

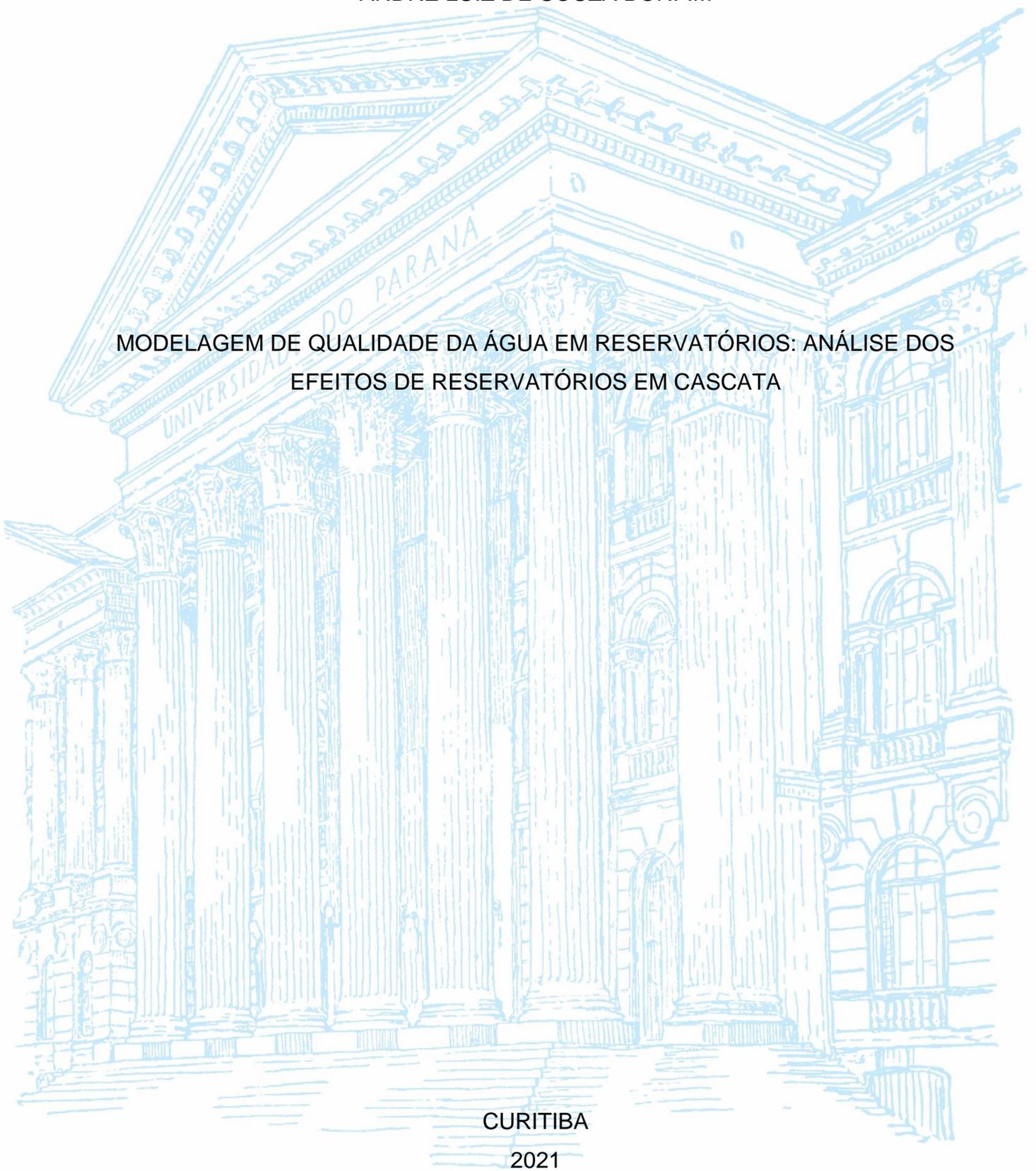
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRÉ LUIZ DE SOUZA BONFIM

MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS: ANÁLISE DOS
EFEITOS DE RESERVATÓRIOS EM CASCATA

CURITIBA

2021



ANDRÉ LUIZ DE SOUZA BONFIM

MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS: ANÁLISE DOS
EFEITOS DE RESERVATÓRIOS EM CASCATA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Tobias Bleninger

Coorientadora: MSc. Camila Bergmann Goulart

CURITIBA

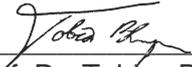
2021

TERMO DE APROVAÇÃO DE PROJETO FINAL

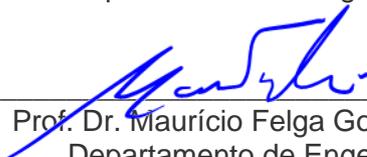
ANDRÉ LUIZ DE SOUZA BONFIM

MODELAGEM DE QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS: ANÁLISE DOS EFEITOS DE RESERVATÓRIOS EM CASCATA

Projeto Final de Curso, aprovado como requisito parcial para a obtenção do Diploma de Bacharel em Engenharia Ambiental no Curso de Graduação em Engenharia Ambiental do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, com nota 9, pela seguinte banca examinadora:

Orientador(a): 
Prof. Dr. Tobias Bernward Bleninger
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Membro(a) 1: 
Profa. Dra. Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Membro(a) 2: 
Prof. Dr. Maurício Felga Gobbi
Departamento de Engenharia Ambiental, UFPR

Curitiba, 14 de dezembro de 2021

A minha mãe, Luciana, por toda a dedicação de uma vida por mim, desde meu nascimento sempre buscando o melhor, meu maior exemplo de vida.

A minha avó, Eva (*in memoriam*) por todo o amor e carinho a que me dedicou enquanto tive o privilégio de sua companhia.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar força e inspiração durante todos os projetos da minha vida. A Nossa Sra. De Aparecida, por me ajudar a manter a fé, mesmo em momentos difíceis.

A minha mãe, Luciana, pelo amor incondicional e por todo o apoio que me deu, me permitindo focar e finalizar a graduação e este trabalho.

Aos amigos que fiz durante a graduação, Lucas, Anna, Bruna, Beatriz, Manoel e Haddoula, entre outros, pela parceria para a vida e por toda a ajuda durante a graduação, tornando-a mais fácil e descontraída.

Ao professor e meu orientador Dr. Tobias Bleninger, primeiramente pela acolhida no projeto de Iniciação Científica, o qual me permitiu entrar nesse incrível universo que compreende as modelagens hidrológicas e suas aplicações, além de toda a orientação e todas as indicações e sugestões que me deu para este trabalho, sempre de maneira muito solícita.

A minha coorientadora Msc. Camila Goulart, que também me orientou desde a Iniciação Científica até a revisão deste documento, a qual agradeço por toda a disposição e paciência para me nortear durante todo este processo.

A toda a equipe do Projeto de Enquadramento da UGRH Paranapanema, o qual serviu de base deste trabalho, pelo excelente trabalho neste projeto base, e por sempre ser solícita quando necessitei de algum material ou sanar alguma dúvida.

A todos os professores dos quais tive a honra de ser aluno, por todos os ensinamentos, em especial para o prof. Dr. Michael Mannich, que juntamente com o prof. Tobias, me ajudaram a trilhar meu caminho durante a graduação por meio dos conselhos e oportunidades que me deram. Também em especial para a profa. Dra. Cynara e o prof. Dr. Maurício, por aceitarem fazer parte da banca de defesa deste trabalho e pelas considerações feitas durante seu desenvolvimento.

Ao pessoal do setor de meio ambiente do LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em especial para o Msc. João Sabóia e o Dr. Júlio Werner, pela incrível experiência profissional durante meu estágio.

A Fundação Araucária, pela concessão de bolsa financeira.

“Fomos, durante muito tempo, embalados com a história de que somos a humanidade. Enquanto isso – enquanto seu lobo não vem – fomos nos alienando desse organismo de que somos parte, a Terra, e passamos a pensar que ele é uma coisa e nós, outra: a Terra e a humanidade. Eu não percebo onde tem alguma coisa que não seja natureza. Tudo é natureza. O cosmos é natureza. Tudo que eu consigo pensar é natureza.”

(Ailton Krenak)

“Quem acredita, sempre alcança”

(Renato Russo)

RESUMO

A cada ano, a necessidade de se analisar a qualidade de corpos hídricos aumenta, de forma que se possa medir o impacto de ações naturais e principalmente ações antrópicas. As dificuldades encontradas durante este processo de análise são grandes, pois geralmente faltam informações nas escalas temporal e espacial, principalmente quando se trata de reservatórios, que possuem um comportamento hidrodinâmico distinto de rios e lagos naturais. As modelagens matemáticas são fundamentais, pois conseguem simular a hidrodinâmica do corpo hídrico e o comportamento de poluentes com razoável acurácia, mesmo com as limitações destacadas acima. Para o projeto de Enquadramento da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos (UGRH) Paranapanema, foram aplicados vários modelos matemáticos distintos, com diferentes níveis de complexidade, de modo que foi possível comparar metodologias distintas para obtenção de resultados, avaliando a acurácia e a viabilidade de modelos distintos, como modelagens zero, uni, bi e tridimensionais. No que diz respeito à modelagem 3D, apesar de necessitar mais dados, se esperava que este conseguisse reproduzir efeitos locais não observados nos outros modelos, que podem ou não ser determinantes na qualidade da água. Com os resultados obtidos no projeto de enquadramento e neste trabalho, os modelos bi e tridimensionais se mostraram capazes de simular a qualidade da água com boa acurácia, ao ser comparados com resultados de projetos anteriores e com dados medidos. Quanto aos efeitos locais, foram observados através do zoneamento do reservatório, pontos com concentrações elevadas que necessitam de maior atenção em relação a ações a serem tomadas. Como continuidade do projeto, neste estudo foi feita a complementação da modelagem dos reservatórios de grande tempo de residência com a inclusão das algas e Clorofila-a, permitindo observar o efeito desses novos parâmetros na qualidade da água, indicando uma leve piora em toda a área de estudo, além de permitir notar o efeito cascata nestes reservatórios, que foi importante para atenuar uma qualidade de água ainda pior, mas seu efeito foi reduzido por conta de afluentes com altas cargas poluidoras, além da prática de aquicultura na área de estudo.

Palavras-chave: Modelagem matemática; qualidade da água; hidrodinâmica de reservatórios; efeito cascata de reservatórios.

ABSTRACT

Every year, the need to analyze the quality of water bodies increases, in order to measure the impact of natural and mainly anthropogenic actions. The difficulties encountered during this analysis process are great, as there is usually a lack of information on temporal and spatial scales, especially when it comes to reservoirs, which present a hydrodynamic behavior distinct from natural rivers and lakes. The mathematical modeling is fundamental, as it can simulate the hydrodynamics of the water body and the behavior of pollutants with reasonable accuracy, even with the limitations highlighted above. For the framework project of the Unidade de Gestão de Recursos Hídricos (UGRH) Paranapanema, several mathematical models were applied, with different levels of complexity, so that it was possible to compare different methodologies to obtain results, evaluating the accuracy and feasibility of different models, such as zero, one, two-dimensional, and three-dimensional models. Regarding 3D modeling, despite needing more data, it was expected that it would be able to reproduce local effects not observed in other models, which may or may not be determinant in water quality. With the results obtained in the framework Project and in this study, the two-dimensional and three-dimensional models proved to be able to simulate the water quality with good accuracy, when compared with results from previous projects and with measured data. As for the local effects, points with high concentrations that require more attention in relation to the actions to be taken were observed through the zoning of the reservoir. Continuing the project, this study complemented the long-lived reservoirs modelling with the inclusion of algae and chlorophyll-a, allowing the observation of the effect of these new parameters on water quality, indicating a slight deterioration in the entire area of study, in addition to allowing the perception of the cascade effect in these reservoirs, which was important to attenuate an even worse water quality, but its effect was reduced due to affluents with high pollutant loads, in addition to the practice of aquaculture in the study area.

Keywords: Mathematical modeling; water quality; reservoir hydrodynamics; reservoir cascade effect.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA GERAL.....	29
FIGURA 2 - BACIA DO RIO PARANAPANEMA	30
FIGURA 3 – BARRAGENS E RESERVATÓRIOS DO RIO PARANAPANEMA.....	31
FIGURA 4 – RESERVATÓRIOS LÊNTICOS DA UGRH PARANAPANEMA.....	33
FIGURA 5 – RESERVATÓRIO JURUMIRIM	34
FIGURA 6 – RESERVATÓRIO CHAVANTES.....	35
FIGURA 7 – RESERVATÓRIO CAPIVARA	36
FIGURA 8 - BATIMETRIAS DOS RESERVATÓRIOS DA UGRH PARANAPANEMA	38
FIGURA 9 - FONTES DE DADOS E SEUS ESQUEMAS DE ALIMENTAÇÃO.....	39
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES DE DADOS DA UGRH PARANAPANEMA.....	40
FIGURA 11 - QUANTIDADE DE ESTAÇÕES COM FREQUÊNCIA DE DADOS SUPERIOR A 90% AO ANO (LINHA VERTICAL REPRESENTA O ANO DE 2012)	41
FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES NA BACIA PARA OS ANOS DE 2012, 2013 E 2014.....	42
FIGURA 13 - ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE RESERVATÓRIOS	50
FIGURA 14 - ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS EFEITOS DAS CARGAS PARA CADA UM DOS SETORES (FIGURA ACIMA) UTILIZANDO RESULTADOS DA MODELAGEM DE FÓSFORO (FIGURA ABAIXO) E DE SÉRIES DE IMAGENS DE SATÉLITE DE CLOROFILA-A (FIGURA DO MEIO) PARA O RESERVATÓRIO JURUMIRIM.....	52
FIGURA 15 - PERCENTUAL DE CARGA A SER REDUZIDO PARA SE CHEGAR NO CLASSE 2 NO CENÁRIO ACELERADO 2035 NO RESERVATÓRIO CHAVANTES.....	53
FIGURA 16 - PROFUNDIDADE E VELOCIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO CAPIVARA.....	54
FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DA MANIPULAÇÃO DOS DADOS DE CONTORNO	56
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS PRINCIPAIS DO RESERVATÓRIO JURUMIRIM.....	63

FIGURA 19 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID110	64
FIGURA 20 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID113	65
FIGURA 21 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID134	65
FIGURA 22 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID116	66
FIGURA 23 – SETORIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO JURUMIRIM	67
FIGURA 24 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS VERDES (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO JURUMIRIM	68
FIGURA 25 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS CIANOFÍCEAS (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO JURUMIRIM	68
FIGURA 26 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO JURUMIRIM	69
FIGURA 27 – MAPAS DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m ³) AO LONGO DO ANO NO RESERVATÓRIO JURUMIRIM	70
FIGURA 28 – BOXPLOT PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO JURUMIRIM	71
FIGURA 29 – PERMANÊNCIA PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO JURUMIRIM.....	71
FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS PRINCIPAIS DO RESERVATÓRIO CHAVANTES.....	72
FIGURA 31 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID100	73
FIGURA 32 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID93	74
FIGURA 33 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID82	74
FIGURA 34 – SETORIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO CHAVANTES.....	75
FIGURA 35 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS VERDES (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CHAVANTES.....	76

FIGURA 36 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS CIANOFÍCEAS (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CHAVANTES	76
FIGURA 37 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CHAVANTES.....	77
FIGURA 38 – MAPAS DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m ³) AO LONGO DO ANO NO RESERVATÓRIO CHAVANTES	78
FIGURA 39 – BOXPLOT PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO CHAVANTES	79
FIGURA 40 – PERMANÊNCIA PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO CHAVANTES	79
FIGURA 41 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS PRINCIPAIS DO RESERVATÓRIO CAPIVARA.....	80
FIGURA 42 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID49	81
FIGURA 43 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID43	82
FIGURA 44 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID40	82
FIGURA 45 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID63	83
FIGURA 46 – SETORIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO CAPIVARA	84
FIGURA 47 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS VERDES (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CAPIVARA	85
FIGURA 48 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS CIANOFÍCEAS (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CAPIVARA	85
FIGURA 49 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m ³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CAPIVARA	86
FIGURA 50 – MAPAS DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m ³) AO LONGO DO ANO NO RESERVATÓRIO CAPIVARA	87
FIGURA 51 – BOXPLOT PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO CAPIVARA ..	88
FIGURA 52 – PERMANÊNCIA PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO CAPIVARA.....	89

FIGURA 53 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO	90
FIGURA 54 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO	91
FIGURA 55 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE NITROGÊNIO	92
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO	93

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS E TEMPOS DE RESIDÊNCIA DOS RESERVATÓRIOS	32
TABELA 2 - PONTOS CARACTERÍSTICOS PARA OPERAÇÃO DA USINA JURUMIRIM	43
TABELA 3 - PONTOS CARACTERÍSTICOS PARA OPERAÇÃO DA USINA CHAVANTES	44
TABELA 4 - PONTOS CARACTERÍSTICOS PARA OPERAÇÃO DA USINA CAPIVARA	44
TABELA 5 – DIFERENÇAS ENTRE ALGAS VERDES E ALGAS CIANOFCÉAS ...	61

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANA	- Agência Nacional de Águas
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	- Balanço Energético Nacional
BR	- Brasil
CBH	- Comitê de Bacia Hidrográfica
CETESB	- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Chlfa	- Clorofila-a
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
DAEE	- Departamento de Águas e Energia Elétrica
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
GIA	- Grupo Integrado de Aquicultura e Estudos Ambientais
INMET	- Instituto Nacional de Meteorologia
MME	- Ministério de Minas e Energia
NT	- Nitrogênio Total
OD	- Oxigênio Dissolvido
PE	- Elaboração de Estudo de Implementação e Aplicação de Modelos Hidrodinâmicos e de Qualidade das Águas Superficiais de Domínio da União como apoio à Tomada de Decisões em Proposta de Enquadramento – Estudo de caso dos Rios Paranapanema e Itararé integrados aos reservatórios em suas calhas na UGRH Paranapanema
PIRH	- Plano Integrado de Recursos Hídricos
PT	- Fósforo Total
SIGA	- Sistema de Informações de Geração da ANEEL
SAR	- Sistema de Acompanhamento de Reservatórios
SP	- Estado de São Paulo
UGH	- Unidade de Gestão Hídrica
UGRH	- Unidade de Gestão de Recursos Hídricos
WAQ	- <i>Water Quality</i> (Qualidade de Água)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo principal	18
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	HIDRODINÂMICA DE RESERVATÓRIOS.....	20
2.2	QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS.....	22
2.3	EFEITO CASCATA EM RESERVATÓRIOS.....	23
2.4	MODELAGEM NUMÉRICA	24
2.4.1	Aplicação do Delft3D em lagos e reservatórios	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1	ÁREA DE ESTUDO	29
3.1.1	A bacia hidrográfica e o rio Paranapanema.....	29
3.1.2	Os reservatórios	31
3.1.2.1	Jurumirim.....	33
3.1.2.2	Chavantes	34
3.1.2.3	Capivara	35
3.2	BANCO DE DADOS	37
3.2.1	Dados Morfométricos.....	37
3.2.2	Dados Hidrológicos e Meteorológicos	38
3.2.2.1	Eliminação de Repetições	40
3.2.2.2	Período de Análise	40
3.2.3	Operação das Usinas e suas Barragens	43
3.2.3.1	UHE Jurumirim	43
3.2.3.2	UHE Chavantes.....	44
3.2.3.3	UHE Capivara.....	44
3.2.4	Processamento de dados pré e pós modelagem	45
3.3	MODELAGEM	46
3.3.1	O Modelo Delft3D	47
3.3.2	Aplicação de modelagem matemática no projeto PE	48
3.3.3	Aplicação da modelagem para este trabalho.....	53
3.3.3.1	Replicação da modelagem hidrodinâmica	53

3.3.3.2	Inclusão de concentrações de algas na modelagem de qualidade da água.	54
3.3.3.3	Escolha pela inclusão de concentrações de algas verdes e algas cianofíceas na modelagem de qualidade da água.....	55
3.3.3.4	Dados de contorno para os parâmetros a serem incluídos	55
3.3.3.5	Validação dos resultados.....	56
3.4	PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA ANALISADOS	57
3.4.1	Oxigênio Dissolvido (OD)	57
3.4.2	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	58
3.4.3	Nitrogênio (N)	58
3.4.4	Fósforo (P).....	59
3.4.5	Algas.....	59
3.4.6	Clorofila-a (Chlfa).....	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4.1	RESERVATÓRIO JURUMIRIM	63
4.1.1	Análise temporal.....	63
4.1.2	Análise espacial.....	66
4.1.3	Análise Conjunta.....	69
4.2	RESERVATÓRIO CHAVANTES	72
4.2.1	Análise Temporal.....	72
4.2.2	Análise Espacial	75
4.2.3	Análise Conjunta.....	77
4.3	RESERVATÓRIO CAPIVARA	79
4.3.1	Análise Temporal.....	79
4.3.2	Análise Espacial	83
4.3.3	Análise Conjunta.....	86
4.4	COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DO PROJETO PE	89
4.4.1	Oxigênio Dissolvido (OD)	89
4.4.2	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	91
4.4.3	Nitrogênio	91
4.4.4	Fósforo	92
4.5	EFEITO CASCATA.....	94
5	CONCLUSÃO.....	96
6	RECOMENDAÇÕES	99
	REFERÊNCIAS.....	100

1 INTRODUÇÃO

A proteção dos recursos hídricos se mostra cada vez mais importante e necessária para a manutenção da qualidade de vida de todo o ecossistema do planeta. A água é um recurso natural básico e fundamental para a existência de atividade biológica na Terra, desde pequenas bactérias até os seres humanos. Porém, a água não é um recurso inesgotável e, portanto, sua utilização carece de uma otimização, desde sua coleta até seu despejo.

A utilização da água pelos humanos é extremamente ampla, desde as mais básicas e primitivas, como necessidades fisiológicas (abastecimento de água à população), para as hoje indispensáveis utilizações no desenvolvimento humano, como geração de energia (hidrelétricas, que no contexto brasileiro são fundamentais, representando mais de 60% da matriz elétrica, segundo o Balanço Energético Nacional – BEN 2021, realizado pelo Ministério de Minas e Energia - MME), produção de alimentos (irrigação), produção industrial e navegação. Também é fundamental no transporte de resíduos, dada a sua grande capacidade de dispersão e diluição destes (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013).

Por conta dessas múltiplas utilizações, se observa a necessidade de armazenar a água que escoar através de corpos hídricos em regiões de interesse, sendo essa uma das principais funções dos reservatórios de água, que possuem ampla utilização no Brasil. Porém, é possível notar grandes efeitos negativos da construção de reservatórios, como a modificação do regime de vazão, desapropriação de populações humanas e não humanas da área inundada, alteração no transporte de nutrientes e sedimentos, entre outros, que afetam a hidrodinâmica de rios da bacia na localidade do reservatório, afetando também a fauna, a flora, e a população (MEES, 2020).

Em relação ao transporte de resíduos, desde a revolução industrial os corpos hídricos são utilizados para despejo de cargas poluidoras de forma muito mais intensa, causando graves consequências na qualidade da água destes corpos, sendo eles incapazes de recuperar sua qualidade a ponto de evitar enormes prejuízos ambientais, como a perda de biodiversidade da biota marinha (AMARAL; JABLONSKI, 2005), mas também econômicos e sociais, como a incapacidade de servir como fonte de água potável ou então exigir grandes investimentos para poder ser reabilitada a cumprir tal função (TUNDISI, 2008).

Relacionando as questões destacadas anteriormente, surge a necessidade de análise de qualidade de água em reservatórios, que se mostra um processo complexo, sendo realizado geralmente por métodos experimentais (amostras e análise laboratorial da qualidade da água) complementada por métodos numéricos (modelagem). As análises geralmente são esparsas no tempo (poucas medições ao longo do ano) e no espaço (poucos pontos monitorados e não necessariamente com boa resolução vertical), e a falta de dados geralmente não permite uma caracterização das variações espaciais e temporais (MAIA *et al.*, 2008; SOUZA FILHO; MARTINS, 2006).

Estes problemas podem ser contornados por meio de modelos numéricos, visto que podem produzir simulações com boa acurácia do comportamento dos poluentes emitidos na água, desde que bem alimentados quanto à quantidade e qualidade de dados (BATISTA; CABRAL, 2017). Apresentam-se como uma forma de auxílio ao monitoramento ambiental atual, e possibilitam a criação de uma grande base de dados que podem auxiliar em futuras tomadas de decisão a respeito do manejo e controle do uso do corpo hídrico a ser analisado.

Em específico, a modelagem tridimensional (3D) de reservatórios é a que mais se assemelha à realidade física comparado a outras modelagens, pois permite classificar e analisar variações espaciais e temporais para fazer um zoneamento de regiões mais poluídas do reservatório e classificar os processos dominantes, tanto em relação ao escoamento como em relação às concentrações de nutrientes e/ou poluentes. A principal dificuldade encontrada para este tipo de modelagem está na necessidade de muitas informações, muitas vezes inexistentes (FERNANDES *et al.*, 2019a).

Utilizando a base de dados obtida e gerada para o projeto que será a base deste trabalho, o projeto “Elaboração de Estudo de Implementação e Aplicação de Modelos Hidrodinâmicos e de Qualidade das Águas Superficiais de Domínio da União como apoio à Tomada de Decisões em Proposta de Enquadramento – Estudo de caso dos Rios Paranapanema e Itararé integrados aos reservatórios em suas calhas na UGRH Paranapanema”, que será chamado de agora em diante de projeto PE, buscou-se dar continuidade aos estudos realizados no projeto acima, por meio da modelagem de outros parâmetros de qualidade da água, que são as algas e a clorofila-a, adicionais à análise inicial e que complementam a análise de qualidade de água para a bacia do rio Paranapanema.

Quanto à região de estudo, a Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema está localizada entre os estados Paraná e São Paulo, abrangendo 247 municípios em uma área de 105.921 km², com uma população estimada de mais de 4,5 milhões de habitantes, em sua grande maioria urbana (CBH PARANAPANEMA, 2019).

Já o rio Paranapanema nasce no sudoeste paulista, percorre por volta de 900 km até sua foz no Rio Paraná (CBH PARANAPANEMA, 2019), em boa parte deste percurso faz a divisa dos estados do Paraná e de São Paulo. Seus principais afluentes são o rio Tibagi, o rio Itararé, e o rio das Cinzas.

Embora o rio Paranapanema possua onze usinas de geração de energia e seus respectivos reservatórios, apenas três desses reservatórios são considerados ambientes lânticos, por possuírem elevado tempo de residência ou de detenção, que são os reservatórios Jurumirim, Chavantes e Capivara. São nestes reservatórios que foram feitas as modelagens e as avaliações da qualidade da água.

1.1 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram separados entre objetivos principais e específicos. Os quais poderão ser alcançados por meio da aplicação de modelagem matemática hidrodinâmica e de qualidade da água, para os parâmetros clorofila-a e algas, nos três reservatórios lânticos da bacia do rio Paranapanema.

Estes parâmetros são de grande importância para a aferição da qualidade da água, juntamente dos parâmetros calculados para a proposta de enquadramento, que foram o oxigênio dissolvido (OD) a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), o Fósforo Total (PT) e o Nitrogênio Total (NT).

1.1.1 Objetivo principal

O objetivo principal do estudo é a classificação dinâmica da qualidade da água dos reservatórios em cascata do Rio Paranapanema, incluindo a modelagem de algas e sua acumulação, por meio da concentração de clorofila-a e observando seus efeitos nos parâmetros já analisados anteriormente no projeto PE.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Complementação dos modelos tridimensionais existentes no projeto PE com mais parâmetros de qualidade de água (clorofila-a e algas);
- b) Validação com dados medidos;
- c) Análise da variabilidade temporal;
- d) Zoneamento do reservatório em regiões de maior poluição;
- e) Análise de efeitos de cascata nos ambientes lânticos;
- f) Análise de qualidade da água através dos novos parâmetros; e
- g) Análise da alteração na qualidade da água através dos parâmetros já simulados no projeto PE.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Avaliar a qualidade da água em reservatórios é uma tarefa bastante complexa, visto que a hidrodinâmica de reservatórios possui muitos fatores que podem influenciar e até mesmo comandar o comportamento de nutrientes e poluentes ao longo do reservatório.

Por isso, a revisão de literatura foi separada em quatro seções, sendo elas a hidrodinâmica de reservatórios, a sua qualidade da água, a ocorrência de efeito cascata nesses ambientes e a modelagem numérica, incluindo uma subseção para a aplicação do modelo utilizado neste trabalho, o Delft3D.

2.1 HIDRODINÂMICA DE RESERVATÓRIOS

Reservatórios são corpos hídricos artificiais, isso faz com que possuam diversas características hidrodinâmicas distintas quando comparado a segmentos de rios e até mesmo de lagos (corpos hídricos semelhantes aos reservatórios, porém são corpos hídricos naturais). Há também diferenças nessas características ao comparar um reservatório com outro, sendo então necessário estudos de caso para poder classificar e entender o regime hidrodinâmico de cada um.

Reservatórios podem ser classificados em três zonas, começando a montante pela zona fluvial, com características próximas as de um rio; a zona lacustre, a qual se assemelha a um ambiente lântico, é a zona onde os reservatórios possuem as suas características próprias, com grandes diferenciais em relação ao leito de rio, seja a montante da zona fluvial seja a jusante da barragem; e a zona de transição entre ambos, com características mistas entre rio e reservatório (TEIXEIRA, 2019).

Como definidores de características hidrodinâmicas de reservatórios estão fatores físicos, químicos e biológicos, levando em consideração também a influência de fatores meteorológicos. Dentre os fatores meteorológicos, destacam-se as influências principais das precipitações, que em conjunto com as variações de fatores como temperatura e umidade podem alterar completamente o comportamento hidrodinâmico de um reservatório em períodos de chuva se comparado a períodos de seca.

Isso reflete em sua geomorfologia, que controla a estrutura da drenagem, o aporte de nutrientes do lago e o tempo de renovação da água, ou tempo de detenção.

Dado pela razão entre volume e vazão do reservatório, representa o tempo que leva para uma parcela de água ser transportada da entrada para a saída do reservatório (WETZEL, 1975 citado por TEIXEIRA, 2019).

Como os reservatórios muitas vezes possuem a função de regular a vazão a jusante do barramento, permitindo a construção e operação de hidrelétricas ou manutenção e acumulação de água para abastecimento e controle de cheia, é notável que nos reservatórios pode ocorrer uma grande acumulação de sedimentos, principalmente na entrada, devido à perda de velocidade da água quando chega a calha muito maior do reservatório se comparada à do rio. Essa perda de velocidade faz com que os sedimentos se depositem no leito do reservatório, já que as forças verticais de gravidade, além do atrito horizontal com o solo reduzem a força horizontal de transporte pela água e aumentam a força vertical. Esses sedimentos também podem se manter no reservatório como materiais suspensos (MEES, 2020; TEIXEIRA, 2019).

A acumulação de sedimentos causa muitos efeitos na hidrodinâmica dos corpos hídricos, tanto na região à montante, como principalmente na região a jusante da barragem construída para o reservatório. Bandeira *et al.* (2017) mostra um processo de migração da foz do rio São Francisco, segundo os autores, resultado de erosão causada pela retenção de sedimentos em barragens ao longo do rio em conjunto com as dinâmicas específicas do transporte costeiro de partículas.

Muitos nutrientes são transportados e acumulados junto com esses sedimentos (adsorção), causando impactos no interior do reservatório e a sua jusante, no que diz respeito a sua qualidade da água.

Como resultado dessa acumulação, a capacidade de armazenamento de água do reservatório vai se reduzindo com o passar do tempo, o que também irá afetar a hidrodinâmica do reservatório, já que há uma clara alteração em seus fatores físicos, o que desencadeará alterações nos fatores químicos e biológicos. Vale destacar que os padrões de deposição dentro do reservatório normalmente são influenciados pela sua operação, assim como os grandes eventos de precipitação, que provocam o carreamento de cargas de sedimento pelos rios (BOERIU *et al.*, 2011 citado por TEIXEIRA, 2019).

Outro fator importante a ser considerado na hidrodinâmica de reservatórios está relacionada à sua estratificação vertical, bastante comum a reservatórios com maiores profundidades (grandes e médios reservatórios, mas também pode ocorrer

em pequenos). Sua ocorrência está ligada a alterações na densidade do fluido, devido ao gradiente de temperatura e a presença de sólidos suspensos. Quando a circulação de água na vertical não ocorre de maneira natural, em que há trocas entre camadas profundas e superficiais, a estratificação vertical é caracterizada, causando a criação de camadas com temperaturas e densidades diferentes, nas quais as camadas superiores possuem maior temperatura devido à radiação solar, menor densidade e maior oxigenação, enquanto camadas inferiores estão sujeitas a ambientes mais densos e com baixas concentrações de oxigênio (TEIXEIRA, 2019; MEES, 2020; FERNANDES *et al*, 2019b; GOULART, 2021).

2.2 QUALIDADE DA ÁGUA EM RESERVATÓRIOS

A qualidade da água em reservatórios depende de muitos processos, além dos processos relacionados à hidrodinâmica, descritos acima, como os processos relacionados as características geométricas e morfológicas dos sistemas, mecanismos de circulação e estratificação térmica e química, tempo de residência da água e interações sedimento/água. Outros processos que podem modificar a qualidade da água são as relações entre profundidades das zonas eufótica (região iluminada), afótica (região escura), o grau de oxigênio da coluna d'água e pelo potencial de oxirredução do sedimento (FERNANDES *et al.*, 2019b).

Características geométricas e morfológicas são utilizadas na definição do tempo de residência de água no reservatório, sendo este um fator importante, já que tempos de residência curtos impedem a permanência de grandes concentrações de poluentes no reservatório, e grandes tempos de residência, apesar de acumularem grandes concentrações, podem ajudar na qualidade de água do rio a jusante, neutralizando nutrientes e reduzindo a carga poluidora, como visto por Fernandes *et al.* (2019b).

Outro fator relacionado às características físicas é a proporção de zonas litorâneas e bentônicas no leito, onde nas primeiras o fundo do rio recebe luz solar, permitindo o desenvolvimento de vários nichos ecológicos e cadeias alimentares, já no segundo há organismos bênticos, como invertebrados, não fotossintetizantes, sendo então dependentes de matéria orgânica vindo de áreas de zona eufótica (JI, 2008; DODDS, 2002; ESTEVES, 1988 citados por TEIXEIRA, 2019). É necessário um

balanço entre essas duas comunidades, de forma a não causar um processo de eutrofização, que necessita também de uma grande quantidade de nutrientes.

A estratificação de reservatórios, como visto na seção anterior, impede a circulação vertical da água no reservatório, ocasionando o aprisionamento de compostos químicos em profundidades do perfil de água que não se misturam. O perfil de oxigênio dissolvido (OD) apresenta as menores concentrações nos níveis mais baixos em função da reduzida troca com a parcela aerada na camada superficial, no sentido contrário, nutrientes ficam concentrados na região inferior e não chegam às camadas superiores, por conta da ação da gravidade (Thomann e Mueller, 1987 citado por TEIXEIRA, 2019).

2.3 EFEITO CASCATA EM RESERVATÓRIOS

A existência de vários reservatórios em sequência em um mesmo rio, comumente conhecidos como reservatórios em cascata, causa alterações na hidrodinâmica e conseqüentemente na qualidade da água de todo o corpo hídrico, conforme pode ser observado em estudos em diferentes rios que apresentam esse efeito cascata no Brasil, com diferentes níveis de poluição de seus corpos hídricos.

Em relação às algas, Moura *et al.* (2013) concluíram que o efeito cascata no rio de Contas, no estado da Bahia, fez com que houvesse um aumento na riqueza de espécies de algas, mas uma redução de densidade conforme se percorre este rio tropical para jusante, com grandes variações, ligadas à mudança hidrológica, com trechos lóticos possuindo valores maiores.

Já no rio Paranapanema, Nogueira *et al.* (2010) observaram que apesar dos reservatórios mostrarem a capacidade de reter nutrientes, a hipótese de redução de concentração total de algas (aumento de condições oligotróficas) para jusante, vista no caso anterior, não pôde ser aceita devido ao aumento de abundância de fitoplâncton na região do médio Paranapanema.

Porém, na análise de qualidade da água de Lima (2012) no rio São Francisco, em uma região com 5 reservatórios em cascata, embora as variações entre os valores médios dos parâmetros considerados nos reservatórios fossem pequenas, apresentaram tendência de oligotrofia, com melhora da qualidade da água à jusante.

Também no tocante à qualidade da água, o estudo de Arruda (2014) apresentou uma significativa melhora na região à jusante comparada a região à

montante de três reservatórios em cascata no rio Iguaçu, na qual cabe destacar que a sua região à montante é fortemente poluída.

Por fim, cabe destacar que em relação à biota marinha, Pelicice *et al.* (2018) concluíram que há uma baixa diversidade de peixes migratórios no rio Paranapanema, devido às represas, além da grande presença de espécies não nativas, essa também influenciada pela prática de aquicultura na região.

2.4 MODELAGEM NUMÉRICA

Devido à alta complexidade que envolve as diversas interações entre aspectos físicos, meteorológicos e hidrológicos em reservatórios, além da limitação de dados, tanto de variáveis hidrológicas como atmosféricas, modelos numéricos são uma grande ferramenta para entendimento dessas variáveis e principalmente das interações que regem o comportamento de um reservatório (BETANCUR-PÉREZ; TORO-BOTERO; GÓMEZ-GIRALDO, 2016; TEIXEIRA, 2019).

Quanto à classificação de modelos numéricos, subdividem-se em três classes: modelos determinísticos, que utiliza valores fixos de variáveis dependentes, resultando em valores exatos; os modelos estocásticos ou probabilísticos, que possuem variáveis com valores aleatórios, resultando em valores prováveis; e os modelos de otimização, que procuram apresentar algoritmos com pontuações máximas e mínimas que estabeleçam o objetivo do sistema (CHRISTOFOLETTI, 1999, citado por BATISTA; CABRAL, 2017).

A classificação dos modelos em função do tempo, em permanentes, quando considera a mudança do tempo em função das variáveis, e não permanentes, quando as análises destas variações são realizadas, é amplamente conhecida e utilizada.

Tucci *et al.* (2001), novamente citados por Batista e Cabral (2007) utilizam a classificação dos modelos de transporte de contaminantes em relação aos seus parâmetros, em conservativos (sem alterações devido a reações químicas e biológicas internas) e não conservativos (quando as alterações por processos químicos e biológicos ocorrem internamente).

A modelagem de lagos e reservatórios pode ser realizada por modelos zero, uni, bi e tridimensionais. Os modelos mais simples são os modelos zero dimensionais, que são a simplificação de todo o reservatório como um ponto sem dimensão, a partir de uma média em relação ao espaço em todo o volume do sistema, servindo de base

para modelos de qualidade de água de entrada-saída (MARTIN; MCCUTCHEON, 1999; FERNANDES *et al.*, 2019a). Como exemplo, tem-se o modelo Bathtub, que simula problemas de qualidade de água utilizando relações empíricas (FERNANDES *et al.*, 2019a).

Modelos unidimensionais verticais são muito utilizados para simular a estrutura térmica de reservatórios, identificar períodos de mistura e podem ser acoplados com modelos de qualidade de água (MARTIN; MCCUTCHEON, 1999). São modelos apenas de estratificação vertical, assumindo homogeneidade ou variabilidade desprezível na direção horizontal. Como exemplo, tem-se o modelo GLM (*General Lake Model*) de estratificação (HIPSEY; BRUCE; HAMILTON, 2014). Há também modelos unidimensionais horizontais, estes mais utilizados na modelagem de rios, riachos ou córregos.

Já os modelos bidimensionais verticais simulam mudanças na qualidade da água nas direções longitudinal e vertical (2DV), desconsideram efeitos laterais, sendo aplicáveis em reservatórios com estratificação térmica e com variações laterais desprezíveis (MARTIN; MCCUTCHEON, 1999). Um bom exemplo é o modelo CE-QUAL-W2, modelo hidrodinâmico e de qualidade de água para rios, lagos, reservatórios e estuários (FERNANDES *et al.*, 2019^a) ou o Delft3D, que permite modelagens 2D. Há também a existência de modelos bidimensionais em planta, que desconsideram os efeitos verticais (2DH).

E finalmente, os modelos tridimensionais, que resolvem as equações de continuidade, quantidade de movimento e do transporte nas três dimensões como descrito por Fernandes *et al.* (2019a), não necessitando assim de simplificações ou desconsiderações de efeitos variáveis locais, sendo ideal para a análise de concentrações de locais acumuladores específicos de poluentes em corpos hídricos, como é bastante comum ocorrer em reservatórios, porém exige uma maior quantidade e qualidade de dados de entrada. Como exemplo, tem-se o modelo Delft3D, que possui aplicação em variados tipos de corpos hídricos e sua aplicação em lagos e reservatórios está detalhada a seguir.

2.4.1 Aplicação do Delft3D em lagos e reservatórios

Através da literatura são facilmente encontrados estudos em situações completamente distintas nos quais a modelagem hidrodinâmica através do Delft3D foi

aplicada e foi satisfatoriamente capaz de simular as características reais do escoamento através do Delft3D-Flow e do comportamento de poluentes que interferem na qualidade de água através do Delft3D-WAQ.

Através do trabalho realizado por Wahl e Peeters (2014), no qual avaliou-se as consequências das mudanças climáticas no lago Constance, que faz fronteira entre Alemanha, Áustria e Suíça, por meio do Delft3D-Flow, foi observado que o modelo hidrodinâmico conseguiu reproduzir de maneira satisfatória a distribuição vertical de temperatura durante os 50 anos modelados. Houve uma boa semelhança entre os dados observados e simulados pelo modelo segundo os autores. De modo que este estudo serve como um bom indicativo de que modelos tridimensionais como o Delft3D são capazes de simular processos de estratificação térmica em um longo período, auxiliando na análise do efeito de mudanças climáticas em processos térmicos de estratificação de lagos e outros corpos hídricos de comportamento parecido.

Também através do Delft3D-Flow, Soullignac *et al.* (2017) chegaram a uma conclusão semelhante, porém para o lago Cretéil, na França, um pequeno lago em meio urbano que faz parte de um parque regional, no qual foram realizadas simulações em 18 períodos de um mês com medidas de temperatura semelhantes. O modelo, segundo os autores, reproduziu muito bem a dinâmica da temperatura, mesmo incluindo a alternância entre períodos de mistura e estratificação e padrões internos de ondas. Os resultados foram considerados muito promissores para a avaliação da difusão, acomodamento e suspensão de nutrientes e poluentes.

Devido à alta complexidade da forma, da batimetria, da variação sazonal do nível de água e da cobertura do solo do novo reservatório da hidrelétrica Nam Theun 2 (volume máximo de 3,5 bilhões de m³), na República Democrática Popular do Laos, Chanudet, Fabre e Van Der Kaaij (2012) aplicaram o modelo tridimensional Delft3D-FLOW com o objetivo de avaliar a hidrodinâmica e ter uma base sobre a qualidade da água. Após a obtenção de dados de entrada necessários ao modelo, os resultados obtidos indicaram uma boa correspondência entre valores simulados e observados para temperatura e velocidade das correntes de água.

Acoplando os módulos Delft3D-Flow e Delft3D-WAQ, Akurut *et al.* (2017) buscaram avaliar o comportamento de processos relacionados ao oxigênio na *Inner Murchison Bay*, localizada em Uganda, na parcela ao norte do Lago Victoria, através dos seguintes parâmetros de qualidade de água: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e íon amônio (NH₄⁺). Através da modelagem, as

principais observações são de que houve um aumento na concentração de nutrientes e de matéria orgânica na região de estudo, no período de 2001 a 2014, exceto de oxigênio dissolvido, devido ao aumento de carga poluidora recebida dos afluentes, além de uma piora na qualidade de água local devido ao longo tempo de residência.

No Brasil, Teixeira (2019) utilizou o Delft3D-Flow para simular o comportamento do lago Paranoá, em Brasília-DF, em determinadas condições de operação das estruturas hidráulicas da barragem, com o objetivo de avaliar a efetividade destas na remoção da camada superficial de água, que contém grande parte da comunidade fitoplanctônica do lago, de modo a melhorar a qualidade da água. Os resultados obtidos pela modelagem se mostraram satisfatórios, com boa acurácia, principalmente nas camadas mais próximas à superfície, e indicaram que a descarga pelos vertedores da barragem cumpriram de modo mais eficiente o objetivo quando comparado à descarga pela tomada de água.

Polli (2018) utilizou o Delft3D para comparar o desempenho da modelagem tridimensional com um modelo base unidimensional, em setores nos reservatórios, no que diz respeito ao transporte de calor. As áreas de estudo foram os reservatórios Vossoroca, Passaúna e Capivari, os três localizados próximos a Curitiba-PR. Os resultados indicaram que o modelo unidimensional por setores foi mais eficiente para a classificação do reservatório, mas segundo a análise da autora, a modelagem tridimensional se mostra necessária para a simulação do transporte de massa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Como exposto na introdução, para este trabalho será aproveitado toda a metodologia já desenvolvida no projeto PE (Fernandes *et al.*, 2019a, 2019b, 2020a, 2020b e 2021), no que diz respeito à área de estudo e a obtenção de dados, de forma que a modelagem de qualidade de água a ser executada para este trabalho utilizará a mesma base de dados iniciais que fora obtida no projeto.

Para que um modelo possua simulações acuradas, é necessário que ele passe por processos de calibração e de validação. O primeiro trata da escolha e utilização de dados de entrada confiáveis, que servem para ajudar a definir as condições iniciais da modelagem, e parâmetros de calibração, que devem ter seus comportamentos ao longo da simulação suficientemente próximos à realidade, por meio da comparação com pontos medidos. Já na validação são comparados os valores obtidos pelo modelo, com valores medidos dos mesmos parâmetros da calibração, porém em uma situação distinta, tanto espacial quanto temporal.

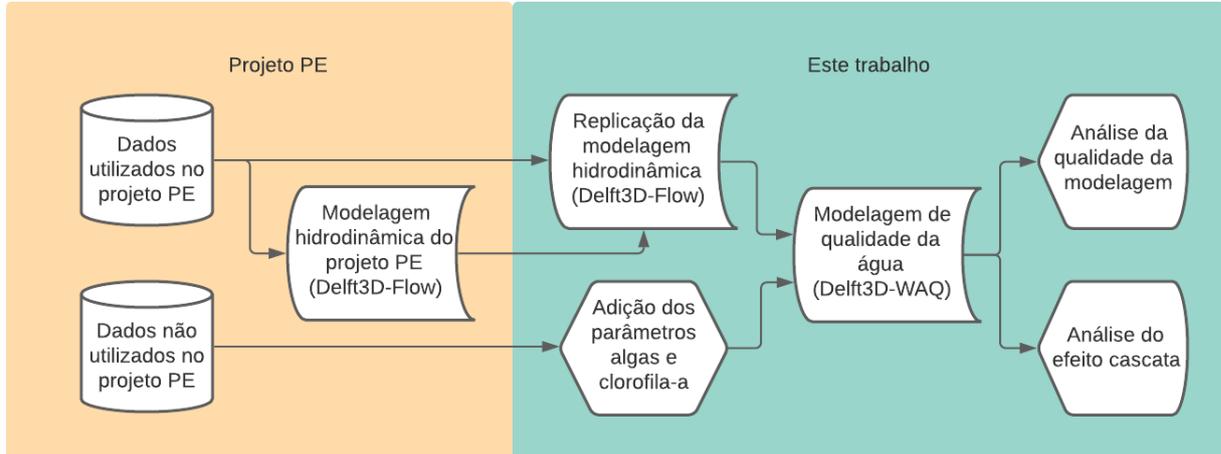
Após a validação, os modelos numéricos permitem inúmeros testes para análise de qualidade da água, como testes de comportamento futuro (desde que se estime as condições futuras pelas quais o corpo hídrico sofrerá influências). Os parâmetros de transporte podem ser utilizados para teste de comportamento do corpo hídrico quanto a outras substâncias poluentes não consideradas inicialmente na simulação, seja por falta de dados, seja por fugir do escopo inicial de tal modelagem. Este é o caso deste trabalho, que irá incluir os efeitos da presença de algas na análise da qualidade de água da área de estudo.

Nas subseções a seguir será descrita a metodologia deste trabalho, cabe destacar que boa parte desta vem do projeto PE. Como este trabalho tem a ideia de dar continuidade aos resultados e a discussão aberta por esse projeto, porém com um foco específico, é necessário rever métodos, conceitos, dados e informações lá levantadas que possuem grande relevância neste trabalho, como a descrição da área de estudo, pois a deste trabalho é apenas uma parte de todo o projeto PE.

Além da área de estudo, também se faz necessário apresentar o banco de dados utilizado para este trabalho, proveniente de dados levantados e analisados durante o projeto PE, com a incrementação dos dados utilizados exclusivamente para este trabalho, mas que também foram lá obtidos. E por fim, a metodologia, separada entre subseções das quais tratam de abordagens desenvolvidas no projeto e as que

foram desenvolvidas já com base no enfoque específico deste trabalho. A FIGURA 1 ilustra a como foi desenvolvido este trabalho, indicando a utilização de muitas informações vindas do projeto PE.

FIGURA 1 – FLUXOGRAMA GERAL



FONTE: O autor (2021)

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 A bacia hidrográfica e o rio Paranapanema

A bacia do rio Paranapanema (FIGURA 2), na qual se encontram os reservatórios de objeto de estudo, possui 900 km de extensão e uma área de 100.800 km², e é de grande relevância nacional em aspectos socioeconômicos, visto que o rio Paranapanema faz grande parte da fronteira dos estados de São Paulo e Paraná, desaguando no rio Paraná, também de extrema relevância para o Brasil e países vizinhos como a Argentina e o Paraguai.

O fato da bacia se situar em dois estados faz com que esta possua diferentes modelos de gestão governamental estadual, por isso, é interessante ver que o Estado do Paraná possui 7 Unidades de Gestão Hídrica (UGH) enquanto o Estado de São Paulo possui 3 UGH's.

A Bacia Hidrográfica do rio Paranapanema abrange 247 municípios, com 212 destes possuindo sede urbana na bacia, sendo que 132 deles estão no estado do Paraná e 115 no estado de São Paulo. Possui uma população estimada de mais de 4,5 milhões de habitantes, sendo 87,5% urbana e 12,5% rural, onde 62,9% são residentes do Paraná e 37,1% de São Paulo (CBH PARANAPANEMA, 2019).

FIGURA 2 - BACIA DO RIO PARANAPANEMA



FONTE: FERNANDES *et al.* (2019a).

Cabe destacar que a área da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos (UGRH) do Rio Paranapanema, com 105.921 km², é levemente superior à da bacia do rio Paranapanema, devido a inclusão da bacia do rio Santo Anastácio, que embora não faça parte da bacia do rio Paranapanema, é integrante da Unidades de Gestão Hídrica – UGH Pontal do Paranapanema, que é uma das três unidades de gestão da vertente paulista pertencentes ao Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) Paranapanema.

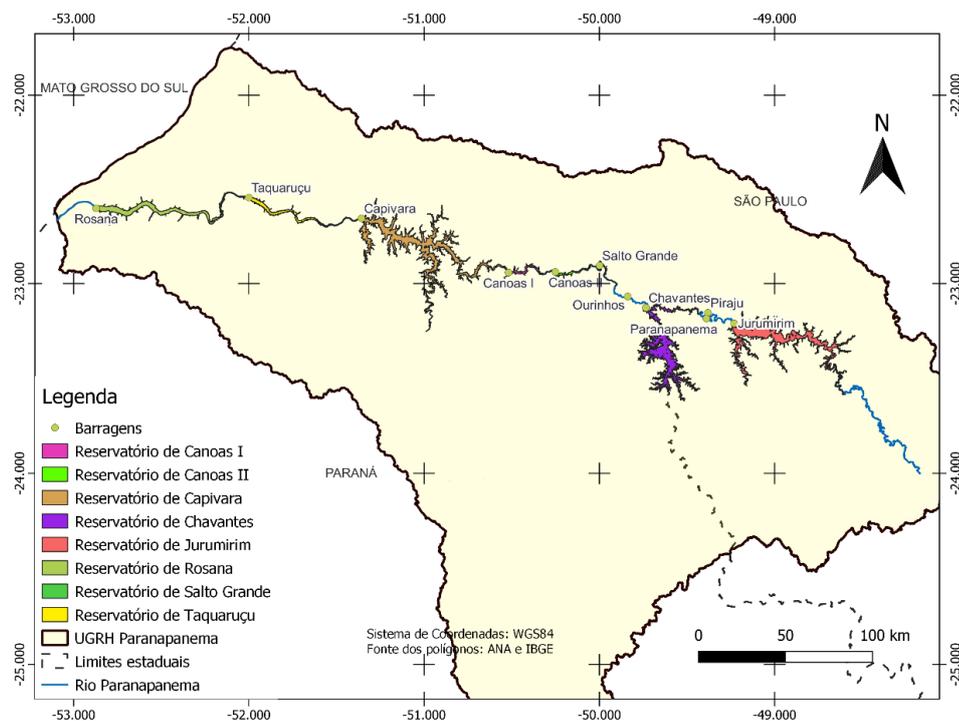
Já o rio Paranapanema nasce na Serra dos Agudos Grandes, sudoeste paulista, em uma altitude de 900 metros e a cerca de 100 km da Costa Atlântica, com cerca de 900 km de extensão até sua foz no Rio Paraná, em uma altitude de 239 metros (CBH PARANAPANEMA, 2019). Seus principais afluentes são o rio Tibagi, o rio Itararé, e o rio das Cinzas.

3.1.2 Os reservatórios

Como observado na seção 2.1, reservatórios podem apresentar uma hidrodinâmica bastante distinta de rios, com significativas diferenças espaciais e temporais.

A bacia do rio Paranapanema conta com 11 usinas hidrelétricas em operação, o que transformou o curso do rio em uma sucessão desses 11 reservatórios justapostos, em cascata, sendo as usinas: Jurumirim, Piraju, Paranapanema, Chavantes, Ourinhos, Salto Grande, Canoas II, Canoas I, Capivara, Taquaruçu e Rosana (FIGURA 3).

FIGURA 3 – BARRAGENS E RESERVATÓRIOS DO RIO PARANAPANEMA



FONTE: O autor (2021).

Oito destas usinas são operadas pela China Three Gorges Brasil Energia, conhecida como CTG Brasil, que é sucessora da Duke Energy (controladora até 2017), sendo as usinas Jurumirim, Chavantes, Salto Grande, Canoas I, Canoas II, Capivara, Taquaruçu e Rosana. Em seus reservatórios, já foram realizados estudos de análises de variações espaciais e temporais, inclusive com modelagem, durante os “Estudos de Implantação dos Parques Aquícolas nos Reservatórios do Rio

Paranapanema” (IGIA, 2013) que gerou informações importantes como as dispostas na TABELA 1.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS E TEMPOS DE RESIDÊNCIA DOS RESERVATÓRIOS

Reservatório	Cota (m)	Volume (10⁶m³)	Vazão (m³/s)	TR* (dias)
Jurumirim	568,00	7.107,28	210	391,72
Chavantes	474,00	8.952,51	322	322,15
Salto Grande	384,67	42,29	431	1,14
Canoas II	366,00	165,55	443	4,33
Canoas I	351,00	222,90	461	5,60
Capivara	334,00	11.622,73	1.058	127,15
Taquaruçu	284,00	969,53	1.102	10,18
Rosana	258,00	2.135,26	1.233	20,04

FONTE: IGIA (2013)

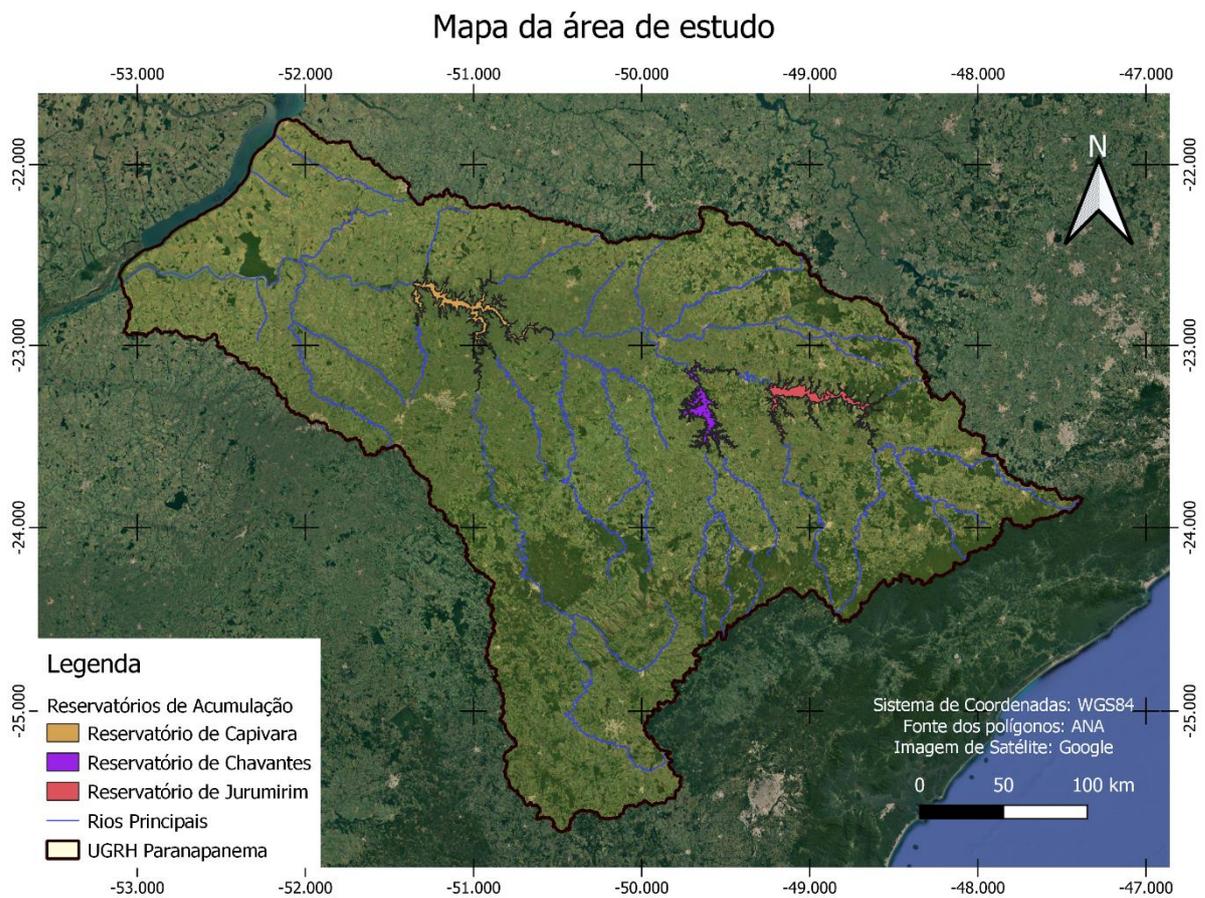
* TEMPO DE RESIDÊNCIA TEÓRICO

Os reservatórios podem ser classificados em dois tipos, dadas as suas características e formas de operação, afetando diretamente na qualidade da água e na distribuição das comunidades aquáticas, inclusive a fauna de peixes. A classificação é feita com base na Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005):

- a) Reservatórios lânticos: demoram um longo período até a renovação completa de sua água (alcançando muitos meses), ou seja, um grande tempo de residência, maior ou igual a 40 dias. Geralmente possuem maior profundidade e amplas áreas alagadas, podendo apresentar grandes variações de nível da água. Entram nessa categoria os reservatórios Jurumirim, Chavantes e Capivara, sendo eles de fato a área de estudo deste trabalho. Estes três reservatórios são corpos d’água lânticos com amplo espelho d’água e com forma dendrítica;
- b) Reservatórios intermediários: geralmente possuem áreas alagadas e profundidade moderada, além de baixo tempo de residência da água no reservatório (de alguns dias ou poucas semanas até renovação completa, ou até 39 dias). Dessa categoria fazem parte todos os demais reservatórios do rio Paranapanema. É chamado de intermediário pois são ambientes que estão entre as condições lânticas acima apresentadas e as condições de ambientes lóticos, que são os rios, riachos e córregos.

Os reservatórios lânticos causam grandes alterações em todo o ambiente no qual estão inseridos, gerando impactos sociais, impactos à fauna e à flora, e também impactos nos processos biológicos, que afetam a qualidade da água do rio. Por estes fatores, são eles a área de estudo para este trabalho, representada na FIGURA 4, de modo que serão analisados de maneira individual e também coletiva, portanto é importante destacar algumas informações sobre cada um deles.

FIGURA 4 – RESERVATÓRIOS LÂNTICOS DA UGRH PARANAPANEMA



FONTE: O autor (2021).

3.1.2.1 Jurumirim

Conforme se observa na FIGURA 3, o reservatório Jurumirim é o primeiro reservatório a montante do rio Paranapanema, de modo que controla grande parte da vazão que chegará nos reservatórios logo a jusante dele, como Salto Grande e Chavantes. Isso também faz com que uma eventual piora na qualidade de água em

Jurumirim seja transportada pelo rio e afete a qualidade desses e de todos os outros reservatórios a jusante.

O reservatório, representado na FIGURA 5, possui um volume de 7,2 bilhões de m³ de água, até 449 km² de área inundada (CTG BRASIL, 2019), além de um comprimento de pouco mais de 100 km, com alguns pontos atingindo mais de 3 quilômetros de largura. Quanto ao tempo de detenção, é de aproximadamente 392 dias, o maior entre todos os reservatórios da bacia do rio Paranapanema.

Sua construção foi iniciada em 1956, e finalizada em 1962. Atualmente, o reservatório banha ao todo 10 cidades do estado de São Paulo: Piraju, Cerqueira César, Arandu, Avaré, Itai, Taquarituba, Tejupá, Itatinga, Paranapanema e Angatuba.

FIGURA 5 – RESERVATÓRIO JURUMIRIM



FONTE: CTG BRASIL (2019).

3.1.2.2 Chavantes

O reservatório Chavantes permite a acumulação de 9,4 bilhões de m³ de água, no qual grande parte dele é represado do rio Itararé (DUKE ENERGY, 2012), que tem sua foz a uma distância de apenas 3 quilômetros a montante da barragem do reservatório. Chavantes, visto na FIGURA 6, possui uma área alagada máxima de cerca de 400 km² e um comprimento em torno de 60 km a montante no rio Itararé e

40 km a montante no rio Paranapanema. O tempo de detenção de 322 dias é um pouco menor que o observado no reservatório Jurumirim.

FIGURA 6 – RESERVATÓRIO CHAVANTES



FONTE: CTG BRASIL (2019).

Começou a ser construído em 1959 e foi finalizada apenas em 1971, mas já começou a operar em 1970 (DUKE ENERGY, 2012). Como o rio Itararé faz a divisa entre os estados de São Paulo e Paraná, o reservatório banha as cidades de Chavantes, Timburí, Fartura, Itaporanga e Barão de Antonina, em São Paulo, e as cidades de Salto do Itararé, Siqueira Campos, Carlópolis e Ribeirão Claro no Paraná.

Devido ao seu porte, estabelece regularidade em grande parte da vazão média do rio Paranapanema, auxiliando no controle de cheias, garantindo irrigação e outros proveitos da água à região ribeirinha.

3.1.2.3 Capivara

Ficando a jusante dos outros reservatórios lânticos descritos acima, o reservatório Capivara só está a montante dos reservatórios Taquaruçu e Rosana, ambos reservatórios a fio d'água. Portanto, Capivara pode estar mais disposto a sentir as alterações na qualidade da água dos reservatórios a montante, seja no reservatório Jurumirim seja, principalmente, no reservatório Chavantes, tanto em relação à pioras

quanto melhoras. Chavantes necessariamente tem a função de controlar a vazão para os reservatórios menores a sua jusante, prevenindo cheias.

É o maior reservatório ao longo do rio tanto em relação ao volume de água, com 10,5 bilhões de m³ represados (CTG BRASIL, 2019), como também na área alagada, com 609 km². O reservatório mostrado na FIGURA 7 possui um comprimento de 120 km ao longo do rio Paranapanema e um tempo de detenção de 127,15 dias, bem menor que os observados em Jurumirim e Chavantes.

FIGURA 7 – RESERVATÓRIO CAPIVARA



FONTE: CTG BRASIL (2019).

Foi iniciada a construção de sua barragem em 1971, sendo concluída em 1978. Assim como no reservatório Chavantes, este reservatório faz a divisa entre os estados do Paraná e de São Paulo, mas desta vez através do rio Paranapanema, banhando as cidades de Taciba, Nantes, Iepê, Gardênia, São José das Laranjeiras, Cruzália, Pedrinhas Paulista e Cândido Mota em São Paulo, além de Porecatu, Florestópolis, Alvorada do Sul, Primeiro de Maio, Sertanópolis, Rancho Alegre, Sertaneja, Leopólis, Santa Mariana e Itambaracá no Paraná.

3.2 BANCO DE DADOS

Modelagens hidrodinâmicas tridimensionais exigem uma grande quantidade de dados de entrada, de modo que possam simular as condicionantes ambientais das quais o corpo hídrico sofre influência. Portanto, são necessários os dados morfométricos, hidrológicos, climatológicos e da estrutura e operação dos reservatórios.

Devido à disponibilidade de dados de vazões e concentrações, o ano de 2012 foi escolhido como base para as simulações em toda a bacia Paranapanema, conforme poderá ser observado na seção 3.2.2.2.

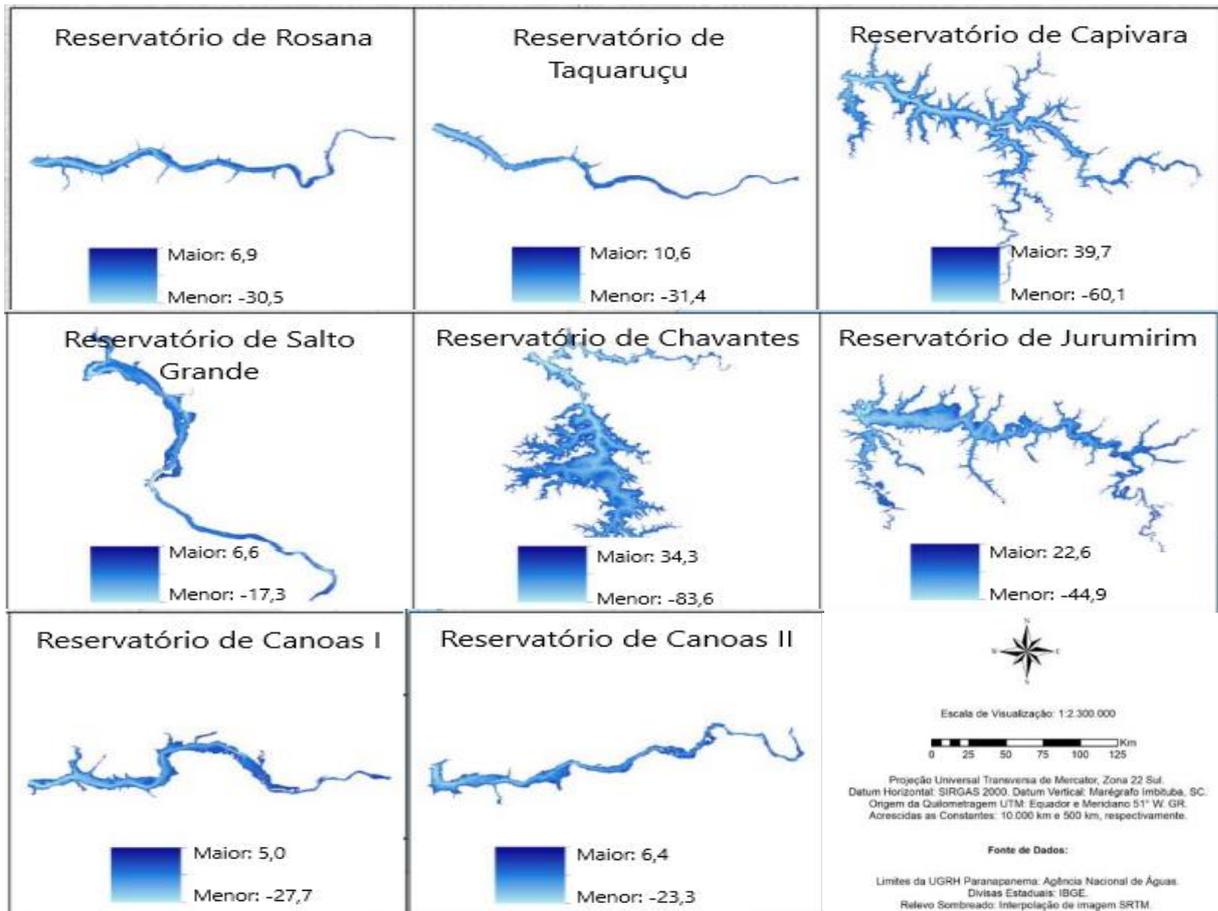
Muitas das informações obtidas referem-se a dados produzidos e/ou organizados no âmbito de dois projetos distintos, um feito sob contratação do Ministério da Pesca para estudos relacionados à aquicultura no Paranapanema, datado do ano de 2012 (no qual houve uma análise de variações espaciais e temporais com modelagem) chamado de “Estudos de Implantação dos Parques Aquícolas nos Reservatórios do Rio Paranapanema” (IGIA, 2013), elaborados pelo GIA (Grupo Integrado de Aquicultura e Estudos Ambientais), e outro relacionado ao Plano de Bacia do Paranapanema (Plano Integrado de Recurso Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema), desenvolvido no ano de 2016 (ANA, 2016).

Porém, como se tratam de diferentes fontes de dados, houve muitos dados repetidos, e outros inconsistentes, de modo que foi necessário uma avaliação sobre quais eram cabíveis ao escopo do projeto PE, priorizando a manutenção de dados mais atualizados. Em seguida serão apresentados muitos dos dados levantados, assim como a metodologia pela qual foram escolhidos, por toda a equipe do projeto e que serão utilizados também neste trabalho, além dos dados utilizados exclusivamente para este trabalho, que também foram obtidos pela equipe do projeto PE, mas que não foram lá utilizados.

3.2.1 Dados Morfométricos

A morfometria do local foi obtida através de um levantamento batimétrico dos reservatórios encontrado no projeto PE, de cada um dos reservatórios presentes na bacia do rio Paranapanema (FIGURA 8).

FIGURA 8 - BATIMETRIAS DOS RESERVATÓRIOS DA UGRH PARANAPANEMA



FONTE: Adaptado de FERNANDES *et al.* (2019a).

Observa-se que os reservatórios com regimes lênticos, com maiores tempos de residência, conforme visto anteriormente na TABELA 1, possuem as maiores profundidades (67,5 metros – Jurumirim, 117,9 metros – Chavantes e 99,8 metros - Capivara), já os outros reservatórios com regime intermediário chegaram à profundidade máxima de 42,0 metros para o Reservatório de Taquaruçu, e a menor sendo de 24,1 metros para o Reservatório de Salto Grande.

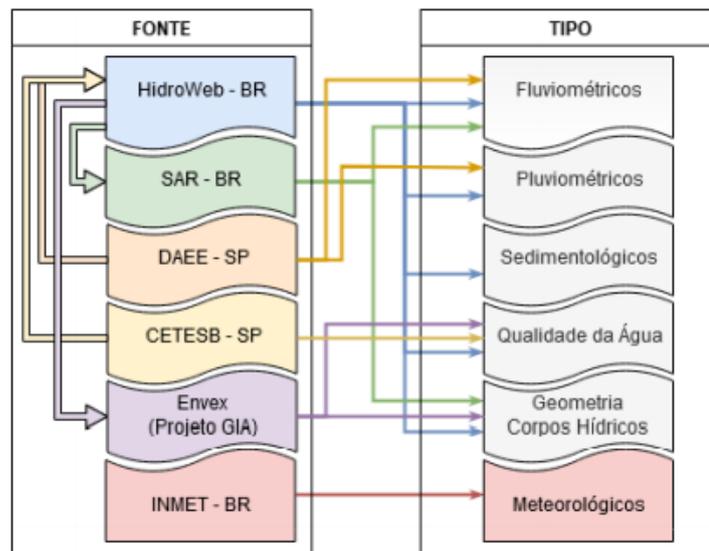
3.2.2 Dados Hidrológicos e Meteorológicos

O banco de dados hidrológicos e meteorológicos do projeto PE é composto por dados das seguintes fontes: HidroWeb (ANA), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), além de uma campanha complementar realizada pela empresa Envex

Engenharia e Consultoria no ano de 2012 durante o projeto GIA, requisitado pelo Ministério da Pesca.

A relação entre essas fontes de dados, além da ocorrência de realimentação de dados entre elas, ou seja, o banco de dados de uma fonte possuir dados de outra fonte, pode ser observado através de um fluxograma que também contempla a fonte de dados meteorológicos (FIGURA 9).

FIGURA 9 - FONTES DE DADOS E SEUS ESQUEMAS DE ALIMENTAÇÃO

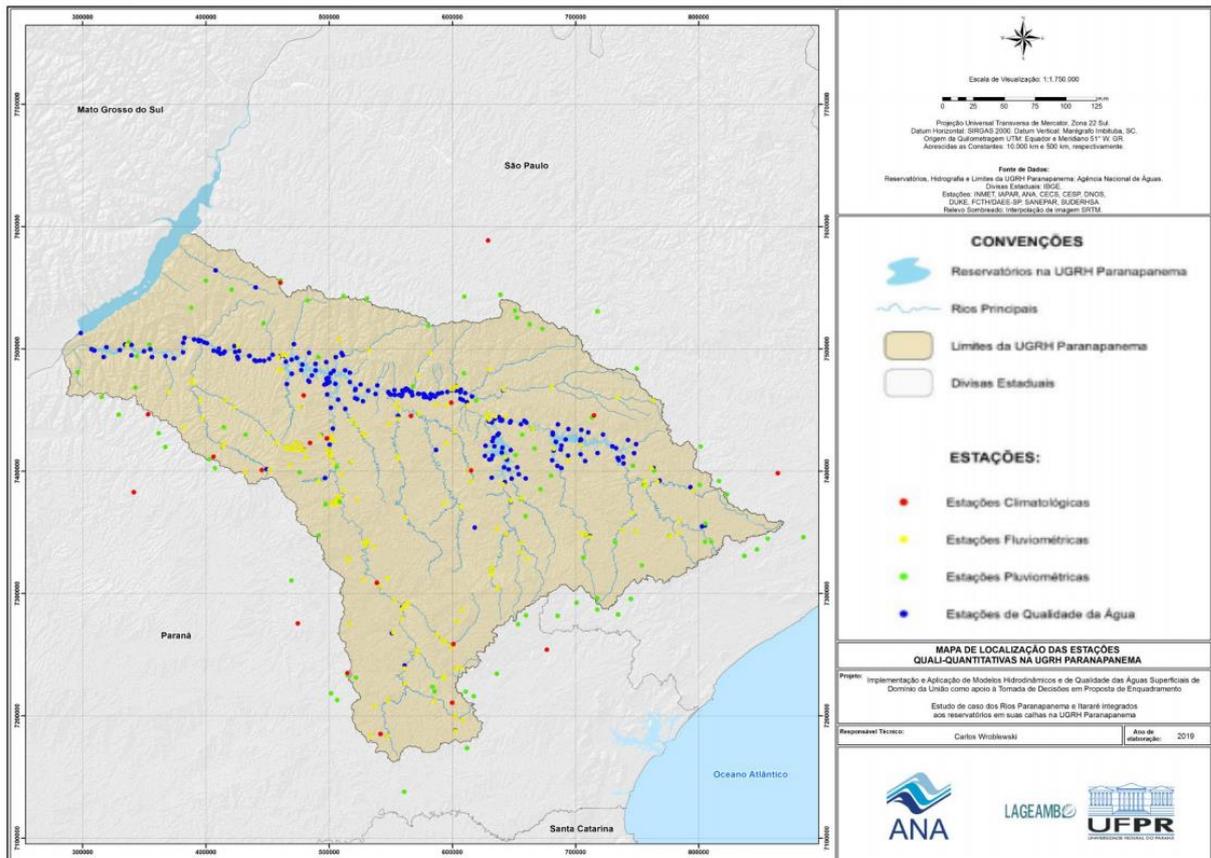


FONTE: FERNANDES *et al.* (2019b).

Através dessas diversas fontes de dados, foi possível verificar uma grande representação de toda a extensão espacial da bacia, com uma grande quantidade de estações ao longo de todo o rio Paranapanema e Itararé (FIGURA 10), porém como dito anteriormente, foi necessária uma avaliação quanto à representatividade desses dados, seja em questão de repetições e também temporal, visto que as estações sofrem com problemas de manutenção e calibração frequentemente.

Quanto à área de estudo, nos 3 reservatórios de regime lântico foram obtidos dados dessas diferentes fontes citadas acima e, apesar dos pontos de medição de cada fonte serem referentes ao mesmo ambiente (barragem), não coincidem totalmente. Essas diferenças podem ser associadas aos métodos e locais de medição (seção horizontal), precisão do equipamento e/ou erro humano na leitura.

FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES DE DADOS DA UGRH PARANAPANEMA



FONTE: FERNANDES *et al.* (2019a).

3.2.2.1 Eliminação de Repetições

O método utilizado no projeto para eliminar repetições, considerou inicialmente que estações com distâncias menores que 50 metros em linha reta uma das outras seriam agrupadas em uma única estação, de modo que os dados são pareados em relação a data de medição formando novos dados, considerando que dados consistidos possuem prioridade, e os novos dados são equivalentes à média dos dados consistidos obtidos das estações, porém caso não haja dados consistidos a média é feita com base em dados brutos.

3.2.2.2 Período de Análise

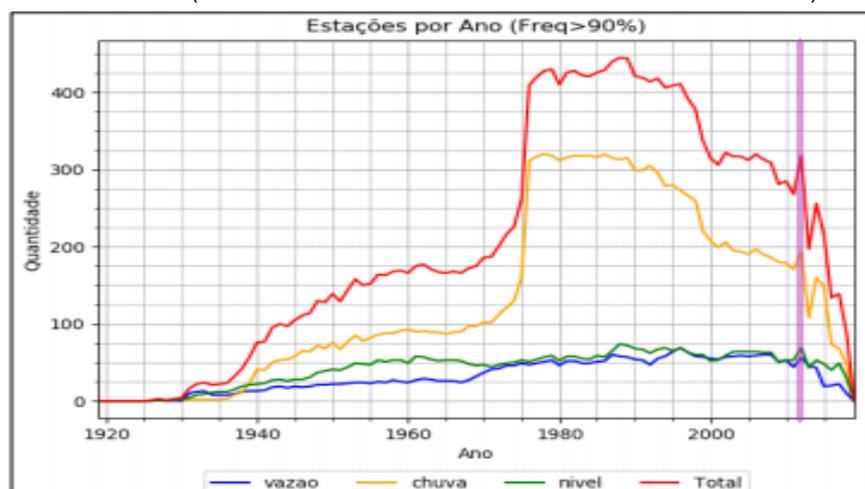
A escolha do ano base de 2012 foi devido a sua maior disponibilidade de dados, o que foi observado através de uma análise quantitativa dos dados de vazão,

nível e chuva de cada estação, sendo estes os parâmetros mais críticos considerando a modelagem.

Dados meteorológicos e de qualidade de água não foram considerados como limitantes nessa questão de periodicidade, visto que o primeiro possui frequência regular e não apresenta limitações de uso em quantidade e o segundo não possui muita representatividade espacial e temporal se comparado aos parâmetros principais adotados.

A análise quantitativa foi feita através da contagem do número de estações que possuem uma frequência de dados superior a 90% de dias medidos ao ano, visto que os três parâmetros possuem dados diários e que o período de modelagem foi determinado como sendo de até um ano para alguns processos, o que reduziria consideravelmente a qualidade da modelagem em caso de menor frequência de dados. Os resultados dessa análise podem ser observados na FIGURA 11.

FIGURA 11 - QUANTIDADE DE ESTAÇÕES COM FREQUÊNCIA DE DADOS SUPERIOR A 90% AO ANO (LINHA VERTICAL REPRESENTA O ANO DE 2012)



FONTE: Adaptado de FERNANDES *et al.* (2019b).

Observa-se o início da implementação dos sistemas de medição fluviométrica e pluviométrica, por volta de 1930, na bacia do rio Paranapanema, tendo um crescimento aproximadamente constante até ano de 1968. Logo depois, ocorre um salto considerável no número de estações, criando um patamar constante, bastante elevado até 1998. Após esse período, ocorre um decréscimo na quantidade de informações disponíveis. Por fim, chega-se a níveis ainda mais baixos para os últimos

5 anos observados, considerando a data da Nota Técnica 2 (Fernandes *et al.*, 2019b), do qual deve ser desconsiderado o ano de 2019, visto que ainda não estava completo.

Também foi considerada uma análise subjetiva quanto à distribuição espacial das estações, já que pode gerar tendências dado o tamanho da bacia. A distância cronológica do ano de 2019, ano do início do projeto, também foi considerada para definir o cenário atual, já que a hidrodinâmica sofre leves alterações com o passar dos anos.

A partir dos critérios acima descritos, relacionados à quantidade, à distribuição espacial e à distância temporal dos dados, foram realizadas algumas definições.

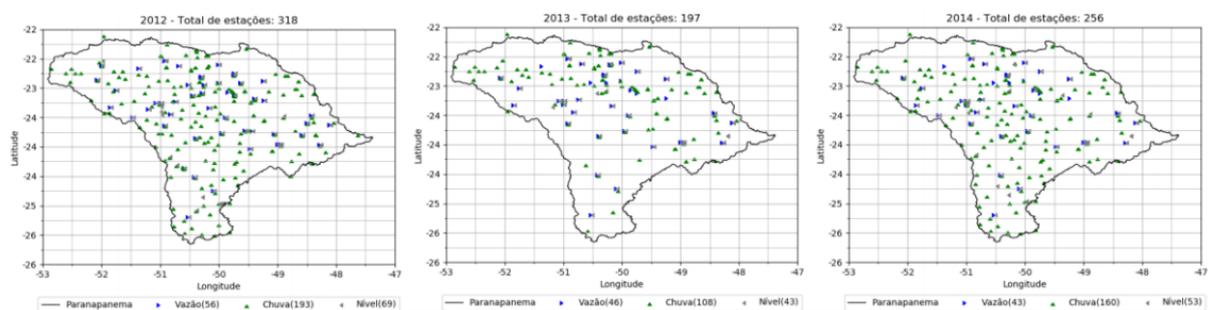
Quanto à distância temporal, foi definido que os dados não poderiam ser anteriores ao ano de 2012, sendo considerado o uso de séries históricas a partir deste ano.

Para a quantidade de dados, o período de maior quantidade de estações respeitando o critério de frequência de dados anuais de 90% foi de 1975 até 1994, porém como se encontra fora dos limites de distância temporal, os anos com maior quantidade foram 2012, 2013 e 2014, com 318, 197 e 256 estações definidas para a modelagem, respectivamente.

A distribuição espacial (FIGURA 12) revelou que o ano de 2013 possui uma baixa representação da região sul da bacia, diferente do observado nos anos de 2012 e 2014, com uma melhor distribuição e quantidade de dados.

Por fim, a escolha se deu pelo ano de 2012 devido a maior quantidade de estações e, conseqüentemente, dados em relação a 2014, visto que a distribuição espacial dos dois é semelhante e a baixa distância temporal entre eles não justifica a escolha para o ano de 2014.

FIGURA 12 - DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ESTAÇÕES NA BACIA PARA OS ANOS DE 2012, 2013 E 2014



FONTE: FERNANDES *et al.* (2019b).

3.2.3 Operação das Usinas e suas Barragens

Anteriormente na seção 3.1.2 foi mostrada a definição e classificação de reservatórios lânticos seguindo a Resolução CONAMA 357/2005, que ajudou a definir a área de estudo deste trabalho. Nesta seção são apresentadas algumas informações importantes quanto a operação das grandes usinas hidroelétricas destes reservatórios, juntas geradoras de uma grande porcentagem de toda a energia produzida na bacia do rio Paranapanema, e também as quais suas construções causaram maiores impactos socioambientais na região, tanto em relação à intensidade quanto à extensão desses impactos.

3.2.3.1 UHE Jurumirim

A construção da Usina Hidrelétrica de Jurumirim contempla o reservatório Jurumirim e segundo o Banco de Informação de Geração (SIGA, 2020), permite a geração de 100,956 MW de energia, através de duas turbinas do tipo Kaplan (CTG BRASIL, 2019).

A barragem de Jurumirim é do tipo mista, feita de concreto por gravidade e terra, tendo 570 m de cota na crista. A obra contém dois vertedores, um do tipo superfície, com três comportas, e um tipo fundo, com dois vãos (DUKE ENERGY, 2012). A TABELA 2 mostra as características operacionais do reservatório.

TABELA 2 - PONTOS CARACTERÍSTICOS PARA OPERAÇÃO DA USINA JURUMIRIM

Pontos característicos	Cota (m)	Volume (hm³)	Área (km²)
Maximorum	569,50	7.701,09	475,84
Máximo oper.	586,00	7.007,51	448,93
Mínimo oper.	559,70	3.842,90	321,15
Delta oper.	8,30	3.164,61	127,78

FONTE: Hydrodata

Essa barragem é essencial no aproveitamento da região do Médio Paranapanema, pois assegura a normalização das águas para as usinas Chavantes e Salto Grande (CTG BRASIL, 2019).

3.2.3.2 UHE Chavantes

A Usina Hidrelétrica de Chavantes possui uma barragem de seção mista com 90 m de altura acima das fundações e cota da crista igual à 479 m, feita de concreto por gravidade, terra e enrocamento. O projeto da usina contém quatro unidades geradoras com turbinas tipo Francis de 103,5 MW (CTG BRASIL, 2019) e um vertedouro do tipo superfície com três vãos (DUKE ENERGY, 2012). A TABELA 3 exhibe as características operacionais do reservatório.

TABELA 3 - PONTOS CARACTERÍSTICOS PARA OPERAÇÃO DA USINA CHAVANTES

Pontos característicos	Cota (m)	Volume (hm³)	Área (km²)
Maximorum	475,50	9.409,52	418,94
Máximo oper.	474,00	8.795,10	400,28
Mínimo oper.	465,23	5.754,00	295,02
Delta oper.	8,77	3.041,10	105,26

FONTE: Hydrodata

3.2.3.3 UHE Capivara

O empreendimento da Usina Hidrelétrica de Capivara tem um vertedouro do tipo superfície com oito vãos e quatro grupos geradores com turbinas do tipo Francis (DUKE ENERGY, 2012), totalizando 619 MW de potência instalada (SIGA, 2020), energia suficiente para abastecer uma cidade com aproximadamente 1,2 milhões de habitantes. A barragem é do tipo mista, feita de cimento, terra e enrocamento, com 60 m de altura acima das fundações e 339 m de cota da crista (DUKE ENERGY, 2012). A TABELA 4 exhibe as características operacionais do reservatório.

TABELA 4 - PONTOS CARACTERÍSTICOS PARA OPERAÇÃO DA USINA CAPIVARA

Pontos característicos	Cota (m)	Volume (hm³)	Área (km²)
Maximorum	336,00	11.741,35	623,70
Máximo oper.	334,00	10.541,35	576,30
Mínimo oper.	321,00	4.816,83	319,46
Delta oper.	13,00	5.724,52	256,84

FONTE: Hydrodata

3.2.4 Processamento de dados pré e pós modelagem

Desenvolvidas durante o projeto PE, foram necessárias algumas medidas de processamento tanto para os dados medidos, que foram utilizados como dados iniciais na modelagem, como para os dados gerados, que precisam cumprir com o objetivo final de entendimento do comportamento e da situação da qualidade de água da área de estudo.

Para que o modelo simule as condições do corpo hídrico de maneira adequada, é preciso que a entrada de dados atenda a todas as necessidades exigidas pelo modelo, a qual inclui dados não disponíveis e dados em escalas temporais menores que as disponíveis. Conforme visto no início da seção 3.3, uma das formas de contornar estes problemas é estimar valores e produzir séries sintéticas, respectivamente.

Já após a obtenção de resultados pelo modelo, é necessário primeiramente analisar a validade destes dados, depois se segue para a comparação dos valores obtidos em relação a outros modelos, em relação aos limites exigidos pela legislação quanto a qualidade de água e também quando possível, em relação a dados históricos.

Nesse contexto, a curva de permanência surge como uma ferramenta complementar para planejamento e gestão de recursos hídricos, uma vez que estima o risco de atendimento a padrões. Esse artifício combina as principais características de um sistema, dentro de um intervalo de variabilidade; assim, permite garantir flexibilidade para classificações de enquadramento, verificar a frequência de transgressões, ou estimar períodos e locais críticos, definindo planejamento adequado para retiradas de água, liberação de efluentes e taxas de uso de água ao longo do ano. (FERNANDES *et al.*, 2019a, p. 55).

De forma parecida, boxplots são capazes de representar de forma resumida a variabilidade da série de dados, apresentando um valor central (mediana, 2º quartil), os 25º e 75º percentis, mínimo e máximo valores não atípicos e valores atípicos (FERNANDES *et al.*, 2019a).

Já os gráficos de concentração mostram as variações ao longo do tempo, sendo indispensáveis em qualquer análise de dados temporais, pois essas variações que geralmente possuem um grande índice de aleatoriedade difícil de ser simulado ou ao mesmo replicado.

Através desses gráficos, é possível comparar séries sintéticas com séries históricas para avaliação da representatividade dessas séries geradas, facilitando a definição e geração de dados de entrada para os modelos.

Já para a análise de resultados, além de permitir todas as comparações descritas acima, também permitem uma melhor análise do comportamento das séries de dados resultantes, observando, por exemplo, o quão significativos são os valores extremos observados (máximos e mínimos), além da verificação de homogeneidade entre esses valores.

3.3 MODELAGEM

Como visto na seção 2.4, modelos hidrodinâmicos são amplamente utilizados para facilitar a avaliação de qualidade de água de corpos hídricos. Na literatura se encontra vários tipos de modelos, de modo que todos possuem vantagens e desvantagens em sua aplicação, podendo produzir resultados bastante distintos uns dos outros e também da realidade, dadas suas limitações.

Modelos tridimensionais resolvem as equações de continuidade, quantidade de movimento e do transporte (FERNANDES *et al.*, 2019a) em escoamentos hidrodinâmicos sem necessitar de grandes simplificações, já que podem simular sistemas de escoamento não-uniforme e de regime não-permanente. Além disso, devido à escala tridimensional, permitem a análise completa de variações espaciais quanto a hidrodinâmica e o transporte de poluentes, de maneira a destacar regiões com maior necessidade de atenção em um corpo hídrico se comparado a modelos mais simples com menores níveis de dimensionalidade.

Porém, em desvantagem, necessitam de uma maior quantidade de dados, dos quais muitos são de difícil obtenção ou não disponíveis, além de muitos que estão disponíveis em uma escala temporal padrão, serem necessários em uma escala temporal menor, fazendo com que muitos dados tenham de ser estimados, seja por meio de simulações, interpolações, seja por adoção de valores padrão, como visto na seção 3.2.4. Esses fatores podem fazer com que os resultados obtidos através do modelo se tornem inadequados, de modo a não refletirem condições reais do corpo hídrico analisado.

Outro ponto negativo é a demanda computacional e temporal para a obtenção de resultados, visto que são inúmeras operações matemáticas a serem realizadas a

cada célula da grade computacional e a cada espaço de tempo adotados, fazendo com que simulações de grandes corpos hídricos em um período de tempo razoável para se verificar alterações temporais e espaciais exija muito processamento da máquina a rodar o programa e também muito tempo para a obtenção de resultados, como um mês para a obtenção de um ano de simulação do modelo hidrodinâmico Delft3D-FLOW para o Reservatório Jurumirim (Fernandes *et al.*, 2020b).

Já o modelo 2D utilizado, apesar da simplificação na componente zenital do reservatório, ou seja, a profundidade, a qual se utiliza apenas uma média em cada ponto, considera as mesmas equações do modelo 3D nas direções horizontais e verticais, podendo produzir resultados bastante satisfatórios e tendo uma demanda computacional e temporal muito menor.

Nesta seção, além de uma breve apresentação sobre o modelo Delft3D, principalmente em seus módulos hidrodinâmico (Delft3D-Flow) e de qualidade de água (Delft3D-WAQ), também será entendida a sua aplicação já realizada no projeto PE, e também de que forma será realizada a sua aplicação para este trabalho.

3.3.1 O Modelo Delft3D

Conforme visto na seção 2.4, o modelo matemático hidrodinâmico Delft3D já se mostrou capaz de simular diversas condições de corpos hídricos distintos, mostrando resultados condizentes com o esperado, sendo que geralmente o fator limitante para a obtenção de melhores resultados se dá pela falta de dados de entrada que transmitam condições específicas do corpo hídrico analisado.

Em relação a aplicação neste trabalho, a escolha pelo Delft3D se mostra justificada devido ao fato de ser um modelo tridimensional muito utilizado na solução de problemas relacionados à reservatórios, como estratificação térmica e principalmente qualidade da água, como observados na seção 2.4.1, por trabalhos como os de Wahl e Peeters (2014) e Soullignac *et al.* (2017).

O módulo hidrodinâmico Delft3D-Flow simula escoamento não permanente bidimensional (média na vertical) e tridimensional e transporte devido às forçantes meteorológicas, de maré e de descargas em rios, inclui efeitos de densidade (devido a gradientes verticais de temperatura e salinidade) e ainda, o transporte de sedimentos suspensos. Este módulo fornece as condições hidrodinâmicas utilizadas

pelos demais módulos, sendo o primeiro passo para qualquer simulação a ser desenvolvida pelo programa Delft3D (HARARI *et al.*, 2020).

O módulo de qualidade da água (WAQ) permite a simulação de várias substâncias, como nutrientes, oxigênio dissolvido e micro poluentes (DELTARES, 2018c). É um modelo bi ou tridimensional usado para representar a qualidade da água em ambientes naturais e artificiais através da resolução das equações de advecção-difusão com reações para uma grade computacional predefinida pelo Delft3D-Flow e várias substâncias diferentes (HARARI *et al.*, 2020).

3.3.2 Aplicação de modelagem matemática no projeto PE

Conforme observado em Fernandes *et al.* (2019a, p.11):

A Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei Nº 9.433/1997, estabelece uma série de princípios e instrumentos para a gestão de águas, porém observa-se que ainda há necessidade de sua implementação para a adequada avaliação de seus efeitos e para contribuir efetivamente para a gestão de bacias hidrográficas. Dentre os instrumentos estabelecidos encontra-se o enquadramento de corpos d'água em classes, de acordo com o uso preponderante, que tem como objetivo prevenir a poluição e assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes.

Portanto, o enquadramento consiste em definir a classe dos corpos d'água com base em seu uso preponderante, sendo que a Resolução CONAMA 357/2005 preconiza uma série de parâmetros de qualidade da água a serem atendidos.

[...] A classificação é realizada em cinco grupos, para águas doces: Classe Especial; Classe 1; Classe 2; Classe 3; e Classe 4. A Classe Especial representa os usos mais exigentes, ou seja, aqueles que requerem uma melhor qualidade da água, como a proteção e preservação da vida aquática, o outro extremo, a Classe 4, expressa os usos menos exigentes, como a navegação e a harmonia paisagística. (FERNANDES *et al.*, 2019a, p. 11).

Além disso, o enquadramento busca definir metas de classes futuras, de modo a auxiliar tomadas de decisão e ações de planejamento futuro, tendo como prioridade a manutenção do uso de água nas diferentes esferas socioeconômicas.

Devido a essa diversificação de necessidades de uso de água em uma bacia extensa como a do rio Paranapanema, é necessário que o enquadramento proposto esteja de acordo com essas necessidades. Por isso, a análise simplista de todo o rio não se mostra adequada, destacando a demanda por uma segmentação desse rio de

modo que cada trecho possua uma análise individualizada quanto a classificação adequada, como também uma análise sobre os efeitos de cada trecho uns sobre os outros, de montante para a jusante, detectando assim pontos que necessitam maior atenção quanto a manutenção ou melhoria de qualidade de água.

Como visto anteriormente, o uso de modelos matemáticos se mostra fundamental nesse processo, pois além de permitirem simular condições reais atuais, também possibilitam representar propostas alternativas e propostas futuras através de cenários de degradação ambiental, propostos e também hipotéticos, que poderiam ocorrer dentro de um limite de incertezas inerentes ao conhecimento científico (FERNANDES *et al.*, 2019a).

Portanto, devido às condições acima e ao fato de a UGRH Paranapanema possuir uma vasta área de estudo, as quais foram divididas em seções, faz com que sejam necessárias diversas simulações com diferentes configurações.

Devido às desvantagens anteriormente citadas para a aplicação de modelos tridimensionais para escoamentos, se mostrou inviável a utilização destes para todas estas simulações, visto que modelos simplificados na modelagem de lagos e reservatórios mostraram inicialmente potencial (Fernandes *et al.*, 2019a) e depois de fato se mostraram capazes (Fernandes *et al.*, 2021) de ser aplicados, como também demonstrado por Polli (2018), em outra situação de comparação entre modelos com diferentes níveis de sofisticação.

Por exemplo, para o período do reservatório misturado, ou seja, período em que não há estratificação relevante, o enquadramento é feito com a modelagem considerando-se o reservatório como um reator totalmente misturado e é calculado o índice trófico em analogia ao gráfico de Vollenweider (1975). Este é o modelo zero dimensional (0D), que utiliza uma média dos parâmetros em todo o seu volume, algo que possibilita sua aplicação em qualquer setor e em qualquer cenário (FERNANDES *et al.*, 2019a; FERNANDES *et al.*, 2019b).

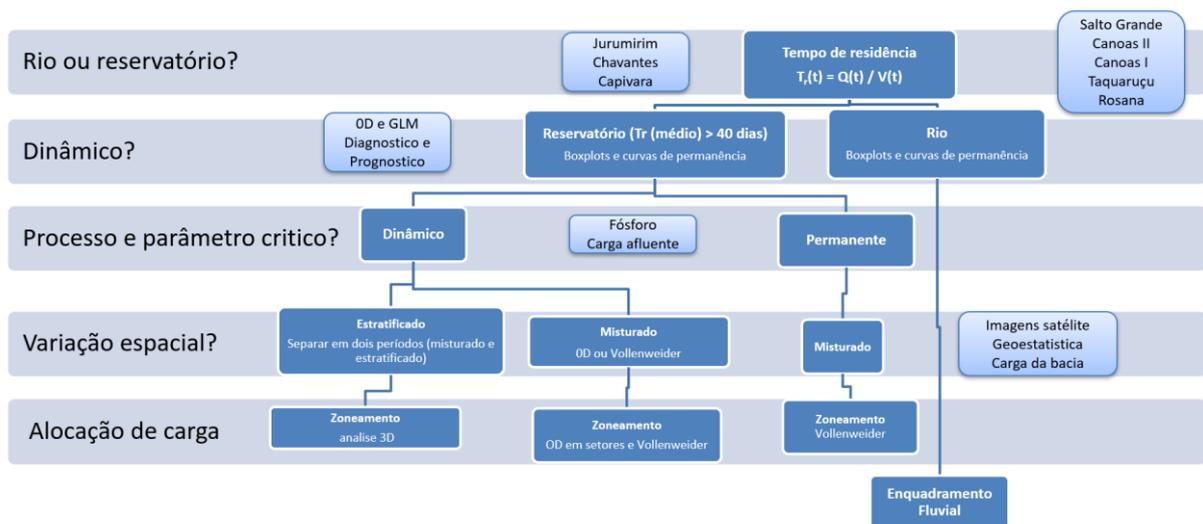
Em relação a área de estudo deste trabalho, a FIGURA 13 apresenta o esquema de classificação adotado para reservatórios, no qual a primeira etapa consiste na análise do tempo de residência, que quando maior que 40 dias é considerada sua alteração no ambiente fluvial, como visto na seção 3.1.2.

Na segunda etapa foi analisada a variação temporal das características físico-químicas dos reservatórios usando análises estatísticas de todos os parâmetros envolvidos (meteorológicos, hidrológicos, geométricos, qualidade de água) junto com

modelagem 1D na vertical com cenários do ano base e 3D para cenários hipotéticos, a fim de entender o comportamento dinâmico do reservatório, ou seja, as alterações no seu regime ao longo do tempo (FERNANDES *et al.*, 2021).

Nesse processo, a modelagem tridimensional hidrodinâmica com Delft3D, o Delft3D-Flow, no projeto PE foi utilizada para quantificar as variações espaciais em detalhe e comparar diferentes métodos de zoneamento para ajudar a definir o mais eficiente.

FIGURA 13 - ESQUEMA DE CLASSIFICAÇÃO DE RESERVATÓRIOS



FONTE: FERNANDES *et al.* (2021)

No total foram feitas 18 simulações, para o reservatório Jurumirim, sendo a situação de referência (base, ano 2012), os cenários acelerados e tendenciosos para os anos 2025 e 2035 com variações de carga e quatro cenários hipotéticos extremos, como descritos na Nota Técnica 3 (Fernandes *et al.*, 2020a) e cada vez uma simulação hidrodinâmica seguido por simulação de qualidade de água. Para os reservatórios Chavantes e Capivara somente foram feitos simulações do cenário hipotético mais crítico para testar e validar a metodologia de zoneamento obtido nas simulações para Jurumirim. (FERNANDES *et al.*, 2019b, p. 93-94).

Na terceira etapa, foi efetuada a modelagem de qualidade de água dos reservatórios através do Delft3D-WAQ, a qual utiliza como entrada a modelagem hidrodinâmica feita na etapa anterior. Através da base de dados do projeto foi possível avaliar vários parâmetros de qualidade de água, dentre os quais se destacam principalmente as concentrações de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), de Oxigênio Dissolvido (OD), de Nitrogênio (N) e de Fósforo (P).

Nesta etapa foi identificado através da modelagem no projeto PE o parâmetro mais crítico para a qualidade de água, sendo em todos os casos, para todos os reservatórios lênticos a carga de fósforo, que tem sua alta concentração no reservatório devido ao transporte pelos afluentes ao longo da bacia e, também, da prática de aquicultura (FERNANDES *et al.*, 2021).

Na quarta etapa verificou-se a possibilidade de o reservatório ser considerado como um todo ou se para fins de enquadramento e gestão deveria se setorizar o reservatório, ou seja, verificar a relevância de pontos específicos de altas concentrações de parâmetros na qualidade de água de todo o reservatório. Esta análise foi feita usando resultados de modelagem 3D comparados com estimativas por séries de imagens de satélite de clorofila-a e métodos geoestatísticos de *clustering* dos parâmetros envolvidos, como exemplificada na FIGURA 14.

Chegou-se à conclusão que, para os três reservatórios, de fato há regiões com características significativamente diferentes, de modo que as simulações indicam a necessidade de um zoneamento dos reservatórios para focar futuros investimentos em regiões com maior demanda/problema, é possível observar na terceira imagem da FIGURA 14, por exemplo, que o ribeirão das Posses, é o afluente com maior concentração de fósforo de todo o reservatório Jurumirim, e portanto ele é analisado de forma independente como setor 2, pois é necessária maior atenção para a análise de possibilidade de redução, tratada na etapa a seguir.

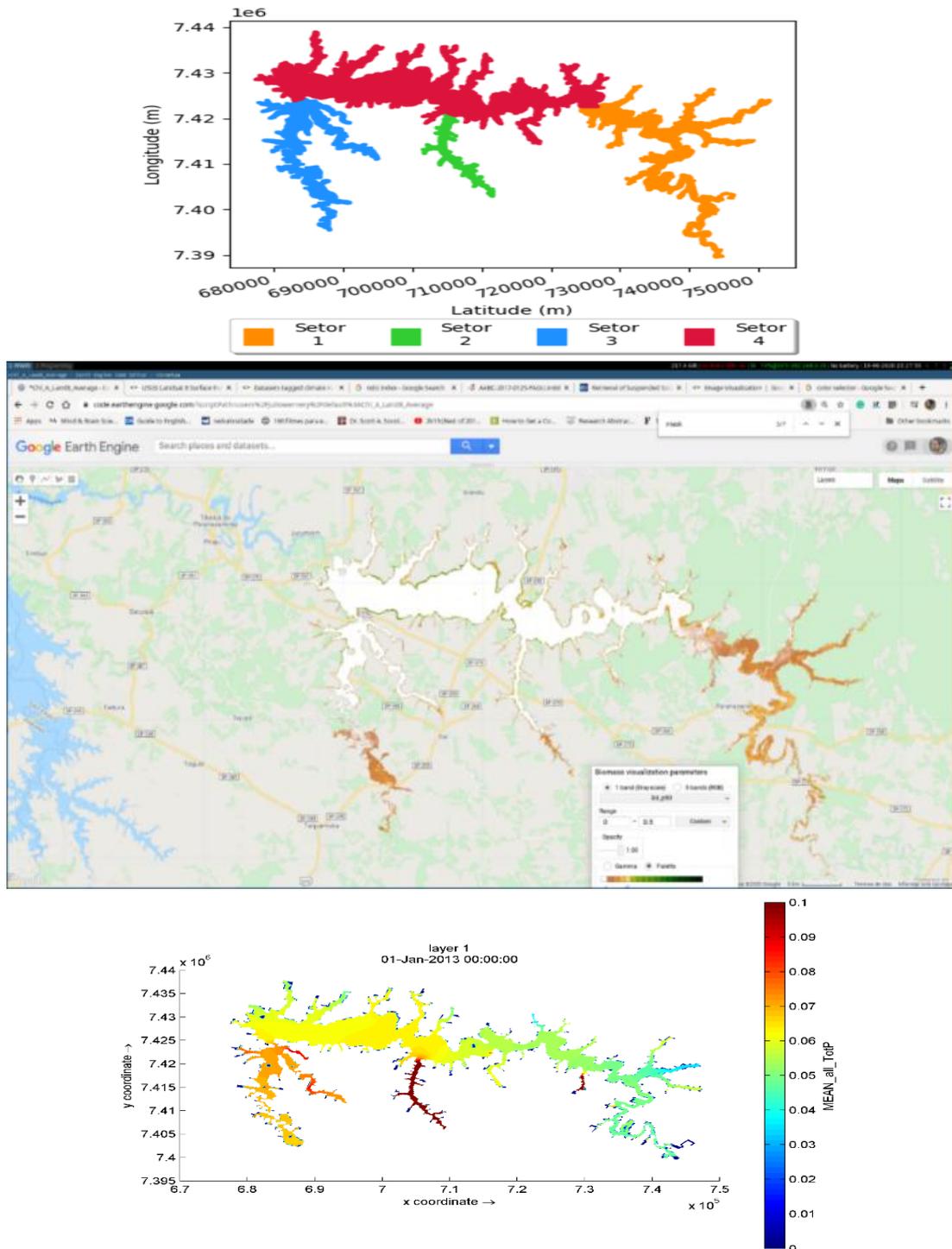
A última etapa foi a obtenção de informações de alocação de carga nos diversos setores dos reservatórios também para os diferentes cenários futuros e a integração das demandas com os potenciais de reduções de carga na bacia e fase rio (FERNANDES *et al.*, 2021) através da verificação de contribuintes (fontes) e efeitos das cargas utilizando a mesma metodologia de comparação da quarta etapa, porém desta vez a comparação é com os parâmetros definidos na Resolução CONAMA 357/2005 para cada classe de uso de água.

O resultado da etapa final é a possibilidade de verificar, de forma simplificada, a necessidade e qual o percentual de redução de cargas, que foram realizados para os três reservatórios e para cada setor, os quais foram definidos na etapa anterior.

Como exemplo tem-se a FIGURA 15 com a porcentagem de redução de carga para o reservatório Chavantes, tanto como um todo quanto para cada um de seus três setores, para o cenário acelerado 2035. No projeto PE foram geradas imagens como

essas para cada cenário, e também para cada classe de uso da água que pode ser possível alcançar.

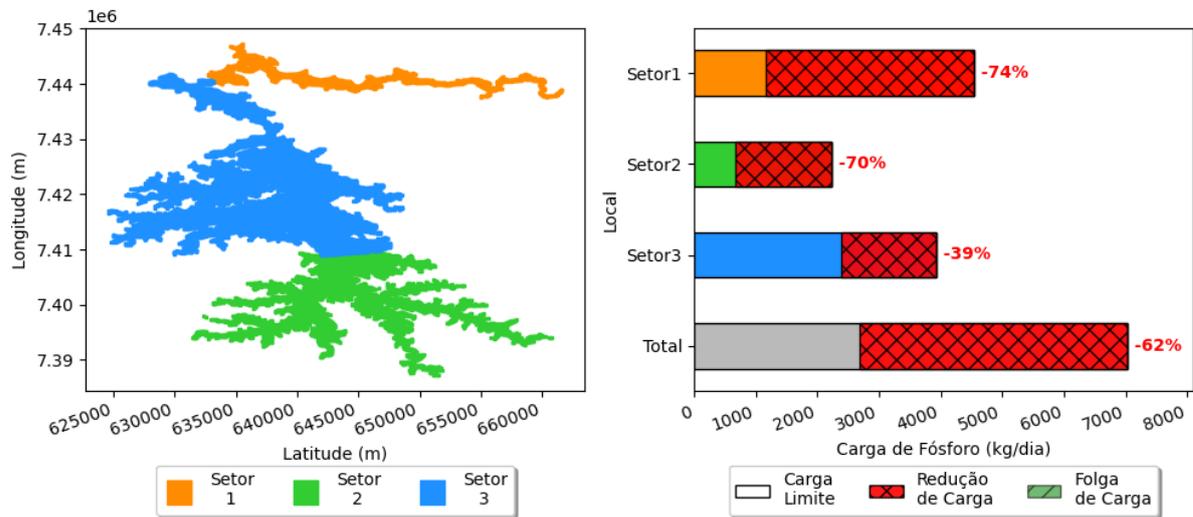
FIGURA 14 - ANÁLISE E COMPARAÇÃO DOS EFEITOS DAS CARGAS PARA CADA UM DOS SETORES (FIGURA ACIMA) UTILIZANDO RESULTADOS DA MODELAGEM DE FÓSFORO (FIGURA ABAIXO) E DE SÉRIES DE IMAGENS DE SATÉLITE DE CLOROFILA-A (FIGURA DO MEIO) PARA O RESERVATÓRIO JURUMIRIM.



FONTE: Adaptado de FERNANDES *et al.* (2021)

FIGURA 15 - PERCENTUAL DE CARGA A SER REDUZIDO PARA SE CHEGAR NO CLASSE 2 NO CENÁRIO ACELERADO 2035 NO RESERVATÓRIO CHAVANTES

Alocação de Carga: Cenário A35 em Período Chuvoso (Classe 2)



FONTE: FERNANDES *et al.* (2021)

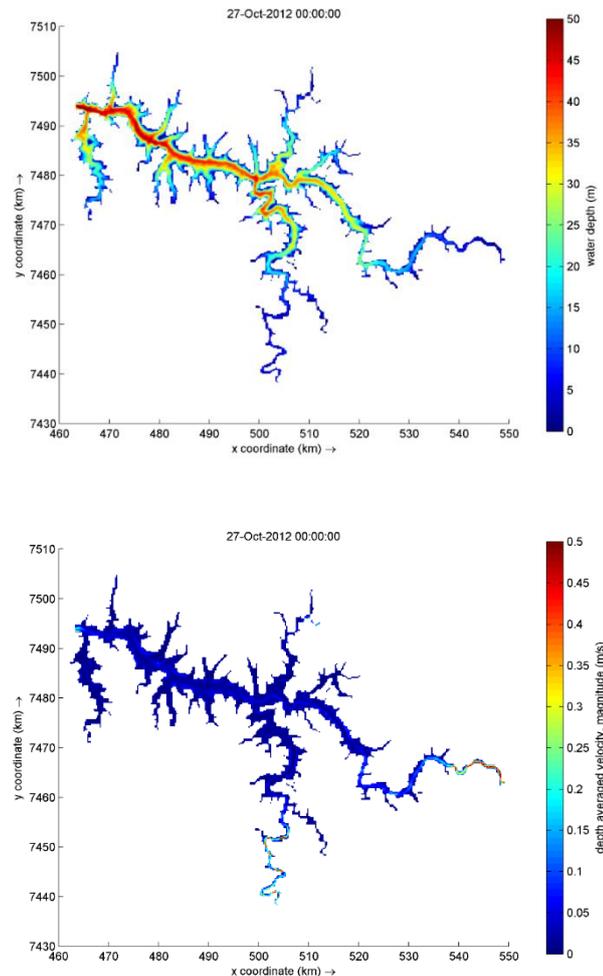
3.3.3 Aplicação da modelagem para este trabalho

3.3.3.1 Replicação da modelagem hidrodinâmica

Como primeira etapa para este trabalho, foi realizada a replicação dos resultados obtidos no projeto PE a partir das modelagens tridimensionais hidrodinâmicas (Delft3D-Flow). Buscando entender melhor como esta modelagem funciona, nesta etapa foi visto como o modelo Delft3D-Flow opera, através do seu manual (DELTARES, 2018a), além de compreender como foi possível aplicá-lo para a área de estudo, considerando todo o processo de preparação de dados para serem utilizados na entrada do modelo.

Seguindo a mesma metodologia aplicada no projeto PE, vista na seção anterior, foi possível gerar informações como campos de velocidade e profundidade da coluna de água (FIGURA 16) para os 3 reservatórios considerados na área de estudo. Esta etapa foi relevante pois permitiu compreender de maneira prática como fora obtida a base hidrodinâmica utilizada neste trabalho, essencial para a modelagem de qualidade da água.

FIGURA 16 - PROFUNDIDADE E VELOCIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO CAPIVARA



FONTE: FERNANDES *et al.* (2021)

3.3.3.2 Inclusão de concentrações de algas na modelagem de qualidade da água

A atividade das algas é extremamente importante para meio aquático, como poderá ser visto na seção 3.4.5. Também são importantes para se determinar as concentrações de vários tipos de clorofila no meio aquático que fazem parte da composição de suas espécies, sendo a principal a clorofila-a. Por isso sua inclusão se tornou essencial para este trabalho.

Porém, como a medição de concentração de algas em meios aquáticos não é comum no Brasil, a obtenção de dados de entrada se torna um grande desafio na modelagem deste parâmetro, de modo que é observada como a maior limitação para a inclusão de mais algas na simulação realizada neste trabalho.

3.3.3.3 Escolha pela inclusão de concentrações de algas verdes e algas cianofíceas na modelagem de qualidade da água

A escolha pela inclusão dessas duas tipologias de algas se deu pela sua grande abundância em corpos hídricos, no caso das algas verdes majoritariamente em água doce, e no caso das algas cianofíceas, são bastante comuns tanto em ambientes de água doce como de água marinha.

Portanto, é esperado que ao incluir esses dois tipos de algas se possa ter uma boa representação de toda a concentração de algas no reservatório, algo que poderá ser comprovado ou não com a comparação dos valores de concentração de clorofila-a obtidos na modelagem com valores medidos em campo ou então por imagens de satélite.

Outro fator importante para essa questão é a falta de parâmetros de morte e crescimento das algas para a área de estudo, o que ocasionaria um aumento de incertezas com a inclusão de mais espécies de algas.

3.3.3.4 Dados de contorno para os parâmetros a serem incluídos

Apesar de serem parâmetros importantes para a qualidade da água, principalmente em lagos e reservatórios, conforme será visto nas seções 3.4.5 e 3.4.6, a medição de seus valores, tanto de algas como de clorofila-a é extremamente rara no Brasil. Na região de estudo não há nenhuma estação, seja convencional ou telemétrica que faça medições de algum desses parâmetros.

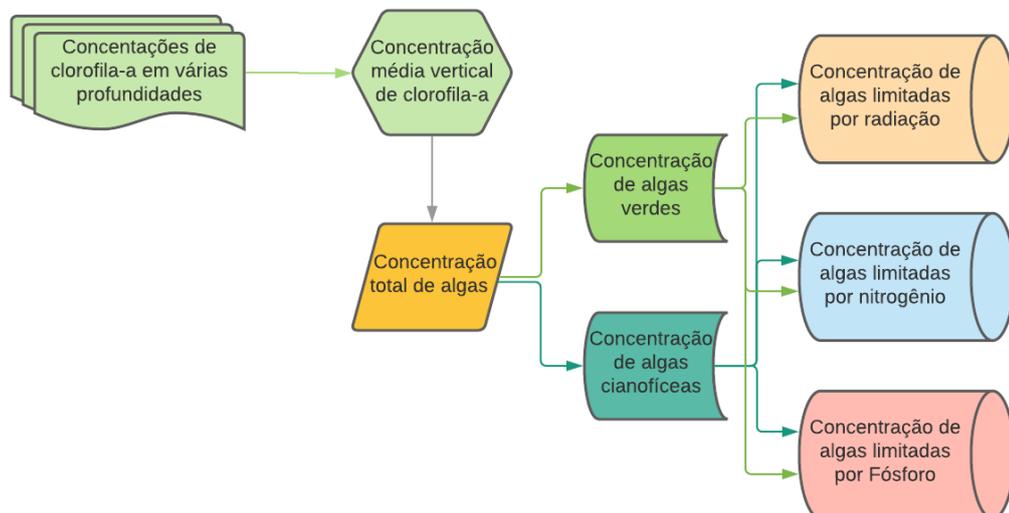
Durante o projeto PE, foram obtidas concentrações de clorofila-a durante um dia no ano de 2011, anterior ao utilizado na modelagem, em diversas profundidades e regiões dos reservatórios da área de estudo, e como este era o único dado disponível, ele foi amplamente utilizado como dados de contorno para a inclusão das algas e conseqüentemente clorofila-a.

Para ser utilizado, inicialmente buscou-se um valor médio de clorofila-a nos dados medidos em várias profundidades, para ser mais representativo quanto as várias camadas do reservatório. Em seguida, foi necessário efetuar a transformação de valores de clorofila-a para algas, a qual foi feita utilizando o valor de referência sugerido no software Delft3D (DELTARES, 2018b) de que 1 µg/L de clorofila-a é igual a 0,03 gC/m³ de algas.

Após transformar as concentrações de clorofila-a em concentrações totais de algas para cada região de contorno, foi necessário dividir essa concentração total por 6, pois além de dois tipos de algas diferentes (verde e cianofíceas), o modelo também exige como dado de entrada uma separação entre as concentrações de algas que são limitadas pela concentração de Nitrogênio (N), de Fósforo (F) e de luz solar, para cada tipo de alga (FIGURA 17).

Em relação à variação temporal, ela não foi considerada, já que não há dados iniciais e de contorno para outras datas no ano das medições, o que ajudaria a supor uma variação temporal nesses parâmetros.

FIGURA 17 – FLUXOGRAMA DA MANIPULAÇÃO DOS DADOS DE CONTORNO



FONTE: O autor (2021)

3.3.3.5 Validação dos resultados

A metodologia utilizada para validar os resultados consistiu na comparação dos valores obtidos na modelagem com valores medidos em regiões intermediárias do reservatório, pontos que não foram utilizados como dados de contorno, e que conseguem ser bastante representativos em relação a distribuição espacial.

Para isso, foi feita uma análise espacial de cada reservatório e a localização de cada ponto, considerando também a setorização realizada no projeto PE, buscando que houvesse ao menos um ponto que representasse cada um dos setores e que se localizasse em uma região intermediária deste, para que os efeitos das regiões de contorno fossem menores.

Com os pontos já definidos, foram realizados gráficos das séries temporais modeladas, dos pontos medidos e de sua média diária, na qual foi possível observar graficamente o quão próximo dos valores reais medidos o resultado da modelagem conseguiu chegar.

Para validar os resultados, se espera que ao menos metade dos pontos representativos para cada reservatório tenham seus valores simulados próximos (com uma variação de $0,5 \text{ mg/m}^3$ acima ou abaixo).

3.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA ANALISADOS

Através dos valores dos parâmetros de qualidade da água que é possível entender processos químicos e biológicos que estão atuando em determinado corpo hídrico, que definem sua qualidade de água. Portanto, é importante fazer a análise dos valores obtidos destes parâmetros a partir da modelagem, além de entender qual a sua relevância para o meio aquático, ou seja, o quanto os valores fora do ideal destes parâmetros são capazes de comprometer tanto a biota marinha como o uso humano deste corpo hídrico.

Na sequência são apresentados os parâmetros utilizados neste trabalho, os quais, em conjunto, permitiram fazer uma análise sobre a situação dos corpos hídricos da área de estudo. Os 4 primeiros já foram analisados no projeto PE, mas serão analisados novamente, principalmente em relação a possíveis alterações que possam sofrer nas modelagens realizadas neste trabalho.

3.4.1 Oxigênio Dissolvido (OD)

A concentração de oxigênio dissolvido (OD) é fundamental na avaliação da qualidade da água, uma vez que está envolvido na grande maioria dos processos químicos e biológicos que ocorrem nos corpos hídricos, essencial para a manutenção da vida aquática, sendo indispensável para organismos aeróbicos.

O oxigênio dissolvido nada mais é do que a concentração de oxigênio (O_2) contido na água. Os corpos hídricos, de maneira geral, consomem e também produzem o oxigênio, através de sua retirada da atmosfera na interface água/ar e por atividades fotossintetizantes de plantas, algas e bactérias, respectivamente. Esses

processos são afetados, em condições normais, pela temperatura, pela pressão atmosférica e também quantidade de sais e minerais presentes na água.

Em relação a valores de concentração, um valor típico, encontrado em corpos hídricos saudáveis, em condições naturais, é de 8 mg/l a 25°C. Concentrações abaixo de 5 mg/l, conforme aumenta a exposição, vai causando um estresse aos organismos, já concentrações abaixo de 2 mg/l leva à morte da maioria destes, por último, em situações anaeróbicas, ocorre a completa extinção de todos os organismos aeróbicos. A Resolução CONAMA 357/2005 define as concentrações mínimas de OD em 6 mg/l, 5 mg/l, 4 mg/l e 2 mg/l para as classes I, II, III e IV, respectivamente.

3.4.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) representa a quantidade de oxigênio necessária para a degradação da matéria orgânica através de processos biológicos, ou seja, pela ação de organismos aeróbicos. A DBO é determinada em laboratório, onde durante 5 dias, em temperatura de 20 °C é observado o oxigênio consumido em amostras de líquido. A DBO é utilizada para quantificar a matéria orgânica dos corpos hídricos.

Conforme a Resolução CONAMA 357/2005, concentrações de DBO abaixo de 3 mg/l indicam corpos hídricos com ótima qualidade de água, de classe I, própria para consumo após desinfecção. Concentrações acima de 3 mg/l e abaixo de 5 mg/l já representam águas que necessitam de tratamento, com uma certa carga de matéria orgânica (classe II). Na classe III, onde já não é possível ter recreação de contato primário, o limite máximo é 10 mg/l, e na classe IV, utilizada apenas para navegação e harmonização paisagística, não há um valor de concentração máxima. Esgotos possuem elevadas concentrações de DBO.

3.4.3 Nitrogênio (N)

A presença de nitrogênio nos corpos hídricos é fundamental para o crescimento de diversos organismos aquáticos, principalmente para os produtores primários, como algas e bactérias.

Normalmente está presente na água principalmente nas formas de nitrogênio molecular (N₂), amônia (NH₃), nitrito (NO₂), e nitrato (NO₃). Cabe destacar que a

amônia é tóxica aos peixes, e que concentrações elevadas de nitrogênio causa uma exagerada concentração de algas na superfície, processo chamado de eutrofização, que reduz a concentração de oxigênio dissolvido do corpo hídrico.

Dentre suas principais fontes, é possível destacar esgotos domésticos e industriais, fertilizantes agrícolas, práticas de aquicultura e excrementos de animais. Portanto, altas concentrações de nitrogênio em corpos hídricos geralmente são efeitos das ações antrópicas na bacia destes locais.

Os valores limites de concentração máxima da Resolução CONAMA 357/2005 para cada classe estão divididas entre concentrações de nitrito, nitrato e nitrogênio amoniacal total, sendo que este último possui concentrações variadas, dependendo da faixa de pH. Porém o nitrogênio total possui um valor limite de concentração, quando este for fator limitante para eutrofização em corpos de classe I e II, de 1,27 mg/l para ambientes lênticos.

3.4.4 Fósforo (P)

O Fósforo possui muitas características semelhantes ao nitrogênio, como sua importância no crescimento de algas e bactérias, e também em suas fontes em corpos hídricos. A relação entre as concentrações de ambos define qual é o fator limitante para a eutrofização, sendo que o critério no qual concentrações de fósforo menores que 1/10 da concentração de nitrogênio indicam que o fósforo é limitante, caso contrário o nitrogênio é o fator limitante é comumente utilizado.

Presente na água nas formas de ortofosfato (PO_4), polifosfato (P_2O_7) e fósforo orgânico (P), ele se apresentou de fato como fator limitante para processos de eutrofização nos reservatórios da área de estudo (Fernandes *et al.*, 2019b), o que tornou a análise de sua concentração ainda mais importante como parâmetro de qualidade da água. Conforme a Resolução CONAMA 357/2005, os limites de concentração de fósforo total, em ambientes lênticos, para as classes I, II, e III são 0,02 mg/L, 0,03 mg/L e 0,05 mg/L, respectivamente.

3.4.5 Algas

Como visto nas seções anteriores, as concentrações de algas são importantes na análise de qualidade de água pelo fato de serem organismos fotossintetizantes e,

portanto, produtores primários, além do potencial de eutrofização de águas calmas como as de reservatórios e lagos.

As algas, de maneira geral, são organismos de ciclo de vida em meio aquático, sendo autótrofos fotossintetizantes, podendo ser uni ou pluricelulares, são na sua maioria eucariontes, mas também há algas procariontes. Embora sejam seres dotados de clorofila, se diferenciam de plantas ao não terem raízes ou caules em sua composição. Também são alimentos para diversas espécies aquáticas (MARQUES; AMÉRICO-PINHEIRO, 2017).

Sua ação fotossintetizante é realizada através da energia solar e da presença de nutrientes apropriados e em quantidade suficiente, como fósforo e nitrogênio, que são consumidos no processo. O gás carbônico é também fundamental para sua manutenção. Isso mostra que são altamente afetadas com as variações da qualidade da água causadas por contaminações (MARQUES; AMÉRICO-PINHEIRO, 2017).

Dada sua alta capacidade de ocupação de meios que possuem luz e umidade, são encontradas tanto em água doce como em água marinha, se adaptando a disponibilidade de nutrientes que encontram no local.

Isso faz com que ocorra os processos de eutrofização, quando há uma alta concentração de nutrientes, o que faz com que as algas cresçam de maneira exagerada nas regiões superficiais, reduzindo a luz solar que passa para regiões mais profundas e assim reduzindo a concentração de algas nessas regiões e de oxigênio no corpo hídrico, uma vez que a produção de oxigênio nas camadas superficiais facilmente se desprende do meio aquático (EMÍDIO, 2012).

Outros inconvenientes de alta concentração de algas na água são alterações: no sabor e odor; na toxicidade, na turbidez; na formação de massas de matéria orgânica, quando mortas, que precisam ser decompostas; na corrosão; e no aspecto estético desagradável (PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA, 2015).

É possível concluir que algas são fundamentais para diversos processos biológicos nos corpos hídricos, podendo ser um bom parâmetro de qualidade de água tanto em relação à sua concentração total, como em relação à sua diversidade de espécies. Marques e Américo-Pinheiro (2017) destacaram que algas utilizadas como bioindicadoras oferecem informações de efeitos ao longo de um período de tempo, devido as alterações que são capazes de realizar na qualidade da água.

As algas verdes e cianofíceas consideradas na modelagem, são as mais comuns de se encontrar em águas doces. Possuem em comum todas as

características acima destacadas, além de ambas possuírem em sua composição a clorofila-a. As principais diferenças entre elas podem ser observadas na TABELA 5.

TABELA 5 – DIFERENÇAS ENTRE ALGAS VERDES E ALGAS CIANOFÍCEAS

Característica	Algas Verdes	Algas Cianofíceas
Organização Celular	Eucariontes	Procariontes
Reino biológico	Protista	Monera
Cloroplasto	Contém	Não contém
Fixação de Nitrogênio	Não	Sim
Habitat	Águas doces (maioria)	Águas doces e águas marinhas

FONTE: Adaptado de Kumari (2019).

As densidades máximas de cianobactérias ou cianofíceas na Resolução CONAMA 357/2005 são em células/ml ou em mm³/l, sendo de 20.000 cel/ml ou 2 mm³/l m na classe I, até 50000 cel/ml ou 5 mm³/l na classe II e 100.000 cel/ml ou 10 mm³/l na classe III. Não há na resolução densidades para algas verdes.

3.4.6 Clorofila-a (Chlfa)

As clorofilas em geral são os pigmentos naturais mais abundantes da natureza. Ocorrem nos cloroplastos das folhas e algas, e em outros tecidos vegetais. São comuns a todos os organismos fotossintéticos, exceto bactérias, que possuem bacterioclorofila em seu lugar.

Existem quatro tipos de clorofilas: clorofila-a (Chlfa), clorofila-b (Chlfb), clorofila-c (Chlfc) e clorofila-d (Chlfd). Enquanto a clorofila-a é o pigmento utilizado para realizar a fotoquímica (o primeiro estágio do processo fotossintético), as outras são consideradas pigmentos acessórios, sendo suas presenças exclusivas de algumas espécies tanto de vegetais como de algas (STREIT *et al.*, 2005).

A utilização da clorofila-a como parâmetro de qualidade da água é importante pois está relacionado com o estado trófico do corpo hídrico, sendo utilizado juntamente com o fósforo para o cálculo do Índice de Estado Trófico (IET) que por sua vez classifica e compara o nível trófico de diferentes corpos hídricos.

A Resolução CONAMA 357/2005 define os seguintes valores máximos para as diferentes classes de uso dos corpos hídricos: Classe I – 10 µg/l; Classe II – 30 µg/l; Classe III – 60 µg/l; enquanto que a Classe IV não possui nenhuma limitação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo Delft3D possui uma ferramenta para análise de resultados pós modelagem, permitindo uma análise completa dos resultados obtidos. Através dessa ferramenta foi possível organizar os dados tanto em escalas temporais como espaciais, além de permitir a obtenção dos valores de séries de dados em formatos de fácil visualização e manejo fora da ferramenta, como planilhas no formato “.csv”, que facilitam a análises de dados além das já realizadas na ferramenta.

Na sequência são apresentados os resultados considerados pelo autor mais relevantes obtidos após a modelagem, separados em seções para cada um dos reservatórios que compõem a área de estudo, na qual está seccionada em relação a escala utilizada para análise, que pode ser temporal, espacial e conjunta, focada nos parâmetros adicionados, além da comparação com os resultados obtidos no projeto PE para os parâmetros que lá já haviam sido modelados e por fim, uma breve discussão sobre o efeito cascata observado.

A análise temporal dos resultados consistiu em observar o comportamento das concentrações dos parâmetros modelados através de suas séries temporais em pontos específicos do reservatório, pontos estes anteriormente definidos como relevantes e representativos para determinadas regiões e setores de cada reservatório, da maneira descrita na seção 3.3.3.5. Devido a busca por uma calibração e validação dos resultados da modelagem deste trabalho, o foco na análise temporal foi para a concentração de clorofila-a.

A análise espacial consiste na análise de todo o reservatório, utilizando um passo de tempo específico, ou utilizando estatística, como média temporal. Para realização destas análises se utilizam mapas das concentrações. A análise espacial permite uma comparação entre o comportamento de diferentes parâmetros ao longo do reservatório, ou seja, de que formas esses parâmetros se distribuem e se concentram ao longo de cada reservatório e seus setores.

A análise conjunta une as duas análises acima descritas, através de um comparativo das alterações observadas em mapas de intervalos de tempos diferentes, ou médias temporais de períodos diferentes, como por exemplo, período de seca/cheia. Outra forma de se realizar este comparativo é através de séries históricas ou gráficos estatísticos como descritos na seção 3.2.4 de setores espaciais. Esta

análise permite que se observe em que épocas e em que regiões são demandadas maiores atenções quanto aos níveis observados dos diferentes parâmetros.

A comparação entre os resultados obtidos aqui com os resultados obtidos no projeto PE se dará por meio de boxplots nos setores de cada reservatório, permitindo assim uma análise rápida e direta das alterações causadas pela inclusão das algas.

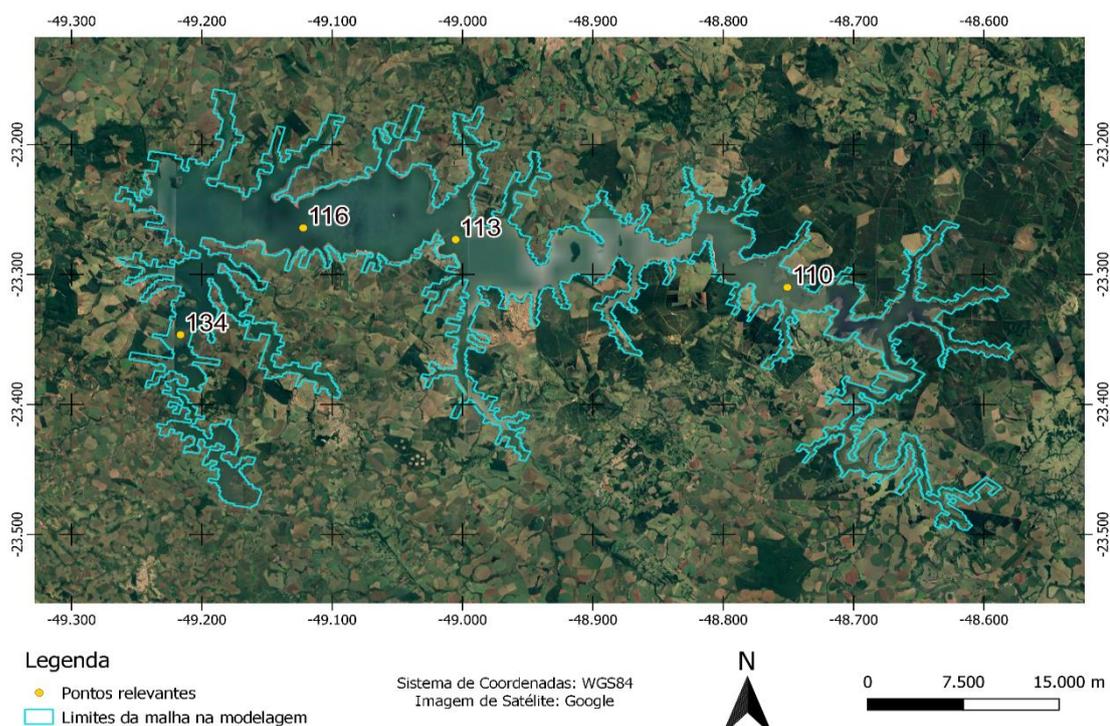
Por fim, há uma análise sobre a hipótese de haver efeito cascata entre os reservatórios que compõem a área de estudo, e de que maneira isso altera o regime hidrodinâmico do rio Paranapanema.

4.1 RESERVATÓRIO JURUMIRIM

4.1.1 Análise temporal

Foram definidos como pontos relevantes para a análise das concentrações de clorofila-a no reservatório Jurumirim, os pontos 110, 113, 116 e 143, conforme a metodologia descrita na seção 3.3.3.5. A disposição espacial destes pontos é apresentada na FIGURA 18.

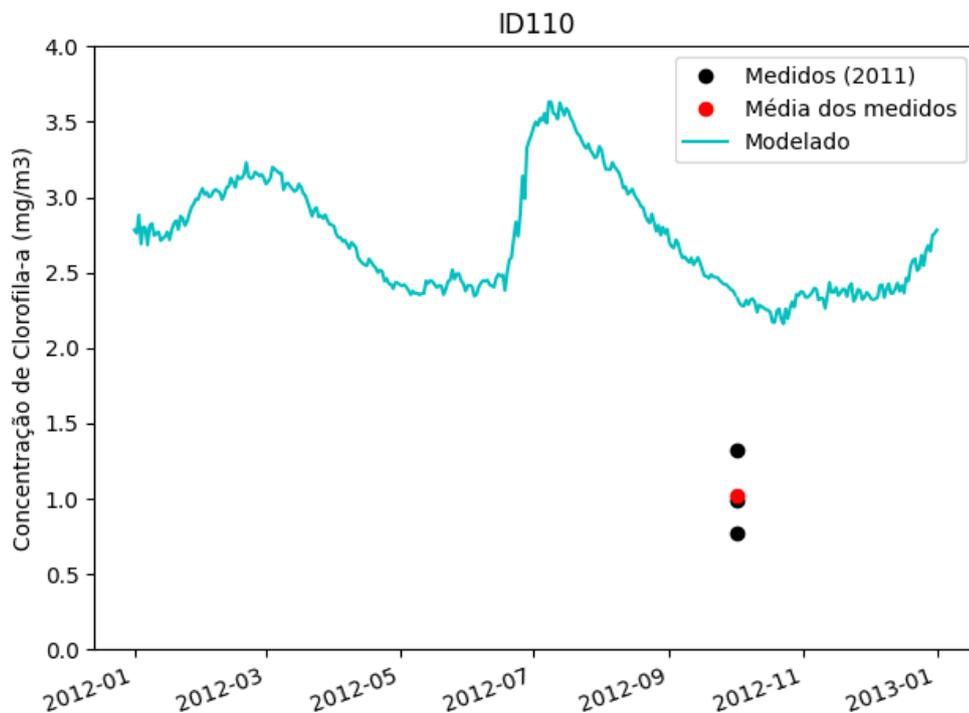
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS PRINCIPAIS DO RESERVATÓRIO JURUMIRIM



FONTE: O autor (2021)

O ponto 110, localizado em uma região em que o Rio Paranapanema recebe a descarga de diversos afluentes, alguns dos quais não tiveram suas cargas de poluentes modeladas, apresentou resultados acima do medido no ano anterior em seu ponto modelado, conforme se observa na FIGURA 19. Uma possível explicação para este resultado é que a influência destes diversos afluentes neste ponto é grande, e além da modelagem não agregar a contribuição de todos esses afluentes, a variação dos parâmetros nesses afluentes em curtos períodos de tempo é grande.

FIGURA 19 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID110



FONTE: O autor (2021)

Os pontos 113 e 134, que se situam em regiões intermediárias no reservatório, um no rio Paranapanema e outro no rio Taquari, apresentaram bons resultados que validaram a modelagem do reservatório Jurumirim em comparação com os valores medidos, conforme se observa na FIGURA 20 e FIGURA 21, indicando que a modelagem se mostrou capaz de simular a clorofila-a de maneira adequada em regiões que sofrem uma interferência menor de regiões limite do reservatório, sejam estas regiões limites os afluentes ou a barragem.

FIGURA 20 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID113

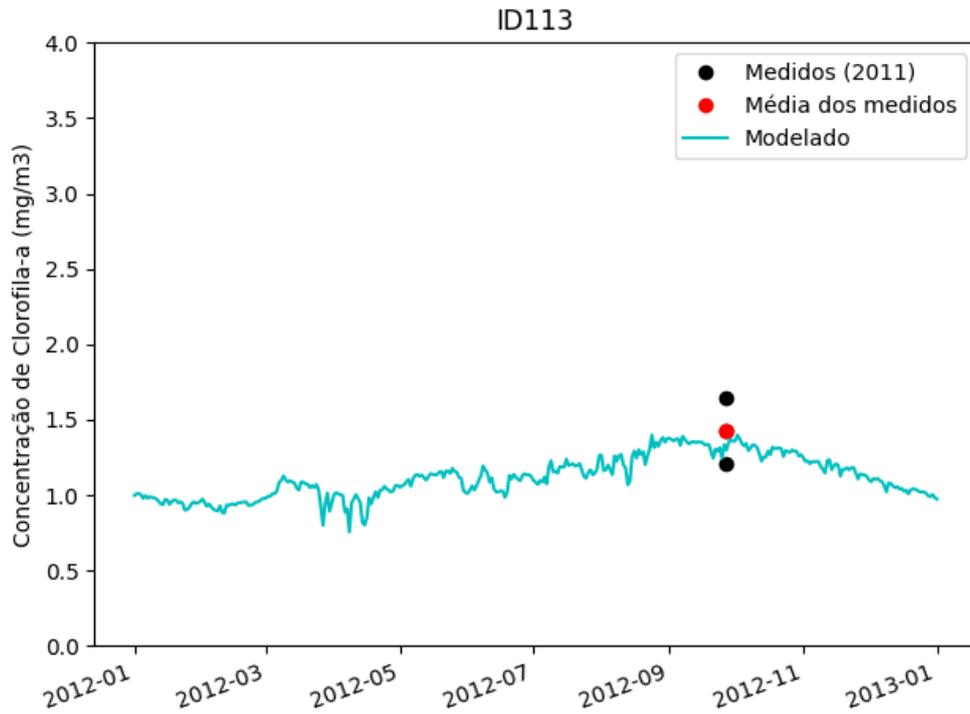
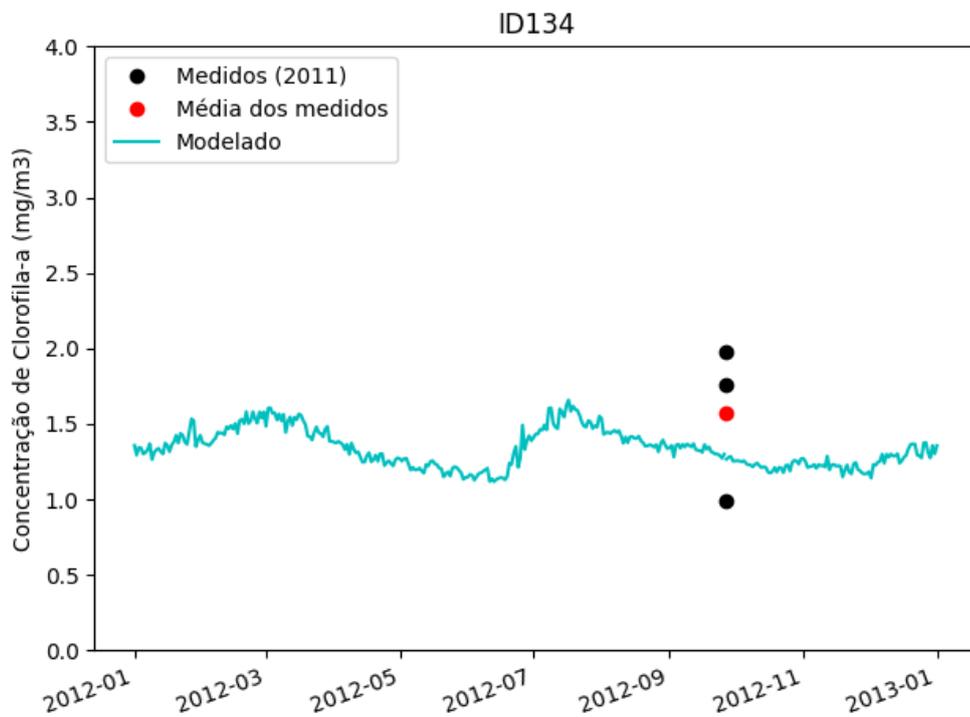
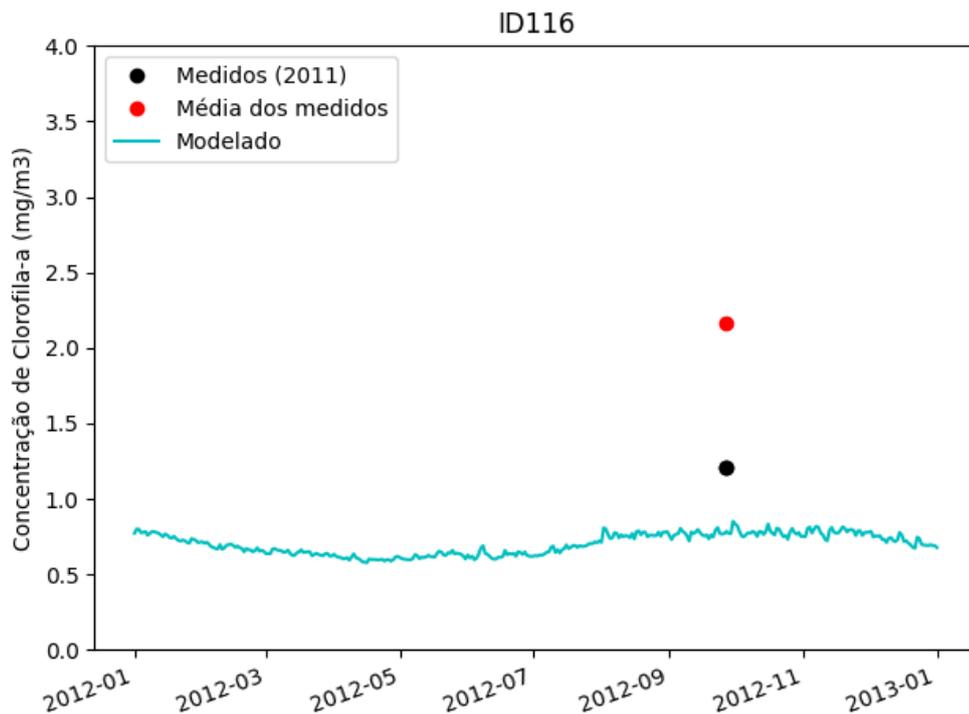


FIGURA 21 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID134



No caso do ponto 116, localizado em região mais próxima da barragem, ainda que esteja próximo do ponto 113, a FIGURA 22 mostra que houve valores de concentração muito abaixo do medido, indicando possivelmente que alguns processos de eutrofização em regiões características de reservatórios não foram bem representados, considerando todas as incertezas no processo.

FIGURA 22 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID116



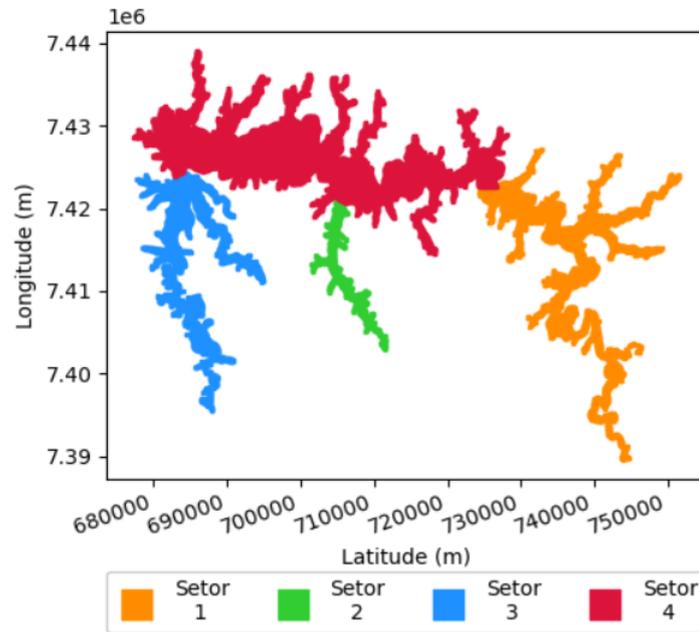
FONTE: O autor (2021)

4.1.2 Análise espacial

Para facilitar a análise espacial, a setorização realizada no projeto PE e apresentada como parte da FIGURA 14 é novamente ilustrada na FIGURA 23. O setor 1 representa a região fluvial do reservatório, onde são esperados os comportamentos mais próximos dos de um rio em todo o reservatório; o setor 2 representa o trecho do ribeirão das Posses, afluente destacado por sua grande carga de Fósforo (FERNANDES *et al.*, 2021); o setor 3 representa o trecho do rio Taquari, principal afluente do reservatório Jurumirim depois do rio Paranapanema, que nessa região da área de estudo tem uma hidrodinâmica próxima a de uma represa; e o setor 4

representa a região lacustre do reservatório, próxima a barragem, de regime lântico característico de reservatórios.

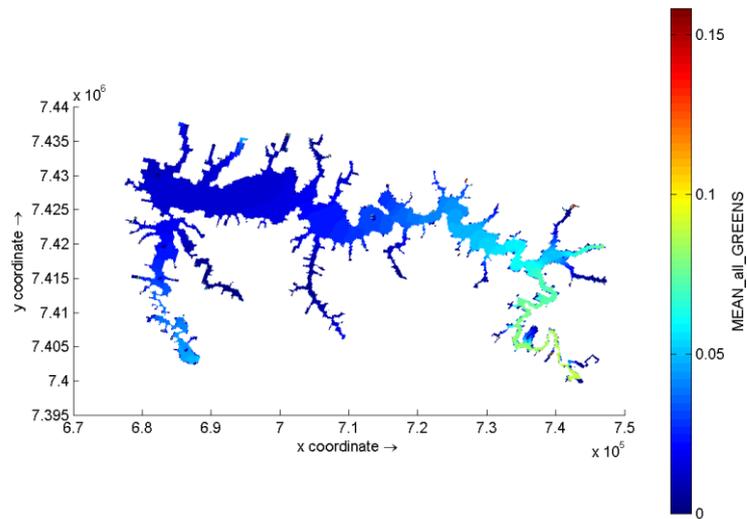
FIGURA 23 – SETORIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO JURUMIRIM



FONTE: FERNANDES *et al.* (2021)

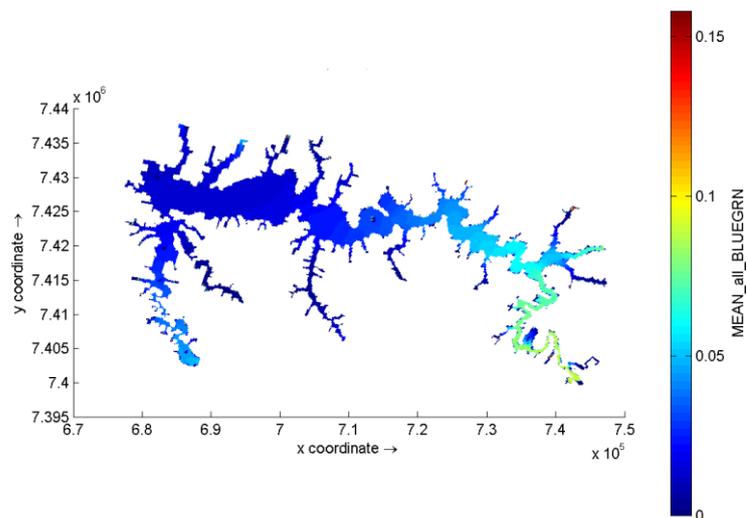
Começando pelas algas, devido às limitações e simplificações descritas na seção 3.3.3.4, a FIGURA 24 e a FIGURA 25 indicam que houve um comportamento praticamente igual entre algas verdes e cianofíceas, algo esperado, já que, embora possuam processos de cálculos distintos no programa D-WAQ, a adoção de parâmetros iguais fez com que os resultados fossem muito semelhantes. Em relação a disposição espacial, a média temporal do período modelado mostra que as concentrações de algas são baixas, sendo as regiões que necessitam de mais atenção localizadas no setor 1, tanto no trecho no rio Paranapanema como em alguns de seus afluentes neste setor. Apesar dos valores máximos estarem na casa dos 0,15 mg/m³, são em pontos bastante localizados, o valor máximo em uma região mais distribuída ficou na casa dos 0,1 mg/m³, na região bem a montante do reservatório, no trecho no rio Paranapanema.

FIGURA 24 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS VERDES (mg/m³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO JURUMIRIM



FONTE: O autor (2021)

FIGURA 25 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS CIANOFÍCEAS (mg/m³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO JURUMIRIM

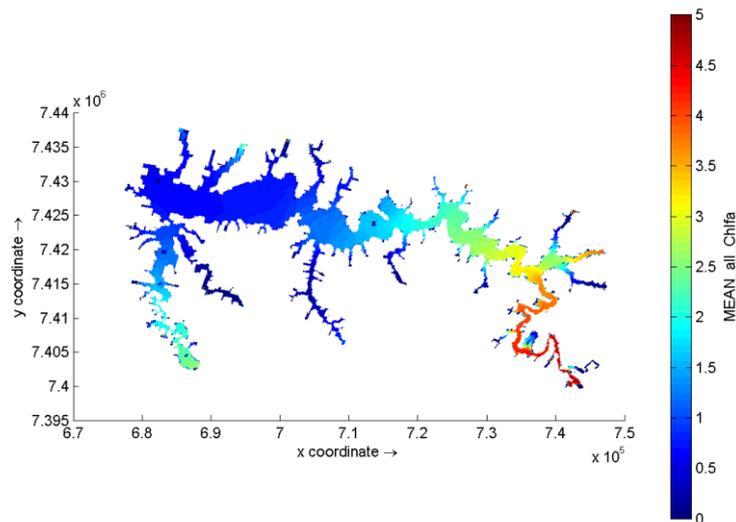


FONTE: O autor (2021)

Esses baixos valores também são observados nas concentrações de clorofila-a encontrados, observados na FIGURA 26. Se observa um comportamento muito parecido de ambos, a diferença é que a concentração de clorofila-a considera a influência dos valores das concentrações de algas somadas. Em todos os pontos, a concentração média não chega a ultrapassar o valor de 10 mg/m³, equivalente aos 10

$\mu\text{g/L}$, considerado valor máximo pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos classe I, a mais restritiva, indicando que a população de algas e a concentração de clorofila-a vindas delas não prejudicam diretamente em suas concentrações a qualidade da água em média, considerando as simplificações adotadas neste estudo.

FIGURA 26 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m^3) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO JURUMIRIM

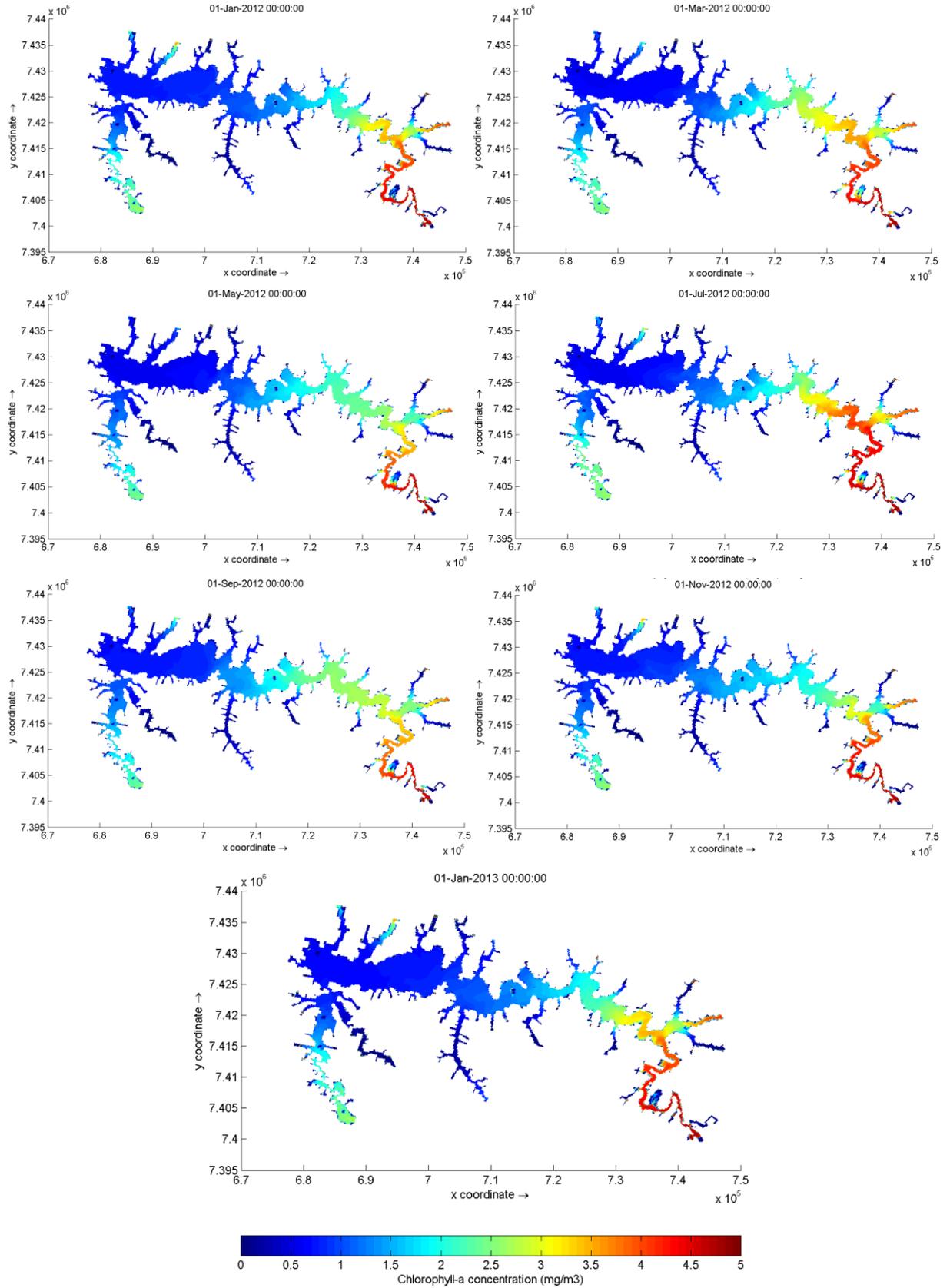


FONTE: O autor (2021)

4.1.3 Análise Conjunta

A partir da FIGURA 27 é possível ver os efeitos dispersivos da concentração de clorofila-a no reservatório Jurumirim, com mapas de concentração a cada dois meses no ano de 2012. Observa-se que as concentrações variam pouco, devido às concentrações de algas nas regiões de contorno utilizadas na modelagem serem constantes, as variações observadas, mais perceptíveis em regiões intermediárias, são causadas pelas variações nas concentrações de outros parâmetros importantes para o crescimento e morte das algas, como Fósforo e Nitrogênio.

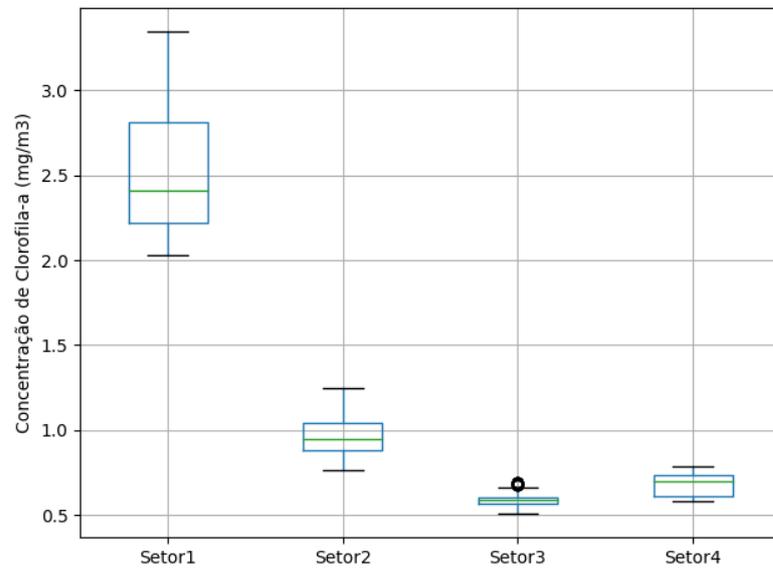
FIGURA 27 – MAPAS DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m^3) AO LONGO DO ANO NO RESERVATÓRIO JURUMIRIM



FONTE: O autor (2021)

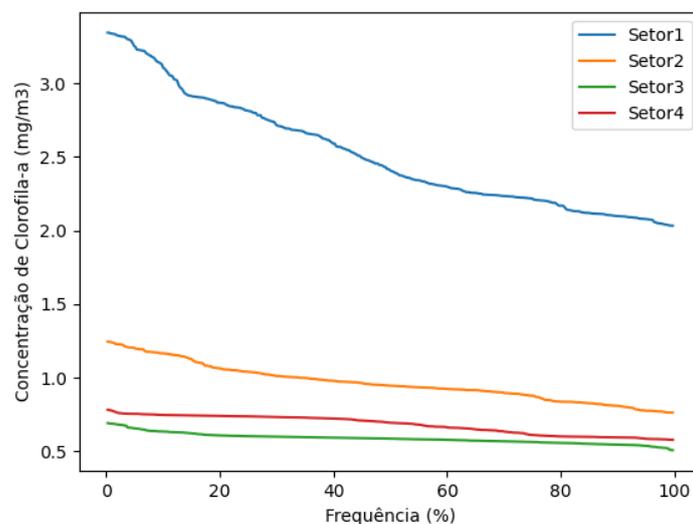
Conforme visto na seção 3.2.4, os gráficos da FIGURA 28 e da FIGURA 29 também podem ajudar na análise conjunta, a primeira mostra que além de maiores concentrações, o setor 1 também possui as maiores variações de concentração de clorofila-a no reservatório Jurumirim. Já a segunda mostra que em todos os setores, há uma baixa amplitude entre os valores máximos e mínimos, mesmo para o setor 1, destacado anteriormente.

FIGURA 28 – BOXPLOT PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO JURUMIRIM



FONTE: O autor (2021)

FIGURA 29 – PERMANÊNCIA PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO JURUMIRIM



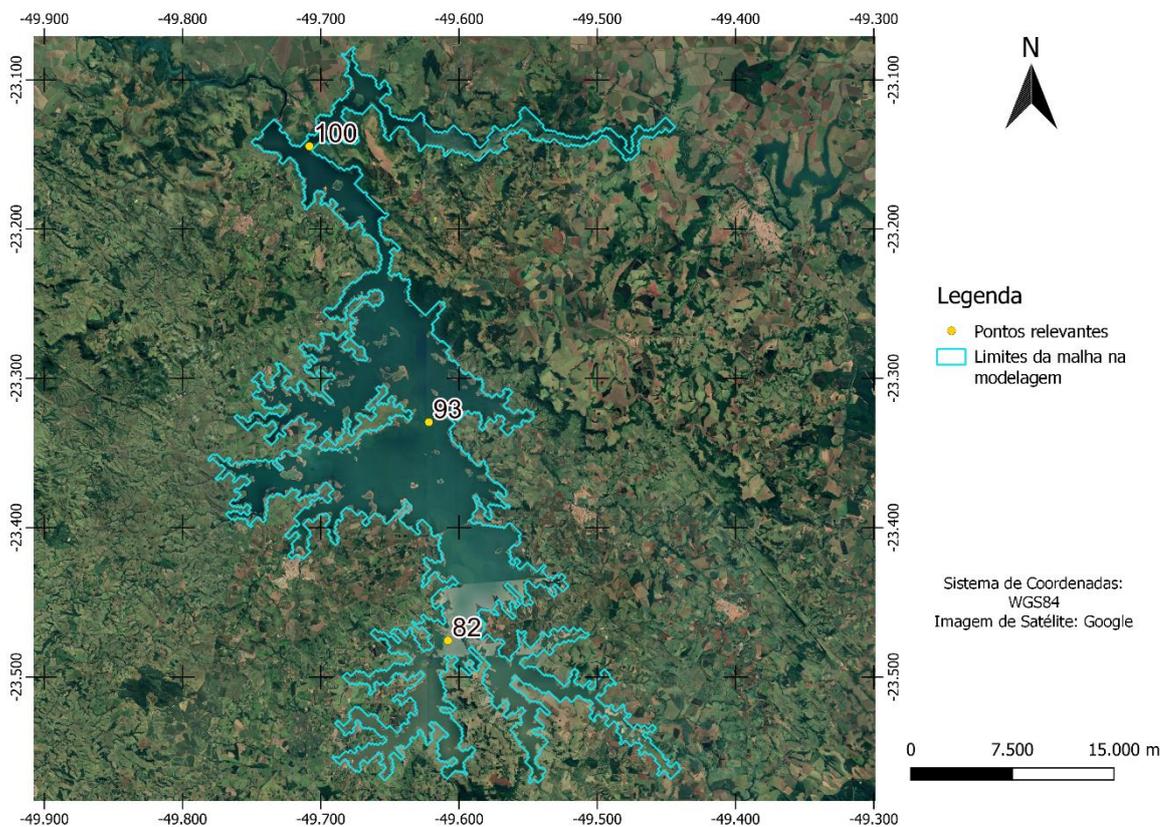
FONTE: O autor (2021)

4.2 RESERVATÓRIO CHAVANTES

4.2.1 Análise Temporal

Os pontos relevantes para análise temporal no reservatório Chavantes são os pontos 82, 93 e 100, apresentados na FIGURA 30, que mostra a capacidade destes pontos de serem representativos para cada região do reservatório.

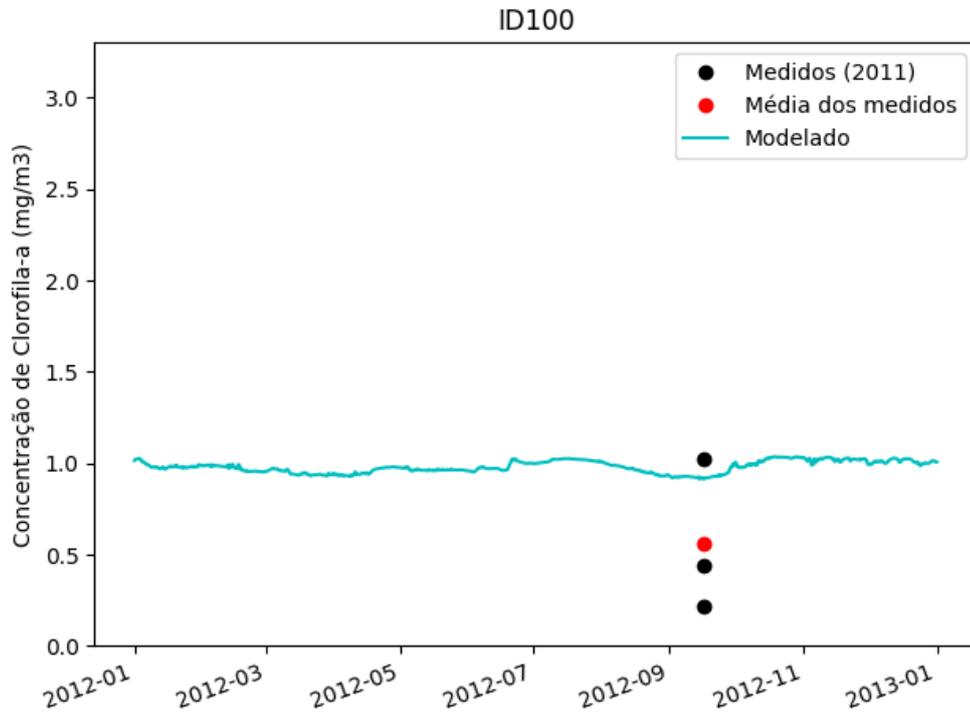
FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS PRINCIPAIS DO RESERVATÓRIO CHAVANTES



FONTE: O autor (2021)

O ponto 100 está localizado na região logo antes da confluência entre o trecho do rio Paranapanema e o trecho do rio Itararé, representando a contribuição do trecho do rio Paranapanema no reservatório. Os valores de concentração de clorofila-a obtidos nesse ponto se mostraram adequados, com uma variação adequada quando comparada com os valores medidos em diferentes profundidades no ano anterior, conforme a FIGURA 31.

FIGURA 31 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID100



O ponto 93 está em uma região intermediária do reservatório, no rio Itararé, e assim como no caso dos pontos em regiões intermediárias em Jurumirim, este ponto apresentou bons resultados em relação aos dados medidos, conforme se observa na FIGURA 32. O ponto 93 e o ponto 100, devido a seus valores modelados próximos aos medidos, validaram a modelagem para o reservatório Chavantes.

No ponto 82, em uma região mais afetada pelos afluentes, os valores obtidos na simulação, representados na FIGURA 33, ficaram bem acima do valor medido no ano anterior, indicando que as concentrações foram superestimadas nessa região no reservatório Chavantes.

FIGURA 32 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID93

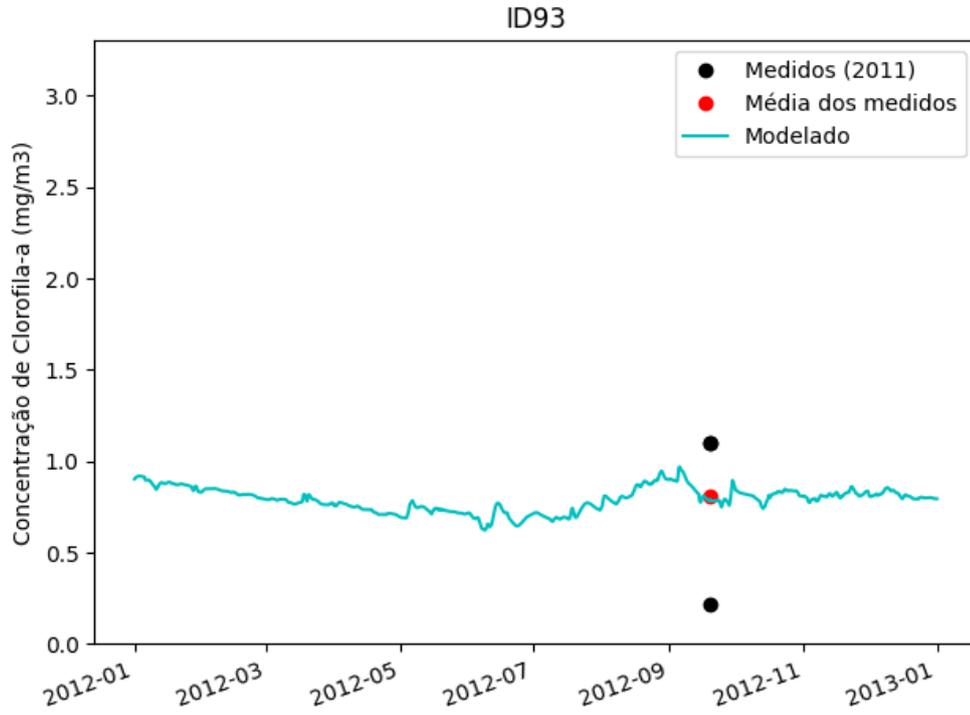
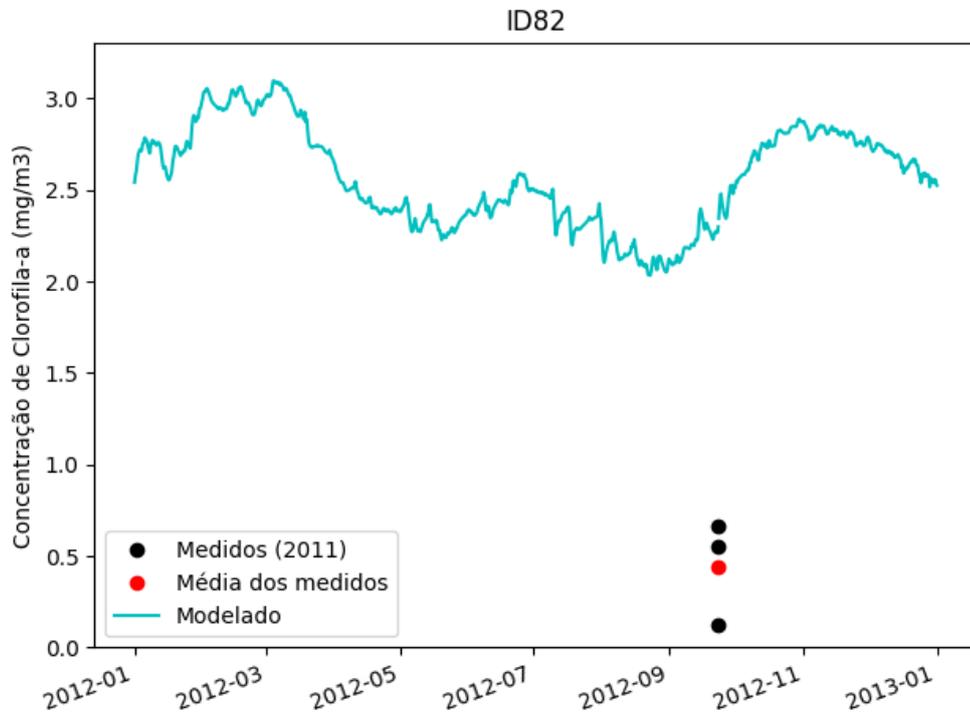


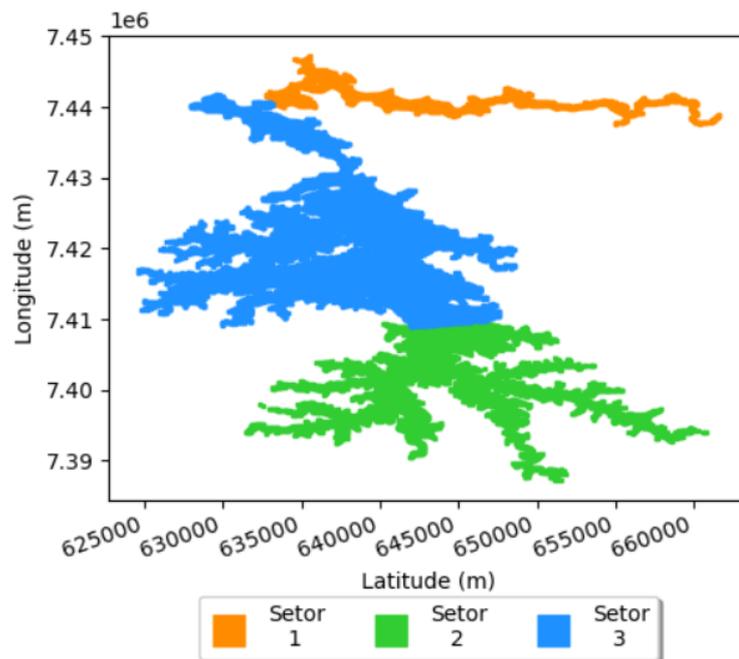
FIGURA 33 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID82



4.2.2 Análise Espacial

A setorização do reservatório Chavantes, realizada no projeto PE é apresentada na FIGURA 34, no qual o setor 1 representa o afluente do trecho no rio Paranapanema, o setor 3 é o trecho no rio Itararé, em sua região em que apresenta maiores características hidrodinâmicas de reservatório, com menor velocidade e maior profundidade, já o setor 2 é a região a montante do setor 3.

FIGURA 34 – SETORIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO CHAVANTES

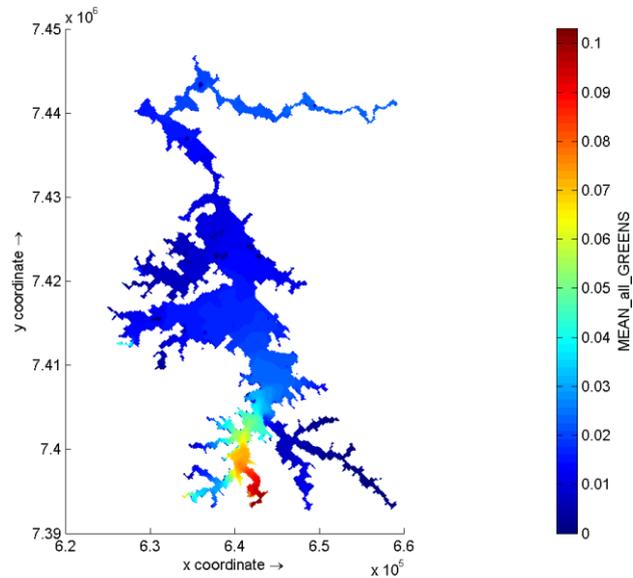


FONTE: FERNANDES *et al.* (2021)

Assim como no reservatório Jurumirim, o comportamento espacial das concentrações de algas, tanto verdes como cianofíceas, e de clorofila-a são iguais, com a diferença de escala para a clorofila-a por considerar os dois tipos de algas.

Foi possível notar uma concentração alta no braço que representa o trecho no rio Itararé, no setor 2, indicando uma alta concentração de algas e conseqüentemente de clorofila-a vindo de sua região a montante, que é reduzida conforme a contribuição de outros afluentes com baixas concentrações é agregada, ao passo que quando chega no setor 3 essa concentração já foi bastante reduzida. No setor 1 as concentrações são baixas, mas maiores que no setor 3.

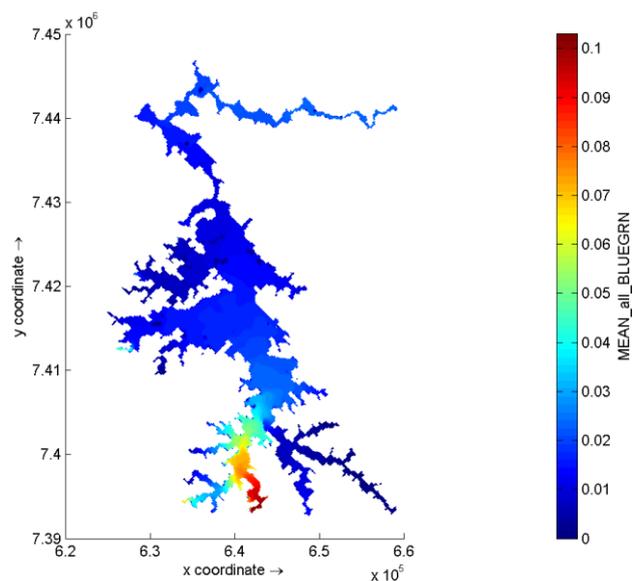
FIGURA 35 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS VERDES (mg/m³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CHAVANTES



FONTE: O autor (2021)

No caso das algas, a FIGURA 35 e a FIGURA 36 mostram que a concentração máxima ainda é baixa, pouco acima de 0,1 mg/m³, abaixo da máxima encontrada em Jurumirim, mas conforme observado anteriormente, em regiões mais distribuídas espacialmente em Jurumirim também ficou na casa dos 0,1 mg/m³.

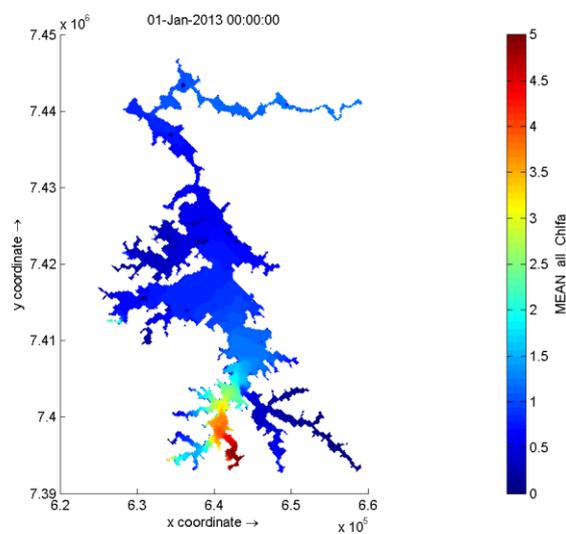
FIGURA 36 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS CIANOFÍCEAS (mg/m³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CHAVANTES



FONTE: O autor (2021)

Já para a concentração de clorofila-a, a FIGURA 37 mostra que a concentração não chegou a $5,5 \text{ mg/m}^3$, quase metade do máximo exigido pela resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos classe I, mostrando que no caso de Chavantes a situação é boa em relação a concentrações de algas e clorofila, no que diz respeito aos resultados obtidos pela modelagem, considerando sempre suas simplificações.

FIGURA 37 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m^3) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CHAVANTES



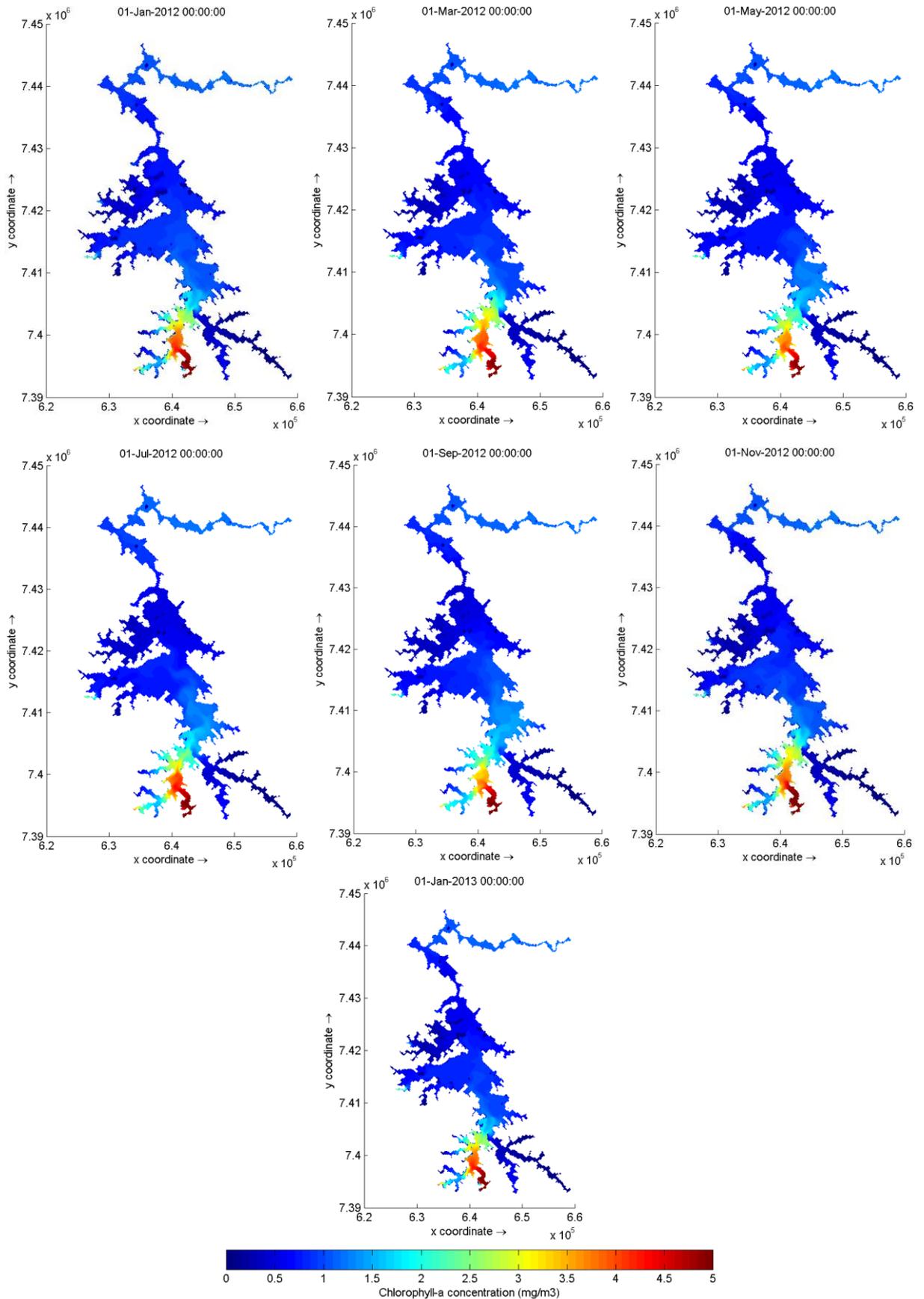
FONTE: O autor (2021)

4.2.3 Análise Conjunta

A FIGURA 38 apresenta os mapas de concentração de clorofila-a no espaço de tempo de dois meses, os quais indicam, assim como no reservatório Jurumirim, baixas variações nas regiões limites, mas é possível notar maiores concentrações em regiões intermediárias, entre os setores 2 e 3 nas figuras que representam os meses de julho e setembro. Já no caso do setor 1, as variações são muito baixas, quase imperceptíveis.

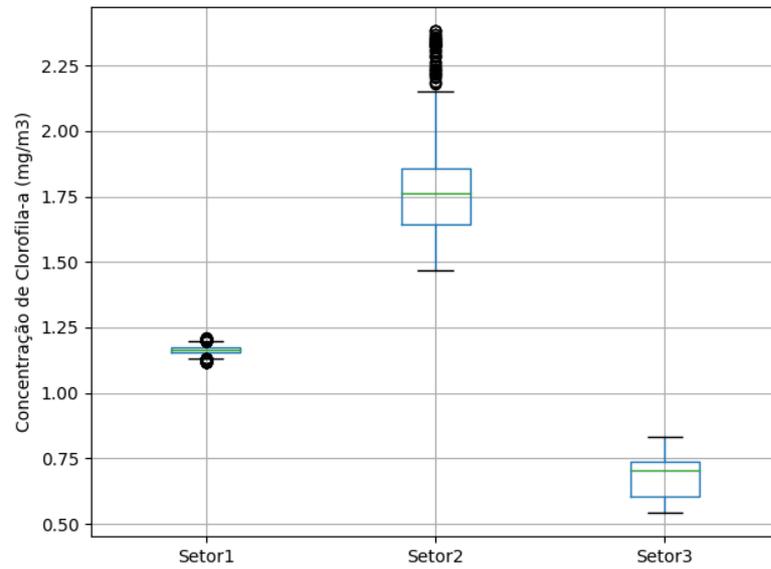
A FIGURA 39 mostra que na análise por setores, as concentrações já são mais baixas, mesmo com os vários valores máximos observados como outliers no setor 2, mas ainda assim não chegaram à metade da concentração observada na região afluente do rio Itararé. Pela FIGURA 40 se observa que o setor 2 possui as maiores variações em relação a seus valores mínimos e máximos.

FIGURA 38 – MAPAS DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m^3) AO LONGO DO ANO NO RESERVATÓRIO CHAVANTES



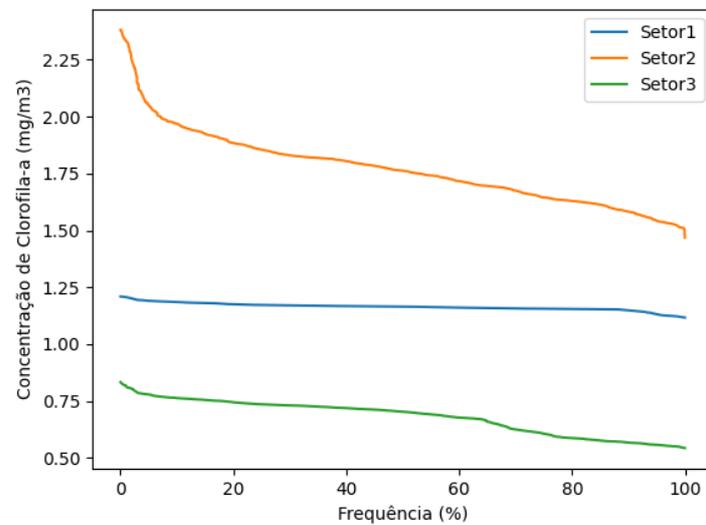
FONTE: O autor (2021)

FIGURA 39 – BOXPLOT PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO CHAVANTES



FONTE: O autor (2021)

FIGURA 40 – PERMANÊNCIA PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO CHAVANTES



FONTE: O autor (2021)

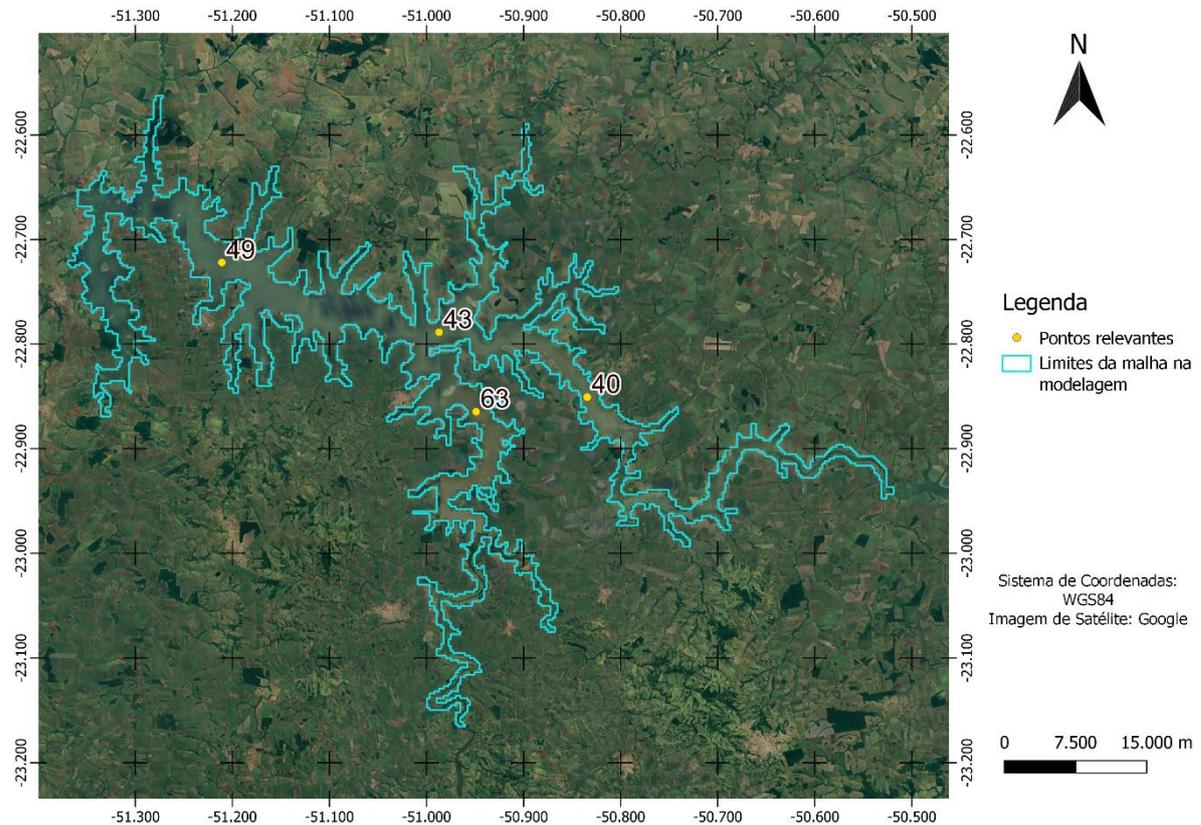
4.3 RESERVATÓRIO CAPIVARA

4.3.1 Análise Temporal

Para o reservatório Capivara, foram definidos 4 pontos relevantes para a análise temporal, sendo eles os pontos 49, 43, 40 e 63. Conforme se ilustra na

FIGURA 41, a grande extensão em comprimento do reservatório Capivara faz com que todos os pontos aqui analisados sejam considerados pontos intermediários.

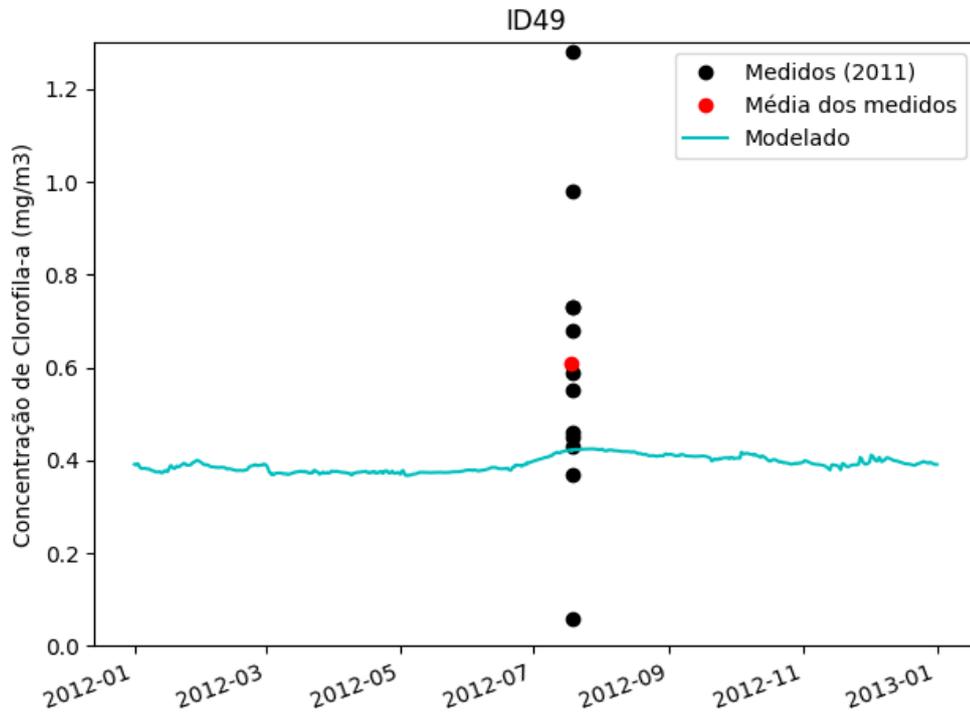
FIGURA 41 – REPRESENTAÇÃO DOS PONTOS PRINCIPAIS DO RESERVATÓRIO CAPIVARA



FONTE: O autor (2021)

O ponto 49, embora esteja localizado mais próximo a barragem, ainda pode ser considerado um ponto intermediário por conta de existir outros afluentes com contribuições significativas a montante da barragem. Os valores observados para este ponto são apresentados na FIGURA 42, e estão dentro dos valores medidos em diferentes profundidades no ano anterior.

FIGURA 42 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID49



FONTE: O autor (2021)

Os pontos 43 e 40 estão em zonas bem intermediárias do reservatório, no rio Paranapanema. Enquanto o ponto 43 está na região que recebe o afluente do rio Itararé, o ponto 40 está em uma região mais a montante, recebendo a contribuição de afluentes menores. Ambos apresentam baixas concentrações de clorofila-a, porém o valor no ponto 40 está abaixo da zona dos valores medidos em campo, mesmo que com uma baixa diferença (FIGURA 44), o ponto 43 também, mas com uma diferença ainda menor (FIGURA 43).

FIGURA 43 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID43

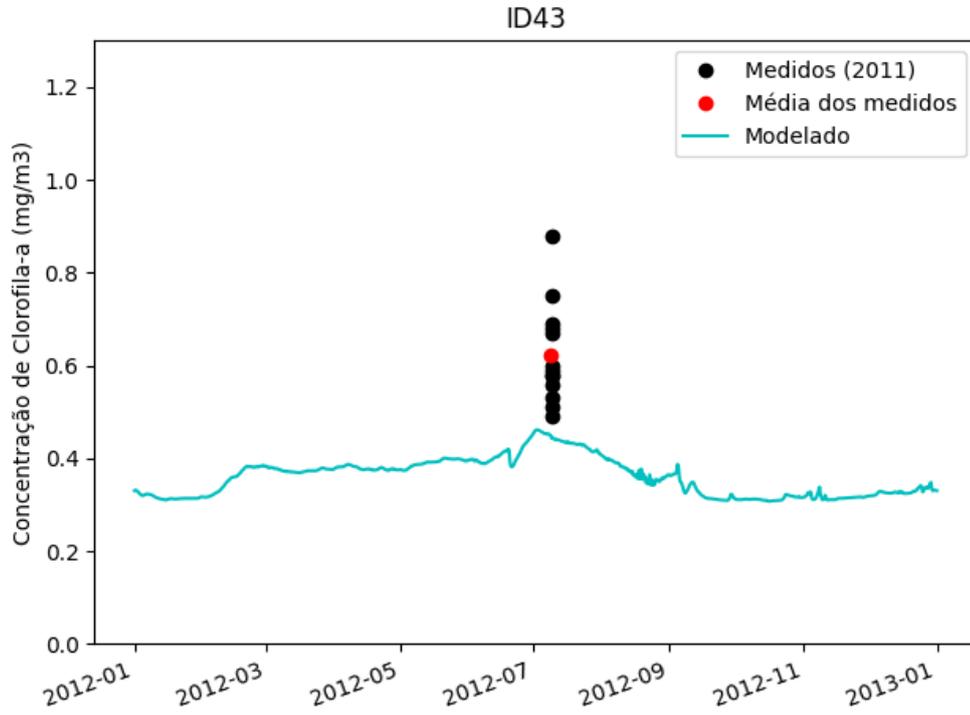
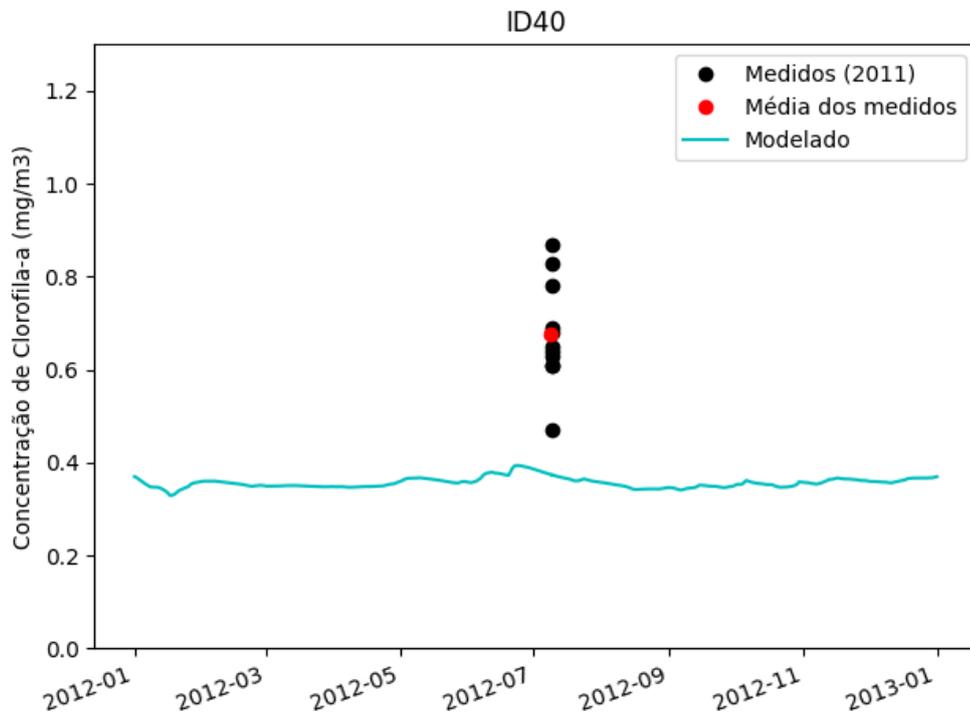
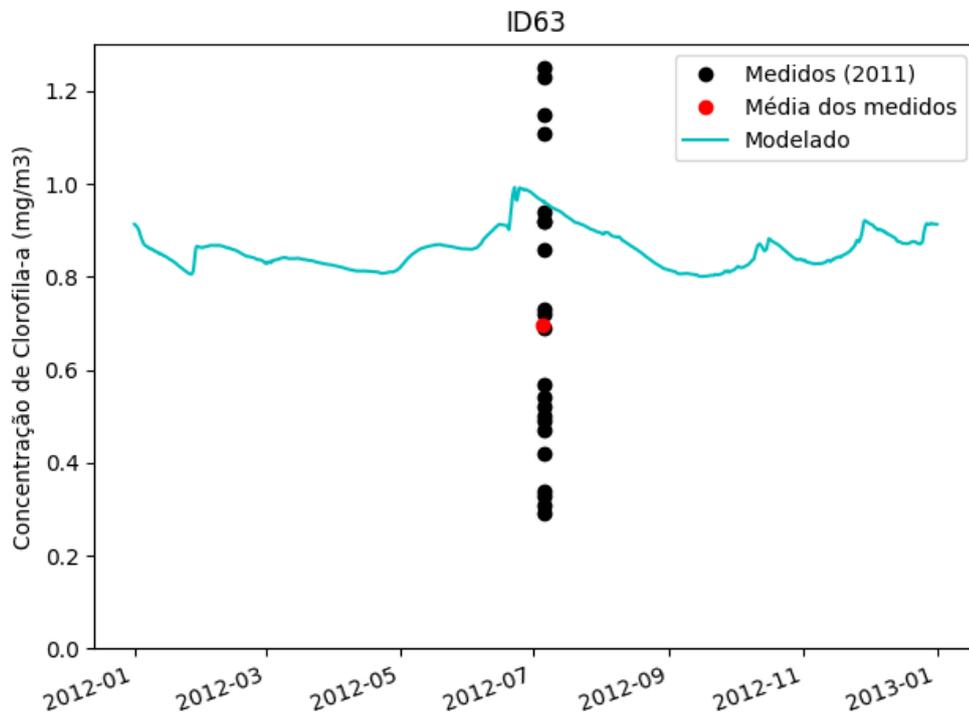


FIGURA 44 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID40



O ponto 63 é o único que não está no trecho de reservatório que seria o rio Paranapanema, está no trecho do rio Tibagi, rio que é o principal contribuinte para as concentrações de clorofila-a do reservatório, como será visto na seção a seguir. Os seus valores obtidos na modelagem foram adequados considerando os diversos valores medidos no ano anterior, em profundidades diferentes, como se observa na FIGURA 45. No caso do reservatório Capivara, todos os pontos foram adequados para validar a modelagem deste reservatório.

FIGURA 45 – CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A SIMULADA PARA O PONTO ID63

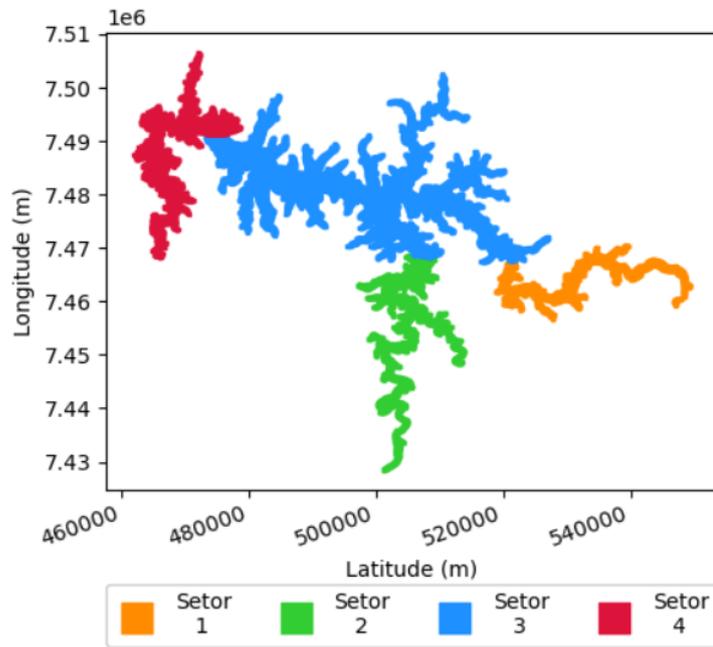


FONTE: O autor (2021)

4.3.2 Análise Espacial

A setorização para o reservatório Capivara realizada no projeto PE e apresentada na FIGURA 46 mostra 4 setores, onde o setor 1 é a região mais a montante do reservatório, trecho no rio Jurumirim, o setor 2 representa um dos principais afluentes do reservatório, o trecho no rio Tibagi, o setor 3 é a região intermediária do reservatório, a qual possui muitos afluentes, dentre eles o setor 2, já o setor 4 é a região mais a jusante do reservatório, região com maior represamento e menor velocidade, englobando ainda dois afluentes consideráveis.

FIGURA 46 – SETORIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO CAPIVARA

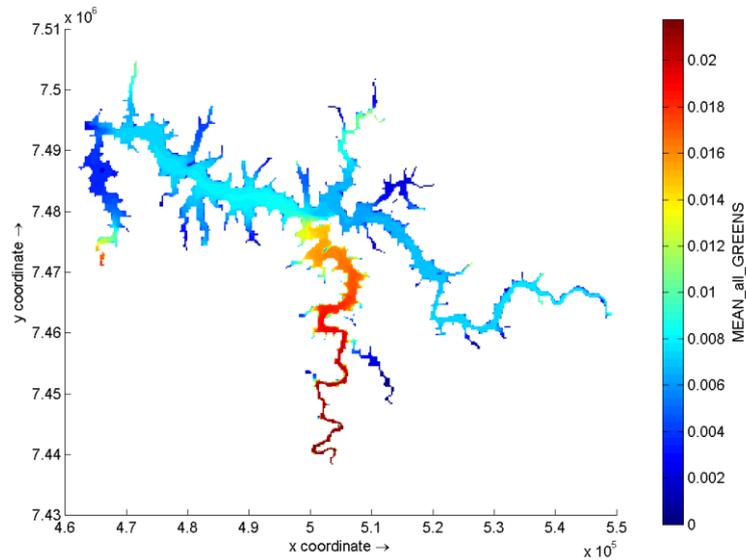


FONTE: FERNANDES *et al.* (2021)

Assim como nos outros reservatórios, o comportamento das concentrações de algas e clorofila-a é igual em relação a disposição espacial. Neste caso, se observa que o setor 2 possui valores de concentrações bastante superior à dos outros setores. O setor 3 apresenta regiões de concentrações altas, como a região a jusante do setor 2 e sua região mais ao norte no reservatório no trecho do rio São Mateus, porém essas concentrações são reduzidas quando esses afluentes chegam ao trecho do reservatório do rio Paranapanema. O setor 1 apresenta uma concentração ainda mais baixa, pois as contribuições de seus afluentes ao trecho no rio Paranapanema são pequenas e o setor 4 também, sendo a região da barragem.

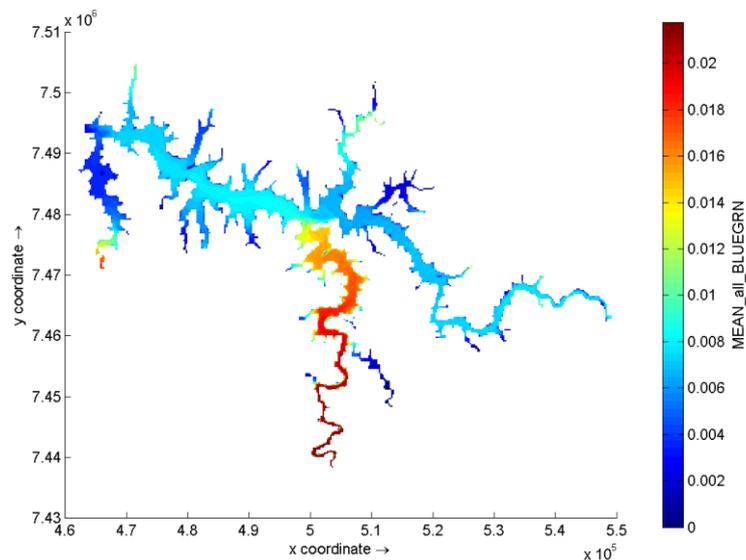
As concentrações de algas para o reservatório Capivara são bem inferiores às encontradas para os reservatórios Jurumirim e Chavantes, ficando com valores máximos de 0,02 mg/m³ no setor 2, enquanto em outras regiões os valores ficam na casa dos 0,006 mg/m³, conforme se observa na FIGURA 47 e na FIGURA 48.

FIGURA 47 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS VERDES (mg/m³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CAPIVARA



FONTE: O autor (2021)

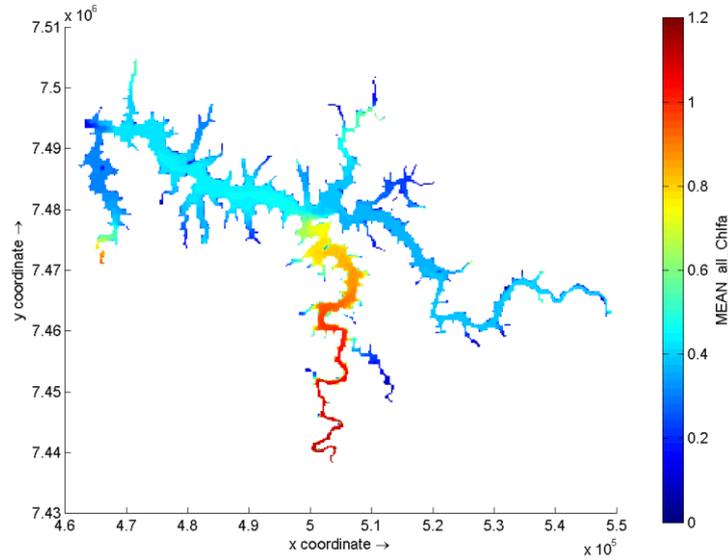
FIGURA 48 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE ALGAS CIANOFÍCEAS (mg/m³) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CAPIVARA



FONTE: O autor (2021)

Assim como no caso das algas, a concentração de clorofila-a no reservatório Capivara é bem inferior a encontrada nos outros reservatórios conforme a FIGURA 49, ficando com valores máximos na média anual entre 1 e 1,2 mg/m³. Já no trecho no reservatório do rio Paranapanema, as concentrações médias anuais de clorofila-a ficam na região dos 0,4 mg/m³.

FIGURA 49 – MÉDIA ANUAL DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m^3) NA CAMADA SUPERIOR NO RESERVATÓRIO CAPIVARA

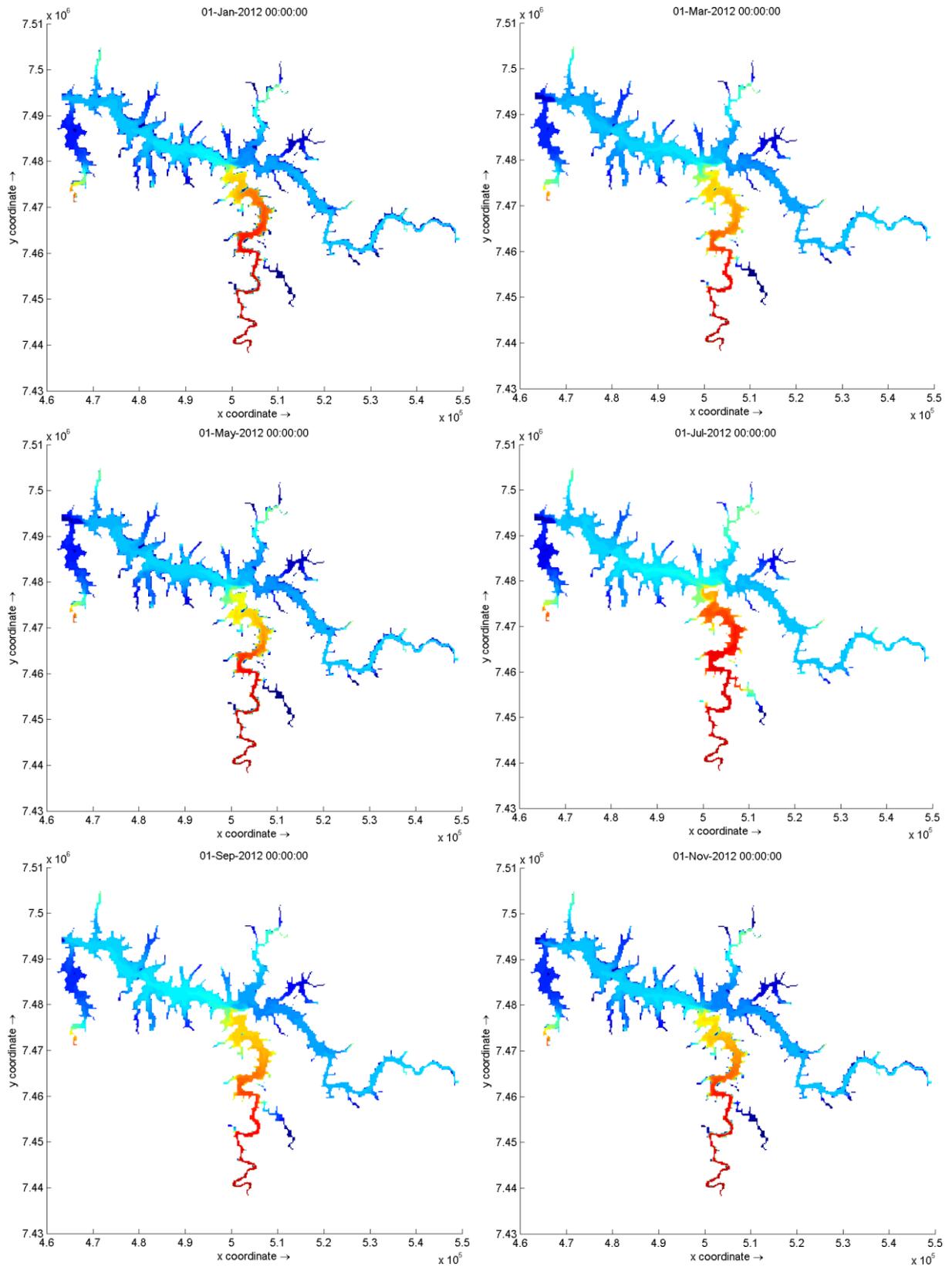


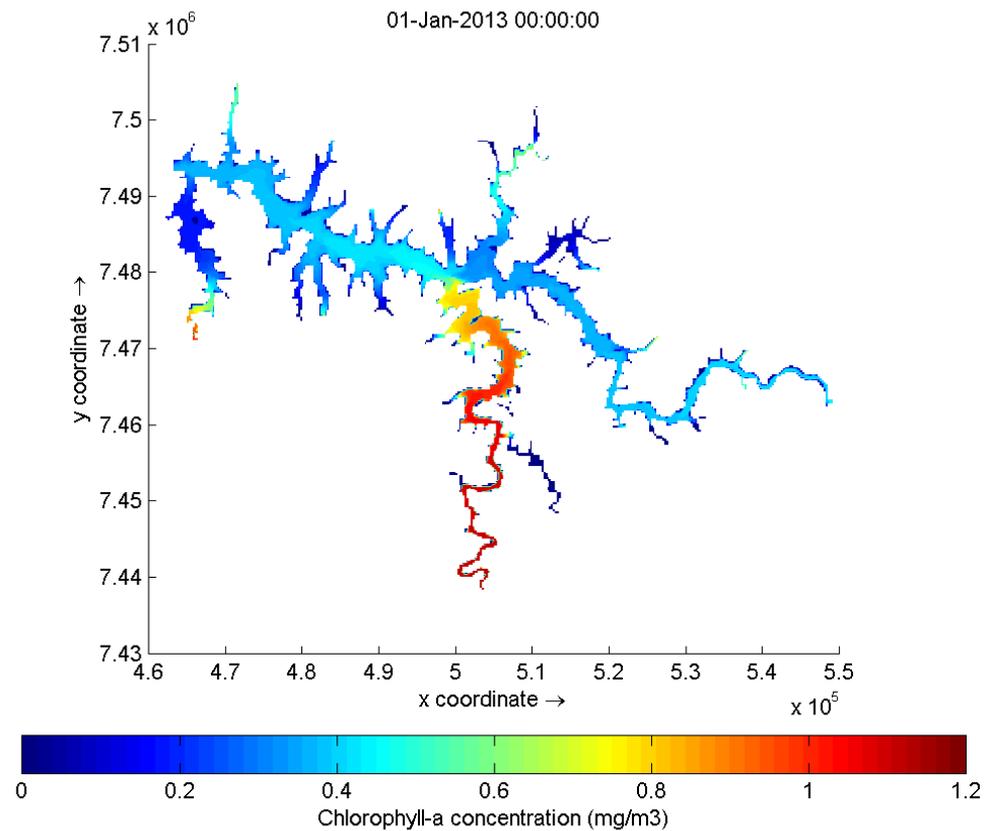
FONTE: O autor (2021)

4.3.3 Análise Conjunta

Através da FIGURA 50 se observa as variações mais perceptíveis em relação ao tempo, pelo menos graficamente, em comparação com os reservatórios anteriores. Isso ocorre devido a menor escala, pois as concentrações de clorofila-a no reservatório Capivara são bem inferiores. É possível notar que o setor 2 sempre possui as maiores concentrações, e que perto do mês de julho é onde há as maiores concentrações.

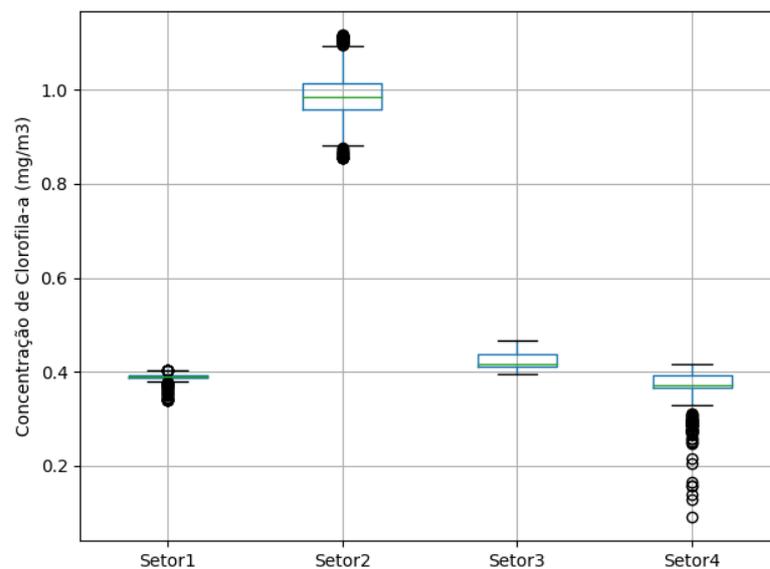
FIGURA 50 – MAPAS DE CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA-A (mg/m^3) AO LONGO DO ANO NO RESERVATÓRIO CAPIVARA





FONTE: O autor (2021)

FIGURA 51 – BOXPLOT PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO CAPIVARA

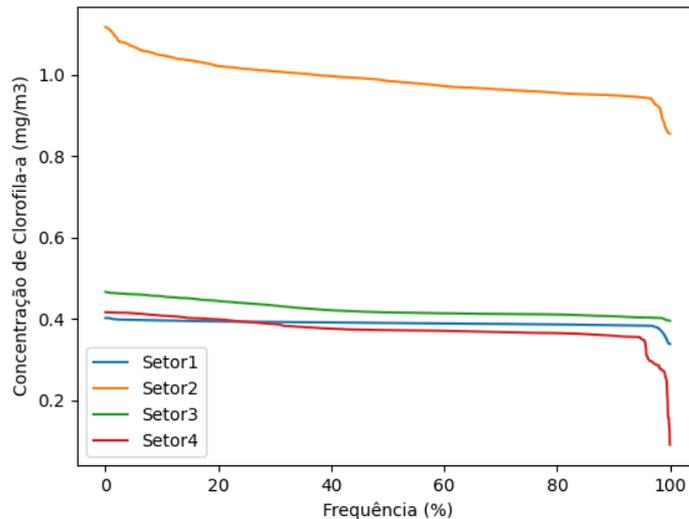


FONTE: O autor (2021)

No caso do reservatório Capivara, a FIGURA 51 indica baixíssimas variações em todos os setores, mas principalmente nos setores 1 e 3. O setor 4 possui bastante

valores mínimos como outliers, algo que é bastante visível na FIGURA 52, que mostra que quando as frequências de superar o valor são próximas de 100%, há um valor bastante baixo.

FIGURA 52 – PERMANÊNCIA PARA OS SETORES DO RESERVATÓRIO CAPIVARA



FONTE: O autor (2021)

4.4 COMPARAÇÃO COM RESULTADOS DO PROJETO PE

Buscou-se nesta seção verificar se os parâmetros de qualidade da água dos reservatórios que compõem a área de estudo deste trabalho sofreram alterações significativas com a inclusão das algas na modelagem, de modo que possa modificar o prognóstico dado no projeto PE sobre a qualidade da água.

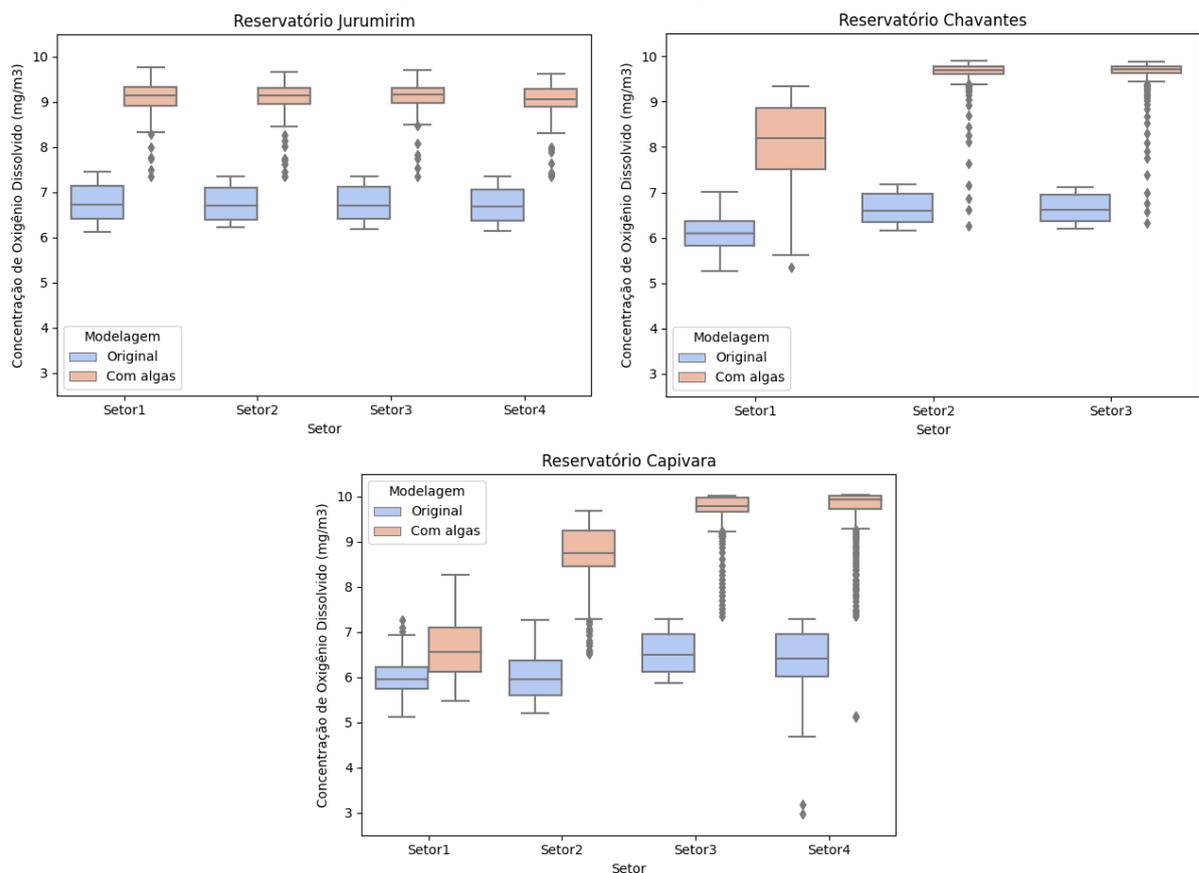
Para que pudesse ser visível as diferenças, tanto em relação a escala espacial como temporal, se utilizaram boxplots das concentrações dos quatro parâmetros já simulados no projeto PE (OD, DBO, N e P), nos setores de cada reservatório, comparando a modelagem do projeto (Original) com a realizada neste trabalho (Com algas).

4.4.1 Oxigênio Dissolvido (OD)

Observando a FIGURA 53, nota-se o aumento significativo de oxigênio dissolvido em todos os setores e em todos os reservatórios, comparando as séries de

dados gerados, além de um aumento na variação dos valores, causando a ocorrência de vários *outliers* em quase todos os setores, mostrando a contribuição fotossintética das algas como produtoras primárias, elevando o nível de OD, sem que haja eutrofização, já que se trata de valores médios em profundidade, seja pelo fato da modelagem ser feita em camadas verticais (Jurumirim) ou por terem sido adotados valores médios de concentração na entrada de dados (Chavantes e Capivara). O setor 1 de Capivara se destacou por ter um aumento de concentração menor, além de ser o único a não possuir *outliers* na modelagem com algas. Este aumento foi considerado muito exagerado, indicando que possivelmente a modelagem não foi adequada no que diz respeito ao consumo de OD pelas algas e outros seres vivos dos corpos hídricos.

FIGURA 53 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE OXIGÊNIO DISSOLVIDO

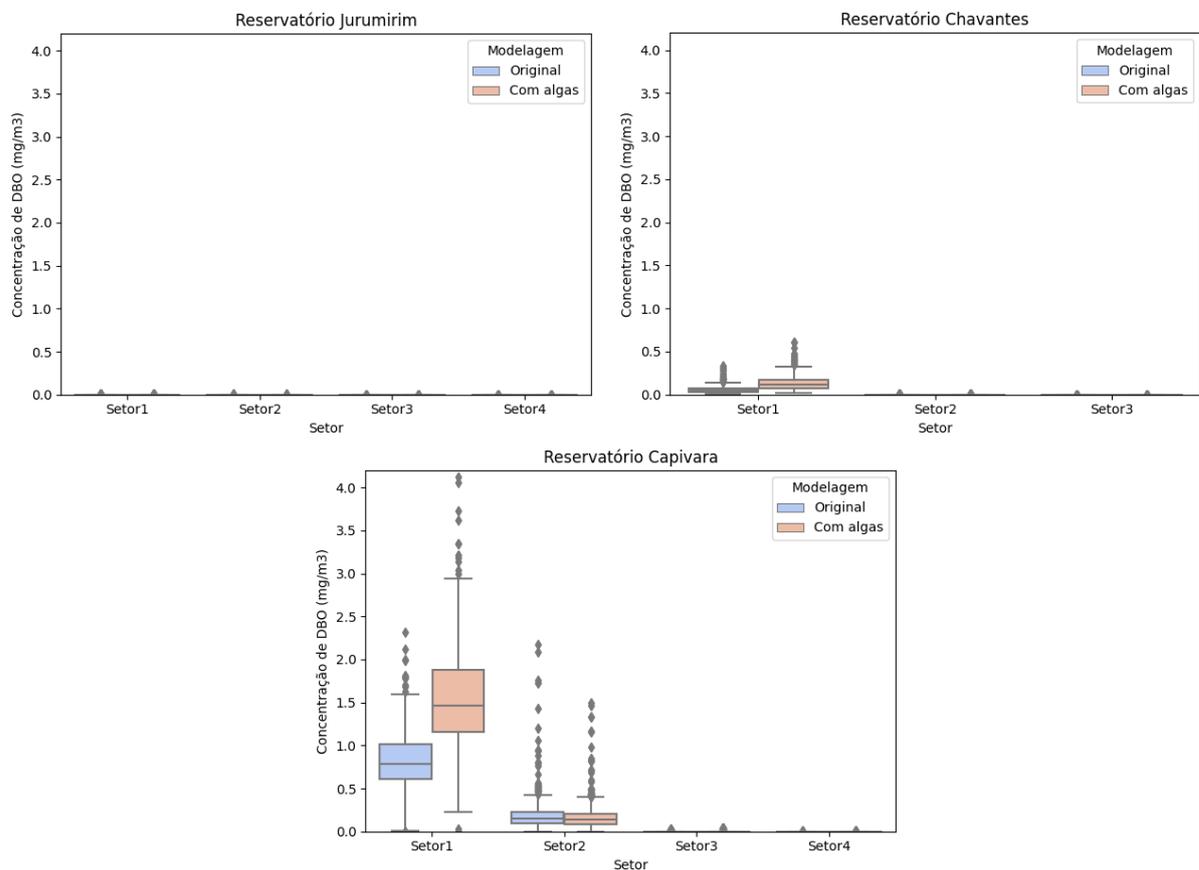


FONTE: O autor (2021)

4.4.2 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)

No caso da DBO, muitos setores dos reservatórios possuem valores muito baixos, de modo que não se observou variações em suas concentrações. Porém, cabe destacar os aumentos no setor 1 de Chavantes e principalmente no de Capivara, na qual houve um aumento mais significativo, expressando um aumento de matéria orgânica simulada nesses locais (FIGURA 54). Assim como no caso de OD, aqui a modelagem não foi considerada adequada, pois os valores obtidos de DBO são extremamente baixos, tanto na modelagem original como na com as algas.

FIGURA 54 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXIGÊNIO



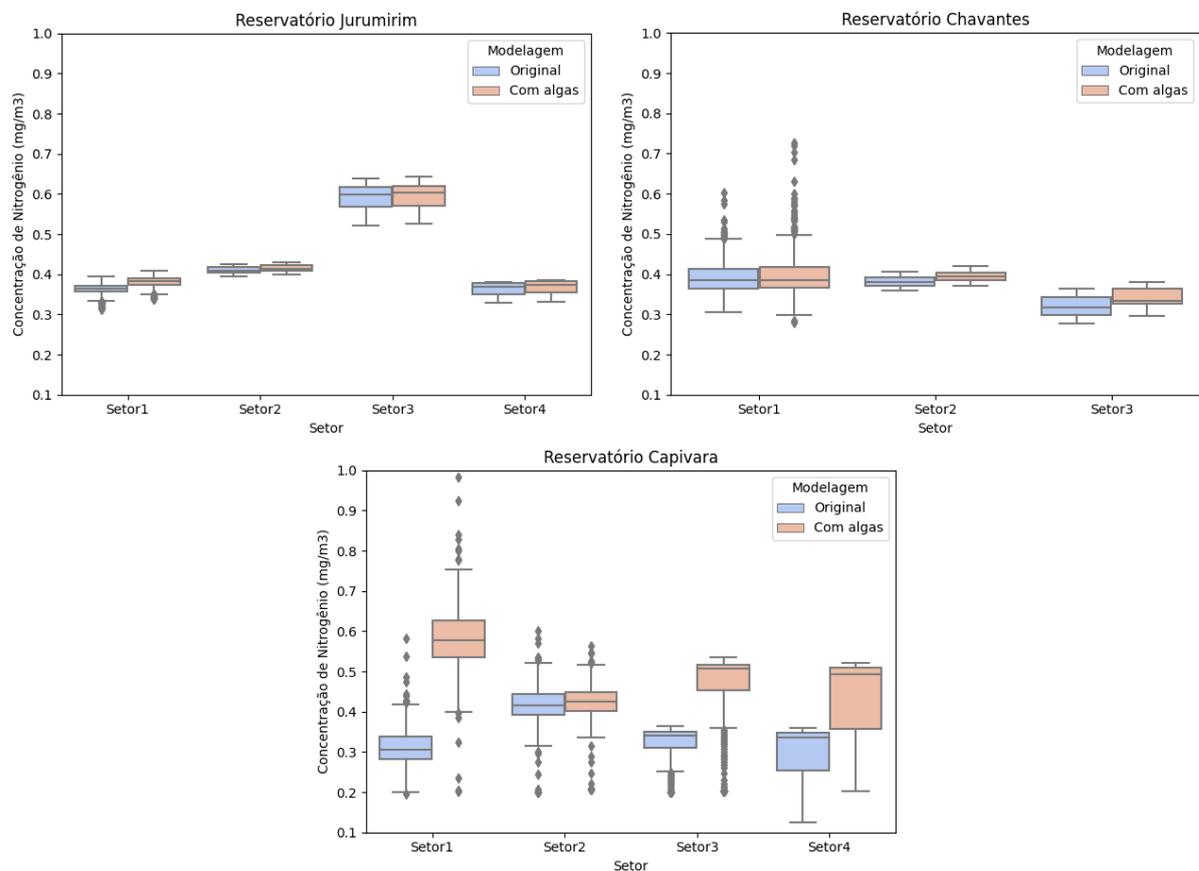
FONTE: O autor (2021)

4.4.3 Nitrogênio

As concentrações de nitrogênio total, conforme a FIGURA 55, tiveram um leve aumento com a inclusão das algas na modelagem, mostrando a rápida reciclagem

deste nutriente na área de estudo, impulsionada pela presença das algas e pela prática de aquicultura, esta considerada nas duas modelagens, que embora não seja uma justificativa, pode ser considerado um fator influenciador. Os reservatórios Jurumirim e Chavantes apresentaram leves aumentos, enquanto que no reservatório Capivara foram observados os maiores aumentos de concentração de N, exceto o setor 2, que apesar de aumento no primeiro quartil (Q1) e na mediana, apresentou uma variação menor, com valores menos extremos na modelagem mais recente, este setor é o que possui maior concentração de clorofila-a de Capivara, segundo a FIGURA 51.

FIGURA 55 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE NITROGÊNIO



FONTE: O autor (2021)

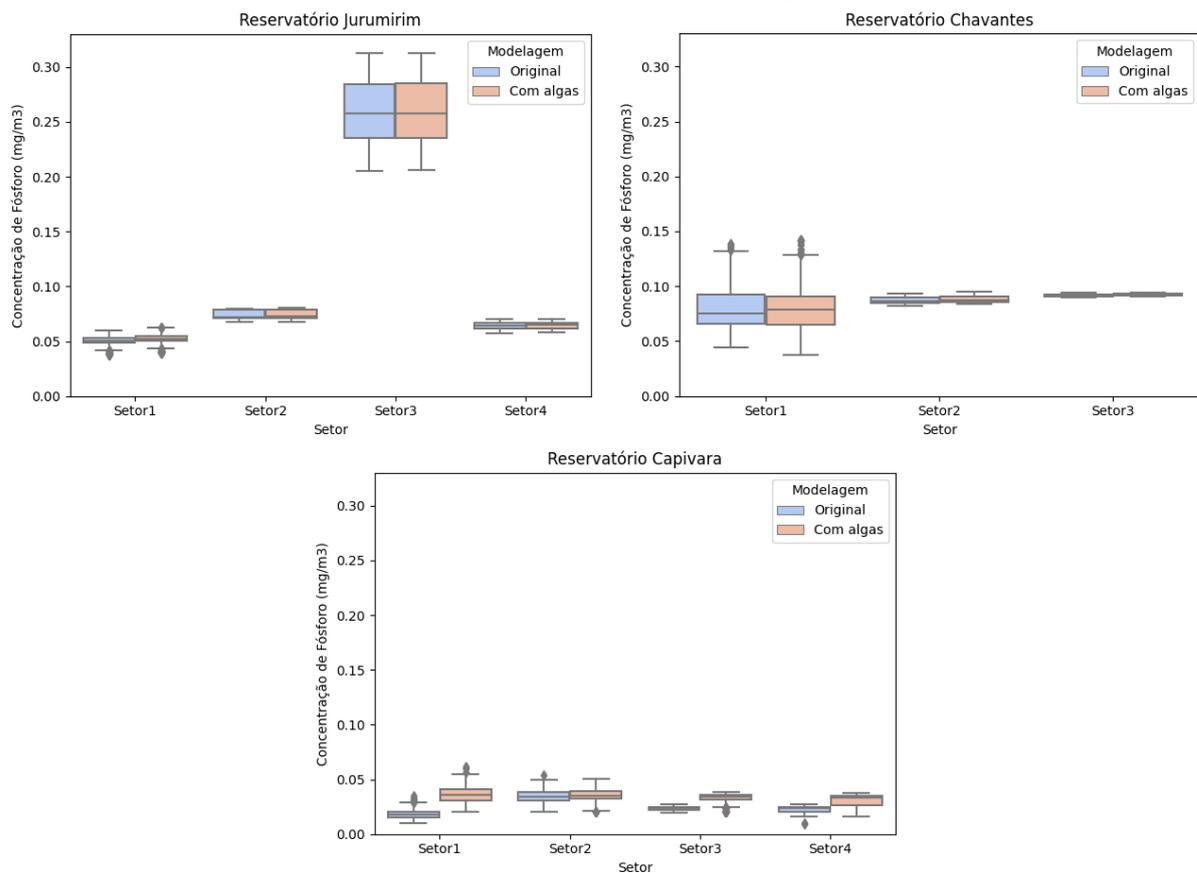
4.4.4 Fósforo

A FIGURA 56 mostra que praticamente não há alterações nos valores de concentração de Fósforo no reservatório Jurumirim. Já em Chavantes, se nota um leve aumento nos setores 2 e 3, enquanto no setor 1 é visto valores mais extremos de

mínimo e máximo, mas distância interquartílica menor e no mesmo patamar da modelagem original. No reservatório Capivara houve um aumento dos valores de concentração em todos os setores, tão significativa a ponto de piorar a classe de uso da água segundo a Resolução CONAMA 357/2005, passando de classe II para classe III, exceto no setor 2 onde o aumento é bastante tímido, mas que já se encontrava em classe III.

É possível ver que assim como no caso do N, as concentrações de P também se reciclam, e este parâmetro é ainda mais limitante nos resultados aqui obtidos do que no projeto PE, pois o reservatório Capivara era o único que lá possuía setores com qualidade da água na classe II da Resolução CONAMA 357/2005, e na modelagem com as algas todos esses setores viraram classe III, com o setor 1 tendo valores até mesmo acima dela.

FIGURA 56 – COMPARAÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO



FONTE: O autor (2021)

4.5 EFEITO CASCATA

Através dos resultados das seções anteriores, é possível notar o efeito dispersivo dos reservatórios que ao receberem altas concentrações de diversos parâmetros em alguns de seus afluentes conseguem neutralizar estas concentrações ao longo de seus leitos, chegando em regiões mais próximas as barragens com as concentrações mais baixas.

Devido a grande quantidade de barragens no rio Paranapanema, como pôde ser visto na FIGURA 3, o comportamento hidrodinâmico deste corpo hídrico é em boa parte controlado por essas barragens, em relação ao seu nível de água e vazão, conseqüentemente ajuda a reduzir grandes alterações nos valores dos parâmetros de qualidade de água.

Observa-se que o reservatório mais a montante do rio Paranapanema, o reservatório Jurumirim, possui as maiores concentrações de clorofila-a e algas no rio Paranapanema, na casa dos 4 mg/m³, vindas diretamente deste afluente, que é bastante reduzida até chegar na região da barragem, como descrito anteriormente, chegando a valores de concentração próximos de zero (FIGURA 27).

A jusante, há dois reservatórios a fio d'água (Piraju e Paranapanema) e então chega-se ao reservatório Chavantes, o qual possui as maiores concentrações nos setores 2 e 3, o setor 1, que representa o rio Paranapanema, em sua região mais a montante da barragem, na grade de modelagem, possui valores na casa de 1,5 mg/m³ de clorofila-a, já na região da barragem os valores também são próximos a zero (FIGURA 38), porém, assim como visto por Nogueira *et al.* (2010), considerando os setores 2 e 3 no rio Itararé não há uma condição que tendencie uma melhor condição oligotrófica no reservatório Chavantes em comparação com o reservatório Jurumirim, com melhores condições apenas no setor 1, justamente o que é jusante do reservatório Jurumirim.

Seguindo o fluxo do rio Paranapanema, há quatro reservatórios a fio d'água (Ourinhos, Salto Grande, Canoas II e Canoas I), e então se chega ao reservatório Capivara, o qual possui baixas concentrações de clorofila-a (em torno de 0,3 mg/m³) no setor 1, que representa a região mais à montante da barragem no rio Paranapanema. Até mesmo no setor 2, região das maiores concentrações, a mesma não passa da região de 1,2 mg/m³ de clorofila-a, ou seja, concentrações ainda mais baixas que nos reservatórios a montante (FIGURA 50).

Em relação aos outros parâmetros, os parâmetros N e P apresentaram o mesmo comportamento da Chlfa, enquanto OD não apresentou diferença significativa entre os reservatórios, porém DBO apresentou um efeito contrário, com a piora dos valores conforme se avança à jusante da área de estudo.

Isso mostra que o efeito cascata ocorre no rio Paranapanema, e conforme visto por Fernandes *et al.* (2021), embora haja afluentes do mesmo com altas concentrações de poluentes em toda sua extensão, os quais necessitam de atenção, as regiões mais a montante são as que necessitam de maior controle de poluição, pois os reservatórios conseguem, em efeito cascata, ir reduzindo as concentrações, não só no caso dos dois parâmetros limitantes já analisados no projeto PE (P e N), mas também no que diz respeito às algas e à clorofila-a.

5 CONCLUSÃO

Assim como no projeto PE, o Delft3D se apresentou como uma boa alternativa para simulações hidrodinâmicas (Delft3D-Flow) e de qualidade de água (Delft3D-WAQ) de corpos hídricos lânticos, em específico os três reservatórios lânticos da bacia do rio Paranapanema, Jurumirim, Chavantes e Capivara, que possuem características bastantes distintas um do outro e mostram a flexibilidade e adaptabilidade do modelo a essas características.

Porém, para a representação adequada, o modelo exige muitos dados de entrada, tanto para condições iniciais como de contorno, em resoluções espaciais e temporais grandes, muitas vezes maiores do que as disponíveis em dados medidos, quando estes são de fato medidos, pois a quantidade de dados medidos por estações de qualidade da água geralmente é baixa no Brasil, mesmo em regiões mais importantes para o desenvolvimento social de grandes comunidades, como é o caso da bacia do Rio Paranapanema.

Isso trouxe muitas dificuldades para a modelagem, tanto no projeto PE como neste trabalho, exigindo a adoção de simplificações nesses dados de entrada, por meio da adoção de séries sintéticas, valores padrão ou valores constante no espaço e/ou no tempo, este último é o caso das concentrações de algas de entrada.

Apesar disso, os resultados puderam ser validados, e mostraram que as regiões intermediárias nos reservatórios, regiões em que o efeito das áreas de contorno é menor, o modelo mostrou resultados muito satisfatórios, já em regiões mais afetadas por afluentes ou por barragens apresentaram resultados mais distantes, porém ainda aceitáveis.

Os novos parâmetros adicionados na modelagem realizada neste trabalho, que foram as algas verdes, as algas cianofíceas e a clorofila-a apresentaram comportamentos espaciais de suas concentrações praticamente iguais, e a setorização dos reservatórios, realizada no projeto PE ajudou a identificar as regiões que necessitam de maior atenção, embora em todos os casos as concentrações foram suficientemente baixas, o que fez com que esses parâmetros não se tornassem limitantes no que diz respeito a qualidade da água da área de estudo.

O parâmetro limitante, assim como no projeto PE, é o fósforo, que teve sua situação piorada nos reservatórios Chavantes e Capivara, sendo agravada no segundo, o qual teve uma redução na classe de uso de sua água, considerando os

limites preconizados pela Resolução CONAMA 357/2005. As fontes antrópicas deste poluente, como efluentes urbanos e industriais, efluentes de agricultura, e a prática de aquicultura, a qual foi simulada, são bastante relevantes para essa condição, que ainda teve um leve aumento com a inclusão das algas na modelagem.

A inclusão das algas também piorou a qualidade da água no que diz respeito a concentração de nitrogênio, que aumentou, indicando a capacidade de reciclagem destes nutrientes em corpos hídricos. Mas também houve melhora, no que diz respeito a concentração de oxigênio dissolvido, que aumentou devido a função fotossintetizante das algas, apesar de esse aumento ser considerado excessivo, indicando uma possível falha na consideração de processo de consumo deste parâmetro nos corpos hídricos pela modelagem. O parâmetro DBO não apresentou diferenças notáveis de modo geral, embora fora observado um aumento no nível de matéria orgânica em dois setores de reservatórios diferentes, novamente com ressalvas por ter tido resultados diferentes do normalmente esperado, mas neste caso não só neste trabalho como no projeto PE.

Quanto a hipótese do efeito cascata ir aumentando as condições oligotróficas conforme se avança à jusante, isso foi observado em partes através dos resultados obtidos neste estudo, pois ao comparar os reservatórios Chavantes e Capivara, a hipótese pode ser aceita, com uma melhora na qualidade de água, além da redução da concentração de algas e clorofila-a na região a jusante, mas ao comparar os reservatórios Jurumirim e Chavantes, isso não é observado analisando os reservatórios como um todo, embora se observe uma melhora na qualidade de água no setor de Chavantes que é montante ao reservatório Jurumirim.

Isso permite concluir que há de fato uma melhora na qualidade de água e aumento da oligotrofia na região mais a jusante dos reservatórios em cascata, mas os efeitos de afluentes com alto nível trófico (rio Itararé em Chavantes e rio Tibagi em Capivara) anularam totalmente (caso de Chavantes) ou parcialmente (caso de Capivara) esse efeito cascata.

De forma geral, considerando as simplificações adotadas, a inclusão das algas na modelagem de qualidade de água nos reservatórios lênticos da bacia do rio Paranapanema se mostrou importante, pois alterou a qualidade da água de maneira negativa, piorando inclusive a classe de uso da água do reservatório Capivara, apesar de não se ver uma situação de eutrofização em nenhuma região na área de estudo. A adoção de simplificações retrata a necessidade de que mais parâmetros sejam

medidos por estações de qualidade de água, além do aumento da rede de estações e de sua manutenção, para que haja dados que permitam melhorar o monitoramento atual e futuro dos corpos hídricos.

6 RECOMENDAÇÕES

A inclusão de cenários futuros, como há no projeto PE, seria uma boa continuação deste trabalho, que poderá ajudar na tomada de decisão de governos, empreendedores e toda a sociedade em geral para evitar pioras na qualidade da água.

Buscando melhorar a qualidade de simulações futuras, além da melhora do monitoramento da qualidade da água dos corpos hídricos citada no capítulo anterior, a modelagem de algas na área de estudo através de outros modelos, com o mesmo ou outro nível de sofisticação maior no que diz respeito as dimensões simuladas, processos e parâmetros considerados poderia identificar fraquezas, tanto do modelo como das simplificações adotadas que podem ter sido relevantes na redução da qualidade da simulação.

A comparação com outros meios de obtenção de dados dos parâmetros incluídos aqui, como medições de campo, imagens de satélite, ou imagens aéreas da área de estudo, por exemplo, complementariam com dados reais a validação e posteriormente a análise da qualidade da água

Estudos futuros utilizando o mesmo modelo, nos quais se espera que possuam melhores condições no que diz respeito aos dados de entrada, poderão trazer resultados mais adequados e para períodos mais recentes.

REFERÊNCIAS

ACHON, C. L., BARROSO, M. M., CORDEIRO, J. S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, p. 115-122, 2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Nota Técnica N°028: Estudos hidrológicos para definição das disponibilidades hídricas da UGRH Paranapanema**. 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Unidade de Gestão de Recursos Hídricos Paranapanema**. Brasília. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA), 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/2IGf4Q0>>. Acesso em: 13 jul. 2021.

AMARAL, A. C. Z.; JABLONSKI, S. Conservação da biodiversidade marinha e costeira no Brasil. **Megadiversidade**, v. 1, p. 43-51, 2005.

ARRUDA, N. M. B. Avaliação de variáveis de qualidade de água dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Foz do Areia, Segredo e Caxias, como instrumento de gestão de bacias hidrográficas. Brasil. 2014. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

BANDEIRA, J. V. *et al.* The present migration of São Francisco river mouth: Part II. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 22., 2017, Florianópolis. **Anais**. Florianópolis: Abrh, 2018. Disponível em: http://evolvedoc.com.br/xxiisbrh/detalhes-201_the-present-migration-of-sao-francisco-river-mouth-part-ii. Acesso em: 29 ago. 2021.

BATISTA, D. F.; CABRAL, J. B. P. Modelos matemáticos para avaliação do índice de qualidade de água: uma revisão. **Acta Geográfica**, v. 11, n. 25, p. 111-136, 2017.

BETANCUR-PÉREZ, G.; TORO-BOTERO, F. M.; GÓMEZ-GIRALDO, A. Methodology for hydrodynamic model selection: Case study: spatial variability of the thermal structure in the Riogrande II tropical reservoir, Colombia. **Dyna**, v. 83, n. 198, p. 154-164, 2016.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF 09/01/1997, P. 470. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm. Acesso em: 12 jul. 2021.

BRASIL. **Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília. 2005. Disponível em: [Resolução CONAMA Nº 357/2005 - "Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências."](#). (mma.gov.br). Acesso em: 12 jul. 2021.

CHANUDET, V.; FABRE, V.; VAN DER KAAIJ, T. Application of a three-dimensional hydrodynamic model to the Nam Theun 2 Reservoir (Lao PDR). **Journal of Great Lakes Research**, v. 38, n. 2, p. 260-269, 2012.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA RIO PARANAPANEMA - CBH PARANAPANEMA. Características, 2019. Disponível em: <<https://www2.paranapanema.org/a-bacia/caracteristicas/>>. Acesso em 28 ago. 2021.

CTG BRASIL - CHINA THREE GORGES. Usinas, 2019. Disponível em: <<http://www.paranapanemaenergia.com.br/USINAS/PAGINAS/USINAS.ASPX>>. Acesso em: 13 jun. 2021.

DELTARES. **Delft3D-FLOW**: User Manual. [S.l.]: The Netherlands, 2018a.

DELTARES. **D-Water Quality**: Technical Reference Manual [S.l.]: The Netherlands, 2018b.

DELTARES. **D-Water Quality**: User Manual. [S.l.]: The Netherlands, 2018c.

DUKE ENERGY. Memória do Rio Paranapanema, 2012. Disponível em: <<http://www.memoriaparanapanema.com.br/>>. Acesso em: 2019 ago. 13.

EMÍDIO, V. J. G. A problemática do fósforo nas águas para consumo humano e águas residuais e soluções para o seu tratamento. Portugal. 2012. 96f. Dissertação (mestrado em Engenharia do Ambiente) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, 2012.

FERNANDES, C. V. S. *et al.* **Nota Técnica 1 - Nota Técnica consolidada sobre os usos e interferências atuais identificados sobre o regime, quantidade e qualidade das águas dos rios de domínio da união e seus reservatórios na UGRH Paranapanema, incluindo-se a identificação das áreas reguladas por legislação específica.** Curitiba. 2019a.

FERNANDES, C. V. S. *et al.* **Nota Técnica 2 - Relatório consolidado de modelagem hidrodinâmica e de qualidade das águas superficiais dos rios de domínio da União e seus reservatórios na UGRH Paranapanema.** Curitiba. 2019b.

FERNANDES, C. V. S. *et al.* **Nota Técnica 3 - Nota Técnica consolidada de cenarizações para os horizontes de planejamento, dos usos pretensos dos**

recursos hídricos superficiais, da potencialidade, disponibilidade e demanda de água. Curitiba. 2020a.

FERNANDES, C. V. S. *et al.* **Nota Técnica 4 - Relatório consolidado de modelagem hidrodinâmica e de qualidade de água dos rios de domínio da União e seus reservatórios na UGRH Paranapanema, para as cenarizações nos horizontes de planejamento do prognóstico.** Curitiba. 2020b.

FERNANDES, C. V. S. *et al.* **Nota Técnica 5 - Relatório consolidado de modelagem hidrodinâmica e de qualidade de água dos rios de domínio da União e seus reservatórios na UGRH Paranapanema, para as cenarizações nos horizontes de planejamento do prognóstico.** Curitiba. 2021.

GOULART, C. B. Incertezas associadas aos dados de entrada em modelagem de transporte de sedimentos e a diferentes técnicas de gestão de sedimentos - estudo de caso da UHE Aimorés. Brasil. 2021. 122 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

GRUPO INTEGRADO DE AQUICULTURA E ESTUDOS AMBIENTAIS - IGIA. **Estudos para a definição dos parques aquícolas nos reservatórios do Paranapanema.** Volume 2: Parâmetros abióticos e modelagem. Ministério da Pesca e Aquicultura, 2013.

HARARI, J. *et al.* Modelagem numérica de plumas de emissários submarinos na região costeira do Estado do Paraná-Brasil. In: RIBEIRO, J. C. **Ciências exatas e da terra [recurso eletrônico]:** conhecimentos estratégicos para o desenvolvimento do país. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020. Cap. 2, p. 1-388–416.

HIPSEY, M. R.; BRUCE, L. C.; HAMILTON, D. P. GLM-General Lake Model: Model overview and user information. **Perth (Australia): University of Western Australia Technical Manual**, 2014.

KUMARI, S. U. Difference Between Blue Green Algae and Green Algae, 2019. Disponível em: < <https://www.differencebetween.com/difference-between-blue-green-algae-and-green-algae/>>

LIMA, A. E. Efeito da cascata de reservatórios sobre a qualidade da água no rio São Francisco, nordeste do Brasil. 2012. 62 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aquicultura) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

MAIA, J. L. *et al.* Uso de geotecnologias para análise espacial da qualidade da água no Reservatório de Barra Bonita–SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n. 2, p. 141-149, 2008.

MARQUES, S. M.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P. Algas como bioindicadores da qualidade da água. **Revista Científica ANAP Brasil**, v. 10, n. 19, 2017.

MARTIN, J. L.; MCCUTCHEON, S. C. Hydrodynamics and transport for water quality modeling Boca Raton. 1999.

MEES, A. Qualidade da Água em Reservatórios. 2020.

MOURA, A. N. *et al.* The role of a cascade of reservoirs and seasonal variation in the phytoplankton structure in a tropical river. **Brazilian Journal of Biology**, v. 73, p. 291-298, 2013.

NOGUEIRA, M. G. *et al.* Phytoplankton assemblages in a reservoir cascade of a large tropical-subtropical river (SE, Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, v. 70, n. 3, p. 781-793, 2010.

PELICICE, F. M. *et al.* Fish diversity in the cascade of reservoirs along the Paranapanema River, southeast Brazil. **Neotropical Ichthyology**, v. 16, 2018.

POLLI, B. A. Modeling of heat transport in lakes: spatial and temporal characterization. Brasil. 2018. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA. Qualidade da Água, 2015. Disponível em: <<https://tratamentodeagua.com.br/artigo/qualidade-da-agua/>>

SOULIGNAC, F. *et al.* Performance assessment of a 3D hydrodynamic model using high temporal resolution measurements in a shallow urban lake. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 22, n. 4, p. 309-322, 2017.

SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R. O processo de mistura em reservatórios do semi-árido e sua implicação na qualidade da água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 109-119, 2006.

STREIT, N. M. *et al.* As clorofilas. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 748-755, 2005.

TEIXEIRA, T. M. N. Modelagem hidrodinâmica tridimensional do Lago Paranoá para análise dos efeitos da operação do reservatório. Brasil. 2019. 143f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. **Principles of surface water quality modeling and control**. Harper & Row Publishers, 1987.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos avançados**, v. 22, p. 7-16, 2008.

VOLLENWEIDER, R. A. Input-output models. **Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie**, v. 37, n. 1, p. 53-84, 1975.

WAHL, B.; PEETERS, F. Effect of climatic changes on stratification and deep-water renewal in Lake Constance assessed by sensitivity studies with a 3D hydrodynamic model. **Limnology and oceanography**, v. 59, n. 3, p. 1035-1052, 2014.