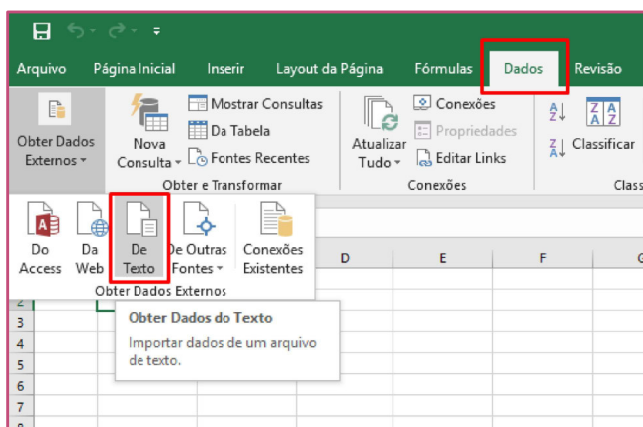
ANÁLISES



- APENAS UM ARQUIVO POR SEGMENTO

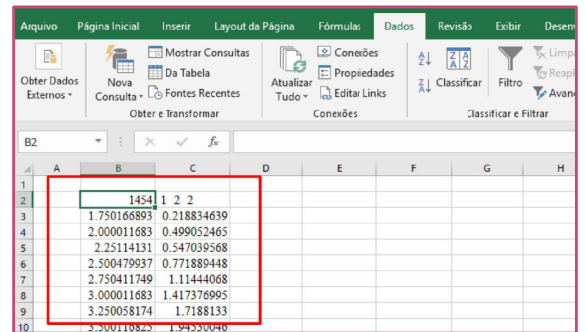
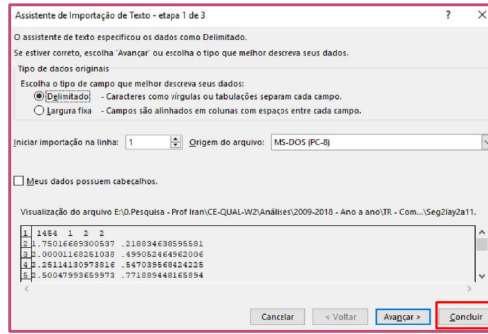
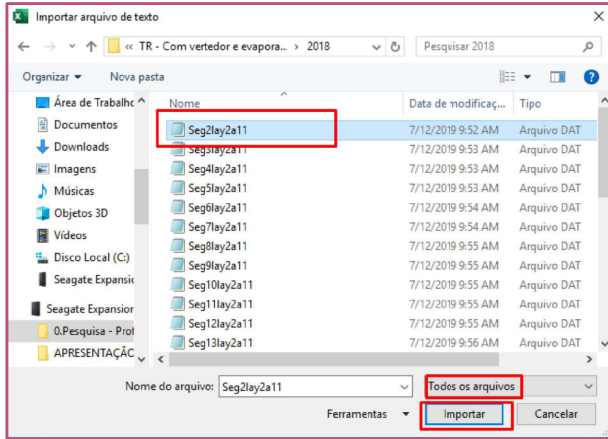
ANÁLISES

- PASSO 4
 - IMPORTAÇÃO DOS DADOS PARA PLANILHA EM EXCEL



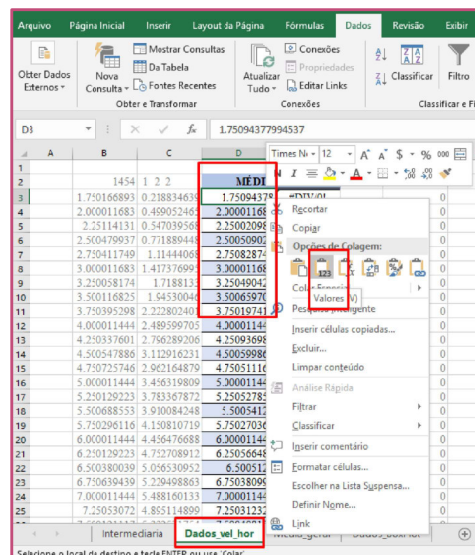
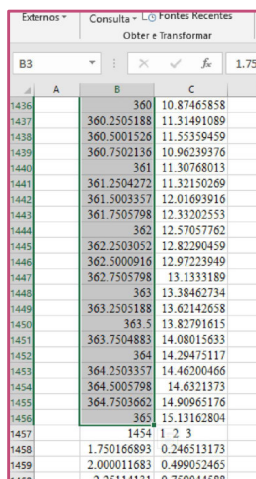
ANÁLISES

- PASSO 4
- IMPORTAÇÃO DOS DADOS PARA PLANILHA EM EXCEL



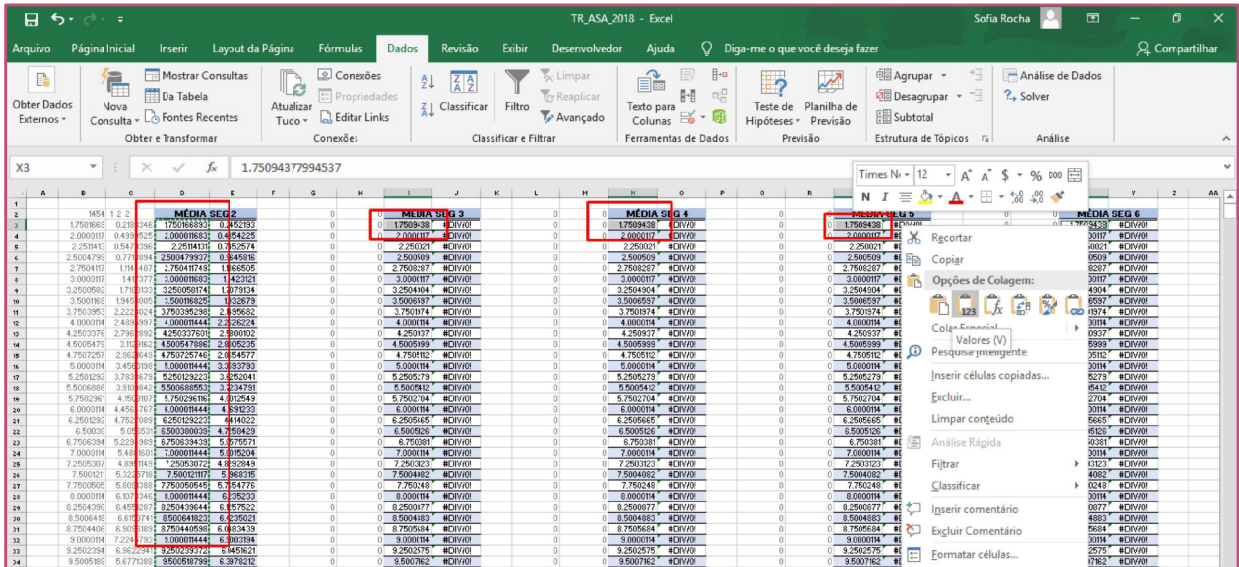
ANÁLISES

- SELECIONAR OS DIAS DAS SIMULAÇÕES E COLAR NA ABA SEGUINTE



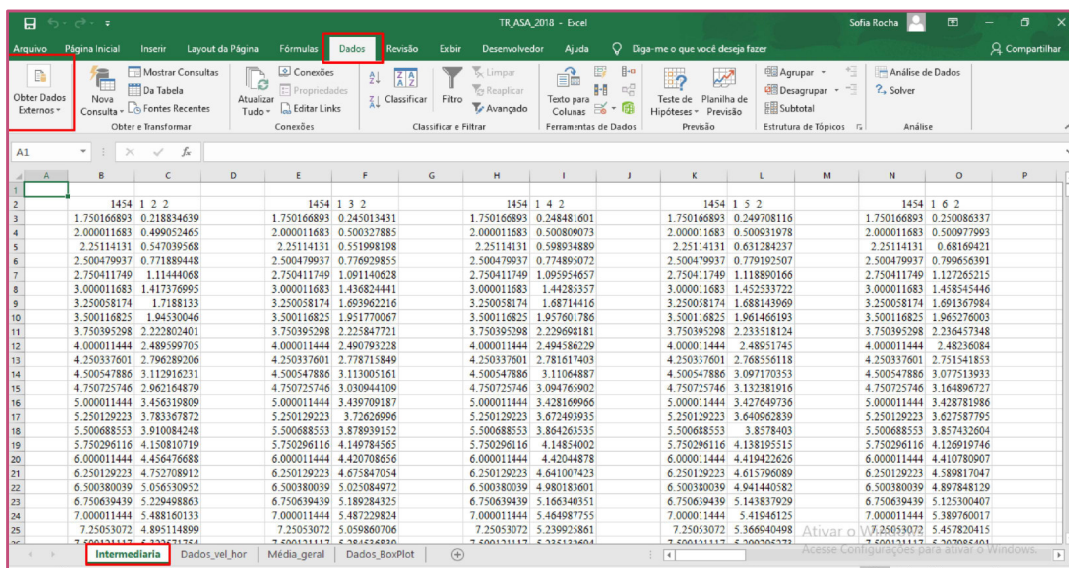
ANÁLISES

- COLAR OS DIAS NAS COLUNAS DE TODOS OS SEGMENTOS



ANÁLISES

- IMPORTAR O RESTANTE DOS DADOS PARA A ABA "INTERMEDIARIA"

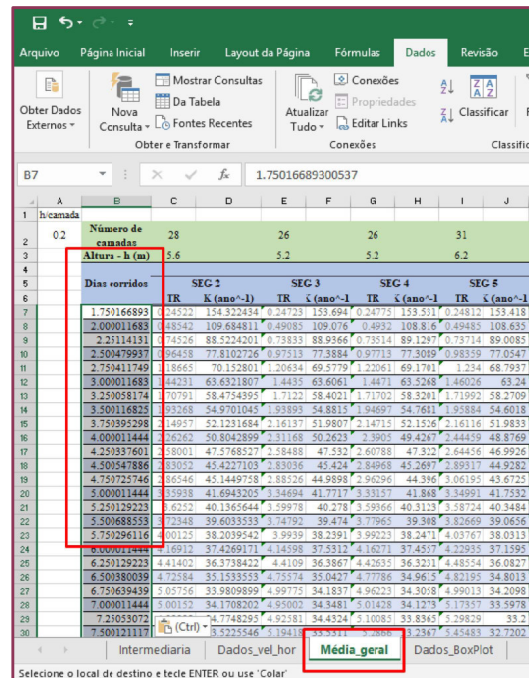
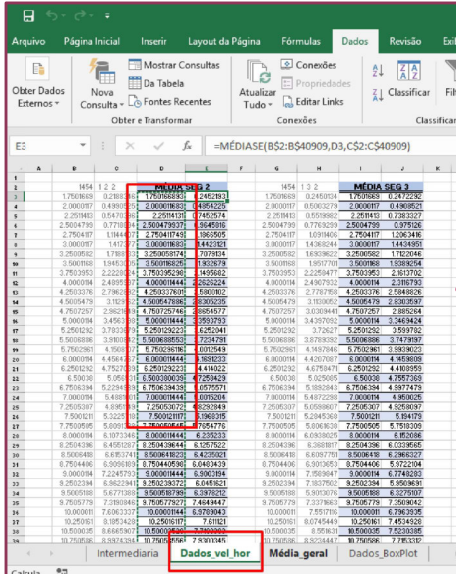


OBSERVAÇÃO

- OS DADOS PRECISAM ESTAR EXATAMENTE NAS COLUNAS COMO APRESENTADO AO LADO, POIS A ABA SEGUINTE PUXA OS DADOS DESTA.

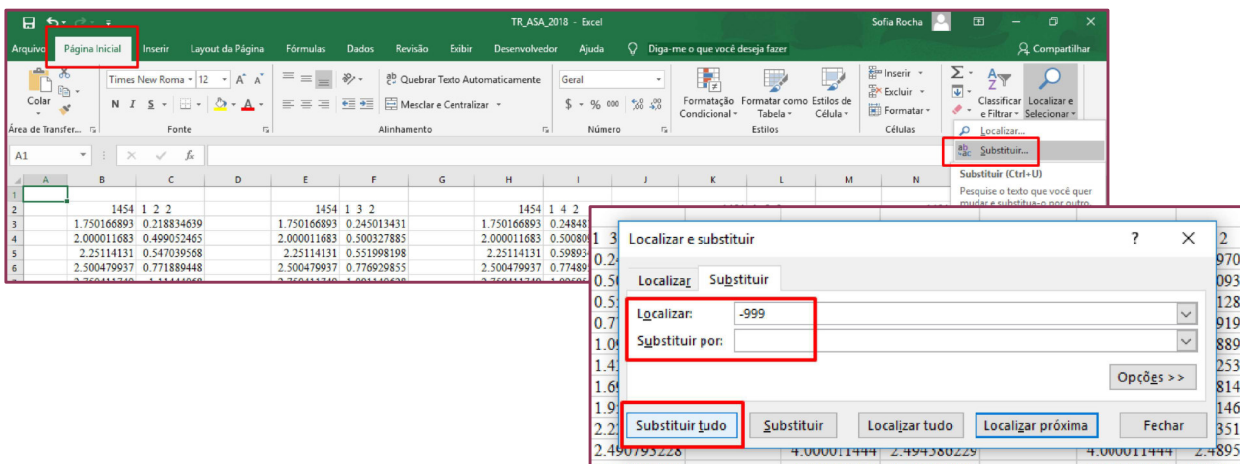
ANÁLISES

- COLAR OS DIAS DAS SIMULAÇÕES NA ABA "MEDIA_GERAL"



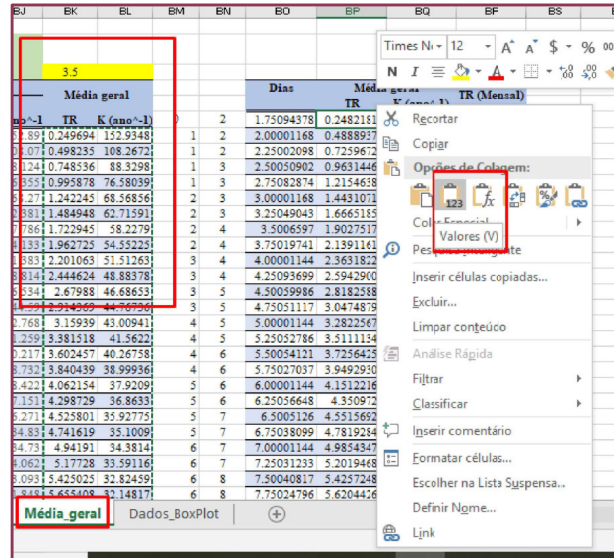
ANÁLISES

- APAGAR OS VALORES "-999" DA ABA "INTERMEDIARIA" (FAZER ISSO UTILIZANDO A FERRAMENTA "SUBSTITUIR" DO EXCEL)



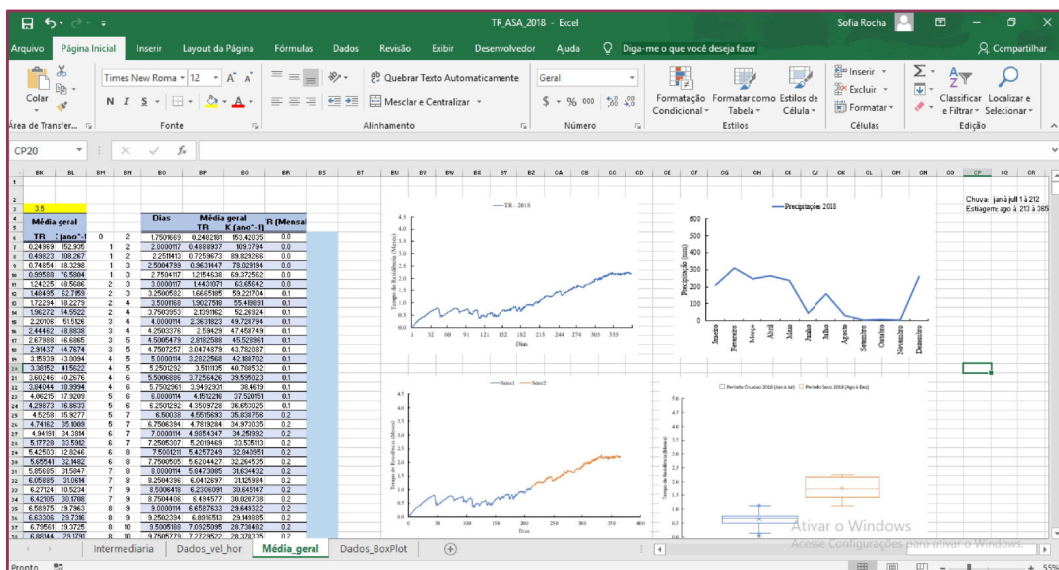
ANÁLISES

- COLAR VALORES DOS DIAS, TR E K NA COLUNA DA QUAL ESTÃO SENDO PLOTADOS OS GRÁFICOS



ANÁLISES

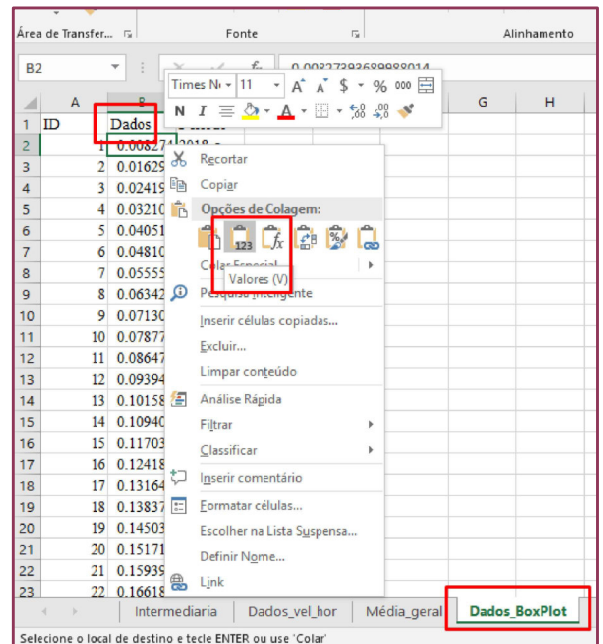
- OS GRÁFICOS JÁ SERÃO ATUALIZADOS AUTOMATICAMENTE



ANÁLISES

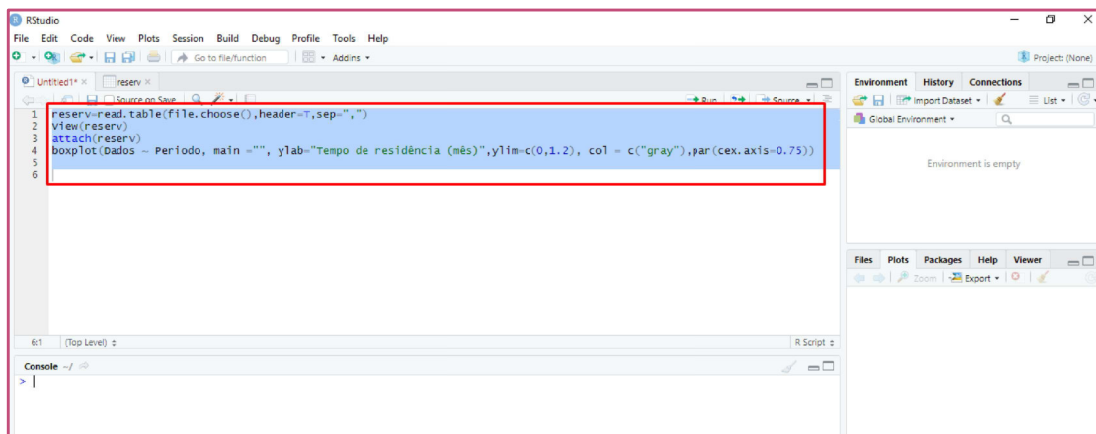
- PASSO 5
 - PREPARO DOS DADOS PARA GERAR O GRÁFICO TIPO BOXPLOT NO R

TR	K (ano-1)	TR	K (ano-1)	TR (Mensual)
0.2498	152.89	0.249694	152.9348	0.0
0.5001	108.07	0.498235	108.2672	0.0
0.7121	88.124	0.748536	88.3298	0.0
0.0017	76.355	0.995878	76.58039	0.0
1.233	68.271	1.242245	68.26826	0.0
3.007	63.381	1.484948	62.71591	0.1
7.489	57.786	1.722945	58.2279	0.4
9.929	54.133	1.962725	54.52225	0.1
0.2119	51.383	2.201063	51.51263	0.3
2.4509	48.814	2.444624	48.88878	0.1
0.6969	46.534	2.67988	46.68653	0.3
0.9372	44.59	2.914369	44.76736	0.1
1.9218	42.768	3.15959	43.00941	0.4
4.8307	41.259	3.381518	41.5622	0.5
6.6107	40.217	3.602457	40.26758	0.6
8.8928	38.732	3.840439	38.99936	0.4
3.956	38.422	4.062154	37.9209	0.5
2.2319	37.151	4.298729	36.8633	0.6
4.5291	36.271	4.521801	35.92725	0.5
8.1339	34.83	4.741619	35.10069	0.7
8.8418	34.73	4.94191	34.3814	0.7
0.0334	34.062	5.17728	33.59116	0.7
3.3328	33.093	5.425025	32.82459	0.8
6.7875	31.848	5.6408	32.14817	0.8



ANÁLISES

- COLAR DADOS EM PLANILHA SEPARADA
- SALVAR A PLANILHA COMO .CSV (SEPARADO POR VÍRGULAS)
- GERAR GRÁFICO NO R



ANÁLISES

The screenshot shows the RStudio interface. On the left, a file explorer window is open, showing a directory structure with folders for years (2009-2018) and files like 'Arquivos simulados', 'TR - Com vetor de', and 'BoxPlot_Comparativo_2009-2018'. The 'BoxPlot_Comparativo_2009-2018' file is selected. The console shows the following R code:

```
> reserv<-read.table(file.choose(),header=T,sep=",")
> view(reserv)
> attach(reserv)
> boxplot(Dados ~ Período, main="", ylab="Tempo de residência (mês)", ylim=c(0,1.4), col = c("gray"))
> reserv<-read.table(file.choose(),header=T,sep=",")
> view(reserv)
> attach(reserv)
The following objects are masked from reserv (pos = 3):
Dados, ID, Período
> boxplot(Dados ~ Período, main="", ylab="Tempo de residência (mês)", ylim=c(0,2.4), col = c("gray"))
> |
```

The Environment pane shows the 'reserv' object with 14540 observations and 3 variables. The Plots pane displays a boxplot of 'Tempo de residência (mês)' for each year from 2009-a to 2018-a. The y-axis ranges from 0.0 to 2.0. The plot shows that the distribution of residence time is relatively stable from 2009 to 2017, but there is a significant increase in the median and spread in 2018.

ANÁLISES

The screenshot shows the RStudio interface with the 'Save as Image' dialog box open. The dialog box has the following fields:

- Image format: PNG
- Directory: ~/Análises/2009-2018 - Ano a ano
- File name: 2009-2018
- Width: 802
- Height: 450
- Options: Maintain aspect ratio
- Buttons: Update Preview, Save, Cancel

The dialog box is positioned over the same boxplot as in the previous screenshot. The 'Save' button is highlighted with a red box.



FIM