



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA
INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE

ANTÔNIO JOSÉ PEREIRA DA SILVA

DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE RESERVATÓRIOS DO ESTADO DO CEARÁ
COM BASE EM CRITÉRIOS DE QUALIDADE

CEARÁ

2022

ANTÔNIO JOSÉ PEREIRA DA SILVA

**DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE RESERVATÓRIOS DO ESTADO DO CEARÁ
COM BASE EM CRITÉRIOS DE QUALIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente (PGEA) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) como requisito para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Energia e Ambiente.

Linha de pesquisa: Sistemas Energéticos, Desenvolvimento Rural e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede

CEARÁ

2022

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Silva, Antônio José Pereira da.

S586d

Disponibilidade hídrica de reservatórios do estado do Ceará com base em critérios de qualidade / Antônio José Pereira da Silva. - Redenção, 2022.
98f: il.

Dissertação - Curso de Mestrado Acadêmico em Energia e Ambiente, Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

1. Modelagem de fósforo. 2. Disponibilidade hídrica. 3. Água - Qualidade. 4. água - Análise. I. Título

CE/UF/BSCA

CDD 551.48

ANTÔNIO JOSÉ PEREIRA DA SILVA

**DISPONIBILIDADE HÍDRICA DE RESERVATÓRIOS DO ESTADO DO CEARÁ
COM BASE EM CRITÉRIOS DE QUALIDADE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Energia e Ambiente (PGEA) da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) como requisito para obtenção do título de Mestre.

Aprovado em: 15 / 06 / 2022

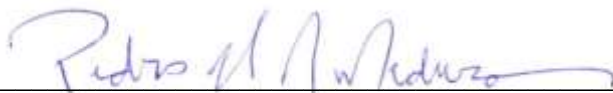
BANCA EXAMINADORA



Professor Doutor George Leite Mamede (Orientador)
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB



Professor Doutor Alexandre Cunha Costa
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira – UNILAB



Professor Doutor Pedro Henrique Augusto Medeiros
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Professor Doutor Iran Eduardo Lima Neto
Universidade Federal do Ceará - UFC

Aos meus Filhos (Ítalo Costa da Silva e Natacha
Gomes da Silva) pela continuidade da vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde em plena pandemia do coronavírus!

Obrigado pela vida e a sabedoria em perseverar na construção do trabalho.

Ao João José Ferreira e à Francisca Pereira da Silva, meus pais, pelo exemplo de família.

Aos meus irmãos João Silva, Cleinice Silva, Cleide Silva e José Silva pela convivência fraterna e saudável.

A minha esposa Natália Gomes, companheira inseparável! Agradeço pela compreensão nos momentos de estudos em que deixei de ficar com ela em família.

Ao professor Prof. Dr. George Leite Mamede pelas inúmeras aprendizagens durante o percurso de orientação, agradeço a atenção e as mensagens de incentivo, por ter acreditado no meu potencial. A minha gratidão por tudo!

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Energia e Ambiente.

Aos colegas de mestrado, pela amizade e partilha vivenciadas em sala de aula e neste período do ensino remoto.

Aos profissionais da Escola Estadual de Educação Profissional José Ivanilton Nocrato, a todos meus colegas professores, em especial, a diretora Tatiana Cruz e a coordenadora Ana obrigado pelo apoio de sempre!

Aos amigos e amigas pelo cuidado incondicional na travessia da vida.

A todos que contribuíram de alguma forma, meus agradecimentos.

“A água de boa qualidade é como a saúde ou a liberdade: só tem valor quando acaba.”
(Guimarães Rosa)

RESUMO

SILVA, Antônio José Pereira da. *Disponibilidade hídrica de reservatórios do estado do Ceará com base em critérios de qualidade*. Ceará. 2022. Dissertação – Programa de Mestrado em Energia e Ambiente, Ceará. Orientador: George Leite Mamede.

A água é um recurso natural cada vez mais escasso no mundo devido a fatores diversos como questões climáticas, poluentes, agentes de contaminação. O armazenamento de águas em reservatórios superficiais vem sendo impactado por estiagens recorrentes e perda de qualidade. Este trabalho tem como objetivo analisar a disponibilidade hídrica de água com base em critérios de qualidade, a partir de concentrações de fósforo, em três reservatórios do Estado do Ceará: Acarape do Meio (29,6 hm³), Aracoiaba (162 hm³) e Pentecoste (395,6 hm³). A estimativa da carga de fósforo afluente nos reservatórios foi realizada a partir de dados censitários de produção animal, agrícola e humana, aplicando-se equações específicas. A modelagem da qualidade da água dos reservatórios com base no teor de fósforo é aplicada usando o modelo de mistura completa com base na equação proposta por Chapra (QUAL-HIDROSED). Com base em dados medidos de concentração de fósforo no reservatório, calibrou-se o coeficiente de ajuste da equação para estimativa do coeficiente de sedimentação K_s em função do tempo de retenção hidráulica TR , para cada reservatório selecionado. A metodologia proposta permitiu estimar a carga de fósforo anual bruta produzida nas bacias hidrográficas dos reservatórios Acarape do Meio (68,4 ton/ha/ano), Aracoiaba (37,3 ton/ha/ano) e Pentecoste (16,7 ton/ha/ano). Com base em dados medidos de concentração de fósforo nos reservatórios estudados, estimou-se a carga de fósforo afluente, que se mostrou dependente do regime hidrológico observado na bacia hidrográfica contribuinte, podendo variar de 1,2% a 11,4% da carga bruta produzida na bacia, a depender do reservatório estudado e das características hidrológicas dos períodos analisados. Nesta pesquisa, considerou-se os períodos de 2004-2010 (mais úmido com maior geração de escoamento superficial) e 2011-2020 (estiagem prolongada com geração de escoamento superficial restrita). As análises de regressão realizadas justificaram a introdução do conceito de Razão de Aporte de Fósforo – RAF, que representa a relação entre a carga de fósforo efetiva que afluí ao reservatório e a carga bruta de fósforo produzida na bacia e pode ser estimado como uma função do coeficiente de escoamento superficial com R^2 de 0,98. Adicionalmente, o modelo de qualidade de água QUAL-HIDROSED foi testado para os três reservatórios estudados e períodos com regimes hidrológicos distintos, mostrando-se eficiente na caracterização da variação no teor de fósforo

no reservatório como função do volume armazenado, indicando redução na concentração deste nutriente para maiores volumes conforme padrão detectado nos dados medidos para os reservatórios estudados. Analisou-se, ainda, os efeitos da qualidade de água na regularização de vazões em cada um dos reservatórios estudados, indicando que o Q90 pode alterar significativamente a depender do critério de qualidade para liberação da água e do aporte de fósforo no período. Os resultados indicaram que mesmo reduzindo a carga de fósforo afluyente aos reservatórios estudados para 20% do registrado no período de 2004-2010, o Q90 reduziu para 49% (Acarape do Meio), 82% (Aracoiaba) e 46% (Pentecoste) do que se consegue regularizar sem restrição de qualidade de água em um cenário com liberação apenas de água dentro dos limites de classe 2 nestes reservatórios estudados.

Palavras-chave: Modelagem de fósforo. Disponibilidade hídrica. Qualidade de água.

ABSTRACT

SILVA, Antonio José Pereira da. *Water availability from reservoirs in the state of Ceará based on quality criteria*. Ceará. 2022. Dissertation – Master's Program in Energy and Environment, Ceará. Advisor: George Leite Mamede.

Water is an increasingly scarce natural resource in the world due to several factors such as climatic issues, pollutants, contamination agents. The storage of water in surface reservoirs has been impacted by recurrent droughts and loss of quality. This study aims to analyze the water availability of water based on quality criteria, based on phosphorus concentrations, in three reservoirs in the State of Ceará: Acarape do Meio (29.6 hm³), Aracoiaba (162 hm³) and Pentecoste (395.6 hm³). The estimation of the phosphorus load affluent to the reservoirs was carried out from census data on animal, agricultural and human production, applying specific equations. Modeling the water quality of reservoirs based on phosphorus content is performed using the complete mixture model based on the equation proposed by Chapra (QUAL-HIDROSED). Based on measured data of phosphorus concentration in the reservoir, the adjustment coefficient of the equation was calibrated to estimate the sedimentation coefficient K_s as a function of the hydraulic retention time T_R , for each selected reservoir. The proposed methodology allowed estimating the annual phosphorus gross load produced in the Acarape do Meio (68.4 ton/ha/year), Aracoiaba reservoir (37.5 ton/year) and Pentecoste (16.7 ton/ha/year) watersheds. Based on measured phosphorus concentration data in the studied reservoirs, the phosphorus inflow load was estimated, which proved to be dependent on the hydrological regime observed in its watershed, ranging from 1.2% to 11.4% of the gross load produced in the basin, depending on the studied reservoir and the hydrological characteristics of the analyzed periods. In this research, the periods of 2004-2010 (wetter with greater generation of runoff) and 2011-2020 (prolonged drought with restricted runoff generation) were considered. The regression analyzes performed justified the introduction of the concept of Phosphorus Input Ratio - RAF, which represents the relationship between the effective phosphorus load that flows into the reservoir and the gross phosphorus load produced in the basin and can be estimated as a function of the surface runoff coefficient with R^2 of 0.98. Additionally, the QUAL-HIDROSED water quality model was tested for the three studied reservoirs and periods with different hydrological regimes, proving to be efficient in characterizing the variation in the phosphorus content in the reservoir as a function of the stored volume. It is indicated a reduction in the concentration of this nutrient for larger volumes according to the pattern detected in the

measured data for the studied reservoirs. The effects of water quality on the regularization of flows in each of the studied reservoirs were also analyzed, indicating that the Q90 can change significantly depending on the quality criterion for water release and the phosphorus input in the period. The results indicated that even reducing the phosphorus load inflowing to the studied reservoirs to 20% of that recorded in the 2004-2010 period, the Q90 reduced to 49% (Acarape do Meio), 82% (Aracoiaba) and 46% (Pentecost) of the that it is possible to regularize without water quality restriction in a scenario with only water release within class 2 limits in these studied reservoirs.

Keywords: Phosphorus modeling. Water availability. Water quality.

LISTA DE SIGLAS

ANA.....	Agência Nacional de Águas
CAGECE.....	Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará
CONAMA.....	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IET.....	Índice do estado trófico
CBH.....	Comitês de Bacias Hidrográficas
CETESB.....	Companhia Ambiental do estado de São Paulo
COGERH.....	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
PLANERH.....	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PERH.....	Plano Estratégico dos Recursos Hídricos
PGRH.....	Política de Gestão dos Recursos Hídricos
SRH.....	Secretaria dos Recursos Hídricos
UFC.....	Universidade Federal do Ceará
RAF.....	Razão de Aporte de Fósforo
UNILAB.....	Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01: MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO.....	35
FIGURA 02: ESPELHO DE ÁGUA DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO.....	36
FIGURA 03: EVOLUÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO..	37
FIGURA 04: LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE ARACOIABA	38
FIGURA 05: ESPELHO DE ÁGUA DO AÇUDE ARACOIABA.....	39
FIGURA 06: EVOLUÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA DO AÇUDE ARACOIABA.....	40
FIGURA 07: LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO AÇUDE PENTECOSTE.....	41
FIGURA 08: ESPELHO DE ÁGUA DO AÇUDE PENTECOSTE.....	42
FIGURA 09: EVOLUÇÃO DO VOLUME DE ÁGUA DO AÇUDE PENTECOSTE.....	43
FIGURA 10: DISTRIBUIÇÃO DO FÓSFORO NO ESGOTO DOMÉSTICO.....	45
FIGURA 11: RELAÇÃO ENTRE A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO E O VOLUME DO RESERVATÓRIO COM BASE EM DADOS MEDIDOS NO AÇUDE ACARAPE DO MEIO.....	61
FIGURA 12: RELAÇÃO ENTRE A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO E O VOLUME DO RESERVATÓRIO COM BASE EM DADOS MEDIDOS NO AÇUDE ARACOIABA.....	62
FIGURA 13: RELAÇÃO ENTRE A CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO E O VOLUME DO RESERVATÓRIO COM BASE EM DADOS MEDIDOS NO AÇUDE PENTECOSTE.....	63
FIGURA 14: CURVA DE PERMANÊNCIA DE CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO NO PERÍODO DE 2004 A 2010.....	64
FIGURA 15: CURVA DE PERMANÊNCIA DE CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO NO PERÍODO DE 2011 A 2020.....	65
FIGURA 16: CURVA DE PERMANÊNCIA DE CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NO RESERVATÓRIO ARACOIABA NO PERÍODO DE 2004 A 2010.....	66
FIGURA 17: CURVA DE PERMANÊNCIA DE CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NO RESERVATÓRIO ARACOIABA NO PERÍODO DE 2011 A 2020.....	67
FIGURA 18: CURVA DE PERMANÊNCIA DE CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NO RESERVATÓRIO PENTECOSTE NO PERÍODO DE 2011 A 2020.....	68
FIGURA 19: CURVA DE PERMANÊNCIA DE CONCENTRAÇÕES DE FÓSFORO NO RESERVATÓRIO PENTECOSTE NO PERÍODO DE 2011 A 2020.....	68
FIGURA 20: CURVAS DE DECAIMENTO DO FÓSFORO TOTAL MODELADO COM O QUAL-HIDROSED E DERIVADO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DERIVADA DE DADOS MEDIDOS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO E VOLUMES ARMAZENADOS TOTAL DE REGRESSÃO NO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO PARA O PERÍODO DE 2011-2020.....	73

FIGURA 21: CURVAS DE DECAIMENTO DO FÓSFORO TOTAL MODELADO COM O QUAL-HIDROSED NO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO PARA OS PERÍODOS DE 2004-2010 E 2011-2020.....	74
FIGURA 22: CURVAS DE DECAIMENTO DO FÓSFORO TOTAL MODELADO COM O QUAL-HIDROSED E DERIVADO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DERIVADA DE DADOS MEDIDOS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO E VOLUMES ARMAZENADOS TOTAL DE REGRESSÃO NO RESERVATÓRIO ARACOIABA PARA O PERÍODO DE 2011-2020.....	75
FIGURA 23: CURVAS DE DECAIMENTO DO FÓSFORO TOTAL MODELADO COM O QUAL-HIDROSED NO RESERVATÓRIO ARACOIABA PARA OS PERÍODOS DE 2004-2010 E 2011-2020.....	76
FIGURA 24: CURVAS DE DECAIMENTO DO FÓSFORO TOTAL MODELADO COM O QUAL-HIDROSED E DERIVADO DA EQUAÇÃO DE REGRESSÃO DERIVADA DE DADOS MEDIDOS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO E VOLUMES ARMAZENADOS TOTAL DE REGRESSÃO NO RESERVATÓRIO PENTECOSTE PARA O PERÍODO DE 2011-2020.....	77
FIGURA 25: CURVAS DE DECAIMENTO DO FÓSFORO TOTAL MODELADO COM O QUAL-HIDROSED NO RESERVATÓRIO PENTECOSTE PARA OS PERÍODOS DE 2004-2010 E 2011-2020.....	77
FIGURA 26: CURVA DE GARANTIA DO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO CONSIDERANDO CENÁRIOS DE QUALIDADE DA ÁGUA LIBERADA (SEM RESTRIÇÕES; APENAS CLASSE 3 OU MELHOR; APENAS CLASSE 2 OU MELHOR).....	78
FIGURA 27: CURVAS DE GARANTIA DO RESERVATÓRIO ACARAPE DO MEIO CONSIDERANDO CENÁRIOS DE QUALIDADE DA ÁGUA LIBERADA (PARA O Q90 COM RELAÇÃO A CARGA DE FÓSFORO AFLUENTE).....	79
FIGURA 28: CURVA DE GARANTIA DO RESERVATÓRIO ARACOIABA CONSIDERANDO CENÁRIOS DE QUALIDADE DA ÁGUA LIBERADA (SEM RESTRIÇÕES; APENAS CLASSE 3 OU MELHOR; APENAS CLASSE 2 OU MELHOR).....	80
FIGURA 29: CURVA DE GARANTIA DO RESERVATÓRIO ARACOIABA CONSIDERANDO CENÁRIOS DE QUALIDADE DA ÁGUA LIBERADA (PARA O Q90 COM RELAÇÃO A CARGA DE FÓSFORO AFLUENTE).....	81
FIGURA 30: CURVA DE GARANTIA DO RESERVATÓRIO PENTECOSTE CONSIDERANDO CENÁRIOS DE QUALIDADE DA ÁGUA LIBERADA (SEM RESTRIÇÕES; APENAS CLASSE 3 OU MELHOR; APENAS CLASSE 2 OU MELHOR).....	82
FIGURA 31: CURVA DE GARANTIA DO RESERVATÓRIO PENTECOSTE CONSIDERANDO CENÁRIOS DE QUALIDADE DA ÁGUA LIBERADA (PARA O Q90 COM RELAÇÃO A CARGA DE FÓSFORO AFLUENTE).....	82
FIGURA 32: CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL EM (TON/ANO) PARA O RESERVATÓRIO DO ACARAPE DO MEIO.....	83
FIGURA 33: CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL (MG/L) POR TEMPO DE RETORNO PARA O RESERVATÓRIO DO ACARAPE DO MEIO.....	84

FIGURA 34: CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL EM (TON/ANO) PARA O RESERVATÓRIO DO ARACOIABA.....	85
FIGURA 35: CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL (MG/L) POR TEMPO DE RETORNO PARA O RESERVATÓRIO DO ARACOIABA.....	85
FIGURA 36: CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL EM (TON/ANO) PARA O RESERVATÓRIO DO PENTECOSTE.....	86
FIGURA 37: CURVAS DE CONCENTRAÇÃO DE FÓSFORO TOTAL (MG/L) POR TEMPO DE RETORNO PARA O RESERVATÓRIO PENTECOSTE.....	87
FIGURA 38: PARÂMETRO DE AFLUENTES COMPARATIVOS DE COEFICIENTES DE AJUSTE E TEMPO DE RETENÇÃO.....	88
FIGURA 39: PARÂMETRO DE AFLUENTES COMPARATIVOS DE COEFICIENTE DE SEDIMENTOS E TEMPO DE RETORNO.....	89
FIGURA 40: PARÂMETRO DE AFLUENTES COMPARATIVOS DE RAZÃO DE APORTE DE FÓSFORO (RAF) POR COEFICIENTE DE ESCOAMENTO.....	90

LISTA DE TABELAS

TABELA 01: ESTIMATIVA DA CARGA DE FÓSFORO DERIVADA DA ATIVIDADE DOMÉSTICA NA BACIA DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO.....	53
TABELA 02: ESTIMATIVA DA CARGA DE FÓSFORO DERIVADA DA ATIVIDADE DA PECUÁRIA NA BACIA DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO.....	54
TABELA 03: ESTIMATIVA DA CARGA DE FÓSFORO DERIVADA DA ATIVIDADE DA AGRICULTURA NA BACIA DO AÇUDE ACARAPE DO MEIO.....	55
TABELA 04: CARGA DE FÓSFORO PARA A ATIVIDADE DOMÉSTICA DO AÇUDE ARACOIABA.....	56
TABELA 05: ESTIMATIVA DA CARGA BRUTA DE FÓSFORO DERIVADA DA ATIVIDADE DA PECUÁRIA NO AÇUDE ARACOIABA.....	56
TABELA 06: ESTIMATIVA DA CARGA BRUTA DE FÓSFORO DERIVADA DA ATIVIDADE DA AGRICULTURA DO AÇUDE ARACOIABA.....	57
TABELA 07: CARGA BRUTA DE FÓSFORO PARA A ATIVIDADE DOMÉSTICA DO AÇUDE PENTECOSTE.....	59
TABELA 08: ESTIMATIVA DA CARGA BRUTA DE FÓSFORO DERIVADA DA ATIVIDADE DA PECUÁRIA NO AÇUDE PENTECOSTE.....	59
TABELA 09: ESTIMATIVA DA CARGA BRUTA DE FÓSFORO DERIVADA DA ATIVIDADE DA AGRICULTURA DO AÇUDE PENTECOSTE.....	60
TABELA 10: PARÂMETRO DE AFLUENTES MÉDIO ANUAL (M3/ANO) PERÍODO DE 2004-2010 E 2011-2020 RESERVATÓRIO DE ACARAPE DO MEIO.....	65
TABELA 11: PARÂMETRO DE AFLUENTES MÉDIO ANUAL (M3/ANO) PERÍODO DE 2004-2010 E 2011-2020 RESERVATÓRIO DE ARACOIABA.....	67
TABELA 12: PARÂMETRO DE AFLUENTES MÉDIO ANUAL (M3/ANO) PERÍODO DE 2004-2010 E 2011-2020 RESERVATÓRIO DE PENTECOSTE.....	69
TABELA 13: PARÂMETRO DE AJUSTE DA EQUAÇÃO (A) DE AFLUENTES MÉDIO ANUAL PARA OBTER O COEFICIENTE DE SEDIMENTAÇÃO NOS PERÍODOS DE 2004-2010 E 2011-2020 RESERVATÓRIO DE ACARAPE DO MEIO.....	70
TABELA 14: PARÂMETRO DE AJUSTE DA EQUAÇÃO (A) DE AFLUENTES MÉDIO ANUAL PARA OBTER O COEFICIENTE DE SEDIMENTAÇÃO NOS PERÍODOS DE 2004-2010 E 2011-2020 RESERVATÓRIO DE ARACOIABA.....	71
TABELA 15: PARÂMETRO DE AJUSTE DA EQUAÇÃO (A) DE AFLUENTES MÉDIO ANUAL PARA OBTER O COEFICIENTE DE SEDIMENTAÇÃO NOS PERÍODOS DE 2004-2010 E 2011-2020 RESERVATÓRIO DE PENTECOSTE.....	72
TABELA 16: PARÂMETRO DE AFLUENTES COMPARATIVOS MÉDIO ANUAL PERÍODO DE 2004-2010 E 2011-2020 DOS RESERVATÓRIOS DE ACARAPE DO MEIO, ARACOIABA E PENTECOSTE.....	87
TABELA 17: PARÂMETRO DE AFLUENTES COMPARATIVOS DE RAZÃO DE APORTE DE FÓSFORO (%) PERÍODO DE 2004-2010 E 2011-2020.....	90

LISTA DE QUADROS

QUADRO 01: CARGA DE NUTRIENTES PER CAPITA.....	46
QUADRO 02: EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE NITROGÊNIO E FÓSFORO.....	47
QUADRO 03: QUANTIDADE DE DEJETOS PRODUZIDOS POR CADA ESPÉCIE DE ANIMAL.....	48
QUADRO 04: MÉDIA DE NITROGÊNIO E FÓSFORO NOS DEJETOS PRODUZIDO POR CADA TIPO DE REBANHO.....	49
QUADRO 05: NECESSIDADE DAS PRINCIPAIS CULTURAS NO CEARÁ.....	50
QUADRO 06: PERCENTUAL DE PERDA DE NUTRIENTES PELO SOLO ATRAVÉS DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES.....	50
QUADRO 07: PERCENTUAL DE PERDA DE NUTRIENTES POR CULTIVO.....	51
QUADRO 08: ESTIMATIVA DA CARGA BRUTA DE FÓSFORO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ACARAPE DO MEIO CONSIDERANDO AS ATIVIDADES DOMÉSTICAS, PECUÁRIA E AGRICULTURA.....	56
QUADRO 09: ESTIMATIVA DA CARGA BRUTA DE FÓSFORO AFLUENTE AO RESERVATÓRIO ARACOIABA CONSIDERANDO AS ATIVIDADES DOMÉSTICAS, PECUÁRIA E AGRICULTURA.....	58
QUADRO 10: ESTIMATIVA DA CARGA BRUTA DE FÓSFORO AFLUENTE AO RESERVATÓRIO PENTECOSTE CONSIDERANDO AS ATIVIDADES DOMÉSTICAS, PECUÁRIA E AGRICULTURA.....	60

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Objetivo Geral:	23
1.2. Objetivos específicos:	23
2. REVISÃO DE LITERATURA	24
2.1. Estado trófico dos reservatórios do Estado do Ceará	24
2.2. Modelagem de fósforo em reservatórios	25
2.3. Operação e alocação de água em reservatórios do Estado do Ceará.....	28
2.4. Enquadramento e classificação de água em reservatórios.	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1. Caracterização da área de estudo	34
3.1.1. Bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio.....	34
3.1.2. Bacia hidrográfica do açude Aracoiaba	37
3.1.3. Bacia hidrográfica do açude Pereira de Miranda	41
3.2. Estimativa da carga de fósforo afluente aos reservatórios	43
3.2.1. Estimativa da carga de fósforo doméstica.....	44
3.2.2. Estimativa da carga de fósforo da pecuária.....	47
3.2.3. Estimativa da carga de fósforo da agricultura	49
3.3. Modelagem da qualidade da água no reservatório com base no teor de fósforo	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1. Estimativa da carga bruta de fósforo nas bacias hidrográficas dos reservatórios estudados.....	54
4.1.1. Carga bruta de fósforo na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio.....	54
4.1.2. Carga bruta de fósforo na bacia hidrográfica do açude Aracoiaba.	56
4.1.3. Carga bruta de fósforo na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.	58
4.2. Diagnóstico da concentração de fósforo com base em dados medidos	61
4.2.1. Concentração de fósforo versus volume acumulado no açude Acarape do Meio..	61
4.2.2. Concentração de fósforo versus volume acumulado no açude Aracoiaba.	62
4.2.3. Concentração de fósforo versus volume acumulado no açude Pentecoste.	62
4.3. Estimativa da carga de fósforo afluente aos açudes estudados.	63
4.3.1. Carga de fósforo afluente ao açude Acarape do Meio.	63
4.3.2. Carga de fósforo afluente ao açude Aracoiaba.....	65
4.3.3. Carga de fósforo afluente ao açude Pentecoste.....	67
4.4. Calibração do coeficiente de ajuste a da equação para estimativa do coeficiente de sedimentação.....	69

4.4.1.	Ajuste para o Açude Acarape do Meio.....	69
4.4.2.	Ajuste para o Açude Aracoiaba.	70
4.4.3.	Ajuste para o Açude Pentecoste.	71
4.5.	Modelagem do balanço de fósforo no reservatório	73
4.5.1.	Balanço de fósforo do Açude Acarape do Meio.....	73
4.5.2.	Balanço de fósforo do Açude Aracoiaba.	74
4.5.3.	Balanço de fósforo do Açude Pentecoste.	76
4.6.	Análise da disponibilidade hídrica de reservatórios com base em critérios de qualidade 77	
4.6.1.	Disponibilidade hídrica do açude Acarape do Meio com base em cenários de qualidade.....	78
4.6.2.	Disponibilidade hídrica do açude Aracoiaba com base em cenários de qualidade. 79	
4.6.3.	Disponibilidade hídrica do açude Pentecoste com base em cenários de qualidade.	81
4.7.1.	Análise de cenários para o açude Acarape do Meio	83
4.7.2.	Análise de cenários para o açude Aracoiaba	84
4.7.3.	Análise de cenários para o açude Pentecoste	85
4.8.	Relações entre parâmetros associados ao fósforo para os reservatórios estudados	87
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90
	REFERÊNCIAS	92

1. INTRODUÇÃO

Os conflitos em torno do uso da água bem como a relação sociedade-natureza têm se tornado nas últimas décadas um vetor de estudos que tem como objetivo aprofundar as discussões sobre a sustentabilidade do planeta e minimizar problemas enfrentados pela

sociedade, pelo poder público e pelas organizações da sociedade civil e na administração das águas nas bacias hidrográficas.

Os poucos índices de precipitação e a irregularidade de chuvas no semiárido brasileiro, associado ao contexto hidro geológico, colaboram para os reduzidos valores de disponibilidade hídrica. No Ceará, além disso, tem um baixo índice pluviométrico, caracterizando-se por apresentar temperaturas elevadas durante o ano todo e com altas taxas de evapotranspiração. Com isso, faz elevar índices de evapotranspiração e, em geral, superam os totais pluviométricos irregulares, configurando taxas negativas no balanço hídrico (ANDRADE, 2018).

De acordo com Araújo (2011), o Ceará é conhecido como uma região de déficit de água, é continuamente palco de conflitos pelo seu uso, pois este recurso é bastante escasso dadas as características físico-climáticas e por apresentar 86,8% do seu território no semiárido. Contudo, na região foi desenvolvida uma experiência de alocação de água que é reconhecida como modelo para regiões semelhantes (ANA, 2019).

Tal experiência de alocação, com a participação da comunidade local na gestão de cada bacia, definindo como a água deve ser distribuída, levou o exemplo do Ceará para todo o Brasil, inclusive para São Paulo.

O conflito de uso da água requer foco em sua gestão ambientada, pois está sendo potencializado pelo intenso crescimento populacional e expansão das atividades econômicas e das indústrias que contribuem para o aumento do uso dos recursos hídricos. Essa questão combinada à variabilidade hidrológica e mudanças climáticas resulta em eventos de escassez hídrica cada vez mais frequentes e intensos (TOMÉ, 2016). A situação da água é ainda mais afetada pela ineficácia dos sistemas de distribuição, pela falta de enquadramento dos corpos hídricos, pelo aumento dos níveis de poluentes e pelos poucos investimentos financeiros nos últimos tempos (FERREIRA, 2014).

Diante da ineficiência de recursos hídricos, o estado do Ceará faz um planejamento integrado a uma gestão participativa nos reservatórios públicos, destacando-se essa ação como elemento positivo e indispensável na gestão das águas (ANA, 2012). A participação da comunidade local, por meio de Comitês de Bacias ou Conselhos Gestores de Açude, possibilita a decisão e deliberação sobre a gestão de grandes reservatórios, discutindo as vazões de água a serem liberadas, da mesma maneira que as regras de uso e preservação desta água. Isso contribui para o exercício pleno da cidadania (SILVA et. al., 2005).

A água é um recurso natural de abundância no Brasil, mas ao mesmo tempo, em regiões do semiárido como o Ceará, tem se tornado bastante escasso e cuja disponibilidade tem

sido cada vez mais limitada. No Estado, os fatores climáticos e geológicos têm sido fundamental papel na renovação das reservas hídricas e, conseqüentemente, nas mudanças da qualidade de suas águas (VIEIRA, 2010). As projeções e demandas traduzem sérios riscos de conflitos e inseguranças cada vez mais complexos. Seja qual for a estratégia de uso e gestão, esta deve estar ligada aos conceitos mínimos de sustentabilidade, avaliando também as possibilidades de reutilização de águas da indústria, por exemplo, como alternativas de minimização do impacto decorrente da escassez de água nos diferentes setores de produção.

Este quadro de insegurança quanto à disponibilidade e à qualidade das águas gera insegurança nas tomadas de decisão políticas de desenvolvimento agropecuário e socioeconômico no Ceará. Sendo necessário, portanto, medidas sobre a disponibilidade de água e planejamento de gestão dos recursos hídricos disponíveis visando atender à demanda da população de forma permanente.

Segundo Slati, Lemos e Slati (1999), para enfrentar os desafios da escassez de água, devem-se considerar as ferramentas disponíveis sobre a gestão do suprimento e da demanda, citando que a gestão do suprimento de água inclui políticas e ações diferenciadas visando identificar, desenvolver e explorar, de forma eficiente, novas fontes de água, enquanto a gestão da demanda inclui os mecanismos e incentivos que promovem a conservação da água e a eficiência do seu uso.

A disponibilidade de água é diferente em cada região e vai de acordo com a necessidade e a época. Contudo, no Ceará, o desenvolvimento e implantação da Política de Gestão dos Recursos Hídricos (PGRH), decorreu através da necessidade imposta pelas características climáticas de um estado situado na região semiárida, sendo fundamental que a concepção do uso dos recursos hídricos seja fundamentada no conhecimento cada vez mais aprofundado e abrangente, de forma a assegurar a melhor partição entre as atividades agrícola, doméstica e industrial (SILVA, 2011).

Segundo Lopes (2007), o modelo utilizado pelos órgãos brasileiros pode ser caracterizado como um mecanismo de alocação de água definido pelo poder público. Especificamente, no Estado do Ceará, a água é de domínio da Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH), que estabelece, desenvolve e executa a política estadual. A secretaria tem como empresa vinculada a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH), órgão executor das políticas de gestão da água, além de atuar como secretaria executiva dos Comitês de Bacias Hidrográficas (CBHs), dando o suporte técnico necessário para a tomada de decisão através do monitoramento da quantidade e nível da água nos reservatórios (CARVALHO, 2005).

No âmbito estadual, embora a legislação vigente determine uma prioridade para concessão de outorga de uso da água, diferente para cada finalidade, priorizando apenas para o consumo humano, não estipulando regras de priorização para alocação de água em períodos de escassez hídrica, não definindo como deve ser o procedimento de alocação de águas em períodos em que a oferta acumulada pela infraestrutura hídrica não atenda à demanda instalada (FORTES, 2018).

Para isso, faz necessário e urgente a idealização de enquadramento da água dos reservatórios, com um plano de gestão que a população tenha uma água disponível de qualidade para todos, mas para que isso aconteça é necessário que a gestão pública envolva a comunidade local e elabore planos emergenciais para tratar de inúmeros conflitos relacionados ao uso ou domínio dos recursos hídricos e da disponibilidade de água em períodos de escassez, uma vez que a necessidade hídrica do Ceará é um evento extremo e permanente (SILVA, 2017).

Com efeito, para se ter uma água de qualidade, faz-se necessário o planejamento integrado de políticas públicas e um maior engajamento da sociedade, tendo como referência uma legislação ambiental adequada, amparada em um conjunto de normas gerais que identifique o padrão de qualidade das águas a partir de critérios técnicos. De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a qualidade das águas pode ser medida de acordo com diferentes critérios e esses podem ser adaptados pelos órgãos estaduais.

No Ceará, onde a escassez de água está sempre presente, seja devido ao aumento da demanda, da degradação dos recursos hídricos ou em consequência da instabilidade climática, os conflitos pelo uso da água tendem a aumentar. Portanto, buscar soluções para um monitoramento e gerenciamento adequados desses recursos, deverá ser a prioridade dos órgãos gestores, a exemplo da outorga de direito de uso e cobrança pelo uso da água, com base em critérios de qualidade da água (CAMPOS, 2011). O monitoramento da qualidade da água em uma bacia hidrográfica é muito mais amplo do que a verificação se os padrões legais de qualidade estão sendo obedecidos, devendo, portanto, atender à necessidade de se responder o que está sendo alterado, o motivo destas modificações estarem ocorrendo e definir e implementar medidas preventivas de contaminação dos recursos hídricos.

Esta dissertação está organizada em cinco seções. A primeira apresenta uma Introdução com justificativa da pesquisa e seus objetivos. A segunda faz uma Revisão de Literatura, abordando o estado trófico dos reservatórios do Estado do Ceará, a modelagem de fósforo em reservatórios do Estado do Ceará. A terceira seção, dedica-se aos Materiais e Métodos, trazendo, portanto, a caracterização da área de estudo, a estimativa da carga de fósforo

afluente aos reservatórios, a modelagem da qualidade da água no reservatório em relação ao teor de fósforo e o prognóstico da carga de fósforo com base em cenários, considerando os açudes de Acarape do Meio, Aracoiaba e Pereira de Miranda. A quarta, apresenta os resultados e a discussão. E fechando o texto, temos a quinta seção, a qual traz as conclusões e recomendações.

1.1. Objetivo Geral:

Este trabalho tem como objetivo geral investigar a disponibilidade hídrica de reservatórios do Estado do Ceará com base em critérios de qualidade, com foco nos açudes Acarape do Meio, Aracoiaba e Pentecoste.

1.2. Objetivos específicos:

- Estimar a carga de fósforo afluente aos reservatórios investigados com base em dados secundários doméstico, animal e de produção agrícola;
- Simular o balanço de fósforo por mistura completa nos reservatórios investigados usando o Modelo QUAL-HIDROSED.
- Modelar a disponibilidade hídrica dos reservatórios investigados com base na qualidade de água associada a teores do nutriente fósforo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Estado trófico dos reservatórios do Estado do Ceará

A eutrofização é o aumento da concentração de nutrientes, especialmente fósforo e nitrogênio, nos ecossistemas aquáticos, que tem como consequência o aumento de suas reproduções de diversos compartimentos e dos corpos hídricos, e esta alteração modifica a qualidade da água (ESTEVE, 2011).

A companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2010) desenvolveu um índice de classificação para o estado trófico, com a finalidade de classificar os corpos d'água para diferente trofia, avaliar a água com qualidade quando enriquecida de nutrientes e o efeito relacionado ao crescimento de algas, ou a potencialidade para o desenvolvimento de macrófitas aquáticas.

Para calcular o Índice do Estado Trófico - IET utilizaram-se os seguintes parâmetros: o fósforo e clorofila a. O fósforo atua como o responsável no processo de eutrofização, tendo como as suas principais fontes esgotos domésticos e industriais, fertilizantes, detergentes excrementos de animais, dissolução de compostos do solo, decomposição da matéria orgânica, dentre outros. Já a clorofila a foi apontada como uma medida de resposta dos recursos hídricos como agente causador do processo de crescimento de algas nos reservatórios (TRINDADE, 2011). Esse processo ocorre na maior parte em lagos e represas, embora possa ocorrer mais raramente em rios, uma vez que as condições ambientais destes ambientes hídricos não são mais favoráveis para o crescimento de aguapés (BATISTA, 2014).

Segundo Rocha (2020), a eutrofização pode ser natural ou artificial. Quando natural, é um processo bastante lento e contínuo que resulta do aporte de nutrientes trazidos pelas chuvas e águas superficiais que escorre a terra. Quando artificialmente, ou seja, produzida pelo homem, denominada antrópica. Neste caso, os nutrientes podem ter diferentes origens, como; esgotos domésticos, efluentes industriais, atividades agrícolas, entre outras (KUCHINSKI, 2016).

A eutrofização artificial pode apresentar odor desagradável, favorecer a extinção de alguns peixes, impulsionar o crescimento de plantas aquáticas, reduzindo a navegação e capacidade de transporte, assim como reduzir a qualidade da água destinada a usos mais nobre como o abastecimento humano (VON SPERLING, 2005).

Os reservatórios do estado do Ceará são, em sua maioria, destinados ao abastecimento humano e vem sofrendo degradação devido à presença de fontes contribuidoras de matéria

orgânica ao longo do seu percurso, tendo como resultado processo intenso de eutrofização, também atribuído a fatores como a erosão intensa, altas cargas poluidoras e baixas profundidades dos lagos e reservatórios (FIGUEIRÊDO et al., 2007; PACHECO & LIMA NETO, 2017).

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH, 2021) recentemente fez um levantamento nos reservatórios monitorados, em que, mais de 3/4 dos 155 reservatórios já apresentam estado eutrófico ou hipereutrófico. Já os reservatórios pequenos, por sua vez, não são monitorados quanto ao grau de trofia, mas estima-se que aproximadamente 30 mil apresentam problemas de eutrofização, potencializado pelo fato destas estruturas apresentarem baixas profundidades de água e condições precárias de proteção ambiental (CAMPOS *et. al.*, 2016).

É fundamental um planejamento de políticas de tratamentos de esgoto e saneamento básico, visto que o Estado do Ceará ainda não possui cobertura de saneamento básico de todo o seu território, o que implica, em muitos casos, em lançamento direto de esgoto nos corpos d'água (LIMA, 2016).

2.2. Modelagem de fósforo em reservatórios

Existem muitos fatores ambientais que afetam a qualidade da água de rios, lagos e reservatórios. Esses fatores integram desde as afluições de rios, lançamentos e descargas de esgoto, interações com sedimentos de fundo, até mudanças na velocidade de fluxo e campos de temperatura da água. Segundo Rocha e Lima Neto (2022), a modelagem de qualidade da água visa simular a concentração de substâncias na água levando em consideração a diversidade desses fatores.

Para Lima Neto et al. (2022), a modelagem ou simulação de fenômenos ou processos físicos, químicos e biológicos incluindo a representação confiável desses eventos e processos em diferentes escalas próximas da realidade de forma simplificada e prática, possibilitando elucidar diversas interações em sistemas complexos como rios, florestas, cidades e clima.

As práticas de modelagem em ambientes-aquáticos têm contribuído não só para um melhor conhecimento da ascensão do meio ambiente, bem como no suporte ao planejamento e ao gerenciamento do espaço e uso dos recursos naturais em diferentes modelos hidrológicos e escalas por meio da simulação de cenários (RAULINO; SILVEIRA; LIMA NETO, 2021).

Estes modelos hidrológicos buscam representar o ciclo hidrológico, parcialmente ou totalmente, transformando a precipitação que cai sobre uma bacia em vazão em um determinado trecho ou seção do corpo de água (ROCHA; LIMA NETO, 2021).

Fazendo uma modelagem na bacia hidrográfica podemos realizar desde uma avaliação da precipitação, interceptação vegetal, evapotranspiração, infiltração e percolação, as necessidades hídricas e escoamentos superficial, sub-superficial, subterrâneo, possibilitando extrair uma melhor qualidade de água deste reservatório (MOURA, 2018).

Segundo Rabelo et al. (2021), uma modelagem de fósforo em reservatório sendo adotada com diferentes e variadas finalidades no âmbito da hidrologia, pois permitem analisar possíveis cenários, realizar estudos de alternativas, auxiliar na prevenção de ocorrência de fenômenos extremos e não extremos.

A modelagem de fósforo em açudes possibilita a previsão de vazões a partir de dados pluviométricos e contribui em aplicações indiretas, utilizada como condição de contorno, como na quantificação de nutrientes provenientes das mudanças no uso do solo da bacia hidrográfica (FREIRE; COSTA; LIMA NETO, 2021).

Recentemente, WIEGAND et al (2021), estimou a capacidade poluidora da bacia hidrográfica de contribuição do reservatório considerando a geração da carga de nutrientes por fontes pontuais e não pontuais difusos a partir de uma modelagem.

A modelagem da concentração total de fósforo no reservatório é uma ferramenta importante para a gestão eficaz da água (ROCHA; LIMA NETO, 2021), permitindo uma melhor compreensão do processo de eutrofização, o que serve de base para a implementação de ações voltadas à melhoria da qualidade da água em reservatório e avaliação de possíveis recomendações para gestores de sistemas de água (ARAUJO; LIMA NETO; BECKER, 2019).

No entanto, para uma realização desta modelagem é necessário analisar inúmeros fatores ambientais que influenciam a qualidade da água de rios, lagos, reservatórios e bacias hidrográficas. A modelagem da qualidade da água tem por objetivo simular concentrações de substâncias na água, levando em conta essa diversidade de carga de afluentes (MOURA, 2018). Vollenweider (1968) propôs um método para estimativa da carga afluyente de fósforo total em reservatórios com base no volume do reservatório (V), vazão de saída (Q), a evaporação (E) e a concentração de fósforo na coluna de água (P). Com a obtenção dos dados, utiliza-se o modelo proposto, aplica-se o balanço de massa em hipótese de mistura completa, como base para alcançar a carga de fósforo. Na Equação 01 apresenta este modelo, na Equação 02 apresenta a

sua solução crítica e na Equação 03 apresenta a recuperação do modelo para previsão da carga de fósforo afluente.

$$V \frac{dP}{dt} = W(t)Q_s \cdot P - K \cdot V \cdot P \quad (01)$$

$$P(t) = P_o \cdot e^{-\gamma t} + \frac{W}{\gamma V} (1 - e^{-\gamma t}) \quad (02)$$

$$W(t) = (P(t) - P_o \cdot e^{-\gamma t}) \cdot \frac{\gamma V}{(1 - e^{-\gamma t})} \quad (03)$$

Em que: $\lambda = \frac{qs}{v} + K$, $p(t)$ – concentração de fósforo total ao longo do tempo (kg/m^3); P_o – concentração de fósforo total no instante inicial (kg/m^3); t – tempo (s); V – volume do reservatório (m^3/s); W – carga de fósforo afluente (kg/s); Q_s – vazão de saída do reservatório (m^3/s); $k = \frac{4}{\sqrt{Tr}}$ coeficiente de decaimento do fósforo (s^{-1}) proposto por Toné & Lima (2015); $Tr = \frac{V}{Q_s + E}$ – Tempo de residência hidráulico do reservatório (1/s).

O modelo proposto por Vollenweider (1969), tendo como base nos modelos seguintes de Canfield & Bachmann (1981), realiza um balanço de massa aplicado ao reservatório usando o conceito de mistura completa que, a partir de dados morfométricos e hidráulicos, permite estimar a concentração de fósforo total final conforme Equações 04 e 05 (CHAPRA, 1997; BRETT & BENJAMIN, 2008).

$$V \frac{dTP}{dt} = W - Q_s PT - kVTP \quad (04)$$

$$PT \frac{W}{ks + kV} \quad (05)$$

Em que: V : volume do lago (m^3); PT : concentração de fósforo total (mg.m^{-3}); t : tempo (ano); W : carga afluente de fósforo ao lago (mg.ano^{-1}); Q_s : vazão de saída do lago ($\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$); k : coeficiente de decaimento do fósforo (ano^{-1}).

Vollenweider (1976), então, aprimorou a Equação 04, que permite estimar a concentração de fósforo total final e gerou um modelo para estimar a concentração de fósforo total em corpos hídricos represados (VON SPERLING, 1996):

$$PT \frac{\frac{L}{1} + k}{TR} = \frac{\frac{W}{1} + k}{V(\frac{1}{TR} + k)} \quad (06)$$

Em que: L: carga afluyente de fósforo ao lago por unidade de área ($\text{mg.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$); z: profundidade média do lago (m).

Dillon & Rigler (1974b), então, transformaram o modelo de Vollenweider (1969), avaliando que a concentração de fósforo total no corpo hídrico, apresentando o fator de conservação, sem uso do coeficiente de decaimento k:

$$PT = \frac{L(1-R)}{q_s} \quad (07)$$

Em que: R: coeficiente de retenção de fósforo; q_s : carga hidráulica de saída do lago; $q_s = Q_s/A$ (m.ano^{-1}); A_s : área superficial do lago (m^2).

2.3. Operação e alocação de água em reservatórios do Estado do Ceará

A construção de reservatórios e operação correta do uso de água em regiões semiáridas como no estado do Ceará traz muitos benefícios, constituindo uma das melhores medidas para combater as consequências negativas das adversas condições ambientais existentes nos reservatórios cearenses (BRASIL, 2016)

Os reservatórios são construídos, de modo geral, tendo como objetivo o aproveitamento da água em muitos usos, principalmente o abastecimento humano, isso contribui, com certeza, com o desenvolvimento da área de influência em que a água está sendo distribuída, garantindo, inclusive, água em abundância para a população local (FREITAS, 2010).

Segundo Cid (2017, p.21), “Operar um reservatório significa definir o volume de água que deverá ser liberado para atender a determinados usos”. Essa decisão deve ser tomada, junto com a comunidade local através dos comitês das bacias mesmo porque envolve vários setores da economia, política e tornando assim, uma gestão de eficazes para uso dos recursos hídricos (LUIZ, 2017).

Segundo Lima (2016), a decisão tomada em relação à distribuição do uso da água, consiste em atribuir regras de retirada de água do reservatório, sem perder de vista a necessidade de monitorar as condições de distribuição desse reservatório. Em caso de descumprimento das regras de vazões, o controle precisa ser restabelecido para evitar o desperdício e a falta da água.

As regras existem e estão em vigor nos reservatórios do Ceará desde a homologação do Plano de recursos hídricos. Estas regras foram criadas a partir do Plano Estratégico dos Recursos Hídricos (PERH), Plano este, conhecido também como pactos das águas, que compõem as 12 bacias hidrográficas, a fim de estabelecer o controle e o monitoramento destes reservatórios sob a responsabilidade da CONGEH. Com base no Plano Estadual de Recursos Hídricos, PLANERH foi conduzida uma metodologia de participação, envolvendo diversos setores da sociedade civil organizada, inclusive, com a intensa participação de membros dos Comitês de Bacias Hidrográficas (CEARÁ, 2010).

Os comitês das bacias hidrográficas foram elaborados partir dos termos de referência, do Proágua (Programa conduzido pela Agência Nacional de Água - ANA), que visa o levantamento de informações, demandas e discussões com os respectivos colegiados, no sentido de subsidiar a elaboração dos termos de referência para o desenvolvimento dos Planos de Recursos Hídricos dessas Bacias (MOREIRA, 2014).

Cada reservatório ou bacias hidrográficas integra um grupo de trabalhadores e técnicos que conhece, ouve os colegiados e monitora o que já foi empreendido pelos planos existentes, e propõe estudos que precisam ser realizados, atualizados ou complementados. Com isso, faz com que os planos se tornem mais ágil e útil, articulando a população para participá-la, mesmo porque esta população se caracteriza o alvo principal, constitui-se, portanto, o público mais beneficiado diretamente pelas ações executadas (ALMEIDA, 2014).

Todas essas ações são definidas e emanadas pela lei nº 14.844/10, que engloba as bacias hidrográficas e reservatórios monitorados realizando-se, antes da aprovação, audiências públicas nas localidades que integram a área de atuação dos comitês, com o acesso à população (ALVES, 2015).

Existem diversos fatores para alocação de água no estado do Ceará, que vão desde descentralização da estrutura gerencial nas bacias hidrográficas e o suporte da administração central da COGERH até uma alocação prevalentemente controlada pelo mercado. A COGERH definiu três fatores de alocação de água, são eles:

- O aperfeiçoamento de um modelo de gestão participativa em construção há mais de 20 (vinte) anos.
- A evolução da participação da sociedade civil na gestão dos recursos hídricos com especial interesse na alocação negociada.
- A relativa pacificação dos usuários de recursos hídricos ao participarem das negociações, que por meio da alocação negociada de água, estabelece o rateio da água disponível.

Este último, a população acompanha todo o processo a partir de reuniões de avaliação e ajustes durante o período determinado a fim de observar os resultados que podem demonstrar ganhos substanciais na redução das vazões liberadas, na conscientização para o uso eficiente da água (SORNBERGER, 2015).

Segundo Speed *et. al.* (2013) para uma utilização eficiente do processo de alocação de água deve-se ter um exercício socioeconômico com qualidade de água para todos, mas para isso é necessário cumprir alguns objetivos que estão na legislação. Estes objetivos devem estar em torno do desenvolvimento sustentável que são eles; a equidade, a sustentabilidade, e a eficiência econômica.

A equidade, segundo o autor apoia-se no princípio de que a água de qualidade deve ser alocada de forma justas entre os diferenciados setores e usuários. Associando-se as oportunidades de desenvolvimento na comunidade local com prioridades em alguns critérios de justiça e equidade, como a maximização da utilidade e a distribuição igualitária.

A sustentabilidade consiste no desenvolvimento da sociedade sem causar prejuízos e danos irreversíveis aos recursos naturais (NASCIMENTO, 2012). Ou seja, a água precisa ser utilizada e alocada de forma justa e equilibrada sem, contudo, causar descontrolado aos reservatórios para manter as condições de abastecimento dentro de sua capacidade de sustentação, a fim de assegurar a água para o consumo humano (ROA-GARCIA, 2014).

A eficiência econômica, nesse contexto, visa à utilização de água de forma eficiente e sem desperdícios (ROA-GARCIA, 2014). No sentido de buscar atender todas as possibilidades de ganhos entre agentes comunitários e econômicos por intermédio de trocas de bens e serviços. Uma alocação economicamente eficaz da água torna-se importante na medida em que potencializa o bem-estar que a sociedade precisa obter a partir dos recursos hídricos. Essa condição refere-se à satisfação econômico da sociedade e é determinado pelo bem-estar agregado dos usuários de água (SPEED *et. al.*, 2013).

Segundo Araújo (2012), a alocação de água no Ceará se viabiliza de acordo com as deliberações previstas para os reservatórios, as quais passam por um processo de discussão pública e político. Esse instrumento de alocação de água configura-se entre os usuários e alocação negociada. Essa negociação colocou o Ceará em uma posição pioneira em relação à alocação de água nos demais estados do Brasil.

A alocação negociada de água é concretização da operação participativa dos reservatórios. Contudo, o comando foi possível com a realização da Política Estadual de Recursos Hídricos (PERH), que conduziu de forma planejada as ações previstas apensando,

dessa forma, consideráveis avanços no processo de definição da operação dos reservatórios (OLIVEIRA FILHO, 2013). Portanto, a quantidade de água que os açudes liberam através de suas comportas é passível de concordância em conformidades com as deliberações das reuniões.

Contudo, definida a vazão destituída, escolhe-se uma subcomissão ou a própria comissão formada no evento deliberativo para acompanhar a operação, além disso, define-se data para as reuniões de avaliação desta atividade, quando necessário, fazem-se os ajustes precisos para o uso adequado da água. Estas reuniões são registradas em atas e assinadas por seus integrantes, elaborando um documento de referência oficial para a operação do reservatório (SILVA, 2011).

A alocação negociada de água adotado no Ceará é aceitável para as condições do semiárido e tem experimentado ajustes técnicos e metodológicos para atender as necessidades ditadas pelo pico de escassez hídrica. A legislação atual, especificamente, a Lei federal Nº 9.433/97 e Lei estadual Nº 14.844/2010), prever o custeio de todos os gastos com a manutenção, operação e administração da infraestrutura hídrica existente para o abastecimento das necessidades humanas, arrecadados com a cobrança pelo uso da água bruta (SILVA, 2015).

2.4. Enquadramento e classificação de água em reservatórios.

A água é um recurso natural e finito, que tem múltiplos usos e interesses. Considerando estes fatores existem diversas formas de gestão como o enquadramento de água, que serve para regular a sua utilização e garantir o serviço e acesso a este recurso, visando a preservação dos corpos hídricos e melhoria contínua da qualidade das águas (SOUAZA; et al. 2014).

Segundo a ANA (2019), o enquadramento dos corpos d'água deve ser baseado no nível de qualidade que deve ser possuído ou mantido para atender às necessidades determinadas pela sociedade, e não apenas as condições atuais dos corpos d'água.

Sendo a água um recurso natural de múltiplos usos e interesses, foi criado pela a CONAMA a resolução Nº 357/2005 utilizando o enquadramento como um instrumento de gestão para elaborar e aplicar regras na utilização da água, de forma a garantir o amplo atendimento às demandas aliviando ao máximo o comprometimento dos corpos hídricos (DELMIRO, 2021).

No que se refere ao enquadramento de água a Resolução CONAMA 357/2005 no artigo 38 § 2º ressalta que:

Estabelece que as bacias hidrográficas em que a condição de qualidade dos corpos de água esteja em desacordo com os usos preponderantes pretendidos, deverão ser estabelecidas metas obrigatórias, intermediárias e final, de melhoria da qualidade da água para efetivação dos respectivos enquadramentos, excetuados nos parâmetros que excedam aos limites devido às condições naturais.

Este respectivo enquadramento dos corpos de água é um instrumento fundamental na esfera de planejamento ao integrar a política de recursos hídricos com a política de meio ambiente, associando a outros instrumentos de gestão das águas como a alocação e o direito aos recursos hídricos (CARNEIRO; et al. 2020).

Não devendo ser visto como um simples instrumento de gestão, o enquadramento é um recurso que visa assegurar que a qualidade das águas seja compatível com as necessidades. A partir da identificação dos usos excelentes e com isso mais restritivos em termos de qualidade, o enquadramento estabelece, no caso das águas superficiais, uma classificação de qualidade da água a ser mantida ou alcançada para a população (GALLINA, 2014).

Esta classificação permite um melhor controle da poluição e avaliação da evolução da qualidade da água, garantindo que a qualidade da água está de acordo com a sua utilização. Ou seja, a água passe a ser classificada do uso mais nobre (por exemplo, para consumo) ao nível secundário.

As águas dos corpos hídricos brasileiros, segundo a resolução CONAMA 357/2005 são classificadas em: classes de água doce (baixa quantidade de sais minerais), as de água salinas (média quantidade de sais minerais), e as águas salobras (alta quantidade de sais minerais).

As águas doces são classificadas como:

- Classe Especial: aquelas destinadas ao abastecimento doméstico prévia ou com simples desinfecção; e à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
- Classe 1: destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento simples; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário (natação, esqui e mergulho); à irrigação de hortaliças consumidas cruas e de frutas que cresçam rentes ao solo e ingeridas sem remoção de película; à criação natural e/ou intensiva (aquicultura) de espécies destinadas à alimentação humana.
- Classe 2: águas destinadas ao abastecimento doméstico após tratamento avançado; à proteção das comunidades aquáticas; à recreação de contato primário; irrigação de hortaliças e frutíferas; à criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas à alimentação humana.

- Classe 3: águas destinadas ao consumo humano após tratamento convencional; à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; dessedentação de animais;
- Classe 4: águas destinadas à navegação; harmonia paisagística; e aos usos menos exigentes.

As águas salinas são classificadas como:

- Classe especial: à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.; criação natural e/ou intensiva de espécies destinadas a alimentação humana.
- Classe 1: à proteção das comunidades aquáticas; à aquicultura e à atividade de pesca.
- Classe 2: à pesca amadora; e à recreação de contato secundário.
- Classe 3: águas salinas destinadas à navegação comercial; harmonia paisagística.

As águas salobras são classificadas como:

- Classe especial: à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; e à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
- Classe 1: à aquicultura e à atividade de pesca; ao abastecimento para consumo humano após tratamento convencional ou avançado;
- Classe 2: à pesca amadora; e à recreação de contato secundário.
- Classe 3: à navegação; e à harmonia paisagística.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

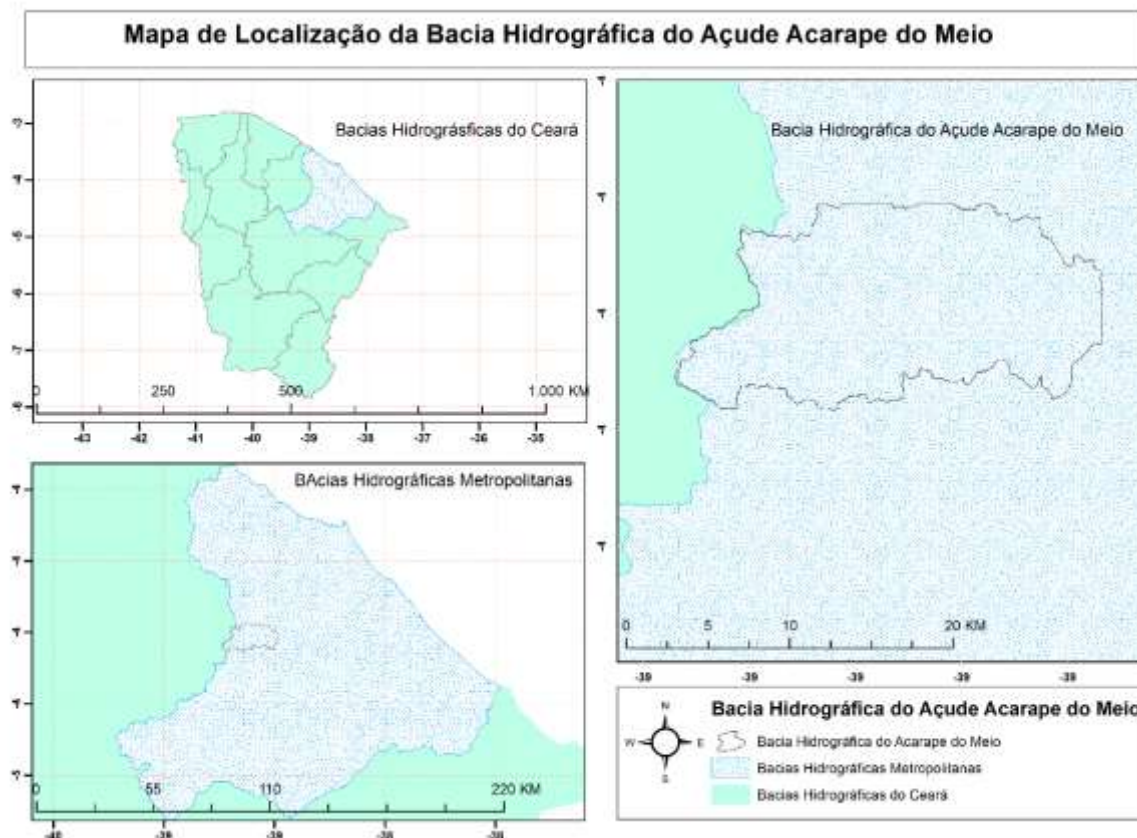
3.1. Caracterização da área de estudo

O presente trabalho foi realizado em uma amostra de reservatórios superficiais do Estado do Ceará, nomeadamente os açudes Acarape do Meio, Aracoiaba e Pereira de Miranda (também conhecido como Pentecoste), descritos nos itens a seguir. Estes reservatórios foram selecionados por apresentar bacias hidrográficas do estado do Ceará com características hidrológicas e fisiográficas distintas: região serrana com clima tropical sub-úmido (bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio; região de transição de clima tropical sub-úmido para tropical semiárido (bacia hidrográfica do açude Aracoiaba); região de clima tropical semiárido (bacia hidrográfica do açude Pentecoste).

3.1.1. Bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio

A bacia do açude Acarape do Meio (FIGURA 01) pertence à região metropolitana de Fortaleza, à microrregião do Maciço de Baturité, no município de Redenção, com uma área aproximada de 210,96 km², tendo o rio Pacoti como o principal. O reservatório Acarape do Meio apresenta capacidade de armazenamento de 29,6 hm³, com uma vazão regularizada com 90% de garantia de aproximadamente 1,42 m³/s.

FIGURA 01: Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Açude Acarape do Meio



FONTE: SILVA, 2022.

A bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio compreende, parcialmente ou em sua totalidade, os municípios de Guaramiranga, Redenção, Pacoti, e Palmácia, totalizando uma população de 54.191 Habitantes, conforme Censo Demográfico de 2010.

A Barragem exposta que bloqueia o Rio Pacoti e é composta por uma represa gravitacional, representada concretamente na (Figura 02), localizada no município de redenção, com as coordenadas geográficas de 523 593E e 9 536 618 N. tem uma área de espelho de água de 220 hectares e uma capacidade de armazenamento de 29,6 milhões de metros cúbicos. (CEARÁ, 2008).

FIGURA 02: Espelho de Água do Açude Acarape do Meio



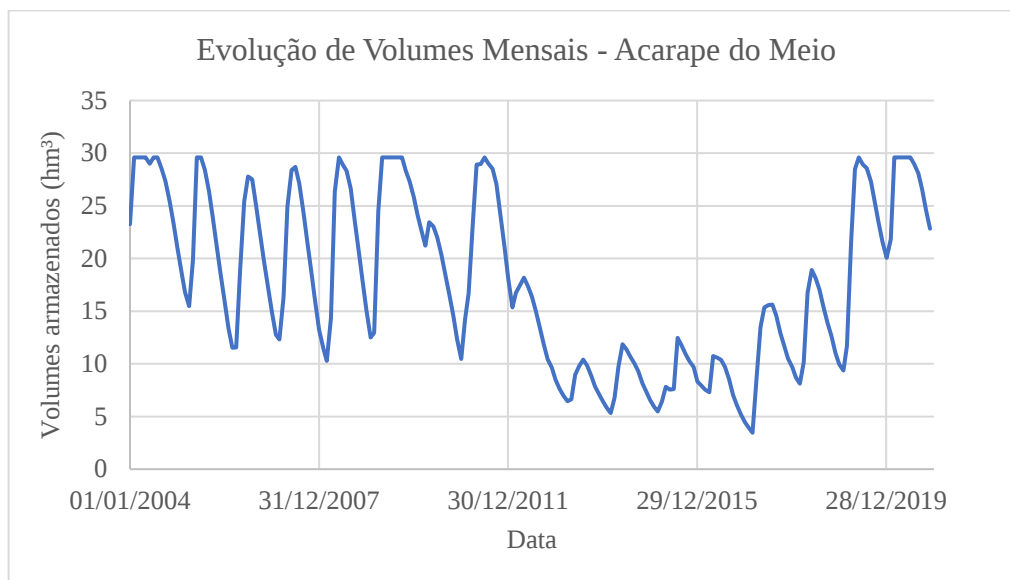
FONTE: SILVA, 2022.

A região apresenta um clima, tropical chuvoso, isso faz, com que o açude permaneça com bom volume de água como podemos observar no (FIGURA 03) que mostra a evolução de volume do açude Acarape do meio nos últimos dezesseis anos. Com a temperatura média em torno de 25° C, atingindo os valores de menos de 22 ° C no eixo do Baturité Serra com a média anual da evaporação é de 562 milímetros. (COGERH,2001).

A vegetação principal na região compreende as três principais composições: caatinga arbustiva densa, floresta subcaducifólia tropical pluvial e floresta subperenifólia tropical pluvio-nebular. Já os principais grupos de solos são os Aluviais, Planossolo solódico, Podzólico vermelho-amarelo e Bruno não-cálcico (CEARÁ, 2010).

A geologia apresenta associação petrotectônica denominada de Complexo Gnáissico-Migmático que representa o embasamento cristalino, com posicionamento no Proterozóico. Os solos predominantes são Podzólico Vermelho Amarelo Eutrófico (jusante) e Podzólico Vermelho Amarelo Distrófico (montante).

FIGURA 03: Evolução do volume de água do açude Acarape do Meio



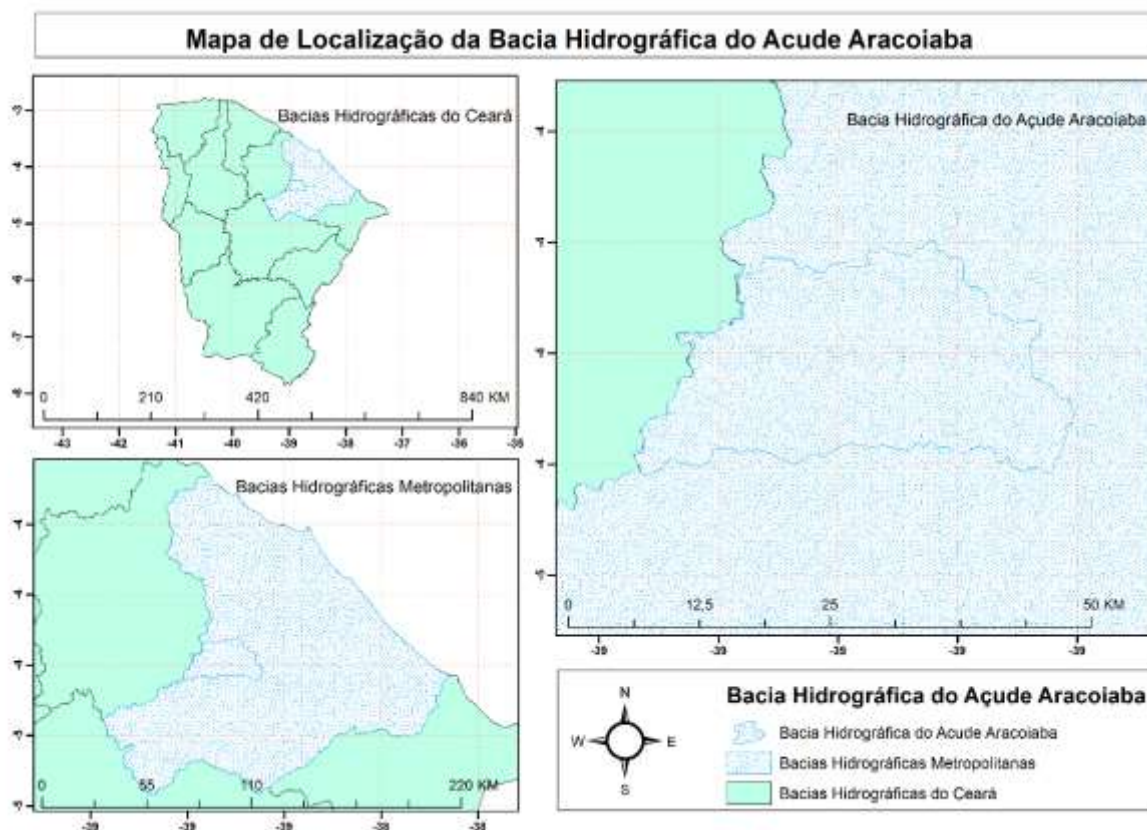
FONTE: DADOS COGERH; SILVA, 2022.

Em termos de uso e ocupação do solo, as hortaliças são plantadas em áreas de serra, tendo como principais produtos a banana, a cana-de-açúcar, o tomate, o milho e o feijão. Essas serras também abrigam grandes quantidades de resíduos florestais. As planícies aluviais dos rios são amplamente utilizadas por culturas de vazantes, principalmente incluindo culturas alimentares, milho, feijão, mandioca e melancia, (COGERH,2001).

3.1.2. Bacia hidrográfica do açude Aracoiaba

A bacia hidrográfica do açude Aracoiaba (FIGURA 04) pertence à região metropolitana de Fortaleza, à microrregião de do Maciço de Baturité, no município de Aracoiaba, com uma área aproximada de 588,6 km². Em seu exutório localiza-se o açude Aracoiaba, com capacidade de armazenamento de 162 hm³ e uma vazão regularizada associada a garantia de 90% de aproximadamente 2,7 m³/s. Uma parte da área da bacia é controlada pelo açude Tijuquinha situado no município de Baturité.

FIGURA 04: Localização da bacia Hidrográfica do Açude Aracoiaba



FONTE: SILVA, 2022.

A bacia hidrográfica do açude Aracoiaba apresenta uma área de 532,83 km², integrando os municípios de Aracoiaba, Baturité, Capistrano, Aratuba, Mulungu, Guaramiranga, Pacoti e Redenção, totalizando uma população de 140.974 habitantes, conforme censo demográfico de 2010. (IBGE, 2010).

A vegetação na bacia de contribuição do açude Aracoiaba é predominante por caatinga arbustiva densa na área correspondente à Depressão Sertaneja, floresta subcaducifólia tropical pluvial (mata seca) nas vertentes dos maciços residuais, floresta subperenifólia tropical pluvionebular (mata úmida) nas encostas e na serra, e também por vegetação de tabuleiros. (CEARÁ, 2010).

A geologia da região é de predomínio de rochas do embasamento cristalino do Pré-Cambriano, representadas por gnaisses, gabros e migmatitos diversos, além de sedimentos areno-argilosos pertencentes à formação barreiras, do terciário, quaternário, podendo ainda ser detectados junto aos cursos dos principais rios os depósitos aluviais, de idade quaternária, compostos principalmente por areia, silte, argila e cascalhos. (CEARÁ, 2010).

Solos da classe Argissolos são predominantes no território, ocorrendo também os Planossolos, dentre outros. Os Argissolos compreendem os solos constituídos por material mineral, medianamente profundos, moderadamente drenados e com presença de horizonte B textural. Apresentam cores avermelhadas ou amareladas e, mais raramente, brunadas ou acinzentadas; a textura varia de arenosa a argilosa no horizonte A e de média a muito argilosa no horizonte Bt. São considerados fortes a moderadamente ácidos. Os planossolos são solos minerais pouco profundos, imperfeitamente ou mal drenados, com horizonte superficial de textura mais leve e um horizonte B plânico imediatamente subjacente, que se caracteriza por ser adensado, argiloso ou muito argiloso, pouco permeável e responsável pela formação de lençol d'água sobreposto (suspensão) temporário e de presença variável durante o ano (EMBRAPA, 2006).

A barragem exposta é do tipo terra que barra o rio Aracoiaba como mostra a (FIGURA 05). Seus principais afluentes são: o riacho do Cedro, o Riacho candeia, o riacho Corrente e o riacho do Susto e está localizada no município de Aracoiaba. A bacia compreende parte dos municípios de Aracoiaba, Aratuba, Baturité, Capistrano, Guaramiranga, Pacoti e Redenção, situada entre as coordenadas UTM, Zona 24M, 9533400mN e 9510787mN, e 534940mE e 499076mE, com uma capacidade de armazenamento de 162 hm³. (CEARÁ, 2008).

FIGURA 05: Espelho de água do Açude Aracoiaba.

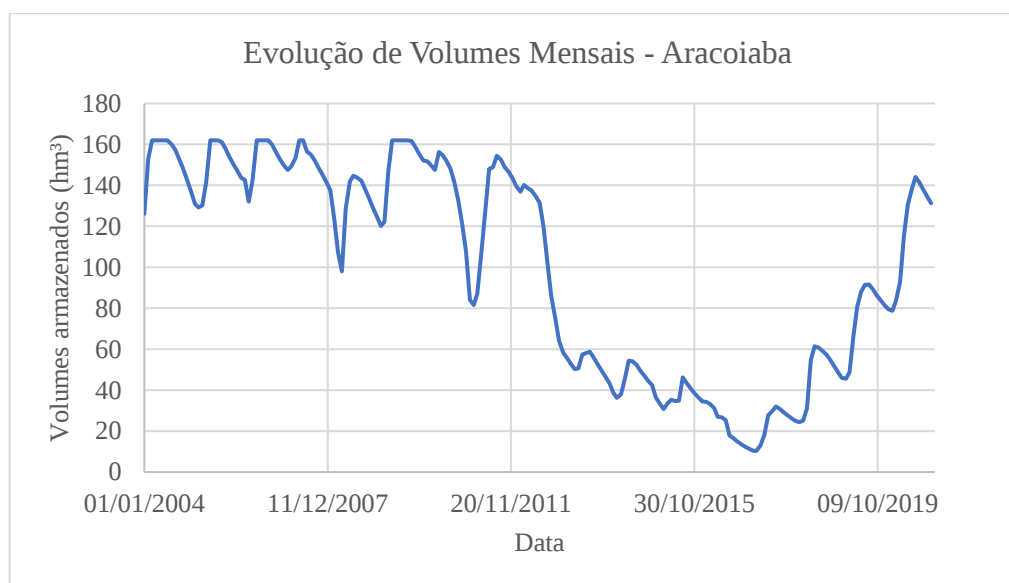


FONTE: SILVA, 2022.

A área da bacia hidrográfica do açude Aracoiaba apresenta o clima tropical chuvoso. A região apresenta um alívio acidentado, a região tem temperaturas consideradas amenas para o semiárido, por se apresentarem na faixa de 19°C a 29°C. A precipitação pluviométrica anual

situa-se entre 900 mm e 1.600 mm e o regime de chuvas é considerado bastante irregular, marcados por chuvas intensas concentradas geralmente de janeiro a abril e outros por secas. A temperatura média é de 25 ° C, atingindo os valores de menos de 16 ° C no eixo da serra de Baturité (COGERH,2001). A evolução do volume de água no reservatório é apresentada na (FIGURA 06) referente aos últimos dezesseis anos.

FIGURA 06: Evolução do volume de água do Açude Aracoiaba



FONTE: DADOS COGERH; SILVA, 2022.

A água do açude Aracoiaba é destinada ao abastecimento humano dos municípios de Aracoiaba, Ocara e Baturité quando necessário, geralmente no segundo semestre do ano, e para o município de capistrano quando o Açude do Pesqueiro seca. Seu uso também é destinado para a atividade de piscicultura e irrigação de culturas agrícolas.

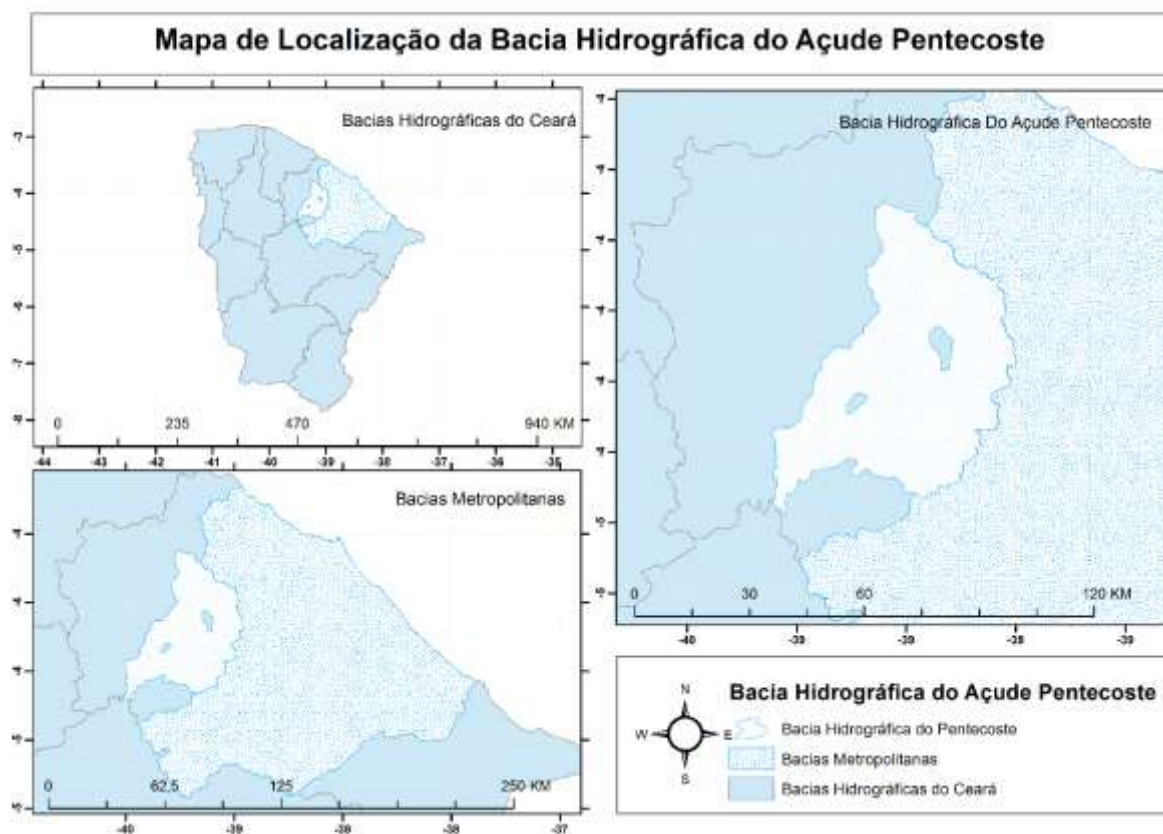
Quanto a agricultura existentes no entorno do açude Aracoiaba, é frequente o uso da água liberada como vazão ecológica para a finalidade de irrigação. No entorno do reservatório são encontradas áreas agricultáveis de pequeno a grande porte, como núcleos de agricultura familiar, com pequenas áreas de cultivo e extensas áreas de culturas agrícolas rotativas, causando o uso indiscriminado de agrotóxicos e de fertilizantes.

Como o açude se localiza abaixo dos municípios de Aracoiaba e Baturité, e nestas cidade não há saneamento básico, percebe-se que há poluição causada pelo lançamento de esgotos domésticos direto no rio.

3.1.3. Bacia hidrográfica do açude Pereira de Miranda

A bacia hidrográfica do açude Pereira de Miranda (FIGURA 07) pertence à microrregião Vale do Médio Curu, situado no município de Pentecoste, com uma área aproximada de 2,840 km². No exutório da bacia, barrando o Rio Canindé (afluente do rio Curú), localiza-se a barragem do Açude Pentecoste, com capacidade de armazenamento de 395,6 milhões m³ e vazão regularizada com garantia de 90% de aproximadamente 3,5 m³/s.

Figura 07: Localização da Bacia Hidrográfica do Açude Pentecoste.



FONTE: SILVA, 2021.

A bacia hidrográfica do Açude Pentecoste é integrada os municípios de Pentecoste, Canindé, Apuiarés, Aratuba, Mulungu, Guaramiranga, Caridade, Pacoti, Paramoti e Maraguape, totalizando uma população de 307.472 habitantes, conforme censo demográfico de 2010. (IBGE, 2010).

A barragem se constitui do tipo terra homogênea e bloqueia o Rio Canindé (FIGURA 08), tendo mencionado o mesmo como o principal afluentes. O açude Pentecoste se localiza no

município de Pentecoste Litoral Oeste e Microrregião Médio Curu, a 3°47'34" de Latitude Sul e 39°16'13" de Longitude oeste (CEARÁ, 2008).

FIGURA 08: Espelho de água do Açude Pentecoste.

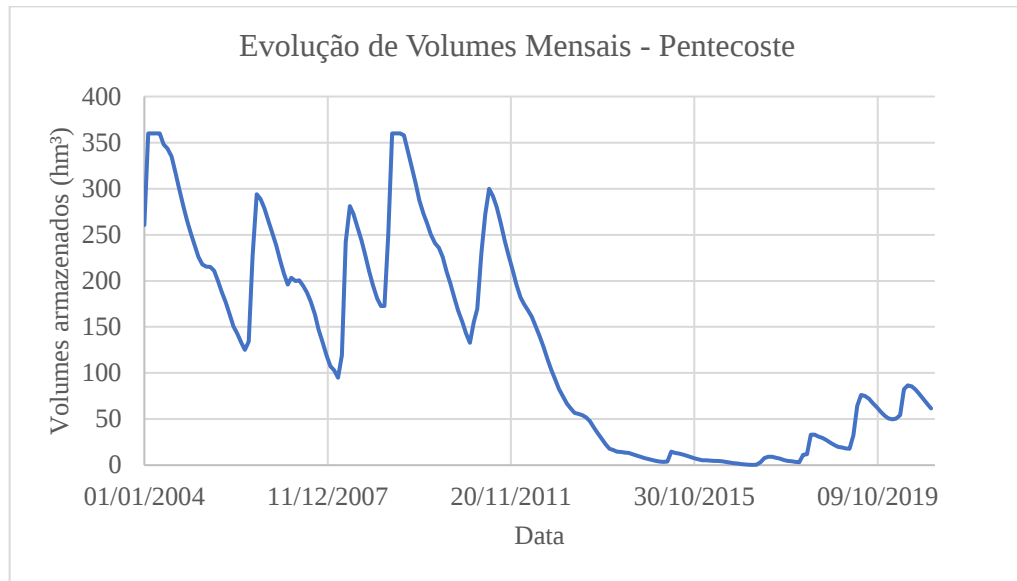


FONTE: SILVA, 2022.

A área da bacia hidrográfica do açude Pentecoste apresenta os tipos de clima tropical, e quente. Devido a sua localização geográfica, em parte apresenta clima tropical, e a outra tem clima quente no extremo sul. A parte mais fria se concentra região mais próxima ao maciço de Baturité.

A pluviometria média na sede é de 818 mm com chuvas concentradas de fevereiro a maio. A região apresenta característica de sertão, com temperaturas de semiárido, a estação seca e de ventos fortes e de céu parcialmente encoberto de nuvens durante o ano inteiro. A parte quente é opressivo ao longo do ano, favorecendo a evaporação da água, em geral, a temperatura varia de 22 °C a 35 °C e raramente é inferior a 21 °C ou superior a 36 °C (COGERH,2001). O açude vem sofrendo ao longo dos anos com precipitação irregulares na região como mostrado na evolução do volume de água no reservatório apresentado na (FIGURA 09) referente aos últimos dezesseis anos.

FIGURA 09: Evolução do volume de água do Açude Pentecoste



FONTE: DADOS COGERH; SILVA, 2022.

A vegetação da região é compreendida por quatro diferentes tipos de vegetação, entre eles caatinga arbustiva aberta, caatinga arbustiva densa, caatinga arbórea e mata seca. Sendo predominante a caatinga arbustiva densa. (IPECE, 2009).

A geologia apresenta associação petrotectônica denominada de Complexo Metatexito de xisto que representa o embasamento cristalino, com posicionamento no Proterozóico. Os solos predominantes na bacia é tipo não cálcico, porém apresenta os solos do tipo podzólico vermelho amarelo equivalente eutrófico, litólico, planossolo solódico e podzólico vermelho amarelo.

A água do açude Pentecoste é destinada ao abastecimento público, pescaria artesanal, piscicultura, transporte hidroviário, agricultura, pecuária e sua ocupação do solo é destinado as hortaliças, leguminosas a exemplo de milho, feijão, fava, mandioca, cana-de-açúcar (IBGE, 2021).

3.2. Estimativa da carga de fósforo afluente aos reservatórios

As principais fontes de carga de fósforo em uma bacia hidrográfica, em ordem crescente de importância que são: drenagem pluvial, áreas com matas e florestas, áreas agrícolas, áreas urbanas, esgotos e rebanho (ANA, 2011)

A drenagem pluvial de áreas com grande cobertura vegetal, como matas e florestas sem área de desmatamento, transporta a menor quantidade de fósforo. Nestas áreas, o fósforo não

está sobrando no meio, já que o ecossistema se encontra próximo ao equilíbrio, não havendo nem grandes excessos, nem grandes faltas dos principais elementos (VON SPERLING, 2005)

Segundo Cetesb (2015), as áreas agrícolas apresentam valores superiores e, também, uma ampla variabilidade, dependendo da capacidade de conservação do solo, irrigação, tipo de fertilizantes usado na cultura e condições climáticas. Já as áreas urbanas apresentam valores mais elevados e com menor alteração. Os esgotos domésticos transmitido por sistemas de esgotamento dinâmico são, na realidade, a maior fonte de contribuição de fósforo. Este se encontra presente nas fezes humanas, nos detergentes para limpeza doméstica e em outros subprodutos das atividades humanas. A pecuária também representa uma importante parcela da produção de fósforo através de suas fezes e urinas.

A estimativa das cargas brutas de nutrientes (via esgoto domésticos, rebanho e agricultura) em uma bacia hidrográfica deve ser calculada usando a seguinte forma:

$$L_1 = \sum_{i=1}^n Coef_i \cdot Quant_i \quad (07)$$

Em que: L1: carga de fósforo produzida na bacia pela atividade (ton); Coef_i: coeficiente de carga; Quanti: quantitativo multiplicativo. A estimativa dos quantitativos populacionais, produção agrícola e pecuária levou em consideração os dados censitários demográficos, quantitativo de cabeças de rebanhos e área de produção agrícolas dos municípios presentes na bacia, ponderados pela área do município coincidente com a bacia hidrográfica. Para distribuir espacialmente a população municipal urbana sobre as bacias hidrográficas adotou-se o critério que tem por base a localização da sede municipal. Para a população rural o critério se baseou nos percentuais da área municipal em cada bacia.

3.2.1. Estimativa da carga de fósforo doméstica

Segundo Lima (2016), a importância do fósforo nos sistemas biológicos se deve à presença deste elemento em processos indispensáveis do metabolismo dos seres vivos. A existência de fósforo em águas naturais e em águas residuárias dar-se-á, quase que exclusivamente, sob a forma de fosfato. Os fosfatos são classificados como ortofosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta- e outros polifosfatos) e fosfatos organicamente ligados. Eles podem ocorrer em solução, em partículas ou detritos, ou nos corpos de organismos aquáticos.

O fósforo total no esgoto doméstico se destina como fosfatos, nas seguintes formas: inorgânicas (polifosfatos e ortofosfatos), origem principal nos detergentes e outros produtos químicos domésticos e orgânica (ligada a compostos orgânicos), origem fisiológica.

O fósforo encontrado nos detergentes e na água residuária bruta ocorre na forma de polifosfatos solúveis ou, após hidrólise, na forma de ortofosfatos. O fósforo proveniente dos detergentes pode representar até 50% da concentração de fósforo total no esgoto doméstico. Os polifosfatos são moléculas mais complexas com dois ou mais átomos de fósforo (LIMA, 2016). Os polifosfatos se transformam em ortofosfatos pelo processo químico no qual as moléculas de substâncias são quebradas em unidades menores a partir da ação de íons proveniente da ionização da água, que apesar de lento, inicia-se, e parcialmente ocorre, no próprio sistema de coleta de esgoto. Os ortofosfatos são imediatamente disponíveis para o metabolismo sem necessidade de conversões a formas mais simples. A forma na qual os ortofosfatos se apresentam na água depende do pH, e incluem PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 . Em esgoto doméstico típico, a forma predominante é o HPO_4^{2-} .

Uma possível classificação do fósforo presente no esgoto é quanto à sua forma como sólidos (IAWQ, 1995): fósforo solúvel (predominantemente inorgânico) – principalmente polifosfatos e ortofosfatos (fósforo inorgânico), estendido de uma pequena fração correspondente ao fósforo ligado à matéria orgânica solúvel do esgoto e fósforo particulado, sendo de forma orgânica e ligado à matéria orgânica particulada do esgoto como apresentado na (FIGURA 10).

FIGURA 10: Distribuição do fósforo no esgoto doméstico.



FONTE: VON SPERLING, 2005.

De acordo com os fatores socioeconômicos, percebe-se que há uma relação direta através de quantidade de esgoto doméstico produzido e o número de habitantes na bacia hidrográfica de um determinado açude. Entretanto, a carga efetiva de esgoto que pode alcançar aos corpos d'água receptores pode ser potencialmente reduzida a depender das condições de saneamento locais, de modo específico se existir uma grande cobertura dos serviços de coleta, tratamento e destino final dos sedimentos produzidos.

A estimativa das cargas de nutrientes decorrentes do esgoto doméstico pode ser realizada a partir de dados secundários usando a seguinte equação:

$$Ced = \text{população} \times \text{carga per capita} \quad (08)$$

Em que: Ced = carga de esgoto doméstico, em ton.ano^{-1} ; população = total de habitantes; carga per capita = carga específica anual de nutrientes por habitante, expressa em $\text{ton.hab}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

As cargas específicas anual do fósforo adotados foram as propostas por Von Sperling (1996), conforme (QUADRO 01).

QUADRO 01: Carga de nutrientes per capita.

Áreas Contribuintes	Cargas de Nutrientes (ton/hab/ano)	
	N	P
Urbanas	0,0021	0,0006
Rurais	0,0015	0,0004

Fonte: VON SPERLING, 1996.

Para considerar os efeitos da eficiência do sistema de tratamento do esgoto coletado, utilizou-se a equação a seguir:

$$Ced_{ma} = Ced \cdot (1 - EF) \quad (09)$$

Em que: Ced_{ma} = carga bruta que chega ao meio-ambiente, em ton.ano^{-1} ; Ced = carga bruta de esgoto doméstico, em ton.ano^{-1} ; EF = taxa de eficiência na remoção dos nutrientes por tipo de tratamento, admitindo 3% para o meio rural (fossa seca) e 5% para o meio urbano (fossa séptica).

No caso de fossas seca e séptica, as eficiências de retirada adotadas podem ser aquelas sugeridas por (NOGUEIRA, 2003), mostradas no (QUADRO 02).

QUADRO 02: Eficiência na remoção de nitrogênio e fósforo.

Destino do Esgoto	Eficiência (%)	
	N	P
Fossa seca	2	3
Fossa séptica	4	5
A Céu aberto	0	0

FONTE: NOGUEIRA, 2003.

O fósforo está associado principalmente ao crescimento dos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica, constantemente, o esgoto doméstico apresenta um teor definitivo de fósforo, mas em certos resíduos industriais o teor pode ser insuficiente para o crescimento dos microrganismos. O fósforo é um nutriente fundamental para o crescimento de algas, atuando, por isso, em certas condições, como impulsionador do processo eutrofização de lagos e bacias hidrográficas, porém o mesmo não apresenta implicações sanitárias na qualidade da água.

3.2.2. Estimativa da carga de fósforo da pecuária

O setor pecuário, bem com outras atividades, é um grande produtor de detritos, o que o torna um potencial causador de impacto ambientais. Segundo Souza (2010), a pecuária afeta também a reposição de água doce através da compactação do solo, diminuindo a infiltração para os lençóis freáticos e a degradação das margens dos rios causado um enorme impacto ambiental.

A pecuária causa impactos negativos ao meio ambiente, tais como: a degradação do solo, poluição dos recursos hídricos, emissão de gases de efeito estufa, redução da biodiversidade e emissão de fósforo. Em relação ao fósforo, as cargas deste nutriente podem ser estimadas com base em informações relativas à agropecuária, mas primeiramente é necessário fazer um levantamento dos dados relativos à pecuária de cada município integrante da bacia hidrográfica do reservatório a partir de dados censitários de agropecuária.

O setor agropecuário constitui uma grande fonte de nutrientes, aliado aos rejeitos da criação de animais, em áreas agrícolas. A partir do solo, os nutrientes podem ser direcionados para o lençol freático e com a ocorrência de chuvas atingindo os corpos d'água superficiais. Contudo, a transposição de nutrientes não ocorre de forma direta, um vez que cerca de 10% do N e P consumido pelo animal é agregado ao crescimento de sua massa corporal (LACERDA; SENA, 2005). A parcela que sobra destes nutrientes produzida pela pecuária, é dispensada sob

forma de esterco, e volta-se a ser adicionado ao solo, principalmente na criação extensiva. Cerca de 40% a 65% da carga incorporada ao solo é absorvida pelas plantas nativas ou cultivadas (LACERDA; SENA, 2005).

Já em pequenas bacias litorânea, a maioria deste nitrogênio retornará, por dispersão atmosférica, para longe da bacia de drenagem, dado o tempo de residência desta espécie química na atmosfera (NRC, 2003, *apud* LACERDA; SENA, 2005). Deste modo, estima-se que de 20 a 35% do nitrogênio e de 35 a 60% do fósforo presente nos dejetos dos animais sejam exportados, provavelmente para águas superficiais e conseqüentemente para reservatórios (LACERDA & SENA, 2005). A produção de dejetos varia com a criação do animal, sendo empregado a seguinte equação:

$$Cdej = (\text{Rebanho}).(\text{Proddiaria}).(365/1000) \quad (10)$$

Em que: Cdej = carga de dejetos produzidos, em ton.ano⁻¹; Rebanho = número de cabeças; Proddiaria = produção diária de dejetos, em kg/dia/cabeça.

Para a realização deste trabalho foi adotado valores de produção diária de projetos, de acordo com trabalhos realizados por Boyd (1971) e Esteves (1998), os quais estão discriminados no (QUADRO 03) que segue:

QUADRO 03: Quantidade de dejetos produzidos por cada espécie de animal.

Rebanho	Produção de Dejetos (kg. cabeça ⁻¹ dia ⁻¹)
Bovinos e Equinos	10
Suínos	2,5
Ovinos e Caprinos	1,0
Galináceos	0,18

FONTE: BOYD, 1971 E ESTEVES, 1998.

Para estimativa da carga de fósforo proveniente dos dejetos animais, utilizou-se a seguinte equação:

$$NUTpec = (Cdej).(\text{PERCnut}).(F/100) \quad (11)$$

Em que: NUTpec = Carga de nutrientes produzidas pela pecuária (ton.ha⁻¹); PERCnut = Percentual de N e P nos dejetos; e F = Índice multiplicador que equivale a 1 para o fósforo 0,85 para o nitrogênio. Este fator F leva em consideração que uma parcela (cerca de 10 a 20%) retorna para a atmosfera pela evaporação da amônia, conforme Bouwman *et al.* (1997, *apud*

LACERDA & SENA, 2005). Com isso, estabeleceu-se um índice multiplicador, F, de 0,85 para o nitrogênio e 1 para o fósforo, considerando que neste último não há perda do nutriente para a atmosfera.

No (QUADRO 04) mostra o percentual médio de nitrogênio e fósforo nos dejetos produzidos por cada tipo de rebanho, embora o estudo tenha focado na carga de fósforo apenas.

QUADRO 04: Média de nitrogênio e fósforo nos dejetos produzido por cada tipo de rebanho.

Rebanho	% de Nutrientes	
	N	P
Bovinos e Equinos	0,6	0,35
Suínos	0,5	0,3
Ovinos e Caprinos	0,5	0,5
Galináceos	1,2	1,3

FONTE: LACERDA E SENA, 2005.

3.2.3. Estimativa da carga de fósforo da agricultura

A agricultura é uma das principais fontes da contribuição de fósforo e nitrogênio em áreas rurais. Isto deve-se a diversos fatores, dentre os quais o uso de fertilizantes no processo da produção agrícola, e com a ação das águas das chuvas ou por irrigação provoca o escoamento de nutrientes não assimilados para os recursos hídricos subterrâneos e superficiais, através de processos como percolação, infiltração e escoamento superficial, contaminando os mananciais da bacia hidrográfica. A quantidade de nitrogênio e fósforo aplicados como fertilizantes varia com o tipo de solo e as necessidades nutricionais da cultura.

Estima-se, inicialmente, as necessidades nutricionais das culturas pela seguinte equação:

$$NNU_{total} = (\text{Área}).(N_{nut}) \quad (12)$$

Em que: NNU_{total} = Necessidade Nutricional total por cultivo, em ton; Área = Área Plantada por cultivo; N_{nut} = Necessidade Nutricional, em $\text{ton}.\text{ha}^{-1}$.

O (QUADRO 05) apresenta valores de referência de necessidade nutricional cada cultivo, conforme UFC (1993).

QUADRO 05: Necessidade das principais culturas no Ceará.

Culturas	Necessidade Nutricional (kg/ha)			
	Nitrogênio		Fósforo	
	Sequeiro	Irrigado	Sequeiro	Irrigado
Milho	70	90	50	80
Feijão	30	40	60	60
Algodão	30	80	50	70
Mandioca	30	-	50	-
Arroz	60	60	60	60

FONTE: UFC, 1993.

Para estimativa da carga de nutrientes derivados da agricultura utilizou-se a equação 9, como segue:

$$\text{Cagr} = (\text{NNUtotal}).(\text{Psolo}).(\text{Pcultura}) \quad (13)$$

Em que: Cagr = Carga bruta de nutriente produzido na agricultura (ton); NNUtotal = Necessidade nutricional por cultivo (ton); Psolo = Perda de nutriente em função do tipo de solo (decimal); Pcultura = Perda de nutriente em função de cada cultura (decimal).

De acordo com as propriedades físicas de cada tipo de solo pode haver uma maior ou menor perda de nutrientes para o ambiente, em linhas gerais podem-se empregar os valores constantes no (QUADRO 06).

QUADRO 06: Percentual de perda de nutrientes pelo solo através de aplicação de fertilizantes

Tipos de Solo	Perda de Nutrientes* (%)
Argilosos	10 a 40%
Arenosos	25 a 80%

FONTE: HOWARTH ET AL. (1996, APUD LACERDA; SENA, 2005).

Segundo Andrade (1991), em seu trabalho sobre *Diagnóstico do Uso de Fertilizantes para o Incremento da Produtividade Agrícola no Ceará*, as culturas apresentam uma necessidade diferenciada por determinados nutrientes. Os fertilizantes são utilizados na

agricultura convencional para melhorar a produtividade do solo, a partir da adição de nutrientes de forma suplementar, incluindo nitrogênio e fósforo.

O fator de retenção de nutrientes na massa seca varia de cultura para cultura e serão empregados os valores propostos pela Universidade Federal do Ceará (UFC, 1993). As taxas de perdas médias para o meio-ambiente variam para cada tipo de cultura, sendo adotados os valores descritos no (QUADRO 07).

QUADRO 07: Percentual de perda de nutrientes por cultivo.

Tipos de Cultura	Perda de Nutrientes (%)	
	N	P
Milho ^a	26-32%	6-20%
Algodão ^a	16%	6
Feijão ^b	16-25%	0,7-1,4%

FONTE: (A) MALAVOLTA & DANTAS (1980); (B) VOLLENWEIDER (1968).

3.3. Modelagem da qualidade da água no reservatório com base no teor de fósforo

O fósforo natural se origina da dissolução de rochas, da lixiviação do solo, da decomposição da matéria orgânica e da composição celular dos organismos presentes, e na distribuição do mesmo através das ações humana.

Contudo, as ações do homem contribuem para que o fósforo chegue nas águas naturais de maneira mais rápida, sobretudo devido aos despejos de efluentes domésticos e industriais, detergentes e do escoamento de áreas agrícolas de culturas que utilizam fertilizantes, além dos excrementos de animais, em especial, aviários e abatedouros (SPERLING, 1995).

Para modelagem do balanço de fósforo nos reservatórios utilizou-se o modelo QUAL-Hidrosed (Peixoto, 2016), que foi desenvolvido com base na equação da modelagem para o fósforo proposta por Chapra (1997), com a perspectiva de acoplagem ao modelo QUAL-UFMG (Von Sperling, 2007), o qual simula a propagação do fósforo pela rede de drenagem. A equação proposta por Chapra considera um plano de mistura completa, ou seja, a concentração de nutrientes é uniforme em todo o reservatório, como segue:

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + K_r + K_s\right)t} + \frac{W}{\left(\frac{Q_s}{V} + K_r + K_s\right) \cdot V} \cdot \left(1 - e^{-\left(\frac{Q_s}{V} + K_r + K_s\right)t}\right) \quad (14)$$

Em que:

$P(t)$ = concentração de fósforo total no lago (kg.m^{-3}); P_o = concentração de fósforo total inicial no lago (kg.m^{-3}); t = tempo de detenção hidráulica (ano); V = volume do reservatório (m^3); W = carga de fósforo do afluente (kg.ano^{-1}); Q_s = vazão de saída do reservatório ($\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$), considerando vertimentos, evaporação e regularização pela tomada d'água; K_r = coeficiente de reação (s^{-1}); K_s = Coeficiente de sedimentação do fósforo (s^{-1}). Na equação 15, o somatório dos valores de Q_s/V , K_r , e K_s é conhecido como fator ∞ . Admitindo-se como desprezível o valor do coeficiente de reação K_r , o fator l é obtido pelo somatório do tempo de detenção (Q_s/V) e o coeficiente de sedimentação do fósforo (K_s).

O tempo de retenção hidráulica - TR tem sido utilizado para estimativa do coeficiente de sedimentação utilizado na equação de Chapra (Equação 15). Vollenweider (1976 apud VON SPERLING, 1996) estimou TR como sendo a razão entre a capacidade de armazenamento e a vazão afluente anual média ($TR = V/Q_{in}$). Na equação de Chapra (1997, Equação 15 acima), o TR é estimado como sendo a relação entre a capacidade de armazenamento e a vazão de saída anual média ($TR = V/Q_s$), considerando Q_s como sendo as perdas médias anuais por evaporação, vertimentos e vazões regularizadas.

Alguns estudos têm proposto equações para estimativa do coeficiente de sedimentação do fósforo - K_s com base em TR. Vollenweider (1976, apud VON SPERLING, 19), por exemplo apresentou a seguinte equação, desenvolvido com base em dados de lagos temperados:

$$K_s = 1 / \sqrt{TR} \quad (15)$$

Salas e Martino (1991), por sua vez, propuseram uma equação ajustada a dados de 40 lagos tropicais, como segue:

$$K_s = 2 / \sqrt{TR} \quad (16)$$

Já Toné & Lima Neto (2014), com base em dados dos reservatórios Castanhão, Gavião, Forquilha e Orós, ajustaram uma equação para estimativa do coeficiente de decaimento no semiárido cearense, como descrito a seguir:

$$K_s = 4 / \sqrt{TR} \quad (17)$$

Considerando que o tempo de retenção hidráulica pode ser bastante influenciado pelo regime hidrológico da bacia no regime estudado, propõe-se nesta pesquisa uma equação

genérica para estimativa do coeficiente de sedimentação K_s , que pode ser calibrada para o período de estudo analisado.

$$K_s = a / \sqrt{TR} \quad (18)$$

Em que: α = coeficiente de ajuste da equação para estimativa do coeficiente de sedimentação K_s com base no tempo de residência hidráulica TR .

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Estimativa da carga bruta de fósforo nas bacias hidrográficas dos reservatórios estudados

4.1.1. Carga bruta de fósforo na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio.

Segundo dados do IBGE (2017), a agricultura nos municípios da bacia hidrológica do açude Acarape do Meio é baseada a partir do cultivo de banana, coco, café, caju, manga, mamão papaia, laranja, além da alface e da cenoura., chuchu, pimentão, couve e flores, além das lavouras de arroz, feijão e milho. A maioria dos produtores dessa área é composta por pequenos e médios produtores rurais que desenvolvem atividades em áreas agrícolas menores. Na pecuária, destacam-se as seguintes espécies: aves, bovinos, suínos, caprinos e ovinos.

Em relação ao saneamento básico, percebeu-se que há poluição causada pelo lançamento de esgotos domésticos diretamente nos rios e riachos da região. No entorno do reservatório, nos distritos de montante, há inúmeras residências com fossa rudimentar, com isso faz-se que o nível de fósforo na bacia seja alto (LIMA, 2016).

Para estimar a carga bruta de fósforo de origem doméstica produzida na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio foram utilizados dados da população urbana e rural que compõem sua bacia hidrográfica, utilizando valores tabelados propostos por Sperling (1996) e por Nogueira (2003), conforme já apresentado em detalhes no item 3.2.1. Os resultados da produção de fósforo para a atividade doméstica estão apresentados na (TABELA 01). A Tabela 01 apresenta ainda a estimativa de carga bruta de nitrogênio, embora apenas o nutriente fósforo tenha sido investigado em detalhes nesta pesquisa.

TABELA 01: Estimativa da carga bruta de fósforo derivada da atividade doméstica na bacia do açude Acarape do Meio

Habitan tes	Carga de nutrientes per capita (ton/hab/an o) N	Carga de nutrientes per capita (ton/hab/dia) P	Popula ção	Carga de nutrientes domésticos (ton/ano)		Eficiência de remoção (%)		Carga de fósforo efetiva (ton/ano)	
				Nitrogênio	Fósfor o	Nitrogên io	Fósfo ro	Nitrogê nio	Fósfo ro
Urbana	0,0021	0,0006	12766	26,81	7,66	4%	5%	25,7	7,4
Rural	0,0015	0,0004	13301	19,95	5,32	2%	3%	19,2	5,1
Total			26067	46,76	12,98			44,9	12,5

FONTE: SILVA, 2022.

Os resultados quanto à estimativa da carga de fósforo proveniente das atividades da pecuária na bacia Acarape do Meio estão sintetizados na (TABELA 02).

TABELA 02: Estimativa da carga bruta de fósforo derivada da atividade da pecuária na bacia do açude Acarape do Meio.

Rebanho	Produção de dejetos (kg/cabeça/dia)	População animal	Produção anual de dejetos (ton/ano)	Percentual de nutrientes nos dejetos (%)		Carga de fósforo (ton/ano)	
				Nitrogênio	Fósforo	Nitrogênio	Fósforo
Bovinos, equinos, asininos e suínos	10,00	4358	15906,7	0,60%	0,35%	81,1	55,7
Suínos	2,50	8020	7318,3	0,50%	0,30%	31,1	22,0
Ovinos e caprinos	1,00	2350	857,8	0,50%	0,50%	3,6	4,3
Aves	0,18	53903	3541,4	1,20%	1,30%	36,1	46,0
Total		68631	27624			152,0	128,0

Fonte: SILVA, 2022.

No caso da agricultura, os resultados de carga bruta de fósforo produzido dentro da bacia hidrográfica do Acarape do Meio estão apresentados na (TABELA 03).

TABELA 03: Estimativa da carga bruta de fósforo derivada da atividade da agricultura na bacia do açude Acarape do Meio.

CULTURA	ÁREA	Necessidade Nutricional P (kg/ha)		% perda P cultura	% perda P p/ o solo	Necessidade Nutricional (ton/ano)	Cálculo carga P que retorna (ton/ano)
		Sequeiro	Irrigado				
Milho	978	50	80	13%	60%	48,900	3,814
Feijão fraudinha	429	60	60	1%	60%	25,740	0,154
Fava	619,0	60	60	1%	60%	37,140	0,223
Mandioca	46,00	50	60	6%	60%	2,300	0,083
Arroz	168,00	60	60	1%	60%	10,080	0,060
Melão	0,00	60	60	13%	60%	0,000	0,000
Abôdora	55,00	60	60	6%	60%	3,300	0,119
Melancia	4,00	60	60	6%	60%	0,240	0,009
Cana-de-açúcar	29,00	60	60	6%	60%	1,740	0,063
Feijão verde	236,00	50	60	1%	60%	11,800	0,071
Total							4,596

FONTE: SILVA, 2022.

O QUADRO 08, por sua vez, sintetiza as cargas de fósforo bruta das diferentes atividades (doméstica, pecuária, agricultura) na bacia hidrográfica do açude Acarape do Meio, perfazendo um total de 145 ton/ano aproximadamente.

QUATRO 08: Estimativa da carga bruta de fósforo na bacia hidrográfica do Acarape do Meio considerando as atividades domésticas, pecuária e agricultura.

Atividade	Carga de fósforo (ton/ano)
Doméstica	12,5
Pecuária	128,0
Agricultura	4,6
Total	145,0

FONTE: SILVA, 2022.

4.1.2. Carga bruta de fósforo na bacia hidrográfica do açude Aracoiaba.

Para estimar a carga bruta de fósforo de origem doméstica produzida na bacia hidrográfica do açude Aracoiaba foram utilizados dados da população urbana e rural que compõem sua bacia hidrográfica, utilizando valores tabelados propostos por Sperling (1996) e por Nogueira (2003). Os resultados da produção de fósforo para a atividade doméstica estão apresentados na (TABELA 04).

TABELA 04: Carga bruta de fósforo para a atividade doméstica do Açude Aracoiaba.

Habitantes	Carga de nutrientes per capita (ton/hab/ano) N	Carga de nutrientes per capita (ton/cabeça/dia) P	População	Carga de nutrientes domésticos (ton/ano)		Eficiência de remoção (%)		Carga de fósforo efetiva (ton/ano)	
				Nitrogênio	Fósforo	Nitrogênio	Fósforo	Nitrogênio	Fósforo
Urbana	0,0021	0,0006	35119	73,75	21,07	4%	5%	70,8	20,2
Rural	0,0015	0,0004	24472	36,71	9,79	2%	3%	35,2	9,4
Total			59591	110,46	30,86			106,0	29,6

FONTE: SILVA, 2022.

A estimativa da carga bruta de fósforo derivada da pecuária foi calculada conforme item 3.2.2 e os resultados apresentados na (TABELA 05).

TABELA 05: Estimativa da carga bruta de fósforo derivada da atividade da pecuária no Açude Aracoiaba.

Rebanho	Produção de dejetos (kg/cabeça/dia)	População animal	Produção anual de dejetos (ton/ano)	Percentual de nutrientes nos dejetos (%)		Carga de fósforo (ton/ano)	
				Nitrogênio	Fósforo	Nitrogênio	Fósforo
Bovinos, equinos, asinininos e muares	10,0	4357	15903,1	0,60%	0,35%	81,1	55,7
Suínos	2,5	4441	4052,4	0,50%	0,30%	17,2	12,2
Ovinos e caprinos	1,0	4054	1479,7	0,50%	0,50%	6,3	7,4
Aves	0,2	113683	7469,0	1,20%	1,30%	76,2	97,1
Total		126535	28904			180,8	172,3

FONTE: SILVA, 2022.

Para estimativa da carga bruta de fósforo procedente da agricultura se utilizou metodologia descrita no item 3.2.3, produzindo os resultados sintetizado na (TABELA 06).

TABELA 06: Estimativa da carga bruta de fósforo derivada da atividade da agricultura do açude Aracoiaba.

CULTURA	ÁREA	Necessidade Nutricional P (kg/ha)		% perda P cultura	% perda P p/ o solo	Necessidade Nutricional (ton/ano)	Cálculo carga P que retorna (ton/ano)
		Sequeiro	Irrigado				
Milho	4.157	50	80	13%	60%	207,850	16,212
Feijão fraudinha	2.912	60	60	1%	60%	174,720	1,048
Fava	1.080,0	60	60	1%	60%	64,800	0,389
Mandioca	77,00	50	60	6%	60%	3,850	0,139
Arroz	192,00	60	60	1%	60%	11,520	0,069
Abôdora	145,00	60	60	6%	60%	8,700	0,313
Melancia	35,00	60	60	6%	60%	2,100	0,076
Cana-de-açúcar	92,00	60	60	6%	60%	5,520	0,199
Feijão verde	293,00	50	60	1%	60%	14,650	0,088
Total							18,533

FONTE: SILVA, 2022.

O QUADRO 09, sintetiza as cargas de fósforo bruta das diferentes atividades (doméstica, pecuária, agricultura) na bacia hidrográfica do açude Aracoiaba. Fazendo uma somatória das três atividades que produzem fósforo na bacia chega aproximadamente por volta de 220.5 toneladas de fósforo por ano.

QUADRO 09: Estimativa da carga bruta de fósforo afluente ao reservatório Aracoiaba considerando as atividades domésticas, pecuária e agricultura.

Atividade	Carga de fósforo (ton/ano)
Doméstica	29,63
Pecuária	172,31
Agricultura	18,53
Total	220,47

FONTE: SILVA, 2022.

4.1.3. Carga bruta de fósforo na bacia hidrográfica do açude Pentecoste.

A carga bruta de fósforo produzida na bacia hidrográfica do açude Pentecoste de origem doméstica foi estimada com base em dados da população urbana e rural que integram a bacia hidrográfica, usando valores tabelados propostos por Sperling (1996) e por Nogueira (2003), conforme já apresentado em detalhes no item 3.2.1. Os resultados da produção de fósforo para a atividade doméstica estão apresentados na (TABELA 07).

TABELA 07: Carga bruta de fósforo para a atividade doméstica do Açude Pentecoste.

Habitan tes	Carga de nutrien te s per capita (ton/hab/ ano) N	Carga de nutrien te s per capita (ton/cabe ça/dia) P	Populaç ão	Carga de nutrientes domésticos (ton/ano)		Eficiência de remoção (%)		Carga de fósforo efetiva (ton/ano)	
				Nitrogênio	Fósfor o	Nitrogên io	Fósfor o	Nitrogê nio	Fósfo ro
Urbana	0,0021	0,0006	49528	104,01	29,72	4%	5%	99,8	28,5
Rural	0,0015	0,0004	30132	45,20	12,05	2%	3%	43,4	11,6
Total			79660	149,21	41,77			143,2	40,1

FONTE: SILVA, 2022.

A Tabela 08, por sua vez, apresenta a estimativa da carga de fósforo proveniente da pecuária que foi calculada conforme item 3.2.2. Já no prognóstico da carga de fósforo conclusivo da agricultura se utilizou metodologia descrita no item 3.2.3, produzindo os resultados determinados na Tabela 08.

TABELA 08: Estimativa da carga bruta de fósforo derivada da atividade da pecuária no Açude Pentecoste.

Rebanho	Produção de dejetos (kg/cabeça/dia)	População animal	Produção anual de dejetos (ton/ano)	Percentual de nutrientes nos dejetos (%)		Carga de fósforo (ton/ano)	
				Nitrogênio	Fósforo	Nitrogênio	Fósforo
Bovinos, equinos, asinininos e muares	10,0	17648	64415,2	0,60%	0,35%	328,5	225,5
Suínos	2,5	23548	21487,6	0,50%	0,30%	91,3	64,5
Ovinos e caprinos	1,0	44069	16085,2	0,50%	0,50%	68,4	80,4
Aves	0,2	138314	9087,2	1,20%	1,30%	92,7	118,1
Total		223579	111075			580,9	488,5

FONTE: SILVA, 2022.

No caso da agricultura, os resultados de carga de fósforo produzido dentro da bacia hidrográfica do Pentecoste estão apresentados na (TABELA 09). Com mostrado na tabela se observa que a agricultura produziu uma média de 16.548 toneladas.

TABELA 09: Estimativa da carga bruta de fósforo derivada da atividade da agricultura do açude Pentecoste.

CULTURA	ÁREA	Necessidade Nutricional P (kg/ha)		% perda P cultura	% perda P p/ o solo	Necessidade Nutricional (ton/ano)	Cálculo carga P que retorna (ton/ano)
		Sequeiro	Irrigado				
Milho	3.826	50	80	13%	60%	191,300	14,921
Feijão fraudinha	3.370	60	60	1%	60%	202,200	1,213
Fava	84,0	60	60	1%	60%	5,040	0,030
Mandioca	9,00	50	60	6%	60%	0,450	0,016
Arroz	25,00	60	60	1%	60%	1,500	0,009
Melão	0,00	60	60	13%	60%	0,000	0,000
Abôdora	144,00	60	60	6%	60%	8,640	0,311
Melancia	11,00	60	60	6%	60%	0,660	0,024
Cana-de-açúcar	7,00	60	60	6%	60%	0,420	0,015
Feijão verde	28,00	50	60	1%	60%	1,400	0,008
Total							16,548

FONTE: SILVA, 2022.

O QUADRO, 10 mostra as cargas bruta de fósforo produzida nas diversas atividades (doméstica, pecuária, agricultura) na bacia hidrográfica do açude Pentecoste. Somando-se as cargas de fósforo das três atividades, obtém-se um total produzido anualmente de 545.1 toneladas de fósforo por ano.

QUADRO 10: Estimativa da carga bruta de fósforo afluente ao reservatório Pentecoste considerando as atividades domésticas, pecuária e agricultura.

Atividade	Carga de fósforo (ton/ano)
Doméstica	40,10
Pecuária	488,48
Agricultura	16,55
Total	545,12

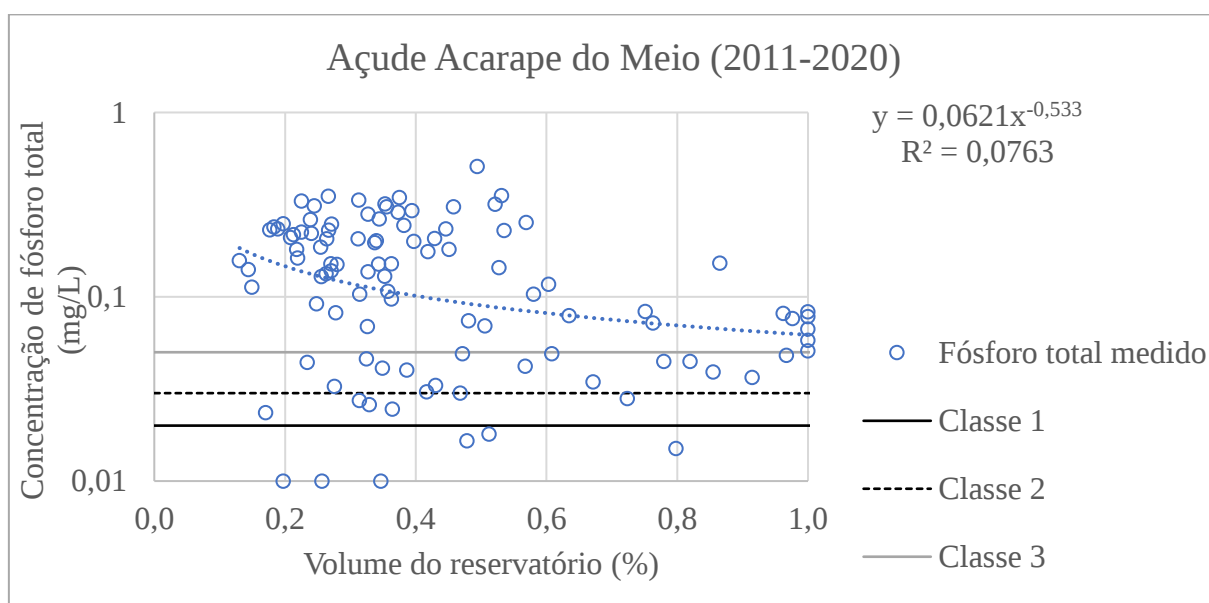
FONTE: SILVA, 2022.

4.2. Diagnóstico da concentração de fósforo com base em dados medidos

4.2.1. Concentração de fósforo versus volume acumulado no açude Acarape do Meio

Com base em dados medidos de concentração de fósforo e volumes no reservatório Acarape do Meio, no período de 2011 a 2020, foi possível estabelecer uma curva de regressão entre estas variáveis, conforme destacado na Figura 11. Pode-se perceber um comportamento de decaimento das concentrações de fósforo para maiores volumes armazenados, sugerindo um processo de diluição do fósforo com o aporte de vazões com menores cargas deste nutriente.

FIGURA 11: Relação entre a concentração de fósforo e o volume do reservatório com base em dados medidos no açude Acarape do Meio.



FONTE: SILVA, 2022.

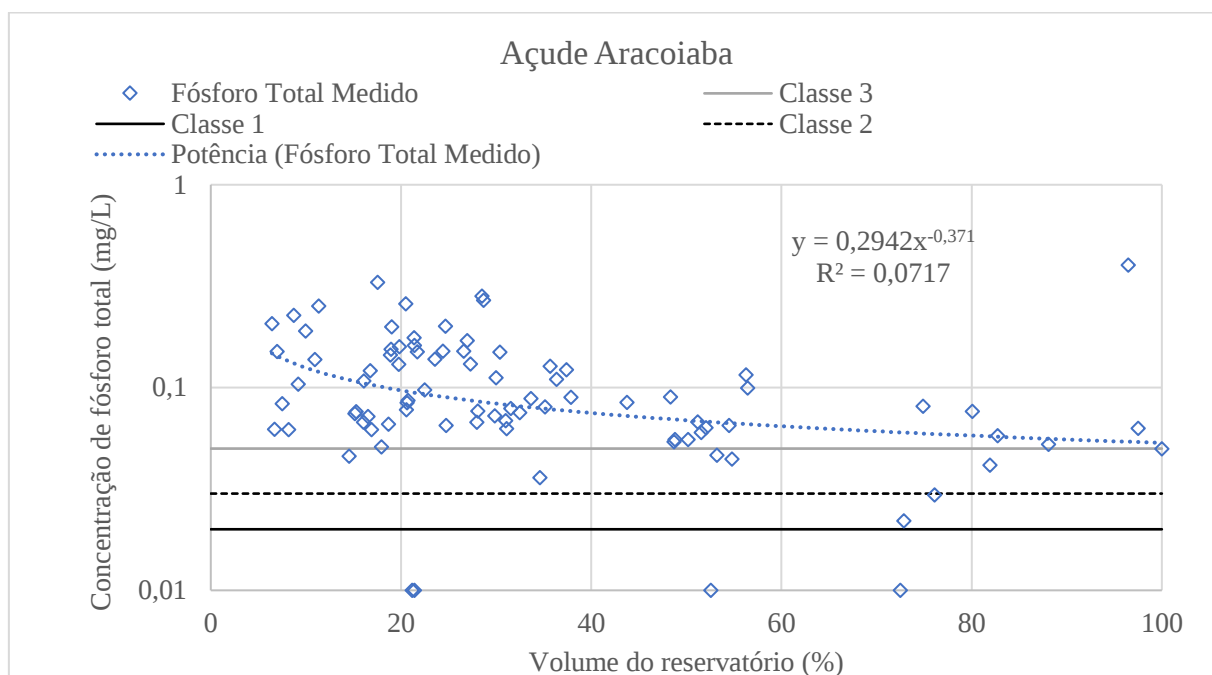
Os resultados mostram uma maior discrepância dos dados para maiores volumes do reservatório, o que pode ser explicado pela dinâmica de água e fósforo no reservatório com maiores cargas aportando durante eventos de escoamento com elevada concentração deste nutriente ou, inversamente, em processo de diluição do fósforo e deposição deste nutriente adsorvido em partículas de sedimento quando o reservatório está cheio e sem entradas adicionais no período.

4.2.2. Concentração de fósforo versus volume acumulado no açude Aracoiaba.

Dados de concentração de fósforo total no açude Aracoiaba disponibilizados pela COGERH no período de 2011 a 2020, permitiu o estabelecimento de uma curva de regressão com o percentual de volume de água armazenada, conforme (FIGURA 12). Também para o açude Aracoiaba se observa um comportamento de decaimento das concentrações de fósforo com o aumento do volume armazenado.

Os dados retratam o comportamento de seca prolongada na última década com baixos volumes armazenados e maiores concentrações de fósforo, com poucas medidas de concentração deste nutriente associadas a maiores volumes acumulados. Diferentemente do açude Acarape do Meio, não se percebe uma maior discrepância de valores de concentração de fósforo para maiores percentuais de volume, o que pode ser explicado pela baixa disponibilidade de dados nesta situação.

FIGURA 12: Relação entre a concentração de fósforo e o volume do reservatório com base em dados medidos no açude Aracoiaba.



FONTE: SILVA, 2022.

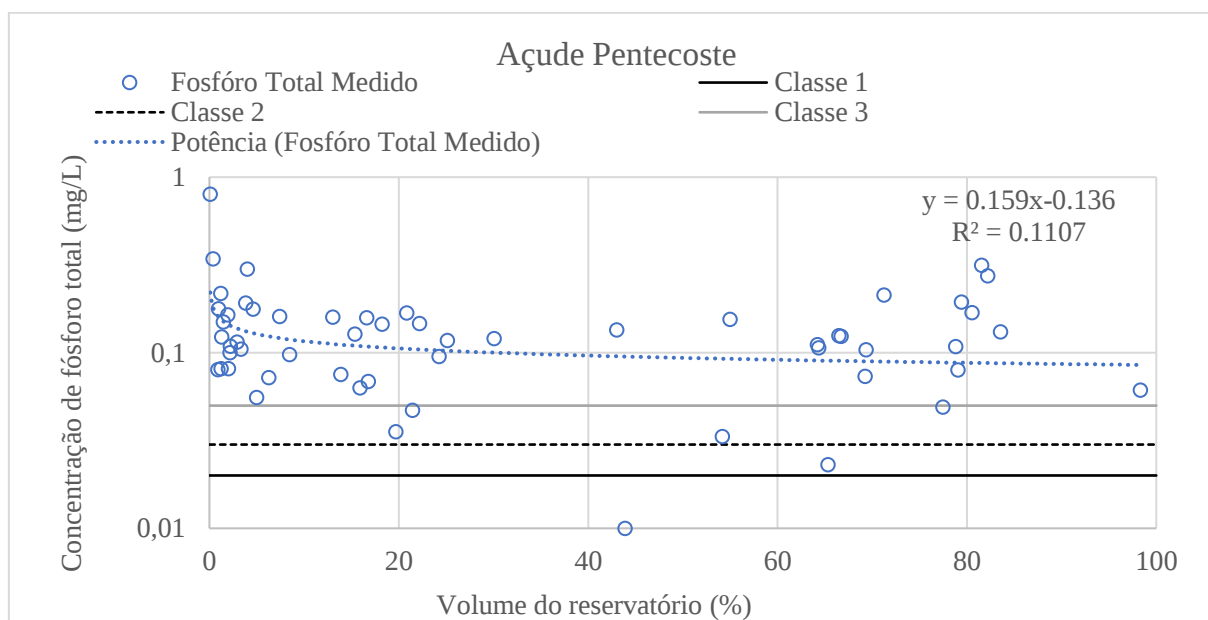
4.2.3. Concentração de fósforo versus volume acumulado no açude Pentecoste.

Para geração da curva de regressão da concentração de fósforo em relação aos percentuais de volume do reservatório, utilizaram-se dados medidos de concentração de fósforo do açude

Pentecoste disponibilizados pela COGHER, referente ao período de 2008 a 2020, conforme ilustrado na (FIGURA 13).

No caso do açude Pentecoste também se observa que as medições se concentram em períodos de baixo volume acumulado característico da última década, indicando um comportamento de decaimento da concentração de fósforo com o aumento do volume armazenado, o que pode ser explicado pela maior capacidade de depuração e diluição do nutriente no corpo hídrico.

FIGURA 13: Relação entre a concentração de fósforo e o volume do reservatório com base em dados medidos no açude Pentecoste.



FONTE: SILVA, 2022.

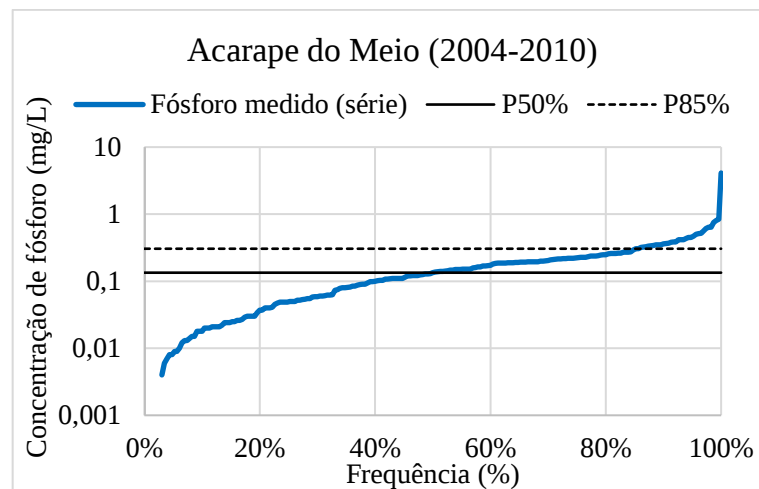
4.3. Estimativa da carga de fósforo afluyente aos açudes estudados.

4.3.1. Carga de fósforo afluyente ao açude Acarape do Meio.

Dados disponibilizados pela COGERH permitiram a construção da curva de permanência de concentrações de fósforo medida nos períodos de 2004 a 2010 e 2011 a 2020. A análise dos dados medidos indicou concentrações de referência representadas pela mediana (P50%) de 0,134 mg/L e pela frequência de 85% da amostra (P85%) de 0,305 mg/L no período de 2004 a 2010 (FIGURA 14). Já no período de 2011 a 2020, sendo que este período foi seco e com menores volumes armazenados no açude Acarape do Meio. As concentrações de referência

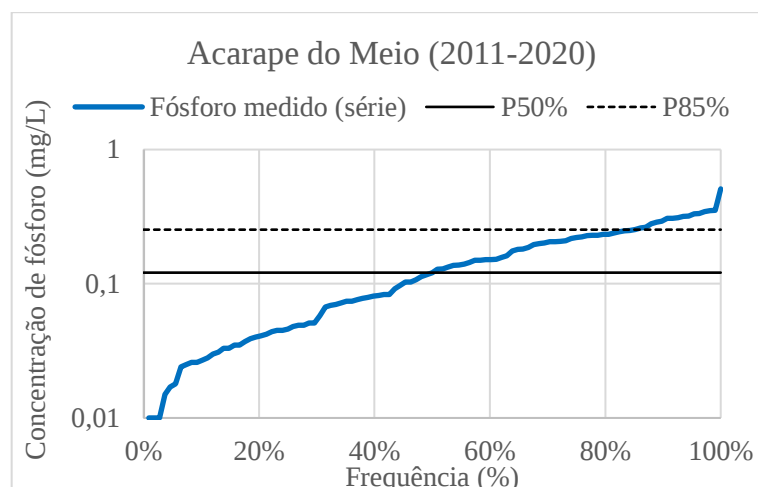
foram de 0,121 mg/L (P50%) e 0,253 mg/L (P85%), conforme destacado na Figura 15. As concentrações de referência foram utilizadas para retratar o processo de decaimento do fósforo e calibração do fator de ajuste α da equação 18. A escolha do percentil 85% como referência nesta análise se deve ao fato da concentração de fósforo associada (P85%) se aproximar do valor médio da concentração de fósforo medido no ponto de amostragem mais à montante dentro do reservatório Acarape do Meio, que reflete a concentração de fósforo na entrada do lago, sendo esta uma hipótese simplicadora neste trabalho. Considerando a escassez de dados medidos de concentrações de fósforo afluente, justifica-se a adoção da concentração de fósforo P85 como representativa da concentração afluente este açude, conforme análise realizada para o período de 2011-2020.

FIGURA 14: Curva de permanência de concentrações de fósforo no reservatório Acarape do Meio no período de 2004 a 2010.



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 15: Curva de permanência de concentrações de fósforo no reservatório Acarape do Meio no período de 2011 a 2020.



FONTE: SILVA, 2022.

Com base na concentração afluyente média de fósforo, aqui representada pelo P85% para os períodos de 2004 a 2010 e 2011 a 2020, foi possível estimar a carga de fósforo afluyente associada, com valores de 16,6 ton/ano e 4,8 ton/ano, respectivamente (TABELA10). Os resultados indicaram uma carga de fósforo mais de três vezes superiores no período de 2004 a 2010, uma vez que no período subsequente registrou-se um período de estiagem prolongado. Apesar de estudos mostrarem que a concentração de fósforo afluyente a reservatórios pode apresentar variabilidade importante, a hipótese simplificada adotada neste estudo busca caracterizar e comparar padrões em períodos hidrológicos distintos.

TABELA 10: Parâmetro de Afluentes médio anual (m³/ano) período de 2004-2010 e 2011-2020 reservatório de Acarape do Meio.

Parâmetro	Período	
	2004-2010	2011-2020
Volume afluyente médio anual total (m³/ano)	54.329.821	18.908.808
Concentração de fósforo afluyente média (mg/l)	0,305	0,253
Carga total de fósforo afluyente (ton/ano)	16,6	4,8

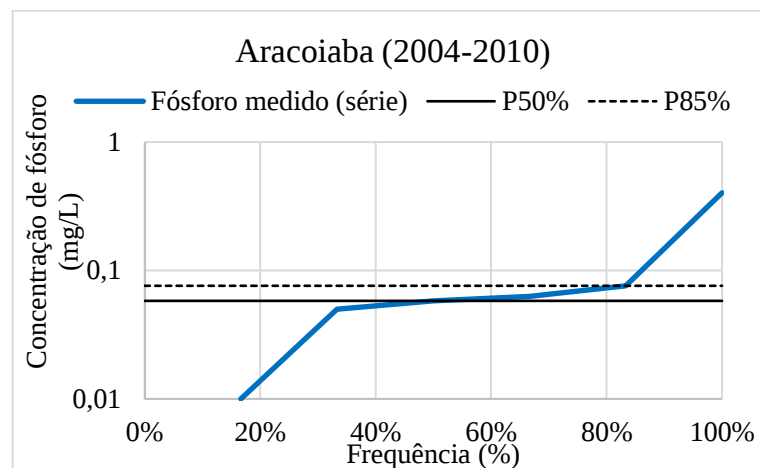
FONTE: SILVA2022.

4.3.2. Carga de fósforo afluyente ao açude Aracoiaba.

No caso do açude Aracoiaba, admitiram-se os mesmos percentuais de referência para caracterização da concentração média no reservatório (P50%), como uma hipótese simplifica

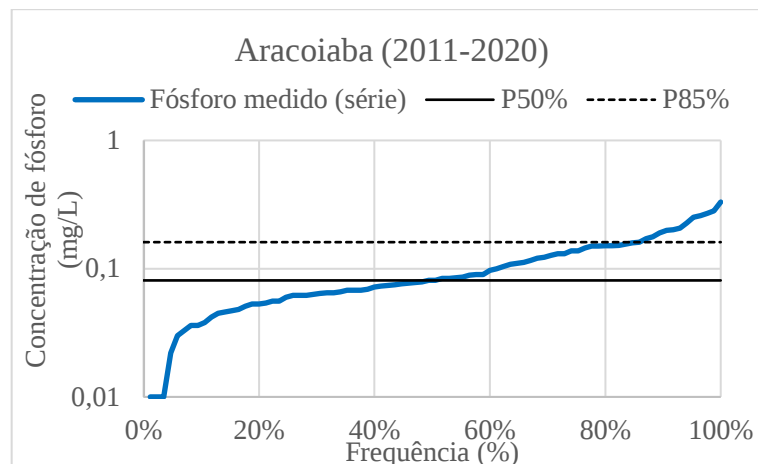
na entrada do reservatório (P85%), identificados para o açude Acarape do Meio. Apesar de apenas poucos dados de concentração de fósforo medida entre 2008 e 2010, foi possível estimar as concentrações de referência que representam o período de 2004 a 2010, com valores de 0,058 mg/L e 0,076 mg/L para P50% e P85%, respectivamente (FIGURA 16). Os valores de P50% e P80% foram, respectivamente, 0,081 mg/L e 0,161 mg/L no período de 2011 a 2020, sendo que este período foi seco e com menores volumes armazenados no açude Aracoiaba conforme ilustrado na Figura 17.

FIGURA 16: Curva de permanência de concentrações de fósforo no reservatório Aracoiaba no período de 2004 a 2010.



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 17: Curva de permanência de concentrações de fósforo no reservatório Aracoiaba no período de 2011 a 2020.



FONTE: SILVA, 2022.

As cargas de fósforo estimadas para o período de 2004 a 2010 e 2011 a 2020 foram de 5,6 ton/ano e 5,0 ton/ano, respectivamente, como mostrado no (TABELA 11). Os resultados indicaram um aporte pouco maior de fósforo no período de 2004 a 2010, que mesmo sendo um período bem mais úmido, a concentração de fósforo afluente média estimada foi bem inferior a do período subsequente.

TABELA 11: Parâmetro de Afluentes médio anual (m³/ano) período de 2004-2010 e 2011-2020 reservatório de Aracoiaba.

Parâmetro	Período	
	2004-2010	2011-2020
Volume afluente médio anual total (m ³ /ano)	74.021.952	31.284.000
Concentração de fósforo média afluente ao reservatório (mg/l)	0,076	0,161
Carga total de fósforo afluente (ton/ano)	5,6	5,0

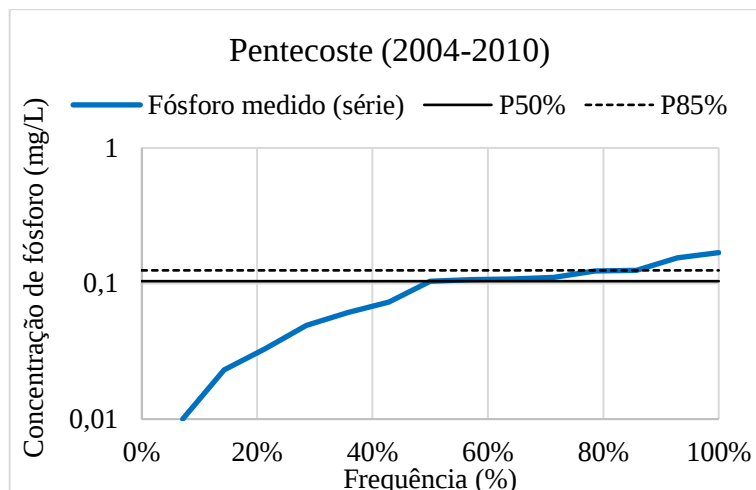
FONTE: SILVA, 2022.

4.3.3. Carga de fósforo afluente ao açude Pentecoste.

Assim como no caso do açude Aracoiaba, admitiram-se os mesmos percentuais de referência para caracterização da concentração média no reservatório (P50%) e na entrada do reservatório (P85%), como uma hipótese simplificada identificados para o açude Acarape do Meio. Da mesma forma que no açude Pentecoste, havia dados de concentração de fósforo medidos nos anos de 2008 a 2010, sendo então considerados como representativos para a estimativa das concentrações de referência no período de 2004 a 2010, com valores de 0,104

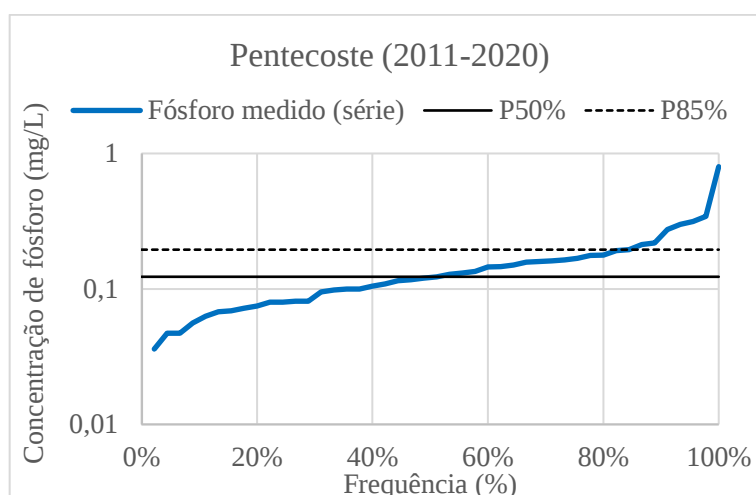
mg/L e 0,125 mg/L (FIGURA 18). No caso do período de 2011 a 2020, sendo que este período foi seco e com menores volumes armazenados no açude Pentecoste os valores de P50% e P80% foram de 0,123 mg/L e 0,195 mg/L, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 19.

FIGURA 18: Curva de permanência de concentrações de fósforo no reservatório Pentecoste no período de 2011 a 2020.



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 19: Curva de permanência de concentrações de fósforo no reservatório Pentecoste no período de 2011 a 2020.



FONTE: SILVA, 2022.

No caso do Açude Pentecoste, as cargas de fósforo estimadas para o período de 2004 a 2010 e 2011 a 2020 foram de 6,6 ton/ano e 57,7 ton/ano, respectivamente, como mostrado no

(TABELA 12). Como se pode observar, há um aporte bem maior de fósforo estimado no período de 2004 a 2010, o que pode ser explicado pela afluência hídrica muito superior neste período (quase 14 vezes superior), carreando muito mais nutrientes para o reservatório, ainda que com menor concentração média de fósforo.

TABELA 12: Parâmetro de Afluentes médio anual (m³/ano) período de 2004-2010 e 2011-2020 reservatório de Pentecoste.

Parâmetro	Período	
	2004-2010	2011-2020
	461.331,86	
Volume afluente médio anual total (m ³ /ano)	4	33.590.000
Concentração de fósforo média afluente ao reservatório (mg/l)	0,125	0,195
Carga total de fósforo afluente (ton/ano)	57,7	6,6

FONTE: SILVA, 2022.

4.4. Calibração do coeficiente de ajuste α da equação para estimativa do coeficiente de sedimentação

4.4.1. Ajuste para o Açude Acarape do Meio.

Para calibração do fator de ajuste α da Equação 18, utilizaram-se as concentrações de referência P50% e P85% obtidas para os períodos de 2004-2010 e 2011-2020, conforme sintetizado na Tabela 13. Como se pode observar, os valores do fator de ajuste não apresentaram diferenças significativas, com valores de 2,72 e 2,55, para os períodos de 2004-2010 e 2011-2020, respectivamente, o que pode ser explicado pelo fato do açude Acarape do Meio não ter sido tão impactado pela estiagem prolongada da última década, como nos demais reservatórios do estado, por apresentar características de região serrana com microclima próprio com continuidade de eventos de chuva e terrenos declivosos que favorecem a propagação do escoamento superficial gerado.

TABELA 13: Parâmetro de ajuste da equação (a) de Afluentes médio anual para obter o coeficiente de sedimentação nos períodos de 2004-2010 e 2011-2020 reservatório de Acarape do Meio.

Período	Parâmetros	Valores
2004-2010	Concentração de fósforo afluyente [Kg/m ³] – P85%	0,000305
	Concentração de fósforo média no reservatório [Kg/m ³] – P50%	0,000134
	Carga de fósforo afluyente - W [Kg]	16.571
	Volume médio do reservatório - V [m ³]	22.391.429
	Tempo de retenção TR [anos]	0,49
	Fator Lâmbda	5,97
	Coeficiente de sedimentação Ks (ano ⁻¹)	3,91
	Concentração de fósforo final reservatório [Kg/m ³]	0,000134
	Fator de ajuste a calibrado	2,72
2011-2020	Concentração de fósforo afluyente medida [Kg/m ³]	0,000253
	Concentração de fósforo média no reservatório [Kg/m ³]	0,000121
	Carga de fósforo afluyente - W [Kg]	4.784
	Volume médio do reservatório - V [m ³]	14.525.000
	Tempo de retenção TR [anos]	1,48
	Fator Lâmbda	2,77
	Coeficiente de sedimentação Ks (ano ⁻¹)	2,10
	Concentração de fósforo final reservatório [Kg/m ³]	0,000121
	Fator de ajuste a calibrado	2,55

FONTE: SILVA, 2022.

4.4.2. Ajuste para o Açude Aracoiaba.

Em relação ao Açude Aracoiaba, o fator de ajuste α também foi calibrado para os períodos de 2004-2010 e 2011-2020, conforme sumarizado na Tabela 14. Para este reservatório, contudo, os valores do fator de ajuste α foram bem discrepantes, 3,70 (2004-2010) e 0,48 (2011-2020), para cada período, indicando que o regime hidrológico pode influenciar significativamente na estimativa do coeficiente de sedimentação do fósforo. Além disso, observou-se que a adoção de um fator de ajuste α constante pode não ser aplicada em cenários com comportamentos hidrológicos distintos. Os resultados também mostram que períodos com maior aporte hídrico e consequentemente maior volume médio armazenado no reservatório tendem a reduzir o tempo de retenção hidráulica TR e o coeficiente de sedimentação do fósforo K_s .

TABELA 14: Parâmetro de ajuste da equação (a) de Afluentes médio anual para obter o coeficiente de sedimentação nos períodos de 2004-2010 e 2011-2020 reservatório de Aracoiaba.

Período	Parâmetros	Valores
2011-2020	Concentração de fósforo afluyente [Kg/m ³] – P85%	0,000161
	Concentração de fósforo média no reservatório [Kg/m ³] – P50%	0,000081
	Carga de fósforo afluyente - W [Kg]	5.037
	Volume médio do reservatório - V [m ³]	66.594.250
	Tempo de retenção TR [anos]	17,74
	Fator Lâmbda	0,93
	Coeficiente de sedimentação Ks (ano ⁻¹)	0,88
	Concentração de fósforo final reservatório [Kg/m ³]	0,000081
	Fator de ajuste a calibrado	3,70
2004-2010	Concentração de fósforo afluyente [Kg/m ³] – P85%	0,000076
	Concentração de fósforo média no reservatório [Kg/m ³] – P50%	0,000058
	Carga de fósforo afluyente - W [Kg]	5.626
	Volume médio do reservatório - V [m ³]	147.120.476
	Tempo de retenção TR [anos]	2,48
	Fator Lâmbda	0,71
	Coeficiente de sedimentação Ks (ano ⁻¹)	0,30
	Concentração de fósforo final reservatório [Kg/m ³]	0,000058
	Fator de ajuste a calibrado	0,48

FONTE: SILVA, 2022.

4.4.3. Ajuste para o Açude Pentecoste.

O fator de ajuste α também foi calibrado para o Açude Pentecoste, considerando as concentrações de fósforo de referência (P50% e P85%) dos períodos de 2004-2010 e 2011-2020, conforme detalhado na Tabela 15. Como se pode observar, o fator de ajuste α foi bem distinto para os períodos considerados, com valores de 3,33 (2011-2020) e 1,13 (2004-2010). Os resultados confirmam também que o regime hidrológico pode alterar os padrões de decaimento de concentração do fósforo no reservatório e sugerem a adoção de fatores de ajuste apropriados para cada regime.

TABELA 15: Parâmetro de ajuste da equação (a) de Afluentes médio anual para obter o coeficiente de sedimentação nos períodos de 2004-2010 e 2011-2020 reservatório de Pentecoste.

Período	Parâmetros	Valores
2011-2020	Concentração de fósforo afluyente [Kg/m ³] – P85%	0,000195
	Concentração de fósforo média no reservatório [Kg/m ³] – P50%	0,000123
	Carga de fósforo afluyente - W [Kg]	6.550
	Volume médio do reservatório - V [m ³]	59.158.083
	Tempo de retenção TR [anos]	15,86
	Fator Lâmbda	0,900
	Coeficiente de sedimentação Ks (ano ⁻¹)	0,837
	Concentração de fósforo final reservatório [Kg/m ³]	0,000123
	Fator de ajuste a calibrado	3,33
2004-2010	Concentração de fósforo afluyente [Kg/m ³] – P85%	0,000125
	Concentração de fósforo média no reservatório [Kg/m ³] – P50%	0,000104
	Carga de fósforo afluyente - W [Kg]	57.666
	Volume médio do reservatório - V [m ³]	231.531.071
	Tempo de retenção TR [anos]	0,816
	Fator Lâmbda	2,471
	Coeficiente de sedimentação Ks (ano ⁻¹)	1,246
	Concentração de fósforo final reservatório [Kg/m ³]	0,000104
	Fator de ajuste a calibrado	1,13

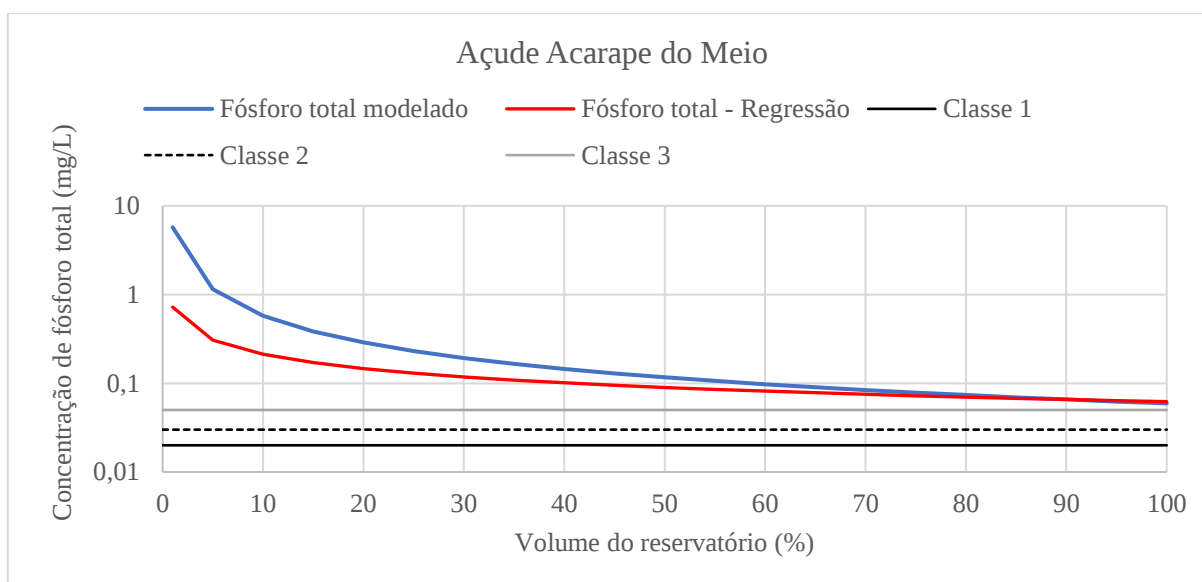
FONTE: SILVA, 2022.

4.5. Modelagem do balanço de fósforo no reservatório

4.5.1. Balanço de fósforo do Açude Acarape do Meio.

Para modelagem da dinâmica de fósforo no reservatório Acarape do Meio, aplicou-se o modelo de balanço de fósforo QUAL-HIDROSED (Peixoto, 2016) para os períodos de 2004-2010 e 2011-2020. No período de 2011 a 2020 foi possível gerar uma equação de regressão dos dados medidos de concentração de fósforo em relação aos volumes armazenados e comparar com os dados simulados pelo QUAL-HIDROSED, conforme ilustrado na Figura 20. Os resultados mostram a capacidade do modelo em capturar o decaimento da concentração de fósforo com o aumento do volume armazenado, apesar de discrepâncias mais evidentes na condição de baixos níveis de água no reservatório, onde ocorre uma marcante discrepância de valores medidos de concentração de fósforo.

FIGURA 20: Curvas de decaimento do fósforo total modelado com o QUAL-HIDROSED e derivado da equação de regressão derivada de dados medidos de concentração de fósforo e volumes armazenados total de regressão no reservatório Acarape do Meio para o período de 2011-2020.



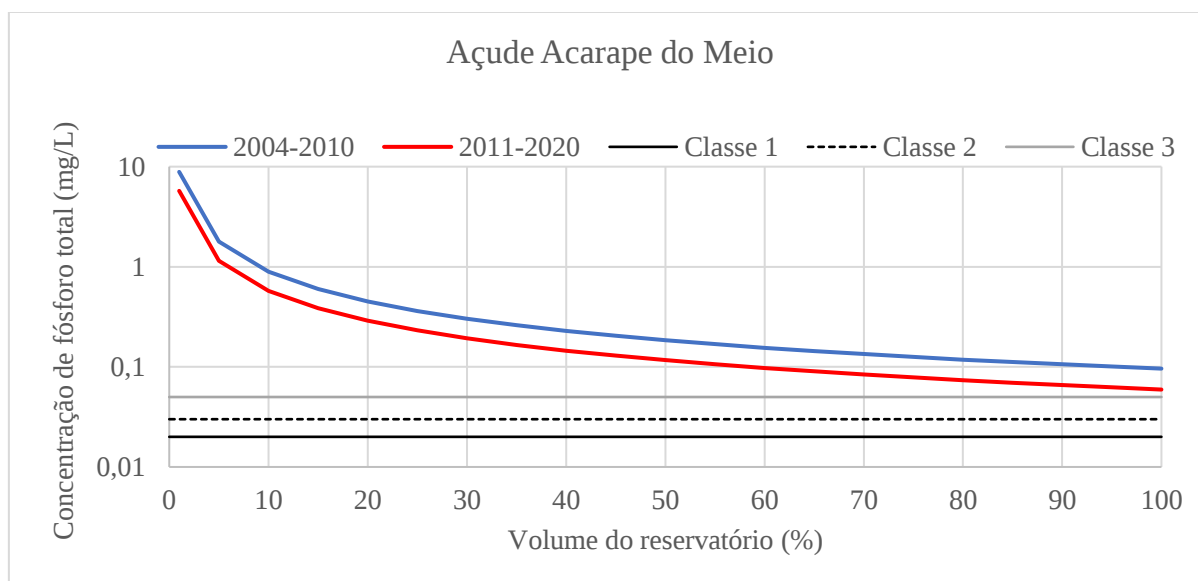
FONTE: SILVA, 2022.

Ainda sobre a Figura 20, é possível constatar que os valores de concentração de fósforo extrapolam os limites de classe 3 da Resolução CONAMA nº 357/2005, indicando baixa

qualidade da água para o parâmetro analisado, o que pode ser resultado do longo período de estiagem e prolongado tempo de retenção hidráulica TR.

Apesar de apresentar dados medidos de concentração de fósforo no reservatório para o período de 2004 a 2010, não foi possível estabelecer uma curva de regressão que cobrisse toda a faixa de volumes armazenados, justamente pelo fato de não haver medições deste parâmetro em situação de estiagem. Contudo, apresenta-se na Figura 21 o comportamento de decaimento da concentração de fósforo com o aumento de volume simulado com o QUAL-HIDROSED. Como se pode observar, os padrões de decaimento da concentração de fósforo no reservatório são relativamente similares no período de 2004-2010 e 2011-2020, embora o primeiro período apresente concentrações maiores resultantes do maior aporte de fósforo no período (16,6 ton/ano contra 4,8 do período subsequente).

FIGURA 21: Curvas de decaimento do fósforo total modelado com o QUAL-HIDROSED no reservatório Acarape do Meio para os períodos de 2004-2010 e 2011-2020.



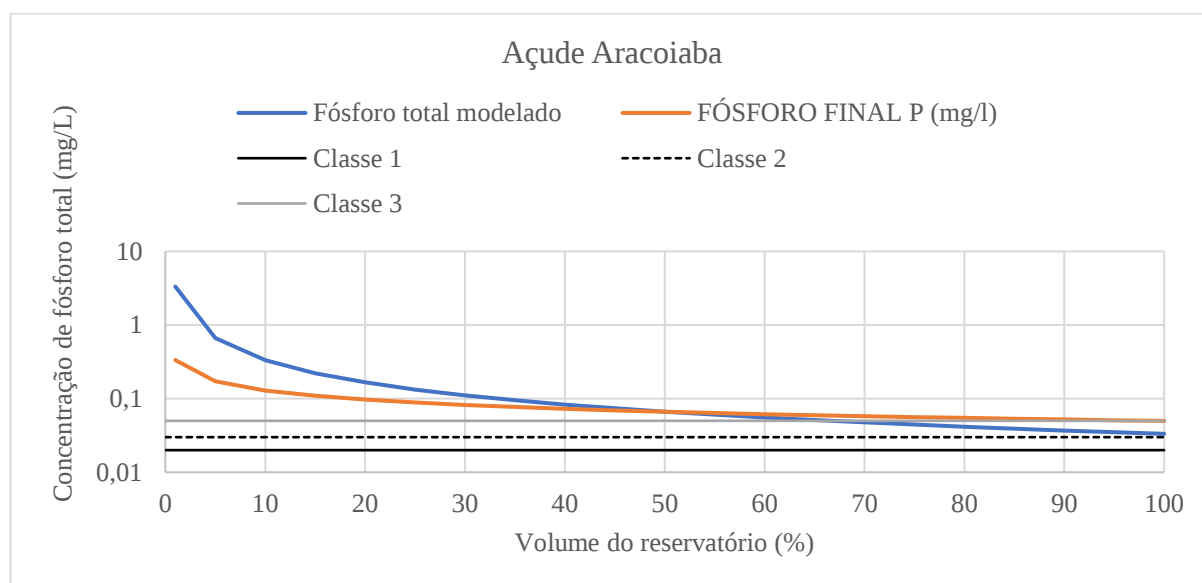
FONTE: SILVA, 2022.

4.5.2. Balanço de fósforo do Açude Aracoiaba.

O modelo QUAL-HIDROSED também foi aplicado para simular a dinâmica de fósforo no Açude Aracoiaba para o período de 2004-2010 e 2011-2020. As concentrações de fósforo simuladas com o QUAL-HIDROSED foram comparadas com aquelas geradas equação de regressão derivada de dados medidos de concentrações de fósforo e volumes armazenados

(FIGURA 22). Apesar de apresentar comportamento similares de decaimento da concentração de fósforo com o aumento do volume do reservatório, é possível perceber que o decaimento do fósforo é mais suave na regressão do que o simulado com o QUAL-HIDROSED, o que pode sugerir que coeficiente de sedimentação do fósforo é ainda menor neste período do que o estimado no item 4.4 no processo de calibração do fator de ajuste α . Observa-se, ainda, que as concentrações de fósforo medidas extrapolam os limites da classe 3 da Resolução CONAMA nº 357/2005 em qualquer condição de volume armazenado, indicando condições precárias de qualidade de água associado ao parâmetro investigado. Já a curva de decaimento de fósforo simulada com o QUAL-HIDROSED apresenta condições de classe 3 para volumes armazenados superiores a 65%.

FIGURA 22: Curvas de decaimento do fósforo total modelado com o QUAL-HIDROSED e derivado da equação de regressão derivada de dados medidos de concentração de fósforo e volumes armazenados total de regressão no reservatório Aracoiaba para o período de 2011-2020.

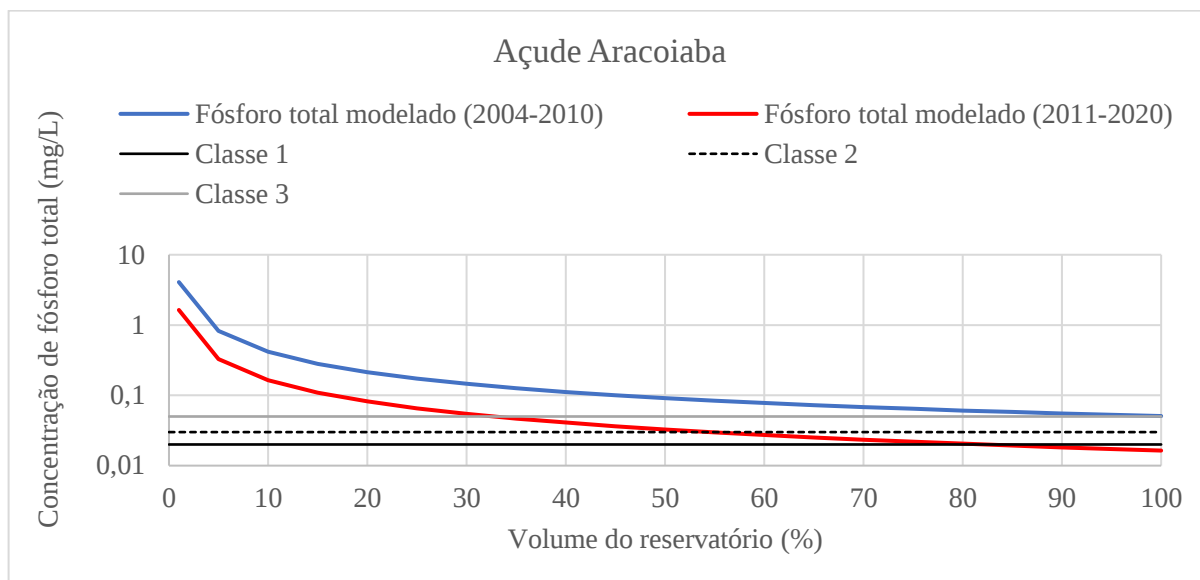


FONTE: SILVA, 2022.

Na ausência de dados para geração de curva de regressão de fósforo e volumes armazenados no período de 2004-2010, apresentam-se apenas as curvas modeladas com o QUAL-HIDROSED neste e no período subsequente (FIGURA 23). Os resultados mostram que a redução do tempo de retenção hidráulica resultante do maior aporte hídrico no período de 2004-2010 permitiu uma boa recuperação da qualidade da água com base no parâmetro fósforo,

atingindo classe 3 com volumes superiores a 32%, classe 2 com volume superior a 50% e classe 1 com volume superior a 80%.

FIGURA 23: Curvas de decaimento do fósforo total modelado com o QUAL-HIDROSED no reservatório Aracoiaba para os períodos de 2004-2010 e 2011-2020.



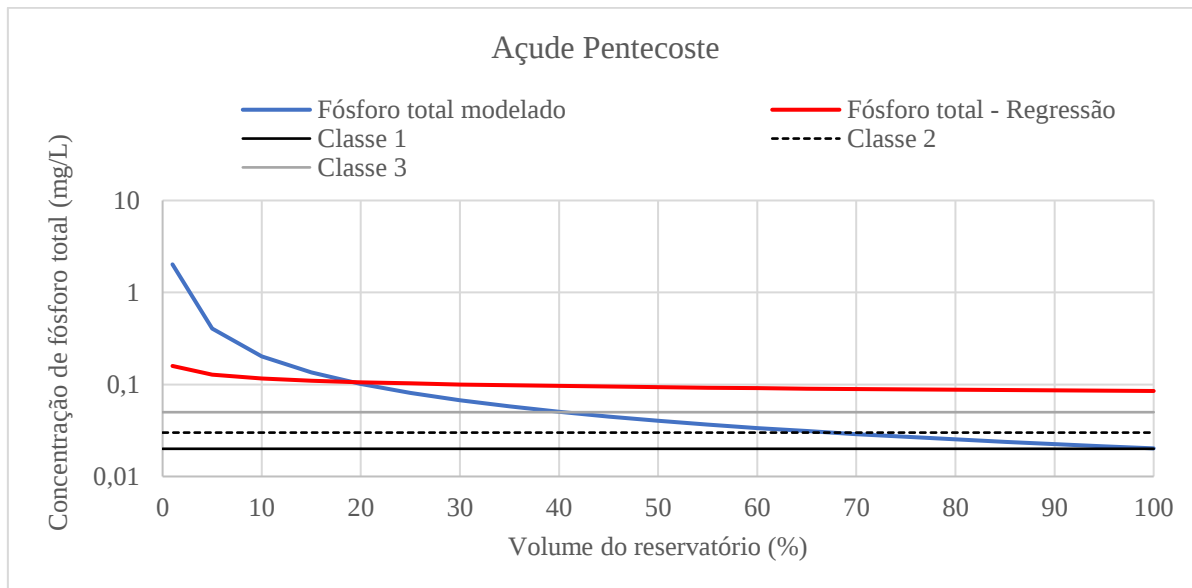
FONTE: SILVA, 2022.

4.5.3. Balanço de fósforo do Açude Pentecoste.

Da mesma forma que nos demais reservatórios estudados, aplicou-se o modelo QUAL-HIDROSED para simular a dinâmica de fósforo no Açude Pentecoste. As concentrações de fósforo geradas para diferentes volumes armazenados foram comparadas com valores obtidos da curva de regressão derivada de dados medidos de fósforo e volumes neste reservatório (FIGURA 24). Como se pode observar, a curva gerada pelo modelo tende a superestimar o decaimento do fósforo com o aumento do volume, o que pode ser resultado do uso de um coeficiente de sedimentação maior do que o de fato ocorreu no período.

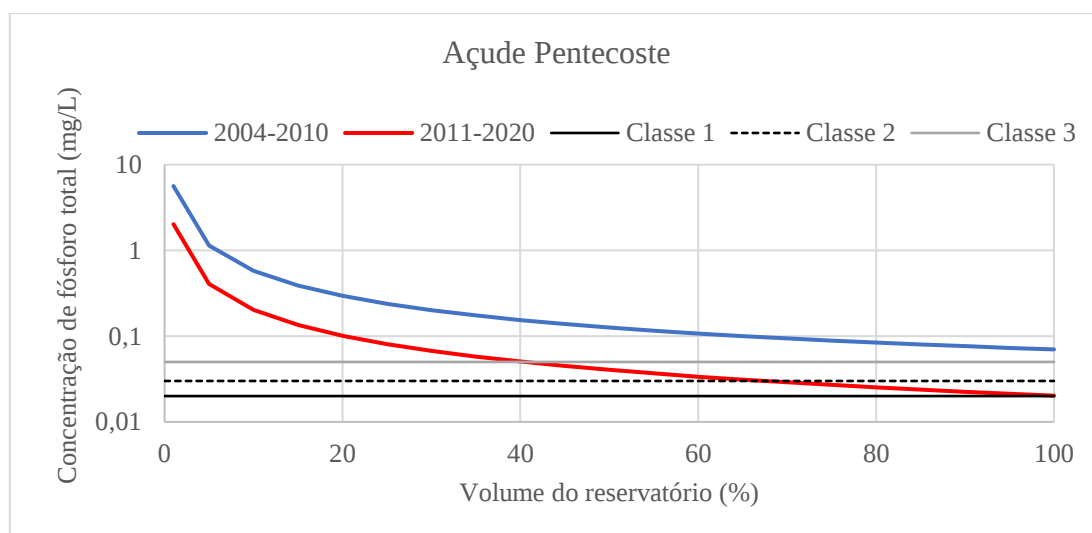
Na análise comparativa das curvas geradas com o modelo QUAL-HIDROSED (FIGURA 25), pode-se perceber que no açude Pentecoste há uma nítida melhora da qualidade da água armazenada no período de 2004-2010, com base no parâmetro fósforo, como resultado da renovação mais frequente da água armazenada neste período em decorrência das grandes afluições detectadas para este reservatório.

FIGURA 24: Curvas de decaimento do fósforo total modelado com o QUAL-HIDROSED e derivado da equação de regressão derivada de dados medidos de concentração de fósforo e volumes armazenados total de regressão no reservatório Pentecoste para o período de 2011-2020.



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 25: Curvas de decaimento do fósforo total modelado com o QUAL-HIDROSED no reservatório Pentecoste para os períodos de 2004-2010 e 2011-2020.



FONTE: SILVA, 2022.

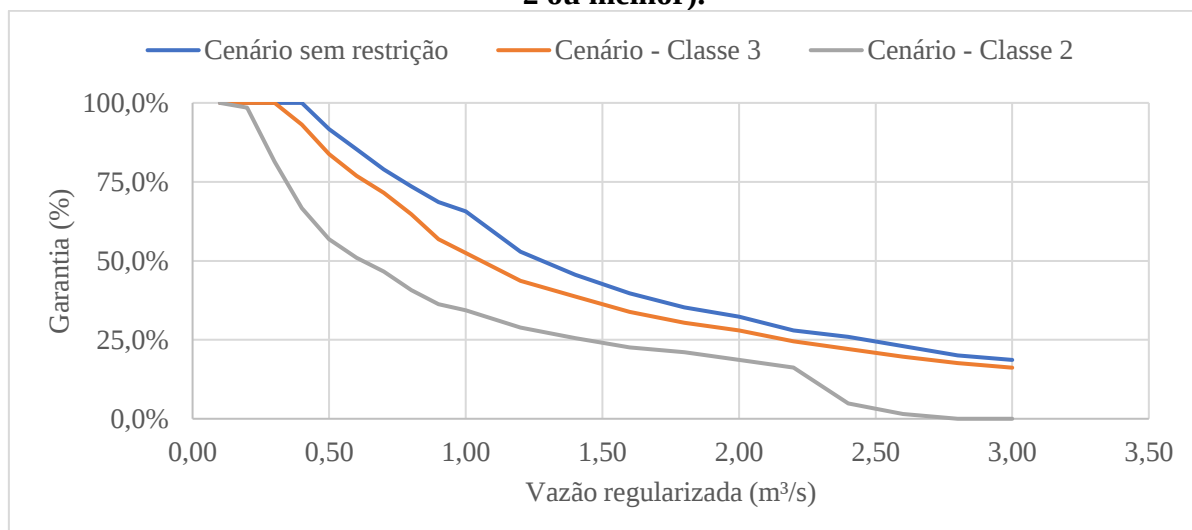
4.6. Análise da disponibilidade hídrica de reservatórios com base em critérios de qualidade

4.6.1. Disponibilidade hídrica do açude Acarape do Meio com base em cenários de qualidade.

Com o objetivo de analisar os impactos da qualidade de água na disponibilidade hídrica de reservatórios superficiais, realizou-se uma simulação considerando três cenários distintos com base em teores do parâmetro fósforo: a) condição de liberação de água para atendimento de demandas sem restrição de qualidade, como é realizado habitualmente nos reservatórios do Estado do Ceará; b) condição de liberação de água desde que a qualidade de água não ultrapasse o limite da classe 3; e c) condição de liberação de água desde que a qualidade de água não ultrapasse o limite da classe 2.

Os cenários com restrição de liberação consideram os volumes obtidos do modelo QUAL-HIDROSED associados a classes 2 e 3 como limitantes para a liberação de vazões regularizadas. O efeito da inclusão de cenários de qualidade na geração das curvas de garantias de cada cenário de qualidade da água liberada pode ser visualizado na Figura 26, exemplarmente para a condição de redução da carga de fósforo afluyente para 20% da carga anual estimada para o período 2004-2010, que pode ser atingida com a adoção técnicas de manejo de efluentes domésticos e industriais como a instalação de Estações de Tratamento de Esgoto e uso controlado de agrotóxicos e fertilizantes.

FIGURA 26: Curva de garantia do reservatório Acarape do Meio considerando cenários de qualidade da água liberada (sem restrições; apenas classe 3 ou melhor; apenas classe 2 ou melhor).



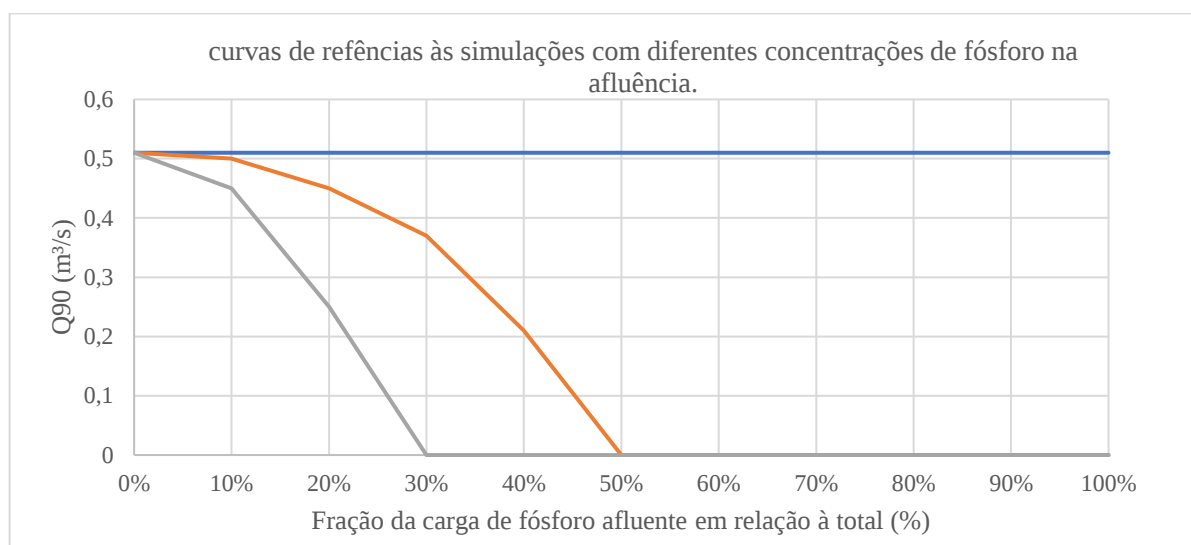
FONTE: SILVA, 2022.

Como se pode observar na Figura 27, ocorreu uma redução significativa da disponibilidade hídrica com a inclusão da qualidade de água na estimativa das vazões

regularizadas associadas a curva de garantia de oferta hídrica. No caso da vazão de referência para atendimento de demandas com 90% de garantia (Q90), o impacto foi bem expressivo, com redução de 520 L/s (cenário sem restrição de qualidade) para 220 L/s no cenário com liberação de água nos limites da classe 2 apenas.

Para ilustrar o efeito da redução da carga de fósforo afluyente no Q90 para os três cenários considerados quanto à restrição da qualidade de água, realizou-se o balanço hídrico considerando diferentes cargas afluentes (frações da carga anual estimada para o período de 2004-2010 de 16,7 ton/ano), conforme ilustrado na Figura 27. Como se pode perceber, cargas de fósforo superiores a 30% (classe 2 – Cenário 3) e 50% (classe 3) da carga anual estimada no período de 2004-2010, já não permitiram a regularização de vazões com 90% de garantia.

FIGURA 27: Curvas de garantia do reservatório Acarape do Meio considerando cenários de qualidade da água liberada (para o Q90 com relação a carga de fósforo afluyente).



FONTE: SILVA, 2022.

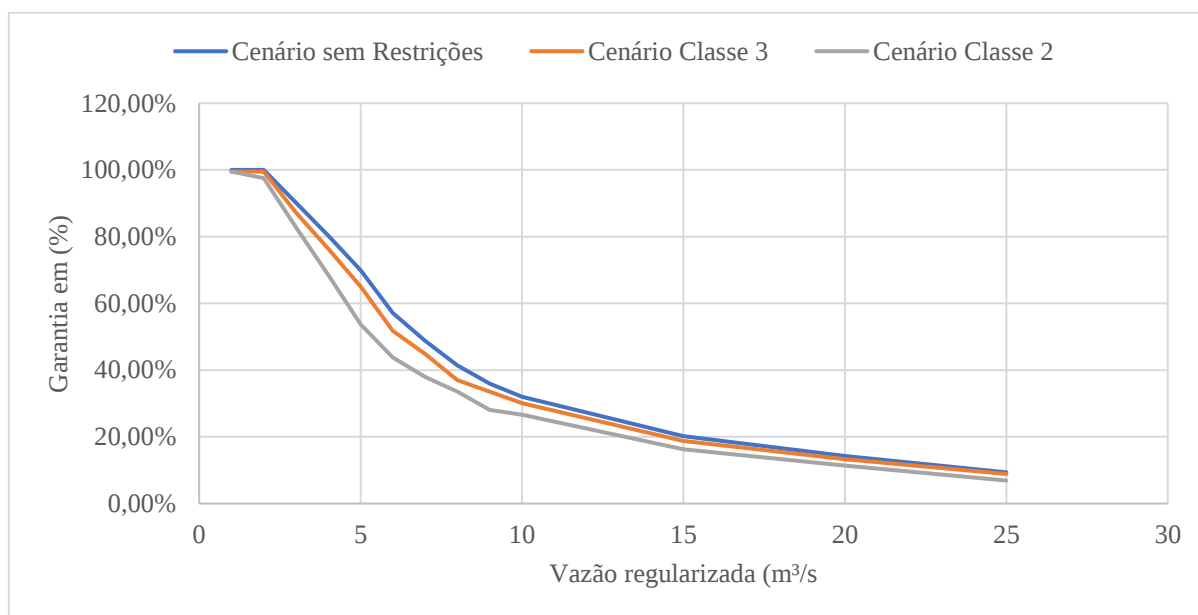
4.6.2. Disponibilidade hídrica do açude Aracoiaba com base em cenários de qualidade.

No caso do açude Aracoiaba, foram geradas as curvas de garantia para os mesmos cenários de qualidade da água liberada definidos para o Açude Acarape do Meio (sem restrição de uso; classe 3; e classe 2), admitindo uma carga afluyente de fósforo correspondente a 20% da média anual estimada para o período 2004-2010 (correspondente a 5,6 ton/ano), conforme ilustrado na Figura 28. As curvas de garantias destes três cenários são pouco discrepantes, o que pode ser justificado pelo baixo aporte de fósforo deste reservatório que é quase três vezes

menor que o Acarape do Meio, embora sua capacidade de acumulação de água seja mais de cinco vezes superior. Os valores de Q90 para os cenários considerados podem variar de 3,07 m³/s (cenário sem restrição de qualidade) a 2,51 m³/s (com restrição de liberação de água de classe 2).

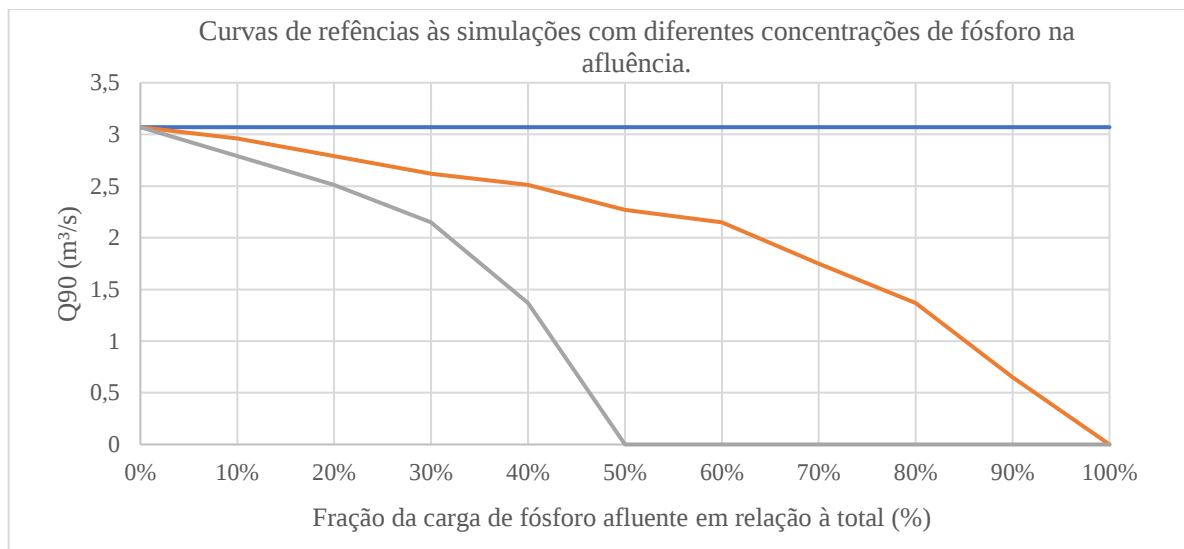
A Figura 29, por sua vez, apresenta o efeito da redução da carga de fósforo afluente no Q90 para os três cenários considerados quanto à restrição da qualidade da água liberada. Como se pode perceber, cargas de fósforo superiores a 50% (cenário com liberação de água de classe 2) da carga anual estimada no período de 2004-2010, já não permite a regularização de vazões com 90% de garantia. No caso de liberação de água de classe 3, o impacto na disponibilidade hídrica foi mais pronunciado na faixa de aporte de fósforo mais próximo do estimado no período 2004-2010.

FIGURA 28: Curva de garantia do reservatório Aracoiaba considerando cenários de qualidade da água liberada (sem restrições; apenas classe 3 ou melhor; apenas classe 2 ou melhor).



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 29: Curva de garantia do reservatório Aracoiaba considerando cenários de qualidade da água liberada (para o Q90 com relação a carga de fósforo afluente).



FONTE: SILVA, 2022.

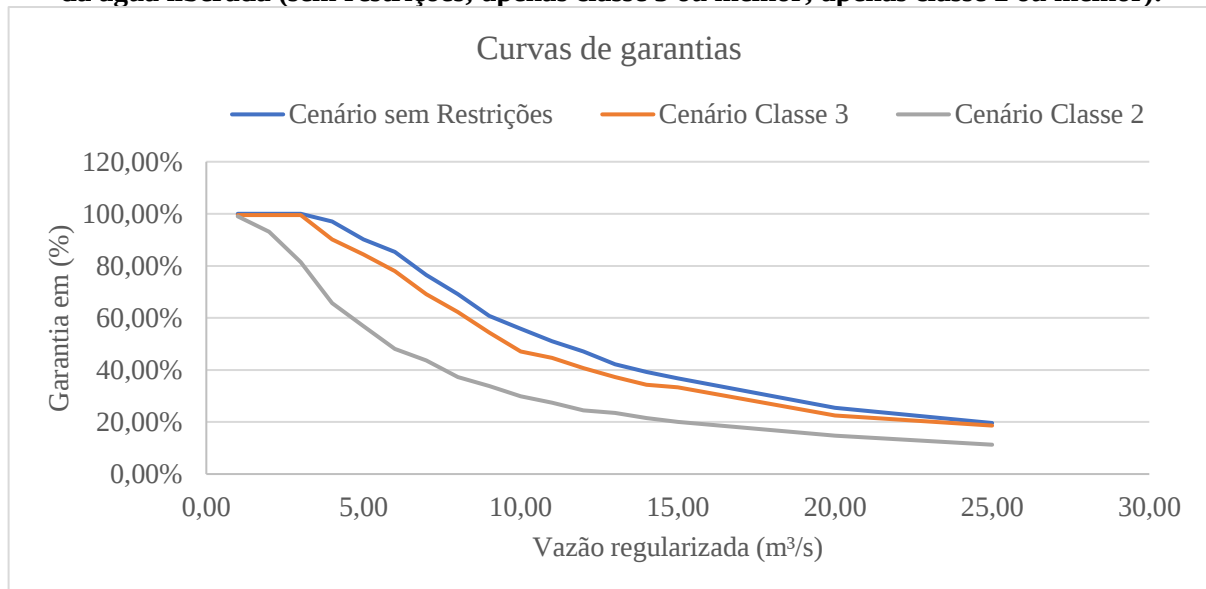
4.6.3. Disponibilidade hídrica do açude Pentecoste com base em cenários de qualidade.

Para simulação da disponibilidade hídrica no Açude Pentecoste foram testados os mesmos cenários de qualidade da água liberada (sem restrição de qualidade; com restrição de classe 3; e com restrição de classe 2) considerando um aporte de fósforo de 20% da carga anual estimada para o período 2004-2010 neste açude (57,7 ton/ano). As curvas de garantia geradas para os três cenários de qualidade estão apresentadas na Figura 30. Pode-se observar na figura que as curvas de garantia para os cenários sem restrição de qualidade e com restrição de classe 3 ficaram bem próximas, o que pode ser explicado pelo fato do reservatório, com este aporte de fósforo (fração de 20% da média anual) atingir condições de classe 3 com volume bem próximo do volume morto, o que permite o aproveitamento da maior parte da água armazenada.

A simulação de aporte de cargas de diferentes ao reservatório Pentecoste também foi simulada considerando frações da carga anual média estimada para o período de 2004-2010, conforme ilustrado na Figura 31. Os resultados permitiram avaliar o impacto no Q90 em cada um dos três cenários de qualidade de água (sem restrição de qualidade; com restrição de qualidade para classe 3; e com restrição de qualidade para classe 2). Conforme observado, quando o aporte de fósforo atinge 30% da carga média anual, já não se consegue mais regularizar vazões com qualidade de água restrita à classe 2 e 90% de garantia, enquanto a

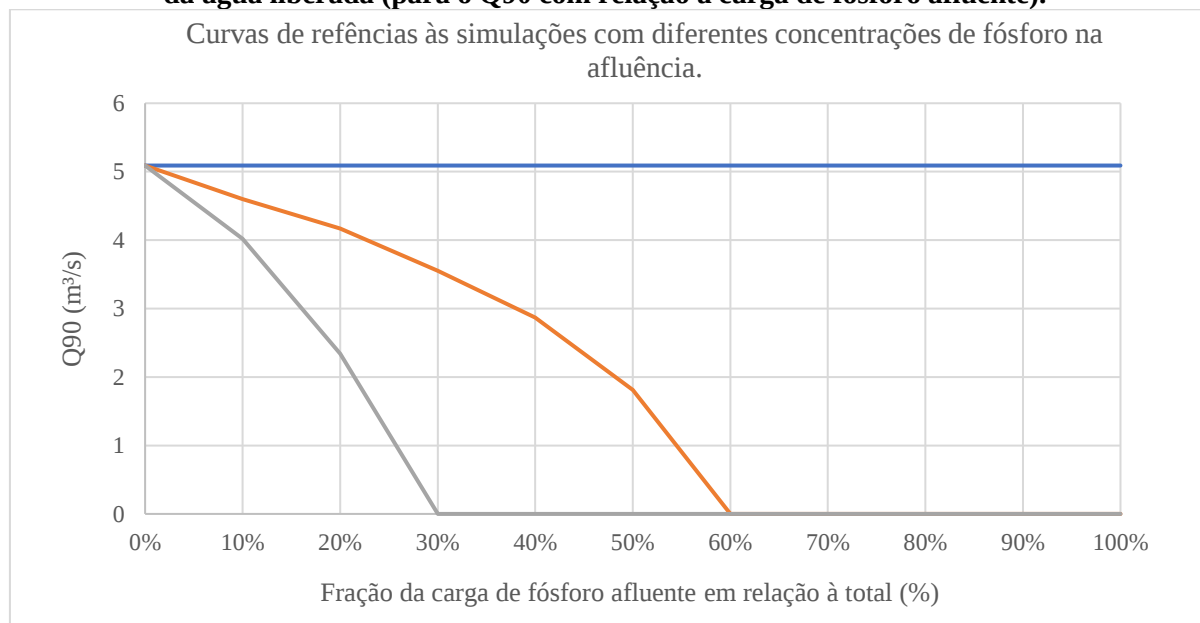
restrição de liberação de água de classe 3 cessa quando o aporte de fósforo corresponde a 60% da carga anual média.

FIGURA 30: Curva de garantia do reservatório Pentecoste considerando cenários de qualidade da água liberada (sem restrições; apenas classe 3 ou melhor; apenas classe 2 ou melhor).



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 31: Curva de garantia do reservatório Pentecoste considerando cenários de qualidade da água liberada (para o Q90 com relação a carga de fósforo afluyente).



FONTE: SILVA, 2022.

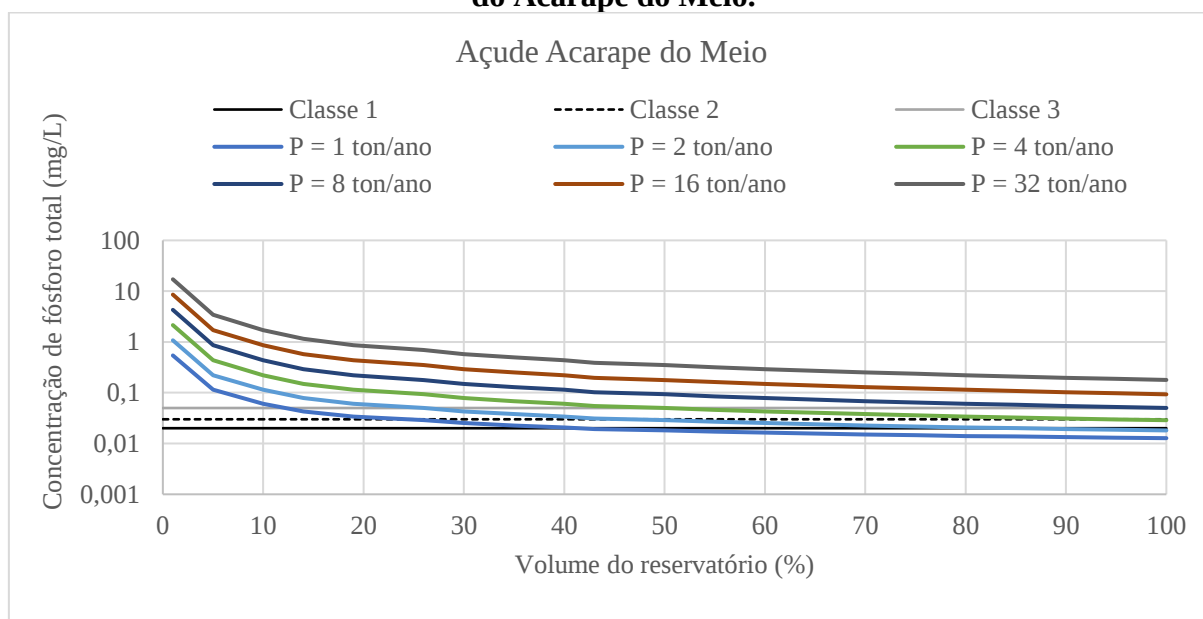
4.7. Análise de sensibilidade para cenários de tempo de detenção hidráulica e de aporte de fósforo

4.7.1. Análise de cenários para o açude Acarape do Meio

Com o intuito de avaliar a sensibilidade do modelo QUAL-HIDROSED a alterações na carga afluyente e no tempo de retenção hidráulica TR variaram-se estes parâmetros de entrada na simulação para o Açude Acarape do Meio. Na análise de sensibilidade do modelo ao aporte de fósforo foram testadas cargas afluentes variando de 1 a 32 ton/ano e tempo de detenção hidráulica constante de 0,49 ano (estimada para o período de 2004-2010), conforme apresentado na Figura 32. Os resultados permitiram avaliar o efeito da redução da carga de fósforo afluyente na qualidade da água para diferentes percentuais de volumes armazenados. Como exemplo, podemos citar que uma carga de fósforo de 2 ton/ano possibilita a obtenção de água de classe 2 para volumes armazenados superiores a 50% e classe 3 para volumes superiores a 30%. Para cargas mais elevadas (acima de 8 ton/ano), o reservatório não consegue permanecer nos limites de classe 2 e 3 para o parâmetro fósforo, mesmo quando se atinge 100% do volume armazenado.

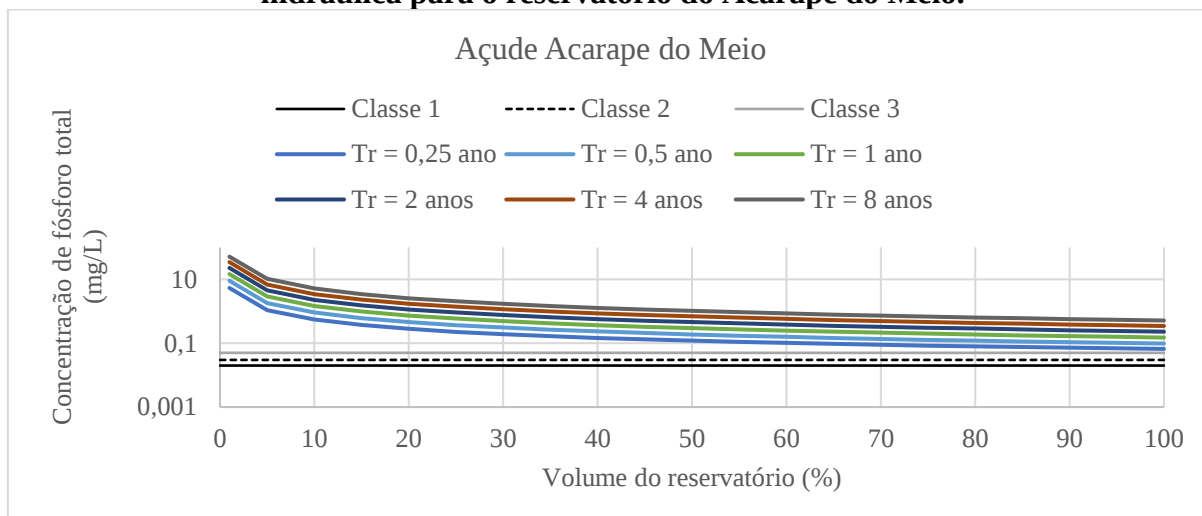
A análise de sensibilidade do modelo QUAL-HIDROSED a variações no tempo de retenção hidráulica TR, com valores entre 0,5 e 8 anos foi realizada para um aporte anual de 16,6 ton/ano (estimada para o período de 2004-2010), como ilustrado na Figura 33. Os resultados indicam um decaimento da concentração de fósforo com o aumento do volume armazenado em todos os cenários com valores distintos de TR, o que pode ser explicado pela elevada aporte de fósforo registrado no período de 2004-2010.

FIGURA 32: Curvas de concentração de fósforo total em (ton/ano) para o reservatório do Acarape do Meio.



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 33: Curvas de concentração de fósforo total (mg/l) por tempo de retenção hidráulica para o reservatório do Acarape do Meio.



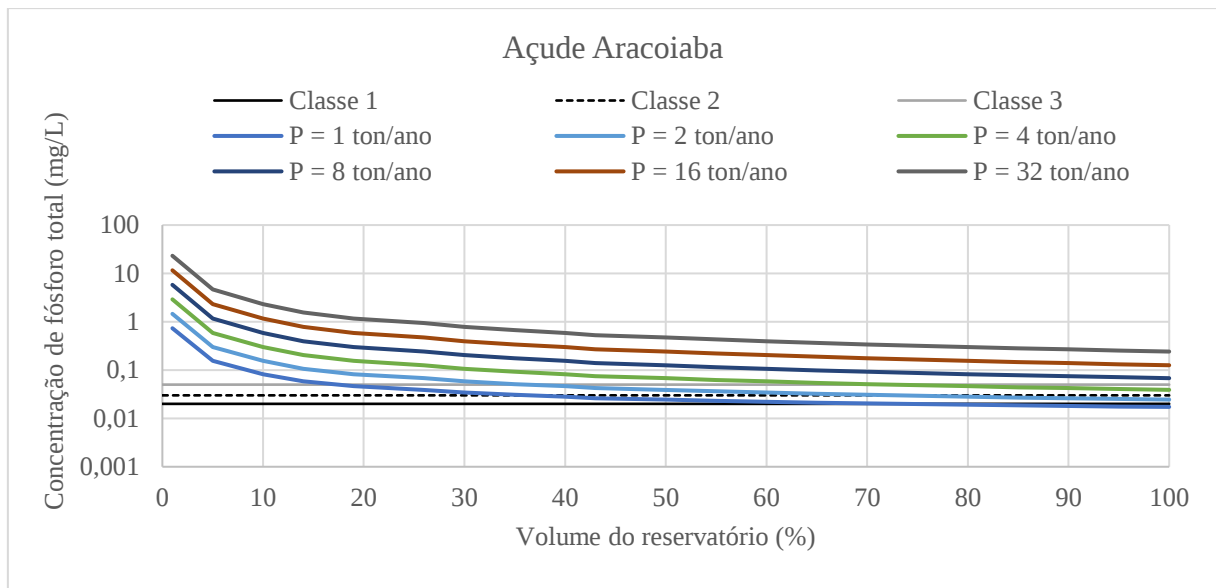
FONTE: SILVA, 2022.

4.7.2. Análise de cenários para o açude Aracoiaba

A sensibilidade do modelo QUAL-HIDROSED a alterações na carga afluyente e no tempo de retenção hidráulica TR também foi testada para o Açude Aracoiaba. Na análise de sensibilidade do modelo ao aporte de fósforo foram testadas as mesmas cargas afluentes variando de 1 a 32 ton/ano e tempo de detenção hidráulica constante de 2,48 anos (estimada para o período de 2004-2010), conforme ilustra a Figura 34. De acordo com os resultados, observa-se apenas cargas inferiores a 5 ton/ano permitem atingir a classe 3 de qualidade e para atingir classe 2 seria necessário um aporte de fósforo não superior a 3 ton/m³.

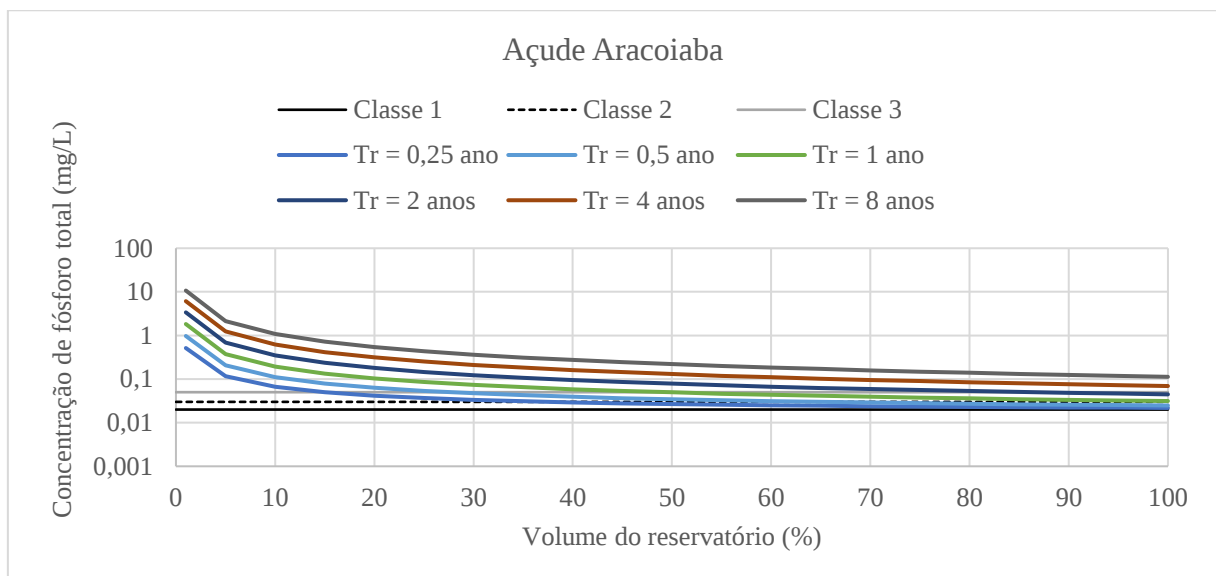
No caso da análise de sensibilidade do modelo QUAL-HIDROSED a variações no tempo de retenção hidráulica TR (0,5 a 8 anos), considerou-se o aporte anual de 5,6 ton/ano (estimada para o período de 2004-2010), conforme apresentado na Figura 35. Os resultados indicaram que valores de TR superiores a 3 anos possibilita a obtenção de classe 3 de qualidade ainda que para baixos volumes armazenados este limite é facilmente extrapolado.

FIGURA 34: Curvas de concentração de fósforo total em (ton/ano) para o reservatório do Aracoiaba.



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 35: Curvas de concentração de fósforo total (mg/l) por tempo de retenção hidráulica para o reservatório do Aracoiaba.



FONTE: SILVA, 2022.

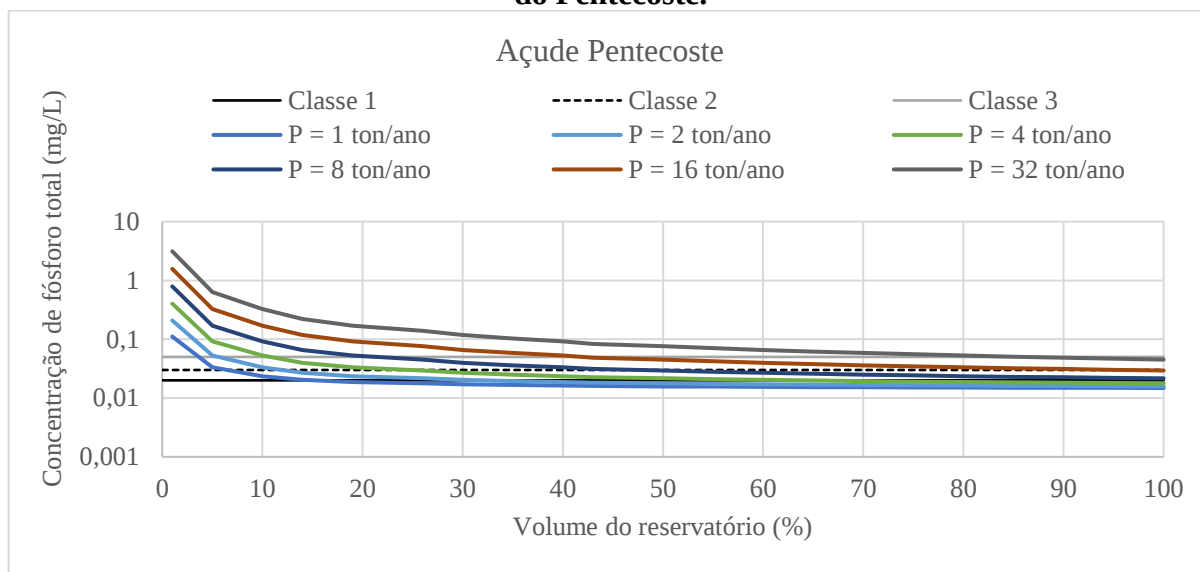
4.7.3. Análise de cenários para o açude Pentecoste

No caso do Açude Pentecoste, a sensibilidade do modelo QUAL-HIDROSED a alterações na carga afluente e no tempo de retenção hidráulica TR também foi analisada. No caso da variável aporte de fósforo a análise de sensibilidade do modelo considerou cargas

afluentes variando de 1 a 32 ton/ano e tempo de detenção hidráulica constante de 0,82 ano (estimada para o período de 2004-2010), como destacado na Figura 36. Os resultados indicaram que o Açude Pentecoste conseguiu atingir o limite de classe 3 em todas as simulações ainda que para maiores volumes armazenados. Já o limite de classe 2 só foi atingido nas simulações para carga afluyente não superiores a 16 ton/ano.

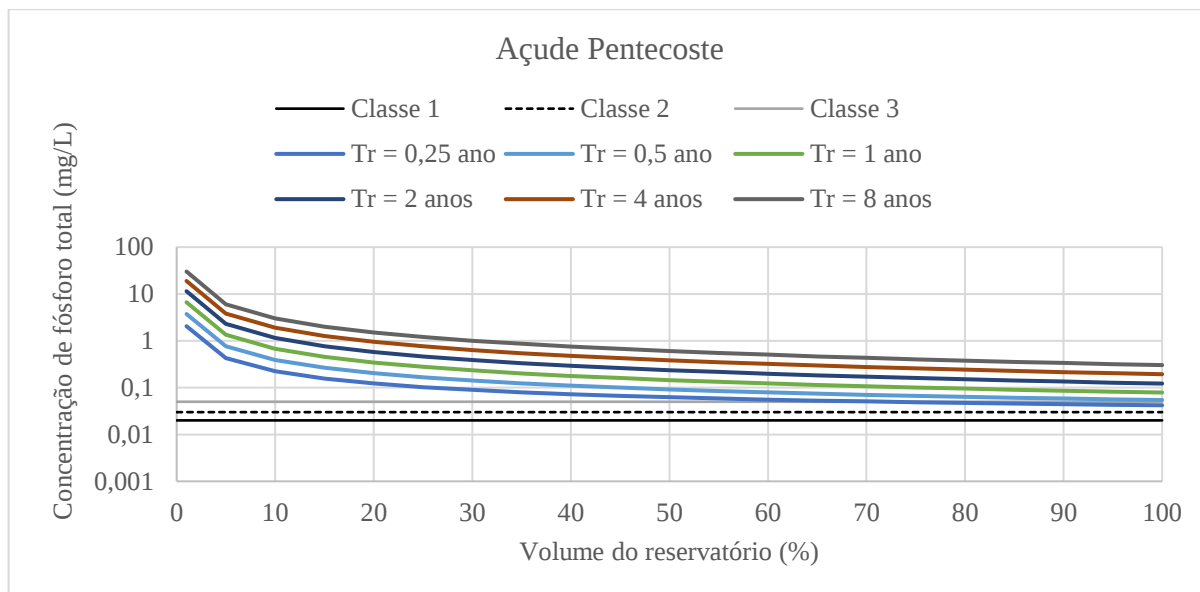
A análise de sensibilidade do modelo QUAL-HIDROSED a variações no tempo de retenção hidráulica TR (0,5 a 8 anos) foi realizada para um aporte anual de 57,7 ton/ano (estimada para o período de 2004-2010), como ilustrado na Figura 37. Como se pode observar, a água armazenada no Açude Pentecoste só permanece dentro do limite de classes 3, quando o tempo de detenção for inferior a seis meses, o que mostra que a carga de fósforo anual afluyente no período de referência (2004-2010) foi muito elevada. Mesmo com renovação frequente da água (curtos tempos de detenção) não se observou concentrações dentro do limite de classe 2, o que confirma o elevado aporte do nutriente.

FIGURA 206: Curvas de concentração de fósforo total em (ton/ano) para o reservatório do Pentecoste.



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 217: Curvas de concentração de fósforo total (mg/l) por tempo de retenção hidráulica para o reservatório Pentecoste.



FONTE: SILVA, 2022.

4.8. Relações entre parâmetros associados ao fósforo para os reservatórios estudados

A relação entre parâmetros associados ao fósforo nos três reservatórios estudados e ainda considerando os regimes hidrológicos distintos dos períodos 2004-2010 e 2011-2020 foi investigada detalhadamente. Os dados de fator de ajuste α , tempo de retenção hidráulica TR e coeficiente de sedimentação do fósforo Ks para cada reservatório e regime hidrológico estão sintetizados na Tabela 16. Os resultados indicaram que os valores do fator de ajuste α podem variar significativamente de 0,48 a 3,70 a depender do regime hidrológico e das condições de decaimento do fósforo no reservatório.

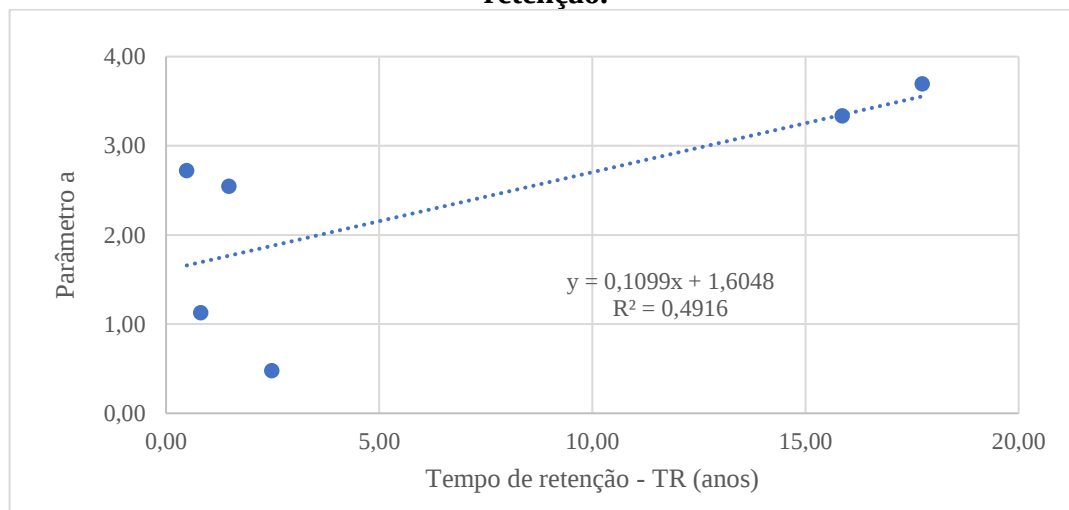
TABELA 16: Parâmetro de Afluentes comparativos médio anual período de 2004-2010 e 2011-2020 dos reservatórios de Acarape do Meio, Aracoiaba e Pentecoste.

Açude (Período)	Fator a	TR (anos)	Coefficiente de sedimentação de referência $K_{s,ref}$ (ano ⁻¹)
Acarape do Meio (2004-2010)	2,72	0,49	1,03
Acarape do Meio (2011-2020)	2,55	1,48	2,10
Aracoiaba (2004-2010)	0,48	2,48	0,30
Aracoiaba (2011-2020)	3,70	17,74	0,88
Pentecoste (2004-2010)	1,13	0,82	1,25
Pentecoste (2011-2020)	3,33	15,86	0,84

FONTE: SILVA, 2022.

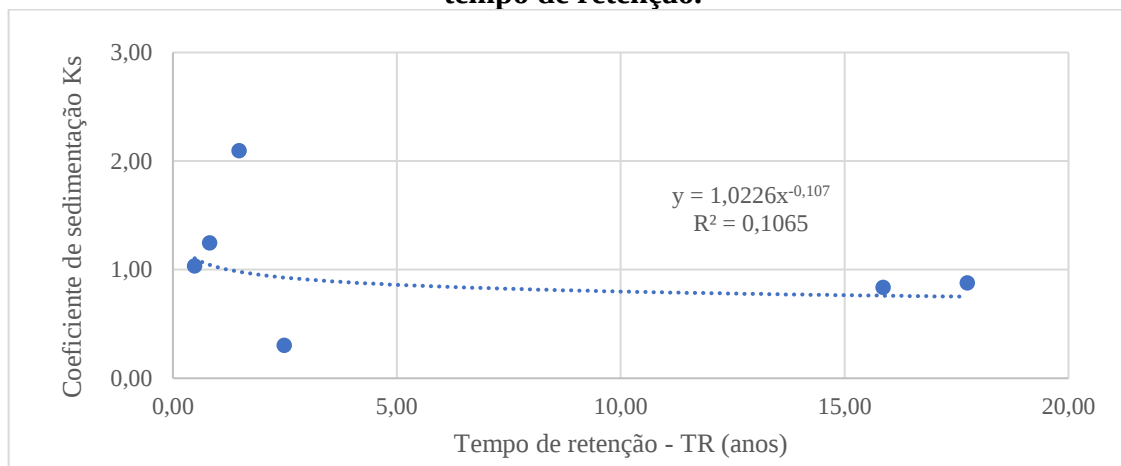
A Figura 38 apresenta uma relação entre o fator de ajuste α e o tempo de retenção hidráulica, indicando uma tendência de crescimento deste parâmetro com o aumento do tempo de retenção hidráulica. No caso da relação do coeficiente de sedimentação do fósforo e o tempo de retenção hidráulica, pode-se perceber a ocorrência de um decaimento potencial de K_s com o aumento de TR como mostrado na Figura 39.

FIGURA 38: Parâmetro de Afluentes comparativos de coeficientes de ajuste e tempo de retenção.



FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 39: Parâmetro de Afluentes comparativos de coeficiente de sedimentos e tempo de retenção.



FONTE: SILVA, 2022.

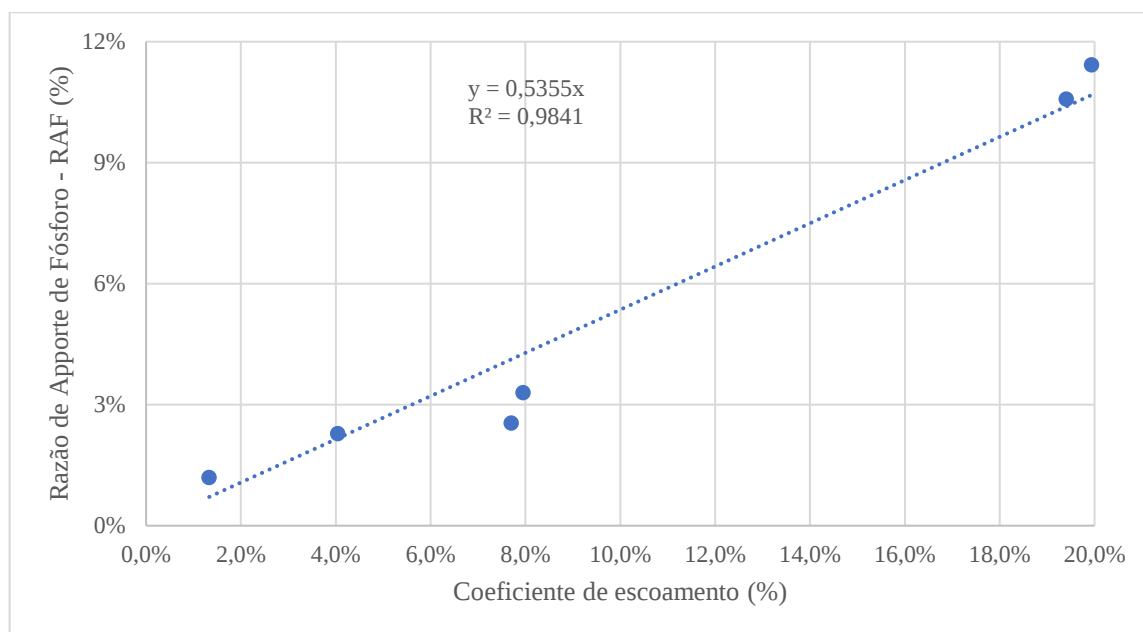
O procedimento metodológico proposto de estimativa da carga de fósforo bruta produzida em uma bacia hidrográfica gera um quantitativo supostamente superior ao que efetivamente aporta ao reservatório localizado no exutório. Neste contexto, definiu-se como Razão de Aporte de Fósforo – RAF, a relação entre a carga de fósforo efetiva estimada com base em dados medidos de concentração de fósforo medida no reservatório e a carga de fósforo bruta estimada com base nas atividades domésticas, agricultura e pecuária apresentada na Seção 3.2. Partindo do pressuposto de que o regime hidrológico da bacia pode influenciar as condições de transporte do fósforo buscou-se relacionar as cargas de fósforo bruta e efetiva com o coeficiente de escoamento superficial da bacia nos períodos de regimes hidrológicos distintos (2004-2010 e 2011-2020) para as bacias hidrográficas dos três reservatórios estudados (Acarape do Meio, Aracoiaba e Pentecoste), conforme ilustrado na Tabela 17 e Figura 40. Os resultados indicaram uma ótima correlação entre a RAF e o coeficiente de escoamento superficial, com R^2 de 0,98. Pode-se perceber uma relação direta em que a RAF correspondente a um fator de 0,54 do coeficiente de escoamento superficial.

TABELA 17: Parâmetro de Afluentes comparativos de razão de aporte de fósforo (%) período de 2004-2010 e 2011-2020.

Açude (Período)	Coefficiente de escoamento (%)	Carga bruta (ton/ano)	Carga afluyente (ton/ano)	Razão de Aporte de Fósforo (%)
Acarape do Meio (2004-2010)	19,9%	145,0	16,6	11,4%
Acarape do Meio (2011-2020)	7,9%	145,0	4,8	3,3%
Aracoiaba (2004-2010)	7,7%	220,5	5,6	2,6%
Aracoiaba (2011-2020)	4,0%	220,5	5,0	2,3%
Pentecoste (2004-2010)	19,4%	545,1	57,7	10,6%
Pentecoste (2011-2020)	1,3%	545,1	6,6	1,2%

FONTE: SILVA, 2022.

FIGURA 40: Parâmetro de Afluentes comparativos de razão de aporte de fósforo (RAF) por coeficiente de escoamento.



FONTE: SILVA, 2022.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa quantifica a disponibilidade hídrica com base em critérios de qualidade nas bacias hidrográficas dos Reservatórios Acarape do Meio, Aracoiaba e Pentecoste pertencentes à bacia metropolitana de Fortaleza.

A coleta de dados censitários de demografia, agricultura e pecuária foi uma estratégia simples e eficaz para estimativa da carga de fósforo afluyente aos reservatórios estudados. A

metodologia proposta permitiu estimar o potencial de geração de carga bruta de fósforo anual por unidade de área nas bacias hidrográfica estudadas, com destaque para o Acarape do Meio (68,4 ton/ha/ano) com quase o dobro da carga do Aracoiaba (37,3 ton/ha/ano) e mais que o quádruplo da carga do Pentecoste (16,7 ton/ha/ano).

Simulações com o modelo QUAL-HIDROSED permitiram modelar a concentração de fósforo nos reservatórios estudados, com marcante extrapolação dos limites propostos pelo CONAMA para classes 2 e 3, com maior frequência para as cargas de fósforo medidas em período úmido (2004-2010) do que para o seco (2011-2020), ainda que neste último a melhoria da qualidade só ocorre quando os reservatórios atingem maiores volumes armazenados. O modelo QUAL-HIDROSED revelou-se eficiente, e de fácil manuseio, para estimativa do decaimento da concentração de fósforo nos reservatórios em função dos volumes armazenados, corroborando com a dinâmica registrada em período com disponibilidade de dados medidos (2011-2020).

Análises de regressão realizadas, justificaram a introdução do conceito de Razão de Aporte de Fósforo – RAF, estimado como uma função do coeficiente de escoamento superficial com excelente ajuste. Ademais, verificou-se, com base nos resultados do método de mistura completa aplicado, que a relação entre coeficiente de decaimento do fósforo K_s e o tempo de retenção hidráulica TR apresenta coeficientes de ajustes distintos, a depender do regime hidrológico nos reservatórios estudados.

Esta pesquisa também analisou o efeito de inclusão de restrições de qualidade de água quanto ao teor de fósforo na disponibilidade hídrica dos reservatórios estudados (Acarape do Meio, Aracoiaba e Pentecoste). Os resultados permitiram a construção de curvas de garantia para diferentes cenários, indicando, por exemplo, quando o Açude Pentecoste atingir o aporte de fósforo de 30% da carga média anual, já não se consegue mais regularizar vazões com qualidade de água restrita à classe 2 e 90% de garantia, enquanto a restrição de liberação de água de classe 3 cessa quando o aporte de fósforo corresponde a 60% da carga anual média, portanto a vazão regularizada com 90% de garantia (Q90) pode sofrer alterações significativas a depender do critério de qualidade para liberação da água e do aporte de fósforo no período.

Esta estratégia de inclusão da qualidade de água na análise da disponibilidade hídrica dos reservatórios estratégicos do Estado do Ceará monitorados pela COGERH, pode ser uma técnica usual com vistas a identificação de açudes com restrições de uso pela qualidade da água, ainda que tenha quantidade suficiente.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Moisés da Silva. **O papel dos comitês das bacias dos afluentes dos rios mogiguacu e padro (MG): uma análise da efetivação da gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos.** Dissertação (mestrado em ciências e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas. Poços de Caldas/MG, 2014.
- ALVES, A, B. **avaliação da qualidade democrática do processo de elaboração do plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio doce.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas, programa de pós-graduação em política social. Vitória, 2015.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **A questão da Água no Nordeste.** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. – Brasília, DF: CGEE, 2012.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura Recursos Hídricos no Brasil.** Outorga de direito de uso de recursos hídricos. Brasília – DF. 2019.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Cuidando das águas:** soluções para melhorar a qualidade dos recursos hídricos / Agência Nacional de Águas; Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. Brasília 2011.
- ANDRADE, F. P. P. **Diagnóstico do Uso de Fertilizantes para o Incremento da Produtividade Agrícola no Ceará.** Governo do Estado do Ceará. Secretarias de Indústria e Comércio (SIC), Agricultura e Reforma Agrária (SEARA) e Planejamento e Coordenação (SEPLAN) - Fortaleza, 1991.
- ARAÚJO, B. A. M. de. **Alocação de água no Ceará: diagnóstico e desafios.** 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Engenharia Hidráulica e Ambiental) -Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- ARAUJO, G. M. ; LIMA NETO, I. E. ; BECKER, H. . Phosphorus dynamics in a highly polluted urban drainage channel-shallow reservoir system in the Brazilian semiarid. *ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (ONLINE)*, v. 91, p. 1-8, 2019.
- ARAÚJO, S. M. S. de. A região semiárida do nordeste do Brasil: questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. Paraíba. **Revista Científica da FASETE.** Ano 5. n. 5. p. 91-98. dez. 2011
- ARRUDA, Nailza Oliveira de. **Controle do aporte de fósforo no reservatório de Itaparica localizado no semiárido nordestino.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Recife, 2015.
- BATISTA. A.A. **Seasonal and spatial variation of the trophic state index of the Orós reservoir, Ceará, Brazil** Revista Agro@mbiente On-line, v. 8, n. 1, p. 39-48, janeiro-abril, 2014.
- BOYD, C. E (1971). **The limnological role of aquatic macrophytes and their relationship to reservoir management.** Washington American Fisheries Society Special Publication 8: 153-166p.

BRASIL, P. P. **Proposta de uso racional da água de reservatório não-estratégico para a agricultura irrigada**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências agrária, Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola. Fortaleza, 2016.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Implementação do enquadramento em bacias hidrográficas no Brasil**; Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos – Snirh no Brasil: arquitetura computacional e sistêmica / Agência

BRASIL. **Entendendo o saneamento básico no Brasil**. Manual do Saneamento Básico Ambiental no Brasil e sua importância socioeconômica. Instituto Trata Brasil, 2012.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano/ Ministério da Saúde**, Secretaria de Vigilância em Saúde. Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 212 p

BRASIL. Ministério da Saúde.Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS /Ministério da Saúde**, Fundação Nacional de Saúde. Brasília : Funasa, 2014. 112 p.

CAMPOS, J. N. B. Conflitos por águas e alocação negociada: o caso do vale dos Carás no Ceará. **Revista de Administração Pública - RAP**, 0043-7612, nov./dez. 2011

CAMPOS, J. N. B.; LIMA NETO, I. E.; STUDART, T. M. C.; NASCIMENTO, L. S. V. Trade-off between reservoir yield and evaporation losses as a function of lake morphology in semi-arid Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 88, 1113-1126. 2016

CARNEIRO, F. et al. **Proposta de enquadramento de corpos hídricos em classes de uso na bacia hidrográfica do rio Piranga utilizando geoprocessamento**. Revista Brasileira de Geografia Física. v.13, n.05, 2020.

CARVALHO, R. C. **Gestão dos recursos hídricos**: conflito e negociação na questão das águas transpostas da bacia do Paraíba do Sul. Tese (doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CEARÁ, **Educação Ambiental para a Conservação de Nascentes**. Secretaria do Meio Ambiente do Estado do Ceará. Fortaleza, 2016.

CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (SRH). **Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos e Meteorológicos do Ceará**. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/obras/index.asp>. Acesso: 23 abr. 2021.

CEARÁ. **Secretaria dos Recursos Hídricos**. Plano de Gerenciamento das Bacias Hidrográficas Metropolitanas. Fortaleza, 2010.

CETESB (São Paulo). **Qualidade das águas superficiais no estado de São Paulo 2014**. São Paulo: CETESB, 2015.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**: Qualidade das águas interiores. São Paulo, 2010.

CID, D. A. C. **Alocação intertemporal e múltiplos usuários:** estudo de caso sistema Jaguaribe- Metropolitana. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos. Fortaleza, 2017.

COGERH. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (2021) **Alocação de água negociada.** Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/comite-do-curu-define-vazoes-de-acudes-da-bacia-para-2020-2/> Acesso em 29 Jul. 2021.

COGERH. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (2021) **Monitoramento Quantitativo e Qualitativo dos Recursos Hídricos.** Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/reservatorios/qualidade/eutrofizacao> Acesso em 17 mar. 2021.

COGERH. SRH/VBA Consultores. **Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas.** Fortaleza, 2001. Acesso 26/04/2021; <http://projects.mcrit.com/ceara/attachments/article/144/Fase%20I%20Tomo%20I%20Textos.pdf>.

DELMIRO, Maria & Lima Neto, Iran. **Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs.** Environmental Science and Pollution Research. 10.1007/s11356-021-16251-w, 2021.

Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos,** 2006.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de Limnologia.** 2º ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 602 p. 1998.

ESTEVES, F.A. **Fundamentos de Limnologia.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2011.

FERREIRA, K. C. D. **Qualidade de Água em um Reservatório na Região semiárida.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, centro de Ciências, Departamento de Biologia Programa de Pós- Graduação em ecologia e Recursos Naturais, Fortaleza, 2014.

FIGUEIRÊDO, M. C. B.; TEIXEIRA, A. S.; ARAÚJO, L. F. P.; ROSA, M.F.; PAULINO, W. D.; MOTA, S.; ARAÚJO, J. C. **Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização.** Engenharia Sanitária e Ambiental, 12, 399-409. 2007.

FORTES, A. C. C. **Índice de qualidade de água para consumo humano:** uma proposta de ferramenta para a vigilância da qualidade da água comunicar os resultados à sociedade. Dissertação (mestrado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Rio de Janeiro, 2018.

FREIRE, L. L. ; COSTA, A. C. ; LIMA NETO, I. E. . **Spatio-temporal patterns of river water quality in the semiarid Northeastern Brazil.** WATER AIR AND SOIL POLLUTION, v. 232, p. 452, 2021.

FREITAS, Marcos Airton de Souza. **Que Venha a Seca:** modelos para gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas. Rio de Janeiro: CBJE. 2010.

GALLINA, K. L. **Enquadramento de corpos de água em pequenas e micros bacias rurais de base agrícola familiar: subsídios à elaboração da face diagnóstica.** Dissertação

(mestrado). Universidade Federal de Espírito Santos, centro tecnológico, programa de pós-graduação em energias ambientais. Vitória, ES, 2014.

GONDIM, R.B. **Avaliação de impacto do reuso de águas na alocação dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências agrária, Programa de pós-graduação em Engenharia Agrícola. Fortaleza, 2018.

IAWQ. Activated sludge model. **International Association on Water Quality**. [s.l]: IAWQ Scientific and Technical Reports, [s.v], n.2, 1995.

IBGE, **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística** <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/downloads-estatisticas.html>. Acesso em 05 de janeiro de 2021.

IPECE, Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Perfil Básico Municipal**, https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Pentecoste_2009. Acesso em 29 de julho de 2021.

KUCHINSKI, V. **Modelagem do estado trófico no reservatório do vacacaí**, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, centro de tecnologia, programa de pós-graduação em engenharia civil, RS, 2016.

LACERDA, L. D. de; SENA, D. L. de. **Estimativas de Cargas de Nitrogênio, Fósforo e Metais Pesados de Interesse Ambiental para as Bacias Inferiores do Litoral do Estado do Ceará**. Zoneamento Ecológico-Econômico da Zona Costeira do Estado do Ceará. SEMACE, Fortaleza, 2005.

LIMA NETO, IRAN E.; MEDEIROS, PEDRO H.A.; COSTA, ALEXANDRE C.; WIEGAND, MARIO C.; BARROS, ANTÔNIO RICARDO M.; BARROS, MÁRIO U.G. **Assessment of phosphorus loading dynamics in a tropical reservoir with high seasonal water level changes**. SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT, v. 815, p. 152875, 2022.

LIMA, B. P. **Enquadramento de corpos d'água no nordeste brasileiro como instrumento de gestão e sustentabilidade ambiental: o caso da bacia hidrográfica Acaraú do meio – CE**. Fortaleza: 2016 Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceará – UFC.

LIRA, C. C. S.; Medeiros, P. H. A.; LIMA NETO, I. E. **Modelling the impact of sediment management on the trophic state of a tropical reservoir with high water storage variations**. ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (ONLINE), v. 92, p. e20181169, 2020.

LOPES, A. V.; FREITAS, M. A. de S. **A alocação de água como instrumento de gestão e recursos hídricos: experiências brasileiras**. REGA – Vol. 4, no. 1, p. 5-28, jan./jun. 2007. Agência Nacional de Águas – ANA. Brasília. DF.

LUIZ, Josiane Paula da. **A governança dos recursos hídricos no Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica Taquari-Antas**. 2017. Monografia (Doutorado) – Curso de Ambiente e Desenvolvimento, Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 24 abr. 2017

MALAVOLTA, E.; DANTAS, J. P. Nutrição e adubação do milho. In: PATERNIANI, E. **Melhoramento e Produção do Milho no Brasil**. 2. ed., Fundação Cargill, São Paulo, 1980. p: 429-479.

MOREIRA, D. S. **O Comitê de bacia como instrumento de democratização dos recursos hídricos**. Um estudo de caso: a atuação do Comitê da Bacia do Acaraú – Ceará. 2014. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2009.

NASCIMENTO, E. P. Trajetória da sustentabilidade: do ambiental ao social, do social ao econômico. **Estudos Avançados**, v. 26, n. 74, p. 51-74, 2012.

NOGUEIRA, S. F. **Balanço de nutrientes e avaliação de parâmetros biogeoquímicos em áreas alagadas construídas para o tratamento de esgoto**. Dissertação (mestrado) Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Piracicaba, 2003.

OLIVEIRA FILHO, R. L. **Metodologia de elaboração de base de informações para alocação negociada de água**: aplicação no Açude Arneiroz. Dissertação (Mestrado profissional) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos, Fortaleza, 2013.

PACHECO, C. H. A.; LIMA NETO, I. E. Effect of Artificial Circulation on the Removal Kinetics of Cyanobacteria in a Hypereutrophic Shallow Lake. **Journal of Environmental Engineering**, 143,06017010, 2017.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Recursos Hídricos, Fortaleza, 2016.

RABELO, U. P. ; DIETRICH, J. ; COSTA, A. C. ; SIMSHAUSER, M. N. ; SCHOLZ, F. E. ; NGUYEN, T. V. ; LIMA NETO, I. E. . **Representing a dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model**. JOURNAL OF HYDROLOGY, v. 127103, p. 127103, 2021.

RAULINO, J. B. ; SILVEIRA, C. S. ; LIMA NETO, I. E. . **Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality of large semiarid reservoirs in Brazil**. Hydrological Sciences Journal, v. 67, p. ., 2021.

ROA-GÁRCIA, M. C. Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world. **Water Alternatives**. v. 7, n.2, p. 298-319, 2014.

ROCHA, M. J. D. ; LIMA NETO, I. E. . **Internal phosphorus loading and its driving factors in the dry period of Brazilian semiarid reservoirs**. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, v. 312, p. 114983, 2022.

ROCHA, M. J. D. ; LIMA NETO, I. E. . **Modeling flow-related phosphorus inputs to tropical semiarid reservoirs**. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, v. 295, p. 113123, 2021a.

ROCHA, M. J. D. ; LIMA NETO, I. E. . **Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs**. Environmental Science and Pollution Research, p. 1, 2021b.

ROCHA, M. J. D. Relationship between total phosphorus and affluent flow in main rural reservoirs of the state of Ceará in brazilian semiarid. **Revista Aidis de Ingeniería y Ciencias Ambientales**: Investigación, desarrollo y práctica. Semiarid, Vol. 13, No.3, 715-730 6 de diciembre de 2020.

ROCHA, M.J.D; NETO, I.E.L. Modeling flow-related phosphorus inputs to tropical semiarid reservoirs. Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Federal University of Ceará, Block 713, **Journal of Environmental Management** – 1st Floor – Center of Technology, Fortaleza, Ceará, Brazil, 2021.

SALATI, E.; LEMOS, H. M. de; SALATI, E. Água e o desenvolvimento sustentável. In: REBOUÇAS, A. da C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. (Ed.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: USP/ABC, Escrituras Editoras, 1999. cap. 2, p. 3962

SÃO PAULO (Estado). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de qualidade das águas interiores do Estado de São Paulo 2002**. São Paulo: CETESB, 2003 (Série Relatórios).

SILVA, S.M.O.; SOUZA FILHO, F.A.; AQUINO, S.H.S. (2015). Alocação de custos e a cobrança pelo uso da água no Estado do Ceará. **REGA**, v. 12, n. 2, p. 47-59.

SILVA, Samiria Maria Oliveira da. **Instrumentos econômicos de gerenciamento do risco climático na alocação de recursos hídricos**: seguro e transferência de risco. 2011. 23 f. Projeto de Pesquisa (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

SILVA, Ubirajara Patrício A; COSTA, Antonio M.; LIMA, Gianni Peixoto B; LIMA, Berthyer P. A experiência da alocação negociada de água nos vales do Jaguaribe e Banabuiú – Ceará. **VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2005. Petrolina. PE

SILVA. S. M. O. Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do Sistema Jaguaribe–Metropolitano. **Eng Sanit Ambient**, v.22 n.4 | jul/ago 2017

SORNBERGER, Neimar Afonso. **O papel do Comitê da Bacia Hidrográfica do Paraná 3 na gestão e conservação da água**. 2015. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Rural Sustentável) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Marechal Cândido Rondon, 2015.

SOUZA; et al. **A Importância da Qualidade da Água e os seus Múltiplos Usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil**. REDE - Revista Eletrônica do Prodepa, ISSN: 1982-5528 p. 26. Fortaleza, 2014.

SOUZA, J. S. **O impacto ambiental atribuído à pecuária**. Programa de Pós Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual de Maringá, 2010.

SPEED, Robert , Li Yuanyuan, Tom Le Quesne, Guy Pegram and Zhou Zhiwei. *et. al.*. **Basin Water Allocation Planning. Principles, procedures and approaches for basin allocation planning**. Paris: UNESCO, 2013.

TOMÉ, A. J. A. **Análise e Modelagem de Fósforo em Reservatórios localizados em Regiões Semiáridas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,

TOMÉ, A. J. A.; LIMA NETO, I. E. Modelagem de fósforo em açudes do semiárido cearense. In: **XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos-SBRH**, Brasília, 2015.

TOMÉ, A. J. de A. & LIMA NETO, I. E. **Modelagem de fósforo em açudes no semiárido cearense**. Artigo científico. 2014.

TOMÉ, A. J. A. Simple modelling of total phosphorus in brazilian lakes and reservoirs. **Revista DAE**, São Paulo, v. 68, n 221, pp 142-156, Jan a Mar, 2020.

TRINDADE, P.B.C.B. **Classificação do estado trófico de reservatórios**: estudo de caso; reservatório do rio bonito (ES). Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Espírito Santos, 2011.

UFC, UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado do Ceará**. Fortaleza, 248p. 1993.

VIEIRA, V. P. P. B. **Sustentabilidade do semiárido brasileiro: desafios e perspectivas**. **RBRH**, v.7, n.4, p.105-112, out/dez. 2010.

VOLLENWEIDER, R. A. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. **Memorie Dell'istituto Italiano di Idrobiologia**, v. 33, p.53-83, 1976.

VOLLENWEIDER, R. A. Possibilities and limits of elementary models concerning the budget of substances in lakes. **Archiv Fur Hydrobiologie**, v. 66, n. 1, p.1-36, 1969.

VOLLENWEIDER, R. A. **Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorus as Factors in Eutrophication**. OECD, Paris, 192p. 1968.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 2. ed. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte, 2007.

VON SPERLING, M. **Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 2. ed. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFMG, Belo Horizonte, 1996.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol 1. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. In: **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 3. ed. Minas Gerais: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v.1, 452 p, 2005.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, v.01. Minas Gerais: ABES, 1995.

WIEGAND, MÁRIO CÉSAR ; DO NASCIMENTO, ANTÔNIA TATIANA PINHEIRO ; COSTA, ALEXANDRE CUNHA ; LIMA NETO, IRAN EDUARDO . **Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability**. **JOURNAL OF ARID ENVIRONMENTS**, v. 184, p. 104321, 2021.