



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOELMA FERREIRA SILVA

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM TRECHO DO EIXO
NORTE DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO**

Recife

2022

JOELMA FERREIRA SILVA

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM TRECHO DO EIXO
NORTE DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maria do Carmo Martins Sobral

Coorientadora: Prof^ª. Dr^ª. Maristela Casé Costa Cunha

Recife

2022

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4 / 2222

S586a Silva, Joelma Ferreira.
Análise da evolução da qualidade da água em trecho do eixo norte do projeto de integração do Rio São Francisco / Joelma Ferreira Silva. 2022.
123 f.; figs., quads., tabs., abrev. e siglas.

Orientadora: Profa. Dra. Maria do Carmo Martins Sobral.
Coorientadora: Profa. Dra. Maristela Casé Costa Cunha.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.
Inclui referências e anexo.

1. Engenharia civil. 2. Semiárido. 3. Recursos hídricos. 4. Uso do solo. 5. Indicadores de qualidade de água. 6. Poluição da água. I. Sobral, Maria do Carmo Martins (Orientadora). II. Cunha, Maristela Casé Costa (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022-324

JOELMA FERREIRA SILVA

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM TRECHO DO EIXO
NORTE DO PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Aprovada em: 19/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Martins Sobral (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof^a. Dr^a. Maristela Casé Costa Cunha (Coorientadora)
Universidade do Estado da Bahia

participação por videoconferência
Prof^a. Dr^a. Érika Alves Tavares Marques (Examinadora externa)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof^o Dr^o Fabrício Motteran (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof^o. Dr^o. Wanderli Rogério Moreira Leite (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

À Deus, pelo seu cuidado a mim em todos meus dias. Por me erguer e me carregar em seu colo nos momentos difíceis. Tudo por Ele e para Ele!

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Joseilto e Francisca, por toda a força, apoio, orações e incentivo na busca dos meus objetivos. Aos meus irmãos, Jonh Hilton, Joedna e Jonh Nilton, pelo companheirismo. Aos meus sobrinhos, por tornarem meus dias mais leves e divertidos.

Agradeço especialmente à minha professora orientadora Dr^a Maria do Carmo Sobral, a quem tenho profunda admiração, pela confiança e oportunidade de trabalhar com sua equipe, além de todo o conhecimento compartilhado. A minha coorientadora Professora Dr^a. Maristela Casé, pela colaboração no enriquecimento desta pesquisa.

A todos os companheiros do Grupo de Gestão Ambiental que estiveram junto a mim durante essa jornada: Ariane Cardoso, Felipe Alves, Hidaiane Caldas, Janaina Assis, Gérsica Nogueira, Oziel Pedrosa, Douglas Brandão, Cláudia Oliveira, Érika Marques, Athos Farias, Camylla Rebeca e Tatyane Guimarães.

Aos bons amigos que fiz durante as disciplinas do Mestrado, os quais tenho muito carinho: Alfredo, Elissandra, Henrique, Josivaldo, Marília.

As minhas colegas de Ap, com quem tive o prazer de conviver nesse espaço de tempo e que levarei sempre no coração. Obrigada por todo apoio e companheirismo nessa etapa da vida. A minha amiga Geovanna, um presente das minhas colegas de Ap por tabela, foi um privilégio poder ter você nessa trajetória.

Aos membros da banca examinadora: Érika Marques, Fabrício Motteran e Wanderli Leite.

À Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), aos professores e secretárias do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), por toda a colaboração ao longo do tempo de construção deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos financeiros no Projeto Universal (Processo nº 434872/2018-0), que possibilitou a realização de visita em campo para o aperfeiçoamento da pesquisa.

Ao Ministério do Desenvolvimento Regional (ex Ministério da Integração Nacional) e à CMT Engenharia, por disponibilizarem o uso dos dados de qualidade da água.

Minha profunda gratidão a todas as pessoas e instituições públicas e privadas que contribuíram direta ou indiretamente para o desenvolvimento dessa pesquisa.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.”

RESUMO

A água, em quantidade e qualidade adequadas, é uma das bases mais importantes para o desenvolvimento saudável e sustentável da sociedade humana e dos ecossistemas. A distribuição de forma irregular deste recurso afeta diretamente a região do Semiárido Nordeste, que passa por constantes períodos de vulnerabilidade hídrica e secas. O Projeto de Integração do rio São Francisco com Bacias do Nordeste Setentrional (PISF) surge como uma alternativa para suprir esse desequilíbrio, transpondo águas a partir de dois eixos de canais artificiais de uma região que têm abundância para outra que sofre de escassez. O objetivo geral desta pesquisa foi analisar a evolução da qualidade da água ao longo de um trecho do Eixo Norte do PISF. Foram utilizados resultados de 11 parâmetros físicos, químicos e biológicos coletados entre 2014 e 2019, correspondentes a 8 estações de monitoramento de qualidade de água ao longo do eixo, incluindo captação, reservatórios projetados e existentes. Os reservatórios existentes apresentaram parâmetros com os piores níveis de violação aos limites recomendados pela Resolução CONAMA 357/2005, enquanto os reservatórios projetados apresentaram valores similares ao do ponto de captação no rio São Francisco. Todos os reservatórios e ponto de captação apresentaram altos valores nos parâmetros de DBO e Fósforo Total, indicando possível contaminação por esgoto doméstico e/ou poluição difusa gerada pela agricultura no entorno. Os resultados de IQA, IET e aplicação da estatística multivariada mostram a diferenciação entre as condições de qualidade da água entre os reservatórios projetados/ponto de captação e os reservatórios existentes, que não receberam águas transpostas ainda. A análise do uso do solo no entorno dos reservatórios projetados demonstrou a existência de diversas comunidades nas suas proximidades e a possibilidade de diversos conflitos pelos usos da água, principalmente pela população mais próxima que não foi beneficiada com infraestrutura de abastecimento ou concedido o uso para irrigação. Considera-se importante o fortalecimento da parceria entre as instituições que realizam o controle ambiental nos diversos níveis, no sentido de garantir acompanhamento, regularização e fiscalização eficazes nas atividades que causam impactos na qualidade da água, além do reforço na Educação Ambiental da população quanto ao uso sustentável e racional dos recursos hídricos do PISF.

Palavras-chave: semiárido; recursos hídricos; uso do solo; indicadores de qualidade de água; poluição da água.

ABSTRACT

Water of adequate quantity and quality is one of the most important bases for the healthy and sustainable development of human society and ecosystems. The irregular distribution of this resource directly affects the semi-arid region of the Northeast, which experiences constant periods of water vulnerability and droughts. The Integration Project of the São Francisco River with the Basins of the Northern Northeast (PISF) emerges as an alternative to address this imbalance, transferring water through two axes of artificial channels from a region that has an abundance to another that suffers from scarcity. The principal objective of this research was to analyze the evolution of water quality along a part of the North Axis of the PISF. Results of 11 physical, chemical, and biological parameters collected between 2014 and 2019 were used, corresponding to 8 water quality monitoring stations along the axis, including the diversion point, projected and existing reservoirs. The existing reservoirs presented parameters with the worst levels of limit violation recommended by CONAMA Resolution 357/2005, while the projected reservoirs presented values similar to the diversion point in the São Francisco River. All reservoirs and the diversion point showed high values in the parameters BOD and Total Phosphorus, indicating possible contamination by domestic sewage and/or non-point pollution generated by agriculture in the surroundings. The results of WQI, TSI and the application of multivariate statistics corroborate the difference between the water quality conditions in the projected reservoirs/diversion point and the existing reservoirs, which have not yet received transferred water. The analysis of land use in the surroundings of the projected reservoirs showed the existence of several communities in their vicinity and the possibility of several conflicts over water uses, mainly by the closest population that was not benefited with supply infrastructure or granted use for irrigation. It is considered important to strengthen the partnership between the institutions that carry out environmental control at different levels, to ensure effective monitoring, regularization and inspection of activities that impact on water quality, in addition to improving the Environmental Education of the population regarding the sustainable and rational use of PISF water resources.

Keywords: semiarid; water resources; use of the soil; water quality indicators; water pollution.

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 1 - | Os 8 Objetivos de Desenvolvimento do Milênio | 22 |
| Figura 2 - | Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável estabelecidos na Agenda 2030 | 23 |
| Figura 3 - | Instituições integrantes do SINGREH | 24 |
| Figura 4 - | Instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos | 25 |
| Figura 5 - | Localização dos eixos do Projeto de Integração do Rio São Francisco | 36 |
| Figura 6 - | Mapa de localização do Eixo Norte do PISF | 39 |
| Figura 7 - | Bacias Hidrográficas na qual o Eixo Norte está inserido | 40 |
| Figura 8 - | Diagrama esquemático do Eixo Norte do PISF | 41 |
| Figura 9 - | Campanhas de monitoramento da qualidade da água do Eixo Norte do PISF analisadas na pesquisa, incluindo as datas e o clima no período das coletas | 43 |
| Figura 10 - | Localização das estações de monitoramento da qualidade da água avaliadas nesta pesquisa ao longo do Eixo Norte | 44 |
| Figura 11 - | Variação da temperatura da água nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 54 |
| Figura 12 - | Variação do pH nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 55 |
| Figura 13 - | Variação da turbidez nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 56 |
| Figura 14 - | Variação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 57 |
| Figura 15 - | Variação do oxigênio dissolvido (OD) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra | |

| | | |
|-------------|---|----|
| | Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 59 |
| Figura 16 - | Variação do fósforo total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 60 |
| Figura 17 - | Variação do nitrogênio total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 61 |
| Figura 18 - | Variação dos sólidos dissolvidos totais nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 62 |
| Figura 19 - | Variação dos sólidos suspensos totais nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 63 |
| Figura 20 - | Variação dos coliformes termotolerantes nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 64 |
| Figura 21 - | Variação da clorofila-a nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019 | 65 |
| Figura 22 - | Matriz de correlação de Pearson das variáveis estudadas | 70 |
| Figura 23 - | Gráfico de sedimentação da ACP aplicada às variáveis estudadas | 72 |
| Figura 24 - | Biplot das PC1 e PC2 correspondente aos dados de qualidade da água do PISF com unidades classificadas por bacia hidrográfica (A) e de acordo com a ordem na matriz de dados (B) | 74 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 25 - | Dendrograma resultante da Análise de Agrupamentos aplicada aos dados de qualidade da água do PISF no período chuvoso | 76 |
| Figura 26 - | Dendrograma resultante da Análise de Agrupamentos aplicada aos dados de qualidade da água do PISF no período seco | 77 |
| Figura 27 - | Sub-bacia GI 5 e delimitação da área estudada no reservatório de Tucutu | 80 |
| Figura 28 - | Variação do uso do solo e vegetação na área do entorno do reservatório Tucutu | 81 |
| Figura 29 - | Sub-bacia Terra Nova e delimitação da área estudada nos reservatórios projetados na bacia | 84 |
| Figura 30 - | Variação do uso do solo e vegetação na área do entorno do reservatório Terra Nova | 86 |
| Figura 31 - | Variação do uso do solo e vegetação na área do entorno do reservatório Serra do Livramento | 89 |
| Figura 32 - | Variação do uso do solo e vegetação na área do entorno do reservatório Mangueira | 91 |
| Figura 33 - | Sub-bacia do Salgado e delimitação das áreas dos reservatórios | 93 |
| Figura 34 - | Zoneamento dos reservatórios Terra Nova e Serra do Livramento | 98 |
| Figura 35 - | Captação do eixo norte no rio São Francisco | 104 |
| Figura 36 - | Reservatórios Terra Nova e Negreiros | 104 |
| Figura 37 - | Estação de Bombeamento EBI-3 do Eixo Norte | 104 |
| Figura 38 - | Captação e início dos canais do Eixo Norte do PISF | 105 |
| Figura 39 - | Primeira Estação de Bombeamento (EBI-1) do eixo norte | 106 |
| Figura 40 - | Contenção utilizada para retenção de biota que se aproxima da EBI-1 | 106 |
| Figura 41 - | Reservatório Tucutu | 107 |
| Figura 42 - | Reservatório Serra do Livramento | 107 |
| Figura 43 - | Reservatório Mangueira | 108 |
| Figura 44 - | Reservatório de Negreiros | 108 |

LISTA DE QUADROS

| | | |
|-------------|---|----|
| Quadro 1 - | Principais origens/causas e relação com a qualidade da água dos parâmetros do Índice de Qualidade da Água (IQA) e do Índice de Estado Trófico (IET) | 29 |
| Quadro 2 - | Reservatórios do Eixo Norte do PISF e suas respectivas localizações | 37 |
| Quadro 3 - | Reservatórios do Eixo Leste do PISF e suas respectivas localizações | 38 |
| Quadro 4 - | Características dos reservatórios projetados e existente no trecho do Eixo Norte do PISF | 42 |
| Quadro 5 - | Estações de amostragem do Eixo Norte do PISF, suas localizações e respectivos tipos de ambientes onde se encontram | 44 |
| Quadro 6 - | Documentos utilizados na elaboração da análise do uso do solo no entorno dos reservatórios e seus reservatórios presentes e estudados | 78 |
| Quadro 7 - | Sub-bacias e reservatórios estudados | 79 |
| Quadro 8 - | Características dos núcleos populacionais no entorno do reservatório Tucutu | 83 |
| Quadro 9 - | Características dos núcleos populacionais no entorno do reservatório Terra Nova | 87 |
| Quadro 10 - | Características dos núcleos populacionais no entorno do reservatório Mangueira | 92 |
| Quadro 11 - | Características dos núcleos populacionais no entorno do reservatório Atalho | 95 |
| Quadro 12 - | Vocação, nome e descrição sucinta das zonas definidas para a área de entorno, ordenadas do maior ao menor grau de restrição | 99 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabela 1 - | Variáveis físico-químicas e biológicas de campo e de laboratório com suas respectivas metodologias de análise | 45 |
| Tabela 2 - | Parâmetros de qualidade da água utilizados na pesquisa com valores máximos permitidos de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005 | 46 |
| Tabela 3 - | Peso relativo dos parâmetros utilizados no Índice de Qualidade de Água | 47 |
| Tabela 4 - | Categorias e valores de ponderação resultantes do cálculo do Índice de Qualidade da Água – IQA | 48 |
| Tabela 5 - | Classificação do Estado Trófico para rios | 49 |
| Tabela 6 - | Classificação do Estado Trófico para reservatórios | 49 |
| Tabela 7 - | Resultados de IQA dos pontos amostrais do Eixo Norte, nas campanhas 16 a 25 dos anos de 2014 a 2019 | 66 |
| Tabela 8 - | Resultados de IET dos pontos amostrais do Eixo Norte, nas campanhas 16 a 25 dos anos de 2014 a 2019 | 68 |
| Tabela 9 - | Valores médios dos Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET) para os pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5 e do rio Terra Nova durante o período de estudo | 69 |
| Tabela 10 - | Componentes principais, autovalores, porcentagens de variância explicada e acumulada para as amostras avaliadas do monitoramento da qualidade da água do PISF | 71 |
| Tabela 11 - | Matriz das cargas das variáveis estudadas em relação às quatro primeiras componentes principais | 73 |
| Tabela 12 - | Características físicas do reservatório de Tucutu | 80 |
| Tabela 13 - | Características físicas do reservatório de Terra Nova | 85 |
| Tabela 14 - | Características físicas do reservatório de Serra do Livramento | 88 |
| Tabela 15 - | Características físicas do reservatório de Mangueira | 90 |
| Tabela 16 - | Características físicas do reservatório Atalho | 94 |
| Tabela 17 - | Programas Ambientais presentes nos PACUERAs para cada sub-bacia | 101 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| ACP | Análise de Componentes Principais |
| ANA | Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico |
| APP | Área de Preservação Permanente |
| CERH | Conselho Estadual de Recursos Hídricos |
| CETESB | Companhia Ambiental do Estado de São Paulo |
| Cl-a | Clorofila-a |
| CNRH | Conselho Nacional de Recursos Hídricos |
| Coli | Coliformes termotolerantes |
| CONAMA | Conselho Nacional de Meio Ambiente |
| CPs | Componentes principais |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| GI 5 | Grupo de bacias de pequenos rios interiores 5 |
| IBAMA | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| IET | Índice de estado Trófico |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| IQA | Índice de Qualidade das Águas |
| LI | Licença de Instalação |
| LO | Licença de Operação |
| MDR | Ministério do Desenvolvimento Regional |
| NT | Nitrogênio Total |
| OD | Oxigênio dissolvido |
| ODM | Objetivos de Desenvolvimento do Milênio |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PACUERA | Plano de Conservação e uso do entorno dos reservatórios artificiais |
| PBA | Projeto Básico Ambiental |

| | |
|---------|--|
| pH | Potencial Hidrogeniônico |
| PISF | Projeto de Integração do rio São Francisco com bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional |
| PNRH | Política Nacional de Recursos Hídricos |
| PT | Fósforo Total |
| RIMA | Relatório de Impacto Ambiental |
| SDT | Sólidos Dissolvidos Totais |
| SINGREH | Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos |
| SNIRH | Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos |
| SNSH | Secretaria Nacional de Segurança Hídrica |
| SST | Sólidos Suspensos Totais |
| SNWDP | <i>South-North Water Diversion Project</i> |
| Temp | Temperatura |
| Turb | Turbidez |
| UP | Unidade da Federação |
| UFPE | Universidade Federal de Pernambuco |
| VPR | Vilas Produtivas Rurais |
| UNIVASF | Universidade Federal do Vale do São Francisco |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1. | APRESENTAÇÃO DA AUTORA..... | 18 |
| 1.2. | JUSTIFICATIVA | 18 |
| 1.3. | OBJETIVOS | 20 |
| 1.3.1 | Objetivo geral | 20 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos | 20 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 21 |
| 2.1 | GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL | 21 |
| 2.2 | QUALIDADE DA ÁGUA..... | 26 |
| 2.3 | PROJETOS DE INTEGRAÇÃO ENTRE BACIAS HIDROGRÁFICAS | 31 |
| 2.4 | PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO | 34 |
| 3 | METODOLOGIA | 38 |
| 3.1 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 38 |
| 3.2 | AMOSTRAGEM E ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA | 42 |
| 3.3 | CÁLCULO DOS ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA..... | 46 |
| 3.3.1 | Cálculo do índice de Qualidade da Água – IQA | 46 |
| 3.3.2 | Cálculo do índice de Estado Trófico - IET | 47 |
| 3.4 | ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA..... | 49 |
| 3.4.1 | Análise de componentes principais (ACP) | 49 |
| 3.4.2 | Análise de Agrupamentos | 50 |
| 3.5 | INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NO ENTORNO DOS RESERVATÓRIOS..... | 52 |
| 4 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 53 |
| 4.1 | ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS..... | 53 |
| 4.2 | ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA E ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO | 66 |
| 4.3 | ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS..... | 70 |
| 4.4 | ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS..... | 75 |
| 4.5 | ANÁLISE DO USO DO SOLO NO ENTORNO DOS RESERVATÓRIOS..... | 77 |
| 4.5.1 | Sub-bacia GI 5 | 79 |
| 4.5.2 | Sub-bacia Terra Nova | 84 |
| 4.5.3 | Sub-bacia do rio Salgado | 93 |
| 4.5.4 | Zoneamento Ambiental | 97 |
| 4.5.5 | Programas Ambientais dos reservatórios | 100 |
| 4.5.6 | Avaliação da área de estudo em campo | 103 |
| 5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 109 |

| | | |
|-----|---|------------|
| 5.1 | CONCLUSÕES | 109 |
| 5.2 | RECOMENDAÇÕES | 111 |
| | REFERÊNCIAS | 113 |
| | ANEXO A – DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA | 123 |

1 INTRODUÇÃO

Nesta sessão será realizada uma breve apresentação da autora, seguida da justificativa da temática escolhida para o desenvolvimento desta pesquisa e os objetivos a serem alcançados.

1.1 APRESENTAÇÃO DA AUTORA

A autora possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) (2016), Especialização em Gestão Pública Municipal pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) (2018), Especialização MBA em Gerenciamento de Obras pela UNIFIP Centro Universitário (2018) e Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela UNIFIP Centro Universitário (2019).

Atualmente atua no Programa de Monitoramento de Qualidade de Água e Limnologia (PBA-22) do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, financiado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional. Bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) durante o Mestrado.

Possui experiência em projetos de pesquisa e extensão. Participante da equipe de elaboração do Plano Municipal de Saneamento Básico de Campina Grande, atuando em conjunto: UFCG, Parque Tecnológico da Paraíba (PaqTcPB) e Prefeitura Municipal de Campina Grande (2013-2014). Atuando também como Secretária adjunta de Infraestrutura do Município de Coremas-PB (2017-2019).

1.2 JUSTIFICATIVA

Água em quantidade e qualidade adequadas é uma das bases mais importantes para o desenvolvimento saudável e sustentável da sociedade humana e dos ecossistemas. Devido às distribuições temporais e espaciais desiguais dos recursos de água doce, é natural que algumas regiões tenham mais água do que o necessário, enquanto outras têm menos. Para garantir a segurança hídrica das regiões menos favorecidas e tentar resolver o descompasso espacial e às vezes temporal entre oferta e demanda, projetos de transferência de água entre bacias, nos quais a conectividade fluvial é reestruturada por meio de canais artificiais, são uma possível solução (GUPTA; VAN DER ZAAG, 2008).

Com o crescimento considerável da população mundial e o rápido desenvolvimento da urbanização nos países em desenvolvimento, muitos projetos de engenharia hidráulica do tipo são construídos para atender às demandas de água para

consumo doméstico, produção industrial e irrigação agrícola. No entanto, esses projetos de desvio de água entre bacias podem ter consequências energéticas, ambientais e sociais negativas (ZHUANG, 2016). Dessa forma, há necessidade de investigar as consequências dos atuais projetos de transferência de água entre bacias e usar essas informações para influenciar a gestão dessa água desviada.

O Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF) é o grande empreendimento brasileiro dessa categoria que finalmente encontra-se em operação, foi pensado desde a época do Brasil Colônia. Sua proposta é levar água do Rio São Francisco para regiões do Semiárido nordestino afetadas constantemente pelo fenômeno das secas, possibilitando segurança hídrica para cerca de 12 milhões de pessoas, e reduzindo, por conseguinte, as diferenças regionais causadas pela oferta desigual da água entre bacias e populações. A transferência da água ocorre por meio de dois sistemas independentes de canais, denominados Eixo Norte e Eixo Leste, e seus respectivos ramais associados (MI, 2004).

O Eixo Leste teve suas obras de estruturas envolvidas no desvio das águas finalizadas no ano de 2017 (MDR, 2020), enquanto o Eixo Norte teve a última etapa de suas obras físicas inaugurada em outubro de 2021 (BRASIL, 2021a). À vista disso, o PISF já está contribuindo para a garantia do acesso à água pela população da região das bacias receptoras, e torna-se imprescindível o controle e monitoramento da qualidade desses recursos.

Ao conectar rios, lagos, mar e outros recursos hídricos para uso humano, os projetos hidráulicos também tornam os problemas de qualidade da água enfrentados pelos seres humanos mais complexos. Esses projetos, como barragens, reservatórios e canais de abastecimento de água, mudam os ambientes das bacias hidrográficas e impactam o uso do solo, a estrutura da vegetação e as densidades populacionais, fatores que podem prejudicar a qualidade da água. Ainda, a conectividade hidrológica pode traduzir-se em uma conectividade química e biológica, que pode perturbar principalmente os ecossistemas das bacias receptoras (FORNARELLI; ANTENUCCI; MARTI, 2013). Portanto, é de fundamental importância uma gestão eficaz para prevenir e controlar a degradação da qualidade da água causada por esses projetos.

Neste contexto, sendo o PISF um empreendimento de operação tão recente, e em particular o caso do Eixo Norte, uma pesquisa sobre a qualidade da água nesse trecho se faz necessária. Até o momento, ainda há pouca compreensão e análise intensiva sobre o tema depois que o projeto foi oficialmente colocado em operação. A investigação das

atividades realizadas no entorno dos reservatórios também contribui para o entendimento da questão e subsidia o aprimoramento das medidas de gestão vinculadas ao projeto.

Este estudo seria um dos primeiros a relatar e demonstrar de forma abrangente o status e as variações da qualidade da água após o início da operação do Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco utilizando dados provenientes do Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia (PBA 22). A avaliação desses dados é importante para a gestão dos recursos hídricos no âmbito do PISF, pois auxilia na compreensão dos processos que afetam a qualidade da água do projeto, permitindo o planejamento de ações de melhoramento e subsidiando a fiscalização e formulação de novas medidas que sejam necessárias.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Analisar a qualidade da água ao longo de um trecho do Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF).

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar os parâmetros de qualidade de água dos reservatórios e ponto de captação ao longo do trecho do Eixo Norte do PISF;
- Avaliar o Índice de Qualidade de Água e o Índice do Estado Trófico no trecho estudado;
- Examinar os parâmetros que mais influenciam na qualidade da água no trecho selecionado;
- Analisar a influência do uso e ocupação do solo no entorno dos reservatórios.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta sessão aborda os principais temas relacionados aos objetivos desta pesquisa, obtidos a partir de levantamentos bibliográficos e documentais. Inicia-se com uma abordagem sobre a gestão dos recursos hídricos, seguido do estudo da avaliação da qualidade da água em aspectos considerados neste trabalho, a experiência de integração entre bacias no contexto internacional e nacional, onde é finalizado dando destaque à experiência do Projeto de Integração do Rio São Francisco.

2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

A água é um bem que tem extrema importância na formação da sociedade. Por ser um recurso imprescindível na vida do ser humano, foi determinante na localização territorial das civilizações mais antigas, e até hoje é objeto de conflitos e disputas em várias regiões do mundo. A economia moderna e seus diversos setores utilizam suas demandas de água de forma heterogênea para diversos fins como industrial, agrícola, abastecimento humano e animal, transporte, lazer e geração de energia (ANA, 2020). A necessidade desse recurso para seus diversos usos continua a se expandir de forma global, à medida que a população geral cresce e os países aumentam seus padrões de consumo (WADA et al., 2016).

Nesse contexto, estando diretamente vinculada à prosperidade do ser humano, a água vem fazendo parte da pauta de campanhas de abrangência mundial. Os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) foram lançados no ano 2000 com horizonte temporal até 2015, e consistiam em oito grandes objetivos globais (Figura 1) acordados pelos países-membros da Organização das Nações Unidas (ONU), visando a eliminação da extrema pobreza e da fome no mundo. A temática dos recursos hídricos estava incluída na Meta 7C, que estabelecia a redução pela metade da proporção de pessoas sem acesso sustentável a água potável e saneamento básico até 2015 (WHO, 2018).

Figura 1 - Os 8 Objetivos de Desenvolvimento do Milênio



Fonte: Portal Federativo (2015).

Posteriormente os ODM foram substituídos pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são 17 objetivos (Figura 2) com 169 metas que todos os países-membros da ONU concordaram em trabalhar para alcançar até o ano de 2030. Os ODS fazem parte da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, que estabeleceu um plano de 15 anos para alcançar os Objetivos. O ODS 6 visa alcançar a cobertura universal exigindo disponibilidade e gestão sustentável de água e saneamento para todos antes do tempo determinado no acordo (UN, 2022).

Figura 2 - Os 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável estabelecidos na Agenda 2030



Fonte: ONU (2022).

A inclusão de um Objetivo da Água na Agenda de Desenvolvimento da ONU reconhece que esse bem é um ponto central em todos os aspectos do desenvolvimento sustentável, colocando a gestão da água firmemente nas mãos dos setores e usuários da água (AIT-KADI, 2016). O ODM 7C e o ODS 6 direcionam os dados de água e saneamento que são coletados em todo o mundo e determinam as informações que temos sobre o acesso a esses serviços (WESTSTRATE et al., 2019).

No cenário atual de altas demandas e iminente escassez e incertezas devido às perspectivas de mudanças climáticas, a gestão eficiente dos recursos hídricos deve garantir a oferta e qualidade da água para os seus diversos usos. O Brasil é um dos países com maior disponibilidade de água doce no mundo, porém com significativa

irregularidade na distribuição entre as regiões (ANA, 2018). Nesse sentido, o país tem desenvolvido legislações e políticas que aos poucos vão consolidando o reconhecimento da importância da gestão desses recursos.

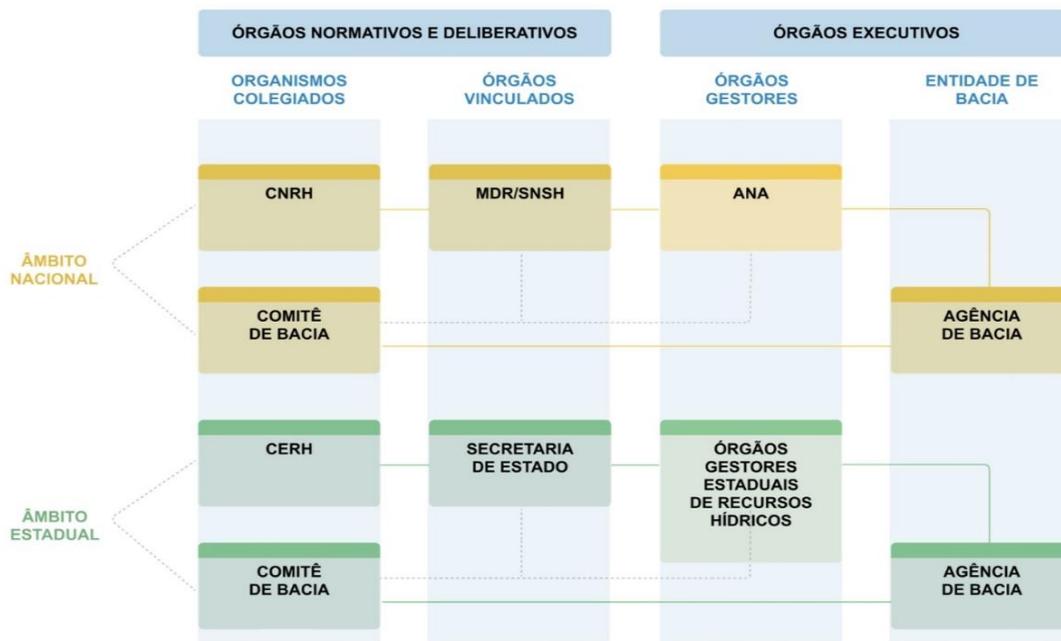
O Código das Águas promulgado em 1934 foi notadamente o que iniciou a consolidação da legislação básica das águas no Brasil, representando-se como um marco legal no gerenciamento dos recursos hídricos. Ele pode ser considerado o pioneiro a aplicar o princípio do Poluidor-Pagador que vigora nas leis brasileiras, pois atribuía aos infratores punições pelas perdas e danos em casos de contaminação das águas. O Código ainda estabeleceu a preferência do uso da água para abastecimento da população e determinou a necessidade de concessão para o uso da água pública na agricultura (BRASIL, 1934a).

A Constituição Federal de 1988 também tem o seu papel histórico na gestão de recursos hídricos no Brasil, tendo estabelecida a dominialidade dos corpos d'água superficiais e subterrâneos do país (BRASIL, 1988). O domínio é um atributo que define qual ente federativo, se a União ou alguma Unidade da Federação (UF), é responsável pela gestão das águas. Foi estabelecido que a gestão a nível Federal deve ser realizada pela Agência Nacional de Águas (ANA, que atualmente é denominada Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico) e a nível estadual pelos 27 órgãos gestores estaduais de recursos hídricos (ANA, 2017).

Posteriormente, a Lei nº 9.433 de 1997, conhecida como a Lei das Águas, instituiu a atual Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Ela pode ser considerada como um divisor de águas da gestão de recursos hídricos no Brasil, pois apresenta uma abordagem descentralizada e com administração participativa visando os usos múltiplos (BRASIL, 1997), de maneira oposta à centralização excessiva com administração setorial que predominava outrora.

O SINGREH (Figura 3) é responsável por implementar a PNRH por meio das entidades que o constituem, que são: o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Secretaria Nacional de Segurança Hídrica (SNSH) vinculada ao Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), a ANA, os Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERHs), os órgãos gestores estaduais de recursos hídricos, os comitês de bacia hidrográfica (interestaduais e estaduais) e as agências de água (vinculadas aos comitês) (BRASIL, 2021b).

Figura 3 - Instituições integrantes do SINGREH



Fonte: ANA (2021).

Mais uma prova da mudança na abordagem na gestão de recursos hídricos brasileira depois da instituição da PNRH foi a definição da água como bem finito e dotado de valor econômico e o estabelecimento da bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento e gestão. Foram definidos instrumentos para o efetivo gerenciamento (Figura 4), que priorizam ações de planejamento, regulação, fiscalização e divulgação de informações (ANA, 2019). Além disso, é assegurada a participação dos usuários de água e de representantes de segmentos da sociedade, configurando assim a prática da gestão participativa.

Figura 4 - Instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos



Fonte: ANA (2020).

Os Planos de Recursos Hídricos (PRH) normalmente são formados por um diagnóstico (características físicas, geográficas, ambientais e socioeconômicas), um prognóstico (apresentação de cenários) e programas de ações, além de diretrizes e recomendações baseadas na análise crítica das etapas anteriores. Esse instrumento de gestão pode ser elaborado para o País, para um Estado ou o Distrito Federal, ou para bacias hidrográficas específicas (ANA, 2020). O instrumento de planejamento de abrangência nacional é o Plano Nacional de Recursos Hídricos, que recentemente teve aprovada a sua mais nova versão para o período de 2022 a 2040 (BRASIL, 2022).

O enquadramento dos cursos d'água em classes de usos preponderantes tem o objetivo de indicar a meta de qualidade da água em função da classificação pelos diversos tipos de uso. A aplicação deste instrumento é baseada na Resolução nº 357, de 17 de março de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas superficiais, e ainda estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes (CONAMA, 2005).

A cobrança pelo uso dos recursos hídricos insere-se na PNRH como um instrumento financeiro que está em fase de implantação em muitos estados. Ela confere à água um valor econômico, estimulando dessa forma o seu uso racional. Geralmente, são

aplicados dois tipos de cobrança: a) cobrança pelo uso da água (captação e o consumo das águas superficiais e subterrâneas, que se refere ao volume de água captado e o volume consumido); b) cobrança por poluição (diluição de efluentes, que se refere à carga poluente lançada nos corpos hídricos) (SANTIN; GOELLNER, 2013).

A outorga de direito de uso dos recursos hídricos é o instrumento de gestão por meio do qual o poder público autoriza o usuário a utilizar determinado volume de água superficial ou subterrânea por período pré-determinado, com a finalidade de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício do direito de acesso à água. Os usuários que captam um volume de água insignificante não necessitam de outorga, mas devem se cadastrar junto ao respectivo órgão gestor de recursos hídricos (ANA, 2017).

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) é o último dos instrumentos listados na PNRH. Trata-se de um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão. Por meio da reunião e divulgação de dados e informações sobre a situação qualitativa e quantitativa das águas no país, o SNIRH fornece subsídios para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

Há uma inter-relação entre os cinco instrumentos e, em alguns casos, uma dependência entre eles. Por exemplo, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos requer a concessão de outorga e a existência do plano de recursos hídricos da bacia para sua posterior implementação. Já a concessão de outorga de direito de uso dos recursos hídricos requer a consideração da classe de enquadramento do corpo d'água antes de ser emitida. Tudo isso deve estar acessível em um sistema de informações estruturado e atualizado (ANA, 2021).

2.2 QUALIDADE DA ÁGUA

A água superficial é, sem dúvida, um dos meios mais essenciais na funcionalidade dos processos ecossistêmicos. É também uma das *commodities* mais importantes do mundo moderno, sendo indispensável para uso doméstico e uma componente-chave para muitas indústrias e serviços em todo o mundo. No entanto, essas atividades antrópicas têm se apresentado na forma de alterações na cobertura do solo, resultando inevitavelmente na degradação da qualidade da água superficial pela poluição (PAK et al., 2021).

As modificações no meio ambiente ocasionadas pelo desenvolvimento demográfico, econômico e tecnológico tem aumentado a interferência da capacidade humana com a natureza, o que afeta diretamente a disponibilidade de água. Um exemplo é a queima de combustíveis fósseis para atender às necessidades humanas e a liberação de CO₂ na atmosfera. Essas ações resultaram no fenômeno das mudanças climáticas que, em última análise, mudaram os padrões de precipitação na paisagem, causando inundações e secas. Além disso, a progressiva demanda por alimentos e produção de energia intensificou a degradação dos recursos hídricos (GIRI, 2021).

Além do papel das atividades antropogênicas, a qualidade da água dos sistemas de água doce é controlada ainda pela variabilidade climática, influências hidrológicas e biogeoquímicas. Essas influências atuam em diferentes escalas temporais e espaciais (por exemplo, global, bacia hidrográfica, local) (MOSLEY, 2015). Manter a qualidade adequada da água é uma tarefa desafiadora principalmente devido à presença de fontes pontuais e não pontuais (difusas) de poluição (GIRI; QIU, 2016).

Fontes pontuais incluem descarga de esgoto urbano ou industrial e estações de tratamento de esgoto, enquanto fontes não pontuais ocorrem quando o escoamento superficial flui sobre terras agrícolas, florestas, minas, canteiros de obras, áreas urbanas e áreas de disposição de resíduos (HAN et al., 2021). Na maioria dos países desenvolvidos, a poluição de fontes pontuais tem sido efetivamente controlada deixando a poluição por fontes não pontuais como a principal ameaça à qualidade da água de superfície (ZHENG; HAN, 2016). A poluição difusa da água é difícil de avaliar e controlar exatamente porque não é causada por um local de descarga facilmente identificável e tratável, mas surge de múltiplas interações entre o ciclo hidrológico e os padrões de uso e cobertura da terra (MELLO et al., 2020). Nos países em desenvolvimento tanto a poluição de fonte pontual quanto a de fonte difusa ainda são preocupantes, e essas diversas fontes precisam ser consideradas de forma abrangente no controle da qualidade da água e nas medidas de governança.

Como uma consequência da poluição tanto difusa quanto pontual, ocorre a elevada quantidade de nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio) dissolvidos na água. Isso resulta na aceleração do fenômeno natural do enriquecimento das águas com os nutrientes necessários ao crescimento da vida vegetal aquática ao longo do tempo geológico, chamado de eutrofização. Os efeitos mais notáveis da eutrofização são o aumento na biomassa de algas, macrófitas e cianobactérias, às vezes tóxicas; a perda de biodiversidade e a depleção de oxigênio (hipoxia ou anoxia), que podem levar à morte

maciça de organismos aquáticos. A natureza e a intensidade dessas respostas também dependem de fatores ambientais como longos tempos de residência da água, altas temperaturas e uma quantidade suficiente de luz estimulam a eutrofização (LE MOAL et al., 2019; LI et al., 2021; VINÇON-LEITE; CASENAVE, 2019).

Parâmetros físicos, químicos e biológicos são usados para verificar a composição natural ou indicadores de poluição na avaliação do uso da água para diversos fins (potável, agrícola, industrial, recreativo e habitat). A coleta sistemática desses conjuntos de dados permite uma avaliação robusta do estado e detecção de tendências, compondo o monitoramento da qualidade da água. Normalmente esse tipo de monitoramento ocorre em longo prazo, o que gera um grande volume de dados que são comumente aplicados para fins regulatórios/de formulação de políticas, planejamento e exploração. Esses dados são interligados, como aponta Ferreira et al (2011), quando diz que a relação entre as concentrações de nutrientes, clorofila e produção primária são úteis quando usadas em conjunto e devem ser buscadas como parte da avaliação da eutrofização.

Devido ao seu caráter de longo prazo e normalmente de uma grande quantidade de variáveis que são coletadas em várias estações amostrais ao longo do ano, os bancos de dados de monitoramentos de qualidade da água são bastante complexos. Para ajudar na interpretação desses elementos, a análise é geralmente realizada de duas maneiras: modelagem hidrológica/qualidade da água e modelagem estatística. A modelagem hidrológica/qualidade da água utiliza modelos que requerem além dos dados de qualidade, outros como elevação, uso da terra, solo, práticas de manejo, precipitação, temperatura e vazão observada. Já no caso da modelagem estatística, que será aplicada neste trabalho, trata-se de um método simples e fácil de entender que fornece resultados satisfatórios (GIRI, 2021). As técnicas estatísticas aplicadas nesta pesquisa serão explanadas na seção da Metodologia.

Outra forma de medir a qualidade da água é por meio do cálculo de índices como o Índice de Qualidade da Água (IQA). Levando-se em consideração que a amostragem em um local não reflete a saúde geral de uma bacia hidrográfica e ainda que monitorar todos os parâmetros em toda a bacia é caro e trabalhoso, o IQA expressa de forma simples as interações complexas que ocorrem no meio. O resultado fornecido permite que o público em geral, os formuladores de políticas e os gestores de bacias hidrográficas compreendam a condição do meio ambiente sem ter um conhecimento profundo sobre ele (GIRI; QIU, 2016).

Além do IQA, outra ferramenta bastante utilizada na avaliação da qualidade da água é o Índice de Estado Trófico (IET). O IET classifica os corpos d'água em diferentes graus de trofia, avaliando a qualidade da água devido ao enriquecimento de nutrientes. No entanto, destaca-se que este índice não distingue os ambientes naturais eutróficos dos artificiais (CIGAGNA et al., 2016). O estado trófico é uma propriedade importante dos ecossistemas aquáticos, pois reflete a influência antrópica na qualidade da água e no funcionamento ecológico de rios, lagos e reservatórios. Os índices de estado trófico fornecem uma visão de como a disponibilidade de nutrientes e luz controla o desenvolvimento do fitoplâncton na água (CUNHA; CALIJURI; LAMPARELLI, 2013).

Para o cálculo dos dois índices apresentados são empregados diversos parâmetros, cujos dados são provenientes de um programa de monitoramento com análises laboratoriais ou medições *in situ*. O Quadro 1 a seguir exhibe os parâmetros utilizados nos cálculos do IQA e do IET, elencando as principais origens/causas da sua ocorrência nos corpos hídricos e as relações que possuem com a qualidade da água.

Quadro 1 - Principais origens/causas e relação com a qualidade da água dos parâmetros do Índice de Qualidade da Água (IQA) e do Índice de Estado Trófico (IET)

| Parâmetros | Principais origens/causas | Relação com qualidade da água |
|--------------------------------------|---|---|
| Temperatura | <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura do ar; • Localização geográfica; • Clima; • Horário; • Lançamento de efluentes. | <ul style="list-style-type: none"> • O calor pode reduzir a retenção do OD; solubilidade. • Interfere no metabolismo dos seres vivos. |
| Oxigênio dissolvido (OD) | <ul style="list-style-type: none"> • Difusão a partir da atmosfera; • Aeração por turbulência; • Resultado da fotossíntese. | <ul style="list-style-type: none"> • Interfere no metabolismo dos seres vivos; • Valores baixos podem revelar lançamento de efluentes sanitários devido ao seu consumo pelos microrganismos. |
| pH | <ul style="list-style-type: none"> • Dissolução de rochas; • Absorção de gases atmosféricos; • Oxidação da matéria orgânica; • Resultado da fotossíntese; • Efluentes sanitários e industriais; • Resíduos agrícolas. | <ul style="list-style-type: none"> • Interfere na pele e no metabolismo dos seres vivos; • pH ácido aumenta a solubilidade de agroquímicos, reduz a decomposição e ciclagem de nutrientes. |
| Turbidez | <ul style="list-style-type: none"> • Processos erosivos; • Chuvas; • Vazão; • Uso inadequado do solo; • Vegetação ciliar reduzida ou ausente. | <ul style="list-style-type: none"> • Valores elevados podem reduzir a penetração da luz e interferir na fotossíntese; • valores altos podem indicar baixo OD; • partículas de resíduos tóxicos podem se unir às partículas em suspensão. |
| Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) | <ul style="list-style-type: none"> • Decomposição da matéria orgânica, de origem natural ou antrópica (efluentes orgânicos). | <ul style="list-style-type: none"> • Valores elevados provocam a redução do OD. |

| Parâmetros | Principais origens/causas | Relação com qualidade da água |
|----------------------------|---|--|
| Fósforo total | <ul style="list-style-type: none"> • Águas pluviais urbanas; • Efluentes sanitários; • Resíduos agrícolas; • Detergentes; • Rejeitos de mineração. | <ul style="list-style-type: none"> • Valores elevados podem promover o crescimento das algas e cianobactérias, com potencial de eutrofização. |
| Nitrogênio total | <ul style="list-style-type: none"> • Fixação a partir da atmosfera; • Águas pluviais urbanas; • Efluentes sanitários e industriais; • Resíduos agrícolas. | <ul style="list-style-type: none"> • Valores elevados podem ocasionar o crescimento das algas e cianobactérias, com potencial de eutrofização; • Quando na forma de nitratos, concentrações elevadas podem prejudicar a saúde humana; • Quando na forma de nitrogênio amoniacal, valores altos elevam a DBO e reduzem o OD. |
| Sólidos Totais | <ul style="list-style-type: none"> • Processos erosivos; • Águas pluviais urbanas; • Efluentes sanitários e industriais; • Resíduos agrícolas. | <ul style="list-style-type: none"> • Aumento da turbidez; • Eleva a sedimentação de fundo, interferindo nos organismos bentônicos. |
| Coliformes termotolerantes | <ul style="list-style-type: none"> • Efluentes sanitários; • Resíduos de adubação orgânica. | <ul style="list-style-type: none"> • Possível presença de microrganismos patogênicos. |
| Clorofila-a | <ul style="list-style-type: none"> • Algas e plantas aquáticas. | <ul style="list-style-type: none"> • Concentrações elevadas indicam florações de algas e plantas aquáticas, aumentando o potencial de eutrofização. |

Fonte: Von Sperling (2005), Tundisi e Tundisi (2008) e Esteves (2011).

Outro fator importante que influencia nas características das águas superficiais é o uso do solo, pois este é um dos componentes da paisagem que tem um papel vital na geração de poluição. O aumento populacional altera o uso do solo principalmente devido a três fatores: 1) necessidade de moradia, 2) alimentação e 3) desenvolvimento de infraestrutura para possibilitar o transporte que promove a urbanização e as atividades agrícolas (GIRI; QIU, 2016). A urbanização aumenta a superfície impermeável, como estacionamentos, telhados, estradas e calçadas, resultando no aumento do escoamento, criando um caminho adicional para o transporte de poluentes para os corpos d'água (WILSON; WENG, 2010). Em contrapartida, as atividades agrícolas aumentam a quantidade de fertilizantes, pesticidas e herbicidas nas terras cultivadas para suprir a demanda alimentar da população, proporcionando a chegada de parte desses agroquímicos aos corpos d'água mais próximos (MOTEW et al., 2019).

Ainda no tocante ao uso do solo, a manutenção de matas nativas ciliares é considerada uma estratégia eficiente para manter as características físicas dos corpos hídricos, reduzir a erosão das margens e a sedimentação na corrente e melhorar a qualidade da água (SWEENEY; NEWBOLD, 2014). Todos esses elementos de proteção

dos cursos d'água são debatidos no Brasil há bastante tempo, onde o uso do solo nas matas ciliares começou a ser regulamentado em 1934 com a promulgação da primeira versão do Código Florestal (BRASIL, 1934b). Essa lei estabeleceu as chamadas Áreas de Preservação Permanente (APPs) para proteger áreas ambientalmente frágeis de importância para o bem-estar humano, e a conversão de ecossistemas nativos para usos agrícolas, bem como o uso agrícola continuado de áreas convertidas no passado, foram proibidos nessas áreas. Em 2012, foi promulgada a Lei nº 12.651, em 25 de maio de 2012, o chamado “Novo Código Florestal”, trazendo mudanças importantes para a regulamentação da vegetação nativa em propriedades privadas. A proteção das APPs cobertas por vegetação nativa foi mantida em patamares semelhantes aos da legislação anterior (GUIDOTTI et al., 2020).

O Novo Código Florestal também determina que as APPs na implantação de reservatório de água artificial destinado à geração de energia ou abastecimento público devem obedecer a uma faixa mínima de 30 (trinta) metros e máxima de 100 (cem) metros em área rural, e à faixa mínima de 15 (quinze) metros e máxima de 30 (trinta) metros em área urbana. Ainda, é obrigatória a aquisição, desapropriação ou instituição de servidão administrativa pelo empreendedor das APPs criadas em seu entorno, conforme estabelecido no licenciamento ambiental (BRASIL, 2012).

A Resolução do CONAMA nº 302/2002, de 20 de março de 2002, prevê a aprovação de um Plano Ambiental de Conservação e Uso do Entorno de Reservatório Artificial (PACUERA), que é definido como um conjunto de diretrizes e proposições com o objetivo de disciplinar a conservação, recuperação, o uso e ocupação do entorno do reservatório artificial. A lei do Novo Código Florestal também estabelece a elaboração deste instrumento na implantação de reservatório de água artificial destinado à geração de energia ou abastecimento público, em conformidade com termo de referência expedido pelo órgão competente, não podendo o uso exceder a 10% (dez por cento) do total da APP.

2.3 PROJETOS DE INTEGRAÇÃO ENTRE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A disponibilidade de água e sua demanda não são equilibradas no tempo e espaço, e conseqüentemente o homem busca por alternativas para suprir esse desequilíbrio. Projetos de integração entre bacias são desenvolvidos ao redor do mundo, talvez como a alternativa mais polêmica devido às suas complexas implicações, na tentativa de resolução desse problema. A ligação geralmente ocorre para transpor água de uma região

que tem abundância para outra região que tem escassez, ocasionando impactos sociais, econômicos e ambientais que devem ser considerados completamente na elaboração de tal projeto para serem alcançados os máximos benefícios na região (GUPTA; VAN DER ZAAG, 2008; ZHUANG, 2016).

Em se tratando de impactos ambientais, as alterações no regime hidrológico tanto da bacia doadora quanto da receptora produzem impactos de natureza quantitativa e qualitativa. Perdas de água por lixiviação, evaporação ou contaminação; água transferida com um alto teor de nutrientes tendo como efeitos a proliferação de algas e diminuição do oxigênio dissolvido no sistema de água receptor, erosão nos rios receptores, propagação de poluição e doenças, intrusão salina no estuário são alguns exemplos de implicações desta ordem (AZEVEDO et al., 2005; ZHUANG, 2016).

A maior parte das pesquisas em relação aos impactos ambientais das transferências de água entre bacias se concentra na ameaça potencial à conservação da biodiversidade (ZENG; QIN; LI, 2015). Poucos estudos, no entanto, se concentram nos efeitos nas mudanças físicas e químicas na qualidade da água como nas concentrações de nutrientes e variáveis como clorofila-a e a comunidade fitoplanctônica.

Na Austrália, o Sistema Shoalhaven é um exemplo de integração de bacias aplicado a diversas finalidades. Trata-se de uma rede de barragens, bombas e canais, localizada a 100 km a Sudoeste de Sydney, que fornece água localmente, gera energia hidrelétrica, proporciona espaço para recreação e também atua como fonte de reserva para o abastecimento de água de Sydney. O sistema é formado por três grandes reservatórios: Lago Yarrunga (também conhecido como Barragem de Talowa), Fitzroy Falls e Wingecarribee. Um pequeno lago (Bendeela) está localizado entre o Lago Yarrunga e Fitzroy Falls para ajudar na geração de energia hidrelétrica. A água é bombeada 127 m acima do Lago Yarrunga para o lago Bendeela, e mais 480 m acima do lago Bendeela para Fitzroy Falls durante a noite. Para a geração de energia hidrelétrica, a água é liberada de Fitzroy Falls para o Lago Yarrunga durante o período de pico de demanda de energia. Durante as secas, a água também é bombeada rio acima de Fitzroy Falls para Wingecarribee, onde sai do Sistema Shoalhaven, e é liberada para o Lago Burragorang, o principal reservatório de abastecimento de água da região de Sydney (FORNARELLI; ANTENUCCI; MARTI, 2013).

Fornarelli e Antenucci (2011) estudaram o efeito das transferências de água entre dois reservatórios na qualidade da água do reservatório receptor do Sistema Shoalhaven, na Austrália. Diferentes modos operacionais foram analisados para determinar mudanças

nas concentrações de nutrientes e metais, clorofila-a, gêneros de algas e biovolume. Os autores identificaram a concentração de ferro e o biovolume de diatomáceas como os principais indicadores de qualidade da água a serem incluídos para uma boa gestão que seja capaz de controlar o regime de transferência tanto da quantidade quanto da qualidade da água.

Ainda no caso do Sistema Shoalhaven, Fornarelli et al. (2013) utilizaram uma modelagem empírica para prever e entender a dinâmica do fitoplâncton em um reservatório afetado por transferências de água. Os autores observaram que as entradas e saídas dos reservatórios exercem um forte controle sobre a dinâmica das diatomáceas e das clorófitas, enquanto a temperatura da água, o nitrato e o fósforo determinam o biovolume de cianobactérias. Destacam além disso que a metodologia é aplicável a diferentes estudos ambientais e combina a força da modelagem empírica, ou seja, modelos compactos e previsões precisas, com um bom entendimento dos processos físicos envolvidos.

A China deu início no ano de 2002 à implementação do megaprojeto *South-North Water Diversion Project* (SNWDP), que visa transferir a água da Bacia do rio Yangtzé para a planície Norte da China. A conclusão do projeto está prevista para 2050, com um volume estimado de 44,8 bilhões de m³ por ano de água a ser transferida, beneficiando mais de 300 milhões de pessoas. O empreendimento contempla três rotas principais de transferência de água: Leste, Central e Oeste, além de conectar quatro grandes rios: Yangtzé, Huai, Amarelo e Hai (PRC, 2016; ZHAO; ZUO; ZILLANTE, 2017; ZHUANG, 2016).

Zeng, Qin e Li (2015) produziram um estudo para prever os impactos da transferência de água nas concentrações de nitrogênio e fósforo e o risco de eutrofização do sistema receptor do canal primário da rota central do SNWDP usando um modelo de código de dinâmica de fluidos ambientais. O modelo calibrado reproduziu com precisão a hidrodinâmica, a qualidade da água e todo o processo de proliferação de algas dos treze cenários definidos, e os resultados mostraram que para minimizar o impacto da transferência de água nos nutrientes e clorofila-a, a água deve ser transferida o mais uniformemente possível com pequena descarga. Os autores ainda destacaram que a variação da clorofila-a foi mais sensível a um aumento de fósforo do que a um aumento de nitrogênio para a água transferida.

Nong et al. (2020) analisaram as variações espaço-temporais e tendências de 16 parâmetros de qualidade da água também na rota central do SNWDP, utilizando o índice

de qualidade da água (IQA) e um novo modelo de IQA_{\min} construído usando análise de regressão linear múltipla. Os resultados demonstraram que o estado da qualidade da água da rota central do SNWDP foi mantido em um nível “excelente” durante o período de monitoramento e o modelo de IQA_{\min} proposto apresentou excelente desempenho na avaliação da qualidade da água do projeto, se mostrando como uma ferramenta útil e eficiente.

Além dos casos australiano e chinês explanados devido aos seus importantes estudos sobre os impactos da integração de bacias na qualidade da água, Azevedo et al. (2005) e Zhuang (2016) elencaram outros casos de projetos internacionais mundialmente conhecidos como o *Colorado-Big Thompson Project* nos EUA, o *Snowy Mountains Hydroelectric Scheme* na Austrália, o *Karakum Canal* na antiga União Soviética (que causou impressionante impacto no Mar de Aral), o *Lesotho Highlands Water Project* na África do Sul, dentre outros.

No Brasil geralmente foram implementados esquemas de menor porte para integração entre bacias. Além do PISF, que será explanado em maiores detalhes na próxima seção, os projetos brasileiros em sua maioria têm como objetivo transferir água para abastecimento de cidades com maior demanda e para a geração de energia. Azevedo et al. (2005) também relataram alguns casos brasileiros mais famosos como o sistema Alto Tietê-Baixada Santista e o Sistema Cantareira, ambos no estado de São Paulo, a transposição do rio Paraíba do Sul no Rio de Janeiro, o sistema Coremas - Mãe d'Água no estado da Paraíba, entre outros.

2.4 PROJETO DE INTEGRAÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO

Historicamente, a região Nordeste do Brasil é a menos beneficiada do fato de o país ter uma das maiores disponibilidades de água doce do mundo. A irregularidade da distribuição dos recursos hídricos afeta particularmente a região chamada de Nordeste Setentrional, formada pelos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco e fazem parte do Semiárido brasileiro. Devido a essa situação de vulnerabilidade à escassez hídrica, os habitantes dessa área convivem com a constante busca de diferentes estratégias para acesso ao abastecimento. Alguns exemplos são os grandes reservatórios (barragens), outros reservatórios menores, água da chuva, poços, caminhões-pipa, entre outros (AZEVEDO et al., 2017).

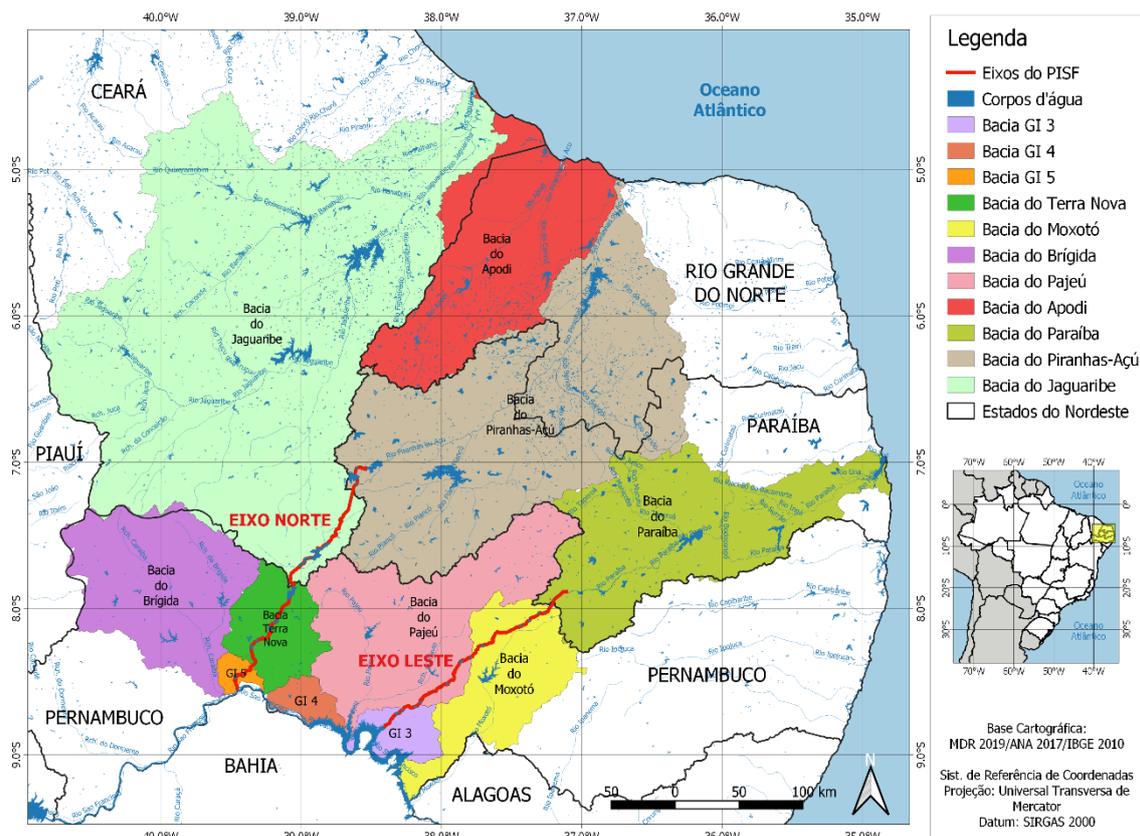
Segundo Ferreira (2019), a alternativa de transposição das águas do rio São Francisco foi apresentada pela primeira vez, em 1818, no governo de Dom João VI, e

havia a pretensão de levar as águas do São Francisco ao rio Jaguaribe, no Ceará. Depois disso, os avanços na proposição da obra só ocorreram a partir dos anos 2000, quando a ANA outorgou ao então Ministério da Integração Nacional o direito de uso de recursos hídricos do rio São Francisco, para a execução do Projeto de Integração do São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional por meio da Resolução Federal nº 411/2005 (BRASIL, 2005).

O Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) apresentado ao público em 2004 explica que o PISF é um empreendimento de infraestrutura hídrica para transferência de água entre bacias hidrográficas, formado por dois sistemas independentes, denominados Eixo Norte e Eixo Leste (Figura 5). Os eixos são compostos de canais, estações de bombeamento, pequenos reservatórios e usinas hidrelétricas para autossuprimento, que terão a finalidade de atender o fornecimento de água para vários usos como abastecimento humano, irrigação, dessedentação de animais, criação de peixes e de camarão em municípios do Semiárido, do Agreste Pernambucano e da Região Metropolitana de Fortaleza, numa área que possui cerca de 12 milhões de habitantes.

O PISF também tem sua importância no âmbito de uma política de desconcentração do desenvolvimento nacional, à medida que além de buscar garantir o abastecimento a longo prazo de grandes centros urbanos da região, como Fortaleza, Juazeiro do Norte, Crato, Mossoró, Campina Grande, Caruaru, João Pessoa e de centenas de pequenas e médias cidades do Semiárido, o projeto ainda favorece áreas com potencial econômico no interior do Nordeste (CODEVASF, 2017).

Figura 5 - Localização dos eixos do Projeto de Integração do Rio São Francisco



Fonte: CALDAS (2021).

As águas são captadas em dois pontos do curso do rio São Francisco entre os reservatórios de Sobradinho e Itaparica em Pernambuco e beneficiarão as bacias hidrográficas do rio Jaguaribe, no Ceará; do rio Piranhas-Açu, na Paraíba e Rio Grande do Norte; do rio Apodi, no Rio Grande do Norte; do rio Paraíba, na Paraíba; dos rios Moxotó, Terra Nova e Brígida, em Pernambuco, na própria bacia do rio São Francisco (MI, 2004).

Os canais principais foram projetados para uma capacidade máxima de 127 m³/s, divididas em 99 m³/s para o Eixo Norte e 28 m³/s para o Eixo Leste, que só poderão ser atingidas em períodos de abundância na Bacia do São Francisco (Sobradinho vertendo). Os volumes excedentes transferidos serão armazenados em reservatórios estratégicos existentes nas bacias receptoras, como: Castanhão, no Ceará; Armando Ribeiro Gonçalves, no Rio Grande do Norte; Epitácio Pessoa, na Paraíba; e Poço da Cruz, em Pernambuco (MDR, 2019).

O Eixo Norte, a partir da captação no rio São Francisco próximo à cidade de Cabrobó (PE), percorre cerca de 260 km, conduzindo água aos rios Salgado, Jaguaribe, Apodi e Piranhas-Açu e opera com uma vazão contínua de 16,4 m³/s. A infraestrutura do

eixo conta com 3 estações de bombeamento, 8 aquedutos, 3 túneis e 15 reservatórios construídos, listados no Quadro 2. A última etapa da obra física do Eixo Norte foi inaugurada em outubro de 2021, o trecho com 8 km de extensão entre os reservatórios Caiçara, em São José de Piranhas, e Engenheiro Ávidos, em Cajazeiras (PB) (BRASIL, 2021b).

Quadro 2 - Reservatórios do Eixo Norte do PISF e suas respectivas localizações

| Estado | Município | Reservatório |
|---------------|----------------------|----------------------------------|
| Pernambuco | Cabrobó | Tucutu |
| | | Terra Nova |
| | | Serra do Livramento |
| | Salgueiro | Mangueira |
| | | Negreiros |
| | Verdejante | Milagres |
| Ceará | Jati | Jati |
| | Brejo Santo | Atalho (já existente) |
| | | Porcos |
| | | Cana Brava |
| | | Cipó |
| | | Boi I |
| | | Boi II |
| Paraíba | São José de Piranhas | Morros |
| | | Boa Vista |
| | | Caiçara |
| | Cajazeiras | Engenheiro Ávidos (já existente) |

Fonte: MDR (2019).

O Eixo Leste se estende por 217 km partindo do reservatório de Itaparica (PE) em direção ao Leste no estado de Pernambuco, passando pelas bacias do Pajeú, do Moxotó e da região do Agreste pernambucano até chegar ao rio Paraíba, no município de Monteiro (PB), funcionando com uma vazão contínua de 10 m³/s. Em 2017 as obras das estruturas diretamente envolvidas na passagem da água (caminho das águas) foram concluídas, permitindo a chegada das águas do PISF ao açude Epitácio Pessoa em abril daquele ano, beneficiando mais de 1 milhão de pessoas em Campina Grande e região. Em setembro de 2018 foram iniciados os testes na Adutora do Moxotó, favorecendo a população do Agreste pernambucano. Atualmente o bombeamento do Eixo Leste está em funcionamento, conforme demanda dos estados beneficiados, e conta com 6 estações de bombeamento, 5 aquedutos, 1 túnel e 12 reservatórios construídos, listados no Quadro 3 (MDR, 2020).

Quadro 3 - Reservatórios do Eixo Leste do PISF e suas respectivas localizações

| Estado | Município | Reservatório |
|---------------|------------------|--------------------------------|
| Pernambuco | Floresta | Areias |
| | | Braúnas |
| | | Mandantes |
| | | Salgueiro |
| | | Muquém |
| | Custódia | Cacimba Nova |
| | | Bagres |
| | | Copiti |
| | | Barro Branco |
| | Sertânia | Moxotó |
| | | Barreiro |
| | | Campos |
| Barro Branco | | |
| Paraíba | Monteiro | Poções (já existente) |
| | Camalaú | Camalaú (já existente) |
| | Boqueirão | Epitácio Pessoa (já existente) |
| | Itatuba | Acauã (já existente) |

Fonte: MDR (2019).

Devido ao grande porte do projeto, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) condicionou para o seu processo de licenciamento ambiental a implantação de um Projeto Básico Ambiental (PBA) que contempla 38 Planos e/ou Programas Ambientais, com o objetivo de propor medidas mitigadoras, compensatórias, de monitoramento e controle ambiental, frente aos impactos inerentes à execução do PISF. As ações executadas no âmbito de cada um dos 38 Programas Ambientais são semestralmente avaliadas pelo órgão licenciador, de forma a promover melhorias nos resultados e nas condições ambientais das áreas de influência do empreendimento (MI, 2018). Os dados de qualidade da água avaliados neste trabalho são parte de um desses programas ambientais.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é caracterizada a área de estudo, como também são apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para o alcance dos objetivos propostos. Contendo os cálculos realizados para obtenção dos índices de avaliação da qualidade da água, técnicas estatísticas empregadas e análise do uso do solo no Eixo Norte do PISF.

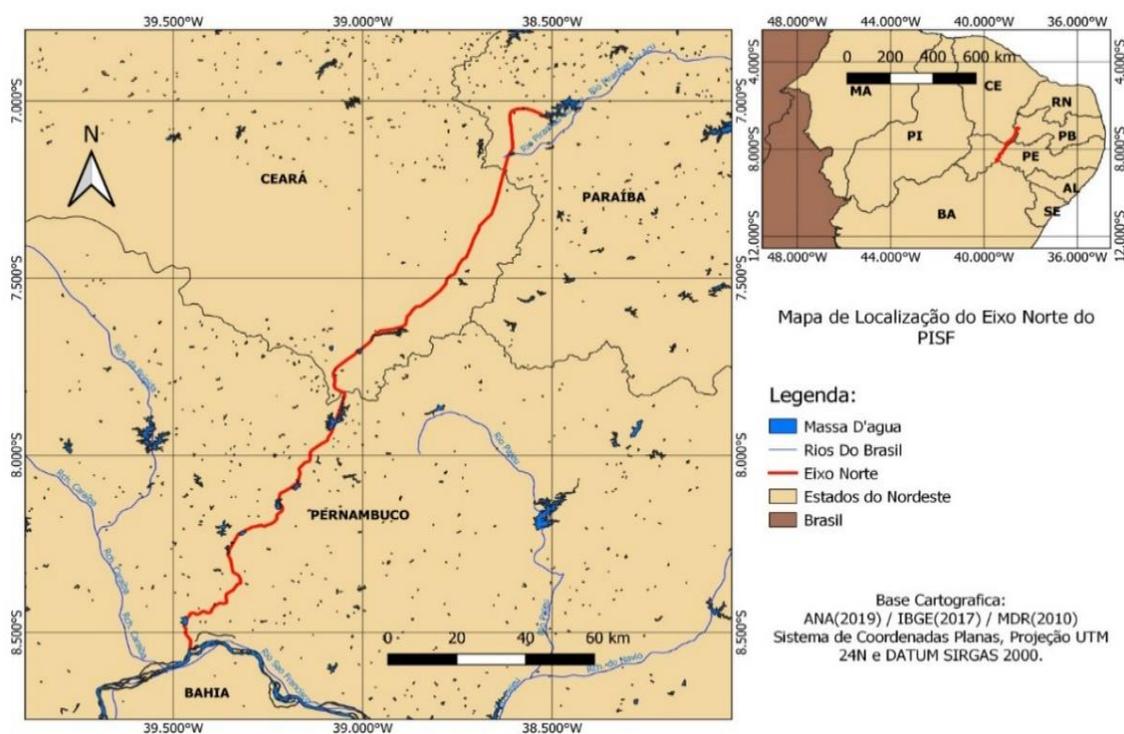
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi desenvolvido em um trecho do Eixo Norte do PISF. Trabalhou-se com reservatórios do Eixo Norte do PISF por ser uma área que apresenta poucos estudos na temática abordada. Sendo escolhido como área de estudo por sua relevância para o

desenvolvimento do semiárido nordestino e por representar uma importante alternativa para o fornecimento adequado de água, contribuindo para amenizar o déficit hídrico de uma região que se encontra dentro do Polígono das Secas. Considerando-se de grande importância verificar a qualidade da água nos reservatórios com a chegada do PISF, onde o último reservatório desse estudo veio a receber as águas da transposição em agosto de 2020.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional - MDR (2019), o Eixo Norte possui 260 km de extensão e beneficiará mais de 7 milhões de pessoas em 222 municípios dos estados de Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará. A Figura 6 apresenta a localização do Eixo Norte do PISF e os respectivos reservatórios do eixo.

Figura 6 - Mapa de localização do eixo norte do PISF



Fonte: A autora (2021).

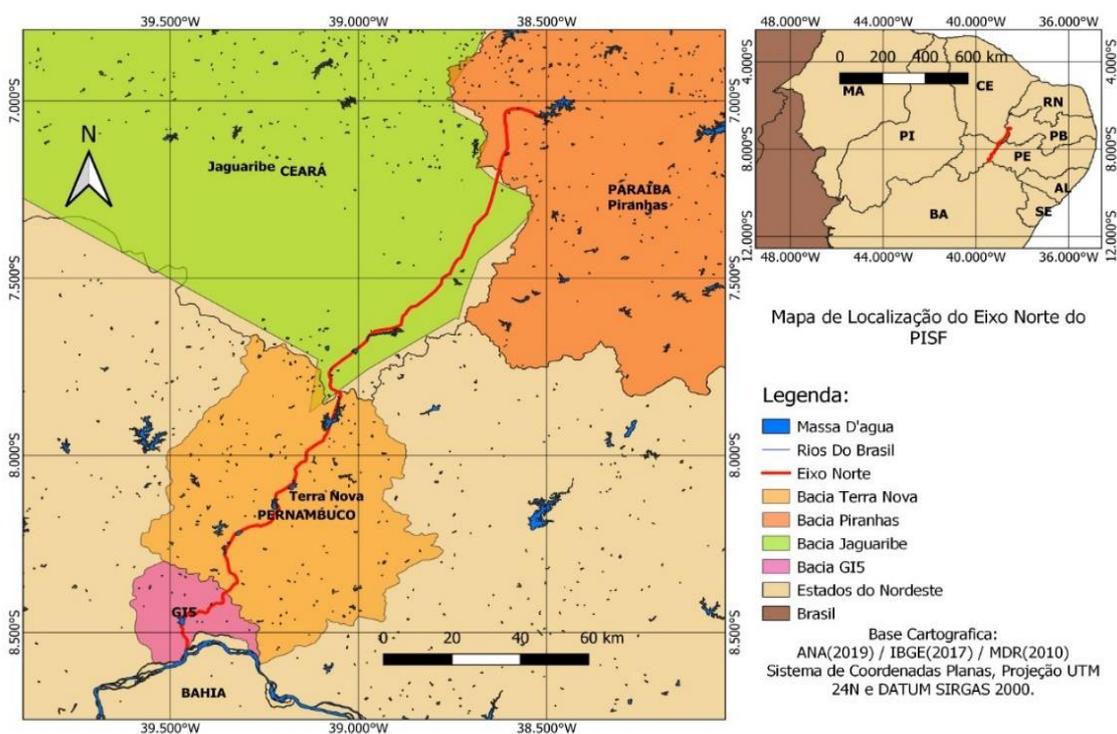
Em seu trajeto, o Eixo Norte passa pelos seguintes municípios: Cabrobó, Salgueiro, Terra Nova e Verdejante, em Pernambuco; Pena Forte, Jati, Brejo Santo, Mauriti e Barro, no Ceará; e em São José de Piranhas, Monte Horebe e Cajazeiras, na Paraíba. Onde será responsável por abastecer grandes centros urbanos como Fortaleza (CE), Juazeiro do Norte (CE) e Mossoró (RN) (RIMA, 2004; MDR, 2016).

O Eixo Norte tem sua captação no rio São Francisco no município de Cabrobó (PE), levando águas do rio São Francisco até as bacias dos rios Salgado e Jaguaribe, no Ceará, Apodi no Rio Grande do Norte e Piranhas-Açu nos estados da Paraíba e Rio

Grande do Norte. Este eixo foi projetado para uma capacidade máxima de 99 m³/s e operando com vazão contínua de 16,4 m³/s (CASTRO, 2011).

O percurso do Eixo Norte em estudo é composto por 04 bacias a partir da captação que é realizada na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, onde segue no Estado de Pernambuco pela bacia de Grupo de bacias de pequenos rios interiores 5 – GI 5 e a Bacia Hidrográfica do rio Terra Nova. No Ceará faz parte do trecho a Bacia Hidrográfica dos rios Salgado/Jaguaribe, da qual o último açude a ser analisado nesse estudo faz parte, que é o Reservatório de Atalho. Finalizando na Bacia Hidrográfica do rio Piranhas no estado da Paraíba e do Rio Grande do Norte. A Figura 7 mostra a disposição dessas bacias no Eixo Norte do PISF.

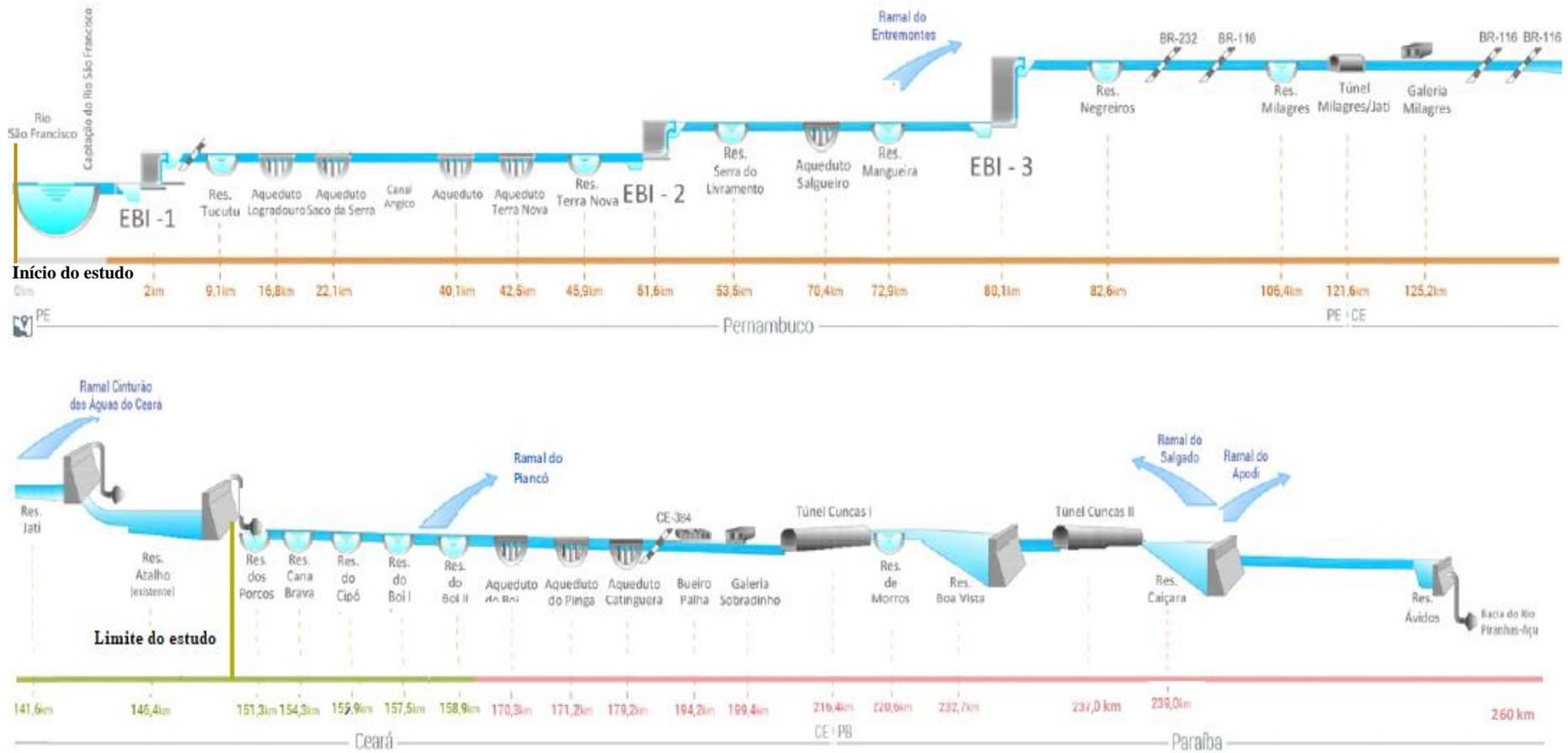
Figura 7 - Bacias Hidrográficas na qual o Eixo Norte está inserido



Fonte: A autora (2021).

Ao longo de seu curso, há 3 estações de bombeamento (EBI - 1, 2, 3), 8 aquedutos, 5 segmentos de canais, 3 túneis, 15 reservatórios construídos e 01 reservatório existente (Atalho) que faz parte do eixo, até chegar ao Açude também existente Engenheiro Ávidos, em Cajazeiras (PB), e seguir pela Bacia do rio Piranhas-Açu. A Figura 8 mostra o diagrama esquemático do Eixo Norte do PISF. É importante destacar que embora as obras físicas do Eixo Norte do PISF estejam quase concluídas e o sistema em operação, o eixo encontra-se em período de teste e possui apenas a Licença de Instalação (LI) N° 1344/2020, que teve seu prazo encerrado em 17/03/2022.

Figura 8 - Diagrama esquemático do Eixo Norte do PISF



Fonte: Adaptado de MDR (2020).

A área estudada é compreendida por apenas um trecho do Eixo Norte, composto por 01 (um) reservatório existente, que é o Reservatório Atalho e 07 (sete) reservatórios projetados. Os reservatórios projetados no trecho do estudo são reservatórios de pequeno porte, esses são denominados de reservatórios de compensação.

O Quadro 4 a seguir mostra o resumo das características físicas dos reservatórios do estudo, bem como informações acerca de sua localização.

Quadro 4 - Características dos reservatórios projetados e existente no trecho do Eixo Norte do PISF

| Sub-bacia Hidrográfica | Reservatório | Área (ha) | Volume útil (m ³) | Função | Município |
|------------------------|---------------------|-----------|-------------------------------|--|--------------------|
| GI 5 | Tucutu | 351,98 | 8,38 x 10 ⁶ | Passagem | Cabrobó |
| Terra Nova | Terra Nova | 230,65 | 2,60 x 10 ⁶ | Compensação | |
| | Serra do Livramento | 155,88 | 14,15 x 10 ⁶ | Compensação | |
| | Mangueira | 320,09 | 11,50 x 10 ⁶ | Compensação, derivação de 25m ³ /s para o ramal de Entremontes | Salgueiro |
| | Negreiros | 244,69 | 16,00 x 10 ⁶ | Compensação | |
| | Milagres | 1114,52 | 70,00 x 10 ⁶ | Passagem | Verdejante |
| Salgado / Jaguaribe | Jati | 129,40 | 13,72 x 10 ⁶ | Derivação para o ramal cinturão das águas do Ceará e para UHE com potência instalada de 49MW | Jati |
| | Atalho | 554,53 | 108,25 x 10 ⁶ | Derivação de água para UHE com potência instalada de 18,5MW | Jati e Brejo Santo |

Fonte: MI (2016a, 2016b, 2016c).

3.2 AMOSTRAGEM E ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

Os dados físico-químicos e biológicos para estudo da qualidade da água utilizados para esta pesquisa, são provenientes do Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia – Programa Básico Ambiental (PBA) 22 do PISF. Estes foram coletados pela empresa CMT – Engenharia Ambiental. A realização do PBA 22 se dá por meio da parceria entre o Ministério de Desenvolvimento Regional (antigo Ministério da Integração Nacional) e a Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Este programa é uma condicionante do IBAMA no processo de licenciamento ambiental do empreendimento. O monitoramento teve início no ano de 2009, paralelamente às atividades de implantação do Projeto.

O monitoramento é realizado em 83 (oitenta e três) pontos de coleta, distribuídos ao longo dos dois eixos do PISF. Até o final de 2019 já foram executadas 25 (vinte e cinco) campanhas de monitoramento. Para esta pesquisa foram analisados os dados coletados em 10 (dez) campanhas realizadas entre os anos de 2014 e 2019, ou seja, as 10

últimas campanhas efetuadas (Figura 9). Foram estudados 11 (onze) pontos de monitoramento ao longo do Eixo Norte, iniciando no ponto de captação em Cabrobó-PE até o reservatório Atalho no Ceará.

Figura 9 - Campanhas de monitoramento da qualidade da água do Eixo Norte do PISF analisadas na pesquisa, incluindo as datas e o clima no período das coletas



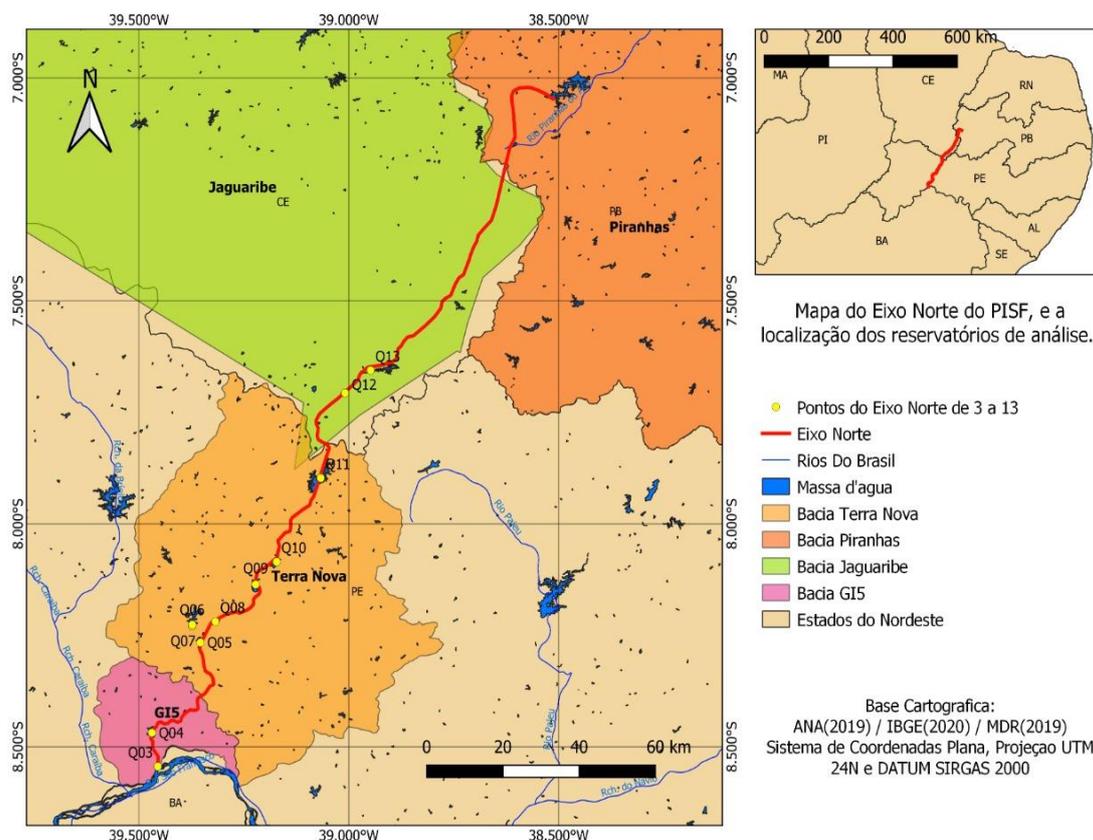
Fonte: Adaptado de Ferreira (2016).

Os dados a partir da 19ª campanha, realizada em 2015, já correspondem ao período de teste do Eixo Norte no Reservatório de Tucutu que já recebe águas do rio São Francisco, e os demais receberam as águas em fase de teste no decorrer das demais campanhas.

A análise de dados começou na campanha 16, mas a campanha 17 não foi alvo do estudo por ausência de dados para os pontos do estudo. Embora a pesquisa tenha sido efetuada de 2020 a 2022, não se obteve dados posteriores a 2019, isso decorreu da situação adversa que foi o estado de calamidade pública decorrente da pandemia da COVID-19, com isso inviabilizou a possibilidade de coleta pelas restrições existentes mundialmente. Sendo assim, o antes e depois do recebimento das águas do PISF de alguns dos reservatórios desse estudo não puderam ser analisados, pois as águas da transposição só chegaram a operar neles em 2020 e não houve ensaios posteriores até a data de elaboração da pesquisa.

A fim de comparar a qualidade da água recebida nos reservatórios inseridos no trecho do Eixo Norte, foram analisados os resultados de qualidade da água referentes ao ponto de amostragem no rio São Francisco, no ponto de captação do Eixo Norte, no município de Cabrobó/PE. As localizações das estações de amostragem, bem como o período que começou a receber águas do PISF em cada reservatório encontram-se detalhadas na Figura 10 e Quadro 5.

Figura 10 - Localização das estações de monitoramento da qualidade da água avaliadas nesta pesquisa ao longo do Eixo Norte



Fonte: A autora (2021).

Quadro 5 - Estações de amostragem do Eixo Norte do PISF, suas localizações e respectivos tipos de ambientes onde se encontram

| Ponto | Descrição | Coordenadas* | | Altitude ** (m) | Tipo de Ambiente | Chegada das águas do PISF | Bacia hidrográfica |
|-------|---|--------------|---------|--------------------|------------------|---------------------------|--------------------|
| | | X | Y | | | | |
| Q3 | Rio São Francisco (captação eixo norte) | 449878 | 9055492 | 331 | Lótico | | São Francisco |
| Q4 | Reservatório Tucutu | 448344 | 9063827 | 358 | Lêntico | agosto/2015 | GI 5 |
| Q5 | Reservatório Terra Nova (projetado) | 461034 | 9086220 | 355 | Lêntico | dezembro/2015 | Terra Nova |
| Q6 | Reservatório Terra Nova (existente) | 458862 | 9090348 | 362 | Lêntico | dezembro/2015 | |
| Q7 | Reservatório Terra Nova (existente – jusante) | 458901 | 9090632 | 365 | Lêntico | dezembro/2015 | |
| Q8 | Reservatório Serra do livramento | 464964 | 9091402 | 400 | Lêntico | março/2017 | |
| Q9 | Reservatório Mangueira | 475533 | 9100635 | 399 | Lêntico | março/2017 | |
| Q10 | Reservatório Negreiros | 481020 | 9106262 | 499 | Lêntico | novembro/2019 | |
| Q11 | Reservatório Milagres | 492599 | 9127011 | 509 | Lêntico | janeiro/2020 | |
| Q12 | Reservatório Jati | 498979 | 9148098 | 460 | Lêntico | junho/2020 | Jaguaribe |
| Q13 | Reservatório Atalho | 505687 | 9153728 | 419 | Lêntico | agosto/2020 | |

*Sistema de Projeção UTM, Datum SAD-69. **Google Earth

Fonte: Adaptado de MI (2004).

Em relação aos parâmetros analisados, foram considerados os parâmetros necessários para realizar o cálculo do Índice de Qualidade das Águas (IQA) e do Índice de Estado Trófico (IET). Foram analisados ao todo 11 (onze) parâmetros de qualidade da água: temperatura, oxigênio dissolvido, potencial hidrogeniônico (pH), turbidez, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), fósforo total, nitrogênio total, sólidos dissolvidos totais, sólidos suspensos totais, coliformes termotolerantes e clorofila-a.

A CMT Engenharia Ambiental coleta e realiza a avaliação de determinados parâmetros em campo, as amostras dos ensaios são transportadas para os respectivos laboratórios onde são realizadas as demais análises. Foram consideradas para este estudo os dados das amostras coletadas na superfície, a uma profundidade aproximada de até 30 cm, com o auxílio de garrafa de *Van Dorn*. A aferição dos resultados das análises das variáveis físico-químicas e biológicas seguiu as metodologias descritas em bibliografia técnica (Tabela 1), sendo executadas pelo laboratório AgroSafety Monitoramento Agrícola, que é devidamente credenciado e certificado pelo INMETRO.

Tabela 1 - Variáveis físico-químicas e biológicas de campo e de laboratório com suas respectivas metodologias de análise

| Parâmetros | Sigla | Unidade | LQ | Método |
|--------------------------------|-------|--------------------------|-----|---|
| Campo | | | | |
| Temperatura | Temp. | °C | | Sonda multiparamétrica (Horiba, modelo B-213) |
| Oxigênio dissolvido | OD | mg/L O ₂ | - | |
| pH | pH | - | | |
| Turbidez | Turb | UNT | | |
| Laboratório | | | | |
| Demanda Bioquímica de Oxigênio | DBO | mg/L O ₂ | 2 | POPMET357, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 5210 B |
| Fósforo total | PT | mg/L | 0,1 | POPMET375, SMWW 23ª Edição 2017 - Métodos 3030 E e 3120 B |
| Nitrogênio total | NT | mg/L | 0,5 | POPMET348 |
| Sólidos Dissolvidos totais | SDT | mg/L | 10 | POPMET236, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 2540 |
| Sólidos Suspensos totais | SST | mg/L | 10 | POPMET354, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 2540 D |
| Coliformes termotolerantes | Coli | NMP.100 mL ⁻¹ | 1 | POPMET397, SMWW 22ª Edição 2012 |
| Clorofila-a | Cl-a | µg/L | 5,5 | POPMET391, SMWW 22ª Edição 2012 - Método 10200 H |

Fonte: Adaptado de MI, 2004.

Os resultados obtidos dos parâmetros que possuem referência, foram relacionados aos padrões indicados na Resolução nº 357/2005 do CONAMA (Tabela 2), que estabelece limites para qualidade da água em rios de águas doces Classe 2, ao qual está proposto o enquadramento da calha principal do rio São Francisco (IBAMA, 1989; SUDEMA, 1988).

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da água utilizados na pesquisa com valores máximos permitidos de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005

| Parâmetros | Valor máximo permitido para Classe 2 |
|--------------------------------|--|
| Temperatura | 40°C |
| Oxigênio dissolvido | ≥ 5 mg/L O ₂ |
| pH | 6 a 9 |
| Turbidez | 100 UNT |
| Demanda Bioquímica de Oxigênio | 5 mg/L O ₂ |
| Fósforo total | 0,030 mg/L P em ambientes lênticos 0,050 mg/L P em ambientes intermediários |
| Nitrogênio total | 1,27 mg/L N em ambientes lênticos 2,18 mg/L N em ambientes lóticos |
| Sólidos Dissolvidos Totais | 500 mg/L |
| Coliformes termotolerantes | 1.000 NMP/100 mL |
| Clorofila-a | ≤ 30 µg/L |
| Sólidos Suspensos Totais | - |

Fonte: CONAMA, 2005.

3.3 CÁLCULO DOS ÍNDICES PARA AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

Para avaliação da qualidade da água nos pontos monitorados ao longo do Trecho do Eixo Norte, foram determinados os seguintes índices: Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET), ambos calculados de acordo com CETESB (2019a).

3.3.1 Cálculo do índice de Qualidade da Água – IQA

O IQA foi desenvolvido a partir de um estudo desenvolvido nos Estados Unidos em 1970, e adaptado pela CETESB, incorporando variáveis consideradas importantes para a determinação da qualidade da água destinada ao abastecimento público. O cálculo do IQA é realizado através do produtório ponderado das qualidades de água das variáveis que compõem o índice, aplicando a Equação 1:

$$IQA = \prod_{i=q}^n q_i^{w_i} \quad (1)$$

Onde:

- IQA Índice de Qualidade das Águas, um número entre 0 e 100;
- q_i Qualidade do i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida;
- w_i Peso correspondente ao i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade;
- n Número de variáveis que entram no cálculo do IQA.

Os parâmetros utilizados para o cálculo deste índice são: coliformes fecais, pH, DBO, nitrogênio total, fósforo total, temperatura, turbidez, sólidos totais e oxigênio dissolvido. A ausência de qualquer uma dessas variáveis inviabiliza a realização do cálculo do IQA. O peso atribuído a cada parâmetro de acordo com sua importância relativa no cálculo do IQA é especificado na Tabela 3.

Tabela 3 - Peso relativo dos parâmetros utilizados no Índice de Qualidade de Água

| Parâmetros | Peso (w) |
|--------------------------------|----------|
| Oxigênio dissolvido | 0,17 |
| Coliformes termotolerantes | 0,15 |
| pH | 0,12 |
| Demanda bioquímica de oxigênio | 0,10 |
| Nitrogênio total | 0,10 |
| Fósforo total | 0,10 |
| Diferença de temperatura | 0,10 |
| Turbidez | 0,08 |
| Sólidos totais | 0,08 |

Fonte: CETESB (2019a).

A partir do cálculo efetuado, o IQA indica um valor numa escala de 0 a 100 que representa a qualidade da água bruta em cinco categorias, representadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Categorias e valores de ponderação resultantes do cálculo do Índice de Qualidade da Água – IQA

| Categoria | Ponderação |
|-----------|---------------------|
| Ótima | $79 < IQA \leq 100$ |
| Boa | $51 < IQA \leq 79$ |
| Regular | $36 < IQA \leq 51$ |
| Ruim | $19 < IQA < 36$ |
| Péssima | $IQA \leq 19$ |

Fonte: CETESB (2019a).

3.3.2 Cálculo do índice de Estado Trófico - IET

O Índice do Estado Trófico é aplicado para indicar o grau de trofia do corpo d'água, avaliando a qualidade da água em relação à presença de nutrientes e seus efeitos quanto ao crescimento excessivo de algas e cianobactérias, ou seja, o potencial de eutrofização do meio analisado. Para este cálculo são utilizadas as variáveis clorofila-a e fósforo total.

O fósforo é considerado por ser um nutriente relevante, que atua como agente causador da eutrofização. Enquanto os dados de clorofila-a indicam o nível de crescimento de algas, resultante do excesso de nutrientes. Corpos hídricos em processo de eutrofização, tendem a apresentar valores mais elevados destas variáveis.

O cálculo de IET possui variações em sua fórmula entre os ambientes lânticos e os lóticos, conforme demonstrado nas Equações 2, 3, 4 e 5.

Ambientes lóticos (rios):

$$IET (CL) = 10 \times (6 - ((-0,7 - 0,6 \times (\ln CL))/\ln 2)) - 20 \quad (2)$$

$$IET (PT) = 10 \times (6 - ((-0,42 - 0,36 \times (\ln PT))/\ln 2)) - 20 \quad (3)$$

Ambientes lênticos (reservatórios):

$$IET (CL) = 10 \times (6 - ((-0,92 - 0,34 \times (\ln CL))/\ln 2)) \quad (4)$$

$$IET (PT) = 10 \times (6 - ((-1,77 - 0,42 \times (\ln PT))/\ln 2)) \quad (5)$$

Onde:

PT Concentração de fósforo total medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;

CL Concentração de clorofila a medida à superfície da água, em $\mu\text{g.L}^{-1}$;

ln Logaritmo natural.

O valor final no IET é resultante de uma média aritmética simples dos índices obtidos para o fósforo total e a clorofila-a, aplicando a Equação 6.

$$IET = [IET(PT) + IET(CL)]/2 \quad (6)$$

Os valores do IET encontrados serão enquadrados nos limites estabelecidos para as diferentes classes de trofia para rios e reservatórios, descritos nas Tabelas 5 e 6 a seguir.

Tabela 5 - Classificação do Estado Trófico para rios

| Classificação do Estado Trófico – Rios | | | |
|--|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| Categoria (Estado Trófico) | Ponderação | Fósforo Total (mg.m^{-3}) | Clorofila-a (mg.m^{-3}) |
| Ultraoligotrófico | $IET \leq 47$ | $P \leq 13$ | $CL \leq 0,74$ |
| Oligotrófico | $47 < IET \leq 52$ | $13 < P \leq 35$ | $0,74 < CL \leq 1,31$ |
| Mesotrófico | $52 < IET \leq 59$ | $35 < P \leq 137$ | $1,31 < CL \leq 2,96$ |
| Eutrófico | $59 < IET \leq 63$ | $137 < P \leq 296$ | $2,96 < CL \leq 4,70$ |
| Supereutrófico | $63 < IET \leq 67$ | $296 < P \leq 640$ | $4,70 < CL \leq 7,46$ |
| Hipereutrófico | $IET > 67$ | $640 < P$ | $7,46 < CL$ |

Fonte: CETESB (2019a).

Tabela 6 - Classificação do Estado Trófico para reservatórios

| Classificação do Estado Trófico – Reservatórios | | | | |
|---|--------------------|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Categoria (Estado Trófico) | Ponderação | Secchi -S (m) | P-Total - P (mg.m^{-3}) | Clorofila-a (mg.m^{-3}) |
| Ultraoligotrófico | $IET \leq 47$ | $S \geq 2,4$ | $P \leq 13$ | $CL \leq 0,74$ |
| Oligotrófico | $47 < IET \leq 52$ | $2,4 > S \geq 1,7$ | $13 < P \leq 35$ | $0,74 < CL \leq 1,31$ |
| Mesotrófico | $52 < IET \leq 59$ | $1,7 > S \geq 1,1$ | $35 < P \leq 137$ | $1,31 < CL \leq 2,96$ |
| Eutrófico | $59 < IET \leq 63$ | $1,1 > S \geq 0,8$ | $137 < P \leq 296$ | $2,96 < CL \leq 4,70$ |
| Supereutrófico | $63 < IET \leq 67$ | $0,8 > S \geq 0,6$ | $296 < P \leq 640$ | $4,70 < CL \leq 7,46$ |
| Hipereutrófico | $IET > 67$ | $0,6 > S$ | $640 < P$ | $7,46 < CL$ |

Fonte: CETESB (2019a).

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

Para que se tenha uma adequada gestão dos recursos hídricos é essencial que existam programas regulares de monitoramento da qualidade das águas. Porém, acaba gerando um grande conjunto de dados, o que torna difícil a interpretação e análise deles, dificultando concluir quais ações devem ser tomadas.

De acordo com Trindade (2013) o emprego de técnicas de análise estatística multivariada é bastante utilizado em estudos para interpretação de grandes e complexos conjuntos de dados. Algumas dessas técnicas vêm sendo utilizadas para auxiliar na resolução dos problemas de poluição dos ecossistemas aquáticos, bem como no planejamento de redes de monitoramento eficientes para a gestão de recursos hídricos (SALES *et al.*, 2009; TRINDADE, 2013).

A partir dos resultados dos dados coletados no monitoramento de pontos do Eixo Norte do PISF durante as campanhas 16 a 25, foi realizada a análise estatística multivariada através das técnicas de Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis*) e Análise de Agrupamentos (*Cluster Analysis*). Para isso, ambas foram executadas no programa computacional livre “R” versão 3.6.1 (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2019), mediante o uso de pacotes que efetuam determinadas funções em um *script*.

3.4.1 Análise de componentes principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais é um método usado para simplificar dados multivariados, pois tem como objetivo reduzir ao máximo o tamanho de dados originais correlacionados, em um conjunto menor de variáveis novas não correlacionadas entre si, caracterizando ao máximo possível a variação no conjunto de dados, com uma perda mínima de informação (HAIR *et al.*, 2009; GOTELLI; ELLISON, 2011).

Quando as variáveis estudadas possuem diferentes escalas de medidas, é necessário que seja realizada a padronização desses dados para que a aplicação da ACP seja bem-sucedida. A padronização é necessária para que todas as variáveis possam ter a mesma escala relativa, e é obtida usando transformações como a da Equação 7:

$$Z = \frac{(Y_i - \bar{Y})}{s} \quad (7)$$

Onde:

Y_i Valor de cada observação da variável;

- \bar{Y} Média amostral;
s Desvio-padrão amostral.

Vários critérios têm sido adotados para auxiliar no processo de seleção do número de Componentes Principais (CPs) a ser retido. Nesta pesquisa, foi aplicado um dos mais frequentemente utilizados, o critério de percentagem da variância, que se baseia em obter um percentual cumulativo especificado da variância total extraída por fatores sucessivos (HAIR et al, 2009). Assim como em outros estudos, será adotado os que explicam mais de 70% da variabilidade total (JOLLIFFE 1972; JOLLIFE 1973; CALDAS, 2021).

Outra ferramenta utilizada foi o gráfico que indica separação visual dos componentes, denominado de *screeplot* ou gráfico de sedimentação, sendo uma ferramenta útil para examinar a contribuição de cada componente principal para a toda ACP. Trata-se do gráfico de autovalores da matriz de covariância em função das componentes principais, que ilustra a porcentagem de variação (autovalor) em ordem decrescente explicada por cada componente. O ponto onde se observa uma estabilização da variância explicada, indica o número de componentes que se deveria reter (GOTELLI; ELLISON, 2011; PALACIO et al., 2020).

Com o número de CPs a ser retido determinado, é interessante desenhar as cargas de um Componente Principal. Um gráfico *biplot* dos dois primeiros CPs (CP1 x CP2) revela quais das medidas originais estão mais proximamente associadas a cada um dos Componentes, bem como quais medidas são mais semelhantes, refletidas por pontos que são próximos no gráfico (LATTIN et al., 2011).

Para a aplicação da técnica ACP aos dados no *software* R, foi utilizado o pacote *FactoMineR*, que executa automaticamente a padronização dos dados para eliminar o efeito de escala e unidades, através da conversão das variáveis para escores padrões. Foram utilizadas as funções *fviz_eig()* para gerar o gráfico de sedimentação e *fviz_pca_biplot()* para gerar o gráfico biplot, ambas do pacote *factoextra*.

3.4.2 Análise de Agrupamentos

A Análise de Agrupamentos, também conhecida como Análise de Cluster (*cluster analysis*) é uma técnica analítica que tem como objetivo agrupar entidades (indivíduos ou objetos) de uma amostra em subgrupos (chamado de *clusters*) com base na similaridade entre as entidades (HAIR et al., 2009; GOTELLI; ELLISON, 2011; PALACIO et al.,

2020). Os *clusters* obtidos devem apresentar alta homogeneidade interna (dentro do *cluster*) e alta heterogeneidade externa (entre os *cluster*).

Existem vários métodos disponíveis para agrupar dados, e, segundo Gotelli e Ellison (2011) o mais utilizado por ecólogos e cientista da área ambiental é o Método Hierárquico. Logo, será utilizado o Método Hierárquico aglomerativo nesta pesquisa para definir a semelhança (ou diferença) entre as entidades, começando com o par mais similar de entidades e formando *clusters* maiores, até que se tenha apenas um *cluster*. O método hierárquico é normalmente ilustrado por um gráfico denominado de dendrograma, este apresenta um formato de árvore cujo intuito é fornecer um resumo de forma visual do passo a passo dos agrupamentos (TRINDADE, 2013).

A interpretação básica é que quanto menor a distância entre os pontos no dendrograma, maior a semelhança entre as amostras. O corte do dendrograma que estabelece os *clusters* no presente estudo foi determinado em relação às maiores distâncias em que os grupos foram formados, e posterior análise dos agrupamentos formados com o conhecimento prévio dos dados para uma decisão lógica do número de grupos

A padronização dos dados é fundamental, pois além de eliminar a influência de diferentes unidades de medida, ela torna os dados adimensionais (TRINDADE, 2013). A formação da matriz de similaridade foi construída com a distância euclidiana quadrada (*Squared Euclidean Distance*) combinada com o método de Ward para formação dos agrupamentos, combinação semelhante vem sendo frequentemente utilizada em estudos que envolvem qualidade da água (ARAÚJO et al., 2020; GOMES et al., 2020; CALDAS, 2021).

Devido ao grande volume de dados coletados para as dez campanhas estudadas nessa pesquisa, os dados médios de cada parâmetro foram analisados considerando dois períodos distintos: as campanhas realizadas nas estações chuvosa e seca para cada ponto de monitoramento.

Para a aplicação da Análise de Agrupamento Hierárquico no *software* R, inicialmente foi executada a padronização dos dados para eliminar o efeito de escala e unidades através da função `scale()`. Em seguida, foi utilizada a função `dist()` para o cálculo da matriz de similaridade. A função `hclust()` foi usada para aplicar o método de Ward e a função `fviz_dend()` do pacote `factoextra` para gerar a visualização do dendrograma.

3.5 INFLUÊNCIA DO USO DO SOLO NO ENTORNO DOS RESERVATÓRIOS

A análise do uso e ocupação do solo no entorno dos reservatórios do estudo foi realizada a partir dos Planos Ambientais de Conservação e Uso do Entorno dos Reservatórios Artificiais - PACUERAs e complementada com uma visita de campo para reconhecimento da área estudada.

O PACUERA vem a ser um documento de grande importância, pois é um instrumento de planejamento e gestão de áreas circunvizinhas aos reservatórios. É definido como um “conjunto de diretrizes e proposições com o objetivo de disciplinar a conservação, recuperação, o uso e ocupação do entorno do reservatório artificial” (MI, 2016a).

A análise realizada foi fundamentada nos documentos contratados pelo Ministério da Integração Nacional e elaborados pela empresa CMT Engenharia Ambiental, que também é responsável pelo PBA-22 anteriormente citado. O PACUERA é composto por dois documentos:

- **Diagnóstico ambiental:** constituído de levantamento de dados secundários, análise documental, visita técnica de campo e, finalmente, da consolidação do diagnóstico;
- **Zoneamento ambiental:** onde utilizou-se o resultado do diagnóstico ambiental para elaboração dos mapas temáticos contendo as informações do estabelecimento de critérios de zoneamento e elaboração de programas ambientais.

Os PACUERAs dos reservatórios projetados no âmbito do PISF foram realizados pelo PBA 14. Este é um dos 38 Programas Básicos Ambientais, que são condicionantes do IBAMA no processo de licenciamento ambiental de instalação do empreendimento. Foram elaborados por sub-bacia hidrográfica.

Os reservatórios alvos do estudo fazem parte de três sub-bacias e conseqüentemente analisou-se seis (diagnóstico e zoneamento ambiental de cada sub-bacia) documentos referentes à: sub-bacia do grupo de bacias de pequenos rios litorâneos GI5, sub-bacia do rio Terra Nova e sub-bacia do rio Salgado.

A visita de campo foi realizada com o intuito de conhecer a área e o entorno dos reservatórios e a análise dos documentos teve como finalidade caracterizar os processos antrópicos que atuam nestes corpos hídricos e como estes influenciam ou podem influenciar a qualidade das águas dos reservatórios.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia adotada, tendo como intuito o de atender aos objetivos traçados, iniciando pela análise dos parâmetros físico-químicos, seguido pelos índices de qualidade da água e índices de estado trófico dos pontos avaliados, bem como das análises estatísticas para estes dados, uma análise do uso do solo a partir dos PACUERAs referentes a área de estudo no Eixo Norte do PISF, também incluiu-se a discussão relativa dos estudos similares e que alcançaram resultados que corroboram ou não com os encontrados nesta pesquisa.

4.1 ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Foram analisados os resultados das análises de qualidade da água em 11 (onze) estações de monitoramento, distribuídas em 04 (quatro) bacias hidrográficas. Nas bacias dos rios São Francisco (Q03), GI 5 (Q04), Terra Nova (Q05 a Q11) e Jaguaribe (Q12 e Q13). As estações compreendem desde a captação do Eixo Norte, diretamente no rio São Francisco, passando pelos reservatórios projetados em Pernambuco ao longo do eixo, até o reservatório existente de Atalho no Ceará.

O período de análise correspondeu às campanhas realizadas entre fevereiro de 2014 a abril de 2019. Ao longo desse período, à medida que ocorreu a finalização das obras dos reservatórios projetados e estes passaram a acumular água é que foram sendo realizadas suas coletas. Portanto, nem todas as campanhas analisadas contém dados de todas as estações. Sendo importante destacar que nos pontos Q10 a Q12 não se obteve nenhum dado, pois até a última campanha do estudo (Campanha 25), não havia chegado água nesses reservatórios. Quanto ao ponto Q13, este possui dados, mas todos eles se referem ao reservatório de Atalho já existente e que não possui contribuição do PISF até a última campanha existente e utilizada neste estudo. Com relação aos pontos Q06 e Q07 referem-se ao Reservatório Senador Nilo Coelho, sendo este de responsabilidade do Governo Estadual do Pernambuco, onde o Q06 é um ponto no reservatório e o Q07 refere-se à água que sai nos poços de alívio a jusante da barragem. A análise desses dados se deve ao fato de que os reservatórios Serra do Livramento, Mangueira, Negreiros e Milagres, todos no Eixo Norte, possuem a capacidade de liberar vazões em riachos afluentes de Nilo Coelho (Neto et al, 2021).

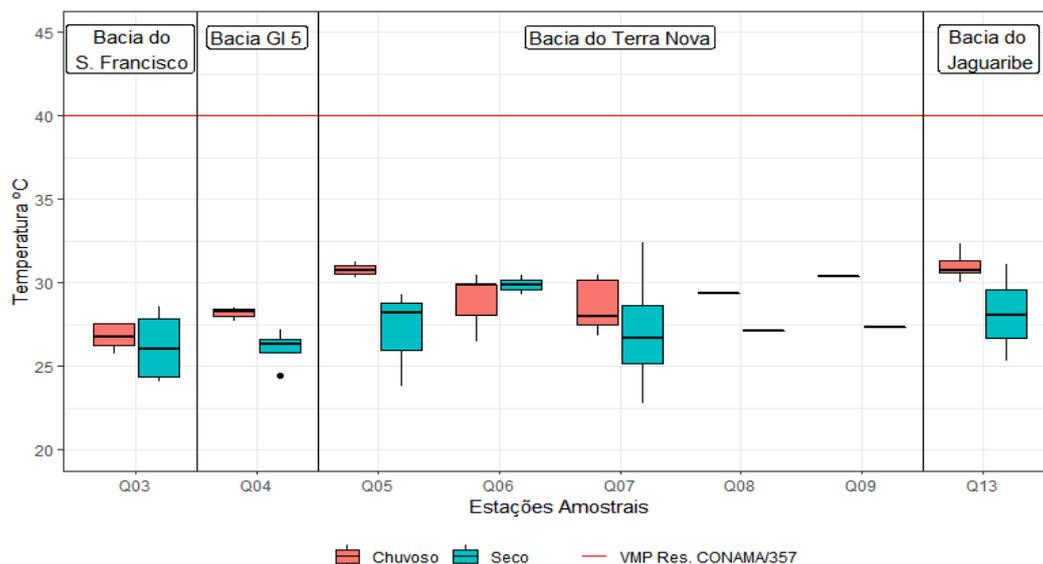
Os resultados das análises de todos os parâmetros avaliados encontram-se na Tabela 18, no Anexo A. A localização dos pontos de amostragem encontra-se ilustrada

na Figura 10, anteriormente apresentada. Os resultados com valores abaixo do limite de quantificação não foram considerados na construção dos boxplots.

A temperatura obtida da água nas campanhas do estudo mostrou-se dentro do limite permitido pelo CONAMA n° 357/2005 (Figura 11). É possível verificar que a maior temperatura foi de 32,4°C registrada no ponto Q07, período seco, na campanha 21 em 2016, enquanto a menor temperatura registrada foi de 22,8°C também no ponto Q07, no período seco em 2017, na campanha 23. O ponto Q07 não faz parte do Eixo Norte da transposição, mas refere-se a jusante do reservatório Senador Nilo Coelho, que receberá águas do PISF pelos seus rios afluentes.

As diferenças observadas nas especificações dos relatórios de coleta, é que embora os limites para a temperatura tenham sido encontrados ambos no período seco, e apresentarem profundidades de coleta semelhantes, o tempo na campanha 21 estava ensolarado, já na 23 estava nublado. Outra diferença relatada é que os horários de coleta foram bem diferentes. Na temperatura máxima foi realizada às 15h e na mínima às 9h, o que pode ter favorecido as diferenças observadas.

Figura 11 - Variação da temperatura da água nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

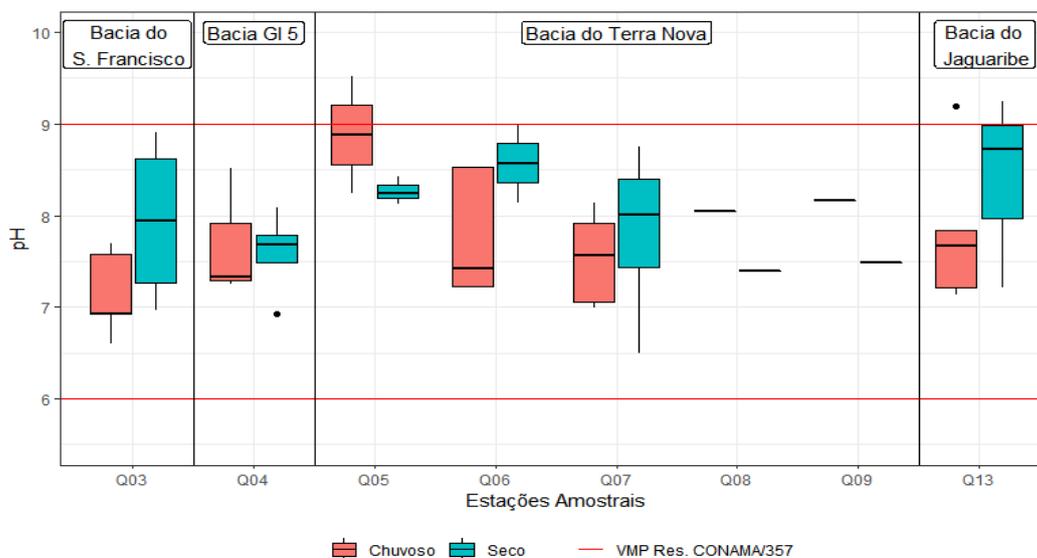
É possível observar que as temperaturas máximas e mínimas obtidas no reservatório Senador Nilo Coelho e no eixo da transposição apresentam valores semelhantes. A Figura 11 ilustra as variações do parâmetro entre os pontos analisados, mostrando que as maiores amplitudes são identificadas em pontos na bacia Terra Nova.

Diversos fatores podem afetar o regime térmico dos corpos de água. Esses podem se dar em função do regime climático normal, de fatores físicos como a altitude, horário do dia e profundidade, como também pode estar relacionado às atividades antrópicas como o lançamento de efluentes (AFONSO, 2016). Alguns autores atribuíram a supressão da cobertura vegetal, como fato existente para o aumento térmico das águas, pois a presença de cobertura vegetal impede que a radiação incida de forma direta sobre o corpo hídrico (BARROS, SOUZA e SOUZA, 2011; CABRAL et al., 2015).

Outros estudos realizados no Semiárido também apresentaram valores de temperatura da água semelhantes aos obtidos neste estudo (CARVALHO et al., 2008; LIMA; GARCIA, 2008; BARRETO; ROCHA e OLIVEIRA, 2009; GARCIA et al., 2012; SILVA; CASÉ; LOPES, 2019).

Os resultados obtidos para o pH (Figura 12) no período analisado mostraram-se em sua maioria dentro da variação de limites permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe 2, classe essa que atende entre outras, o uso para abastecimento humano (objetivo principal do PISF) mediante tratamento convencional. O menor valor obtido para o pH foi de 6,5 no ponto Q07, período seco, na campanha 24 em 2018, enquanto o maior pH obtido foi de 9,52 no ponto Q05, período chuvoso, campanha 22 em 2017.

Figura 12 - Variação do pH nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

É possível observar que além do ponto Q05 na campanha 22, o ponto Q13 nas campanhas 16 (período chuvoso) e 23 (período seco) também apresentou valores de pH acima do permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para o uso em estudo, com

resultados de 9,19; 9,25; respectivamente. Todos os demais resultados atendem às especificações da legislação em questão.

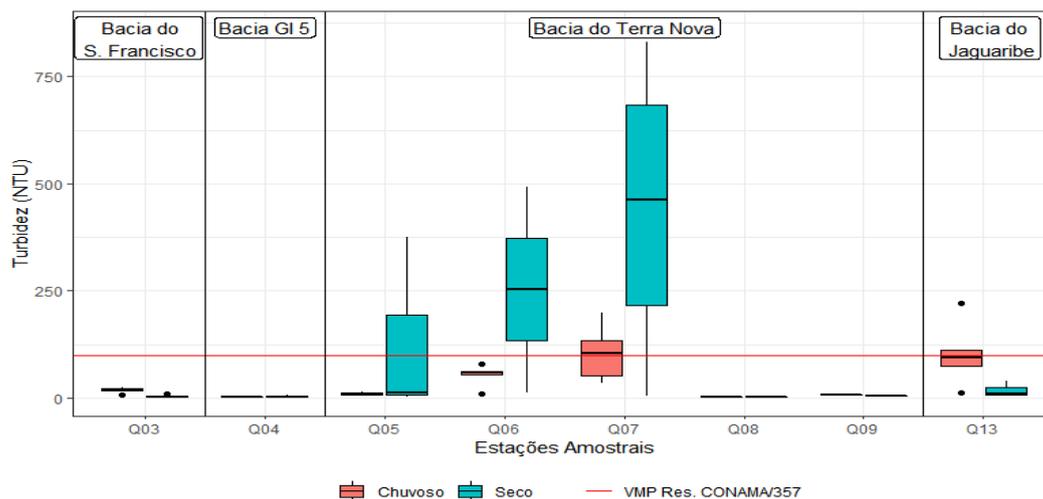
O pH é uma variável que caracteriza o tipo de solo por onde a água transita, e tem-se que quando este se mostra muito ácido ou muito alcalino está associado à presença de despejos industriais (SILVA; GALVÍNCIO e ALMEIDA, 2010).

De acordo com Esteves (2011) o pH pode ser considerado como uma das variáveis ambientais mais importantes, mas ao mesmo tempo uma das mais difíceis de se interpretar em função do grande número de fatores que podem influenciá-lo. A obtenção de valores de pH elevados está relacionada às regiões com balanço hídrico negativo (onde a precipitação é menor que a evaporação) e cita que os açudes do Nordeste do Brasil se enquadram nesse tipo de região. Descreve também que o pH é muito influenciado pela quantidade de matéria orgânica presente a ser decomposta, e cita que quanto maior a quantidade disponível, menor será o pH, pois muitos ácidos são gerados para haver decomposição desse material.

Os valores de turbidez apresentados na Figura 13 foram relativamente constantes em boa parte dos pontos nas campanhas analisadas, mas se obteve aproximadamente 20% de valores acima do permitido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe 2. O maior valor de turbidez obtido foi de 830 UNT no ponto Q07, período seco, na campanha 19 em 2015 e o menor valor foi 0,62 UNT no ponto Q04, período seco, na campanha 21 em 2016. A prevalência de valores fora do limite citado pode ser observada em sua maioria na Bacia do rio Terra Nova, predominantemente com valores mais altos no período seco no ponto Q07, que é a jusante do açude Senador Nilo Coelho. O ponto Q13 na Bacia do Jaguaribe também apresentou valores de turbidez fora do limite, mas com valores inferiores a maioria dos pontos monitorados na da Bacia do Terra Nova, onde o valor máximo de turbidez obtido foi de 220 UNT, período chuvoso, campanha 22 em 2017.

Ambientes em que os níveis de turbidez são altos, apresentam dificuldade de a luz penetrar na água, desfavorecendo a ação dos organismos fotossintetizantes, o que compromete a sucessão dos ciclos ambientais de fixação de energia e nutrientes. As ações antrópicas desempenham papel fundamental sobre os índices da turbidez, através do lançamento de efluentes sob os corpos hídricos, a lixiviação e carreamento de partículas de solo exposto (AFFONSO, 2016).

Figura 13 - Variação da turbidez nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

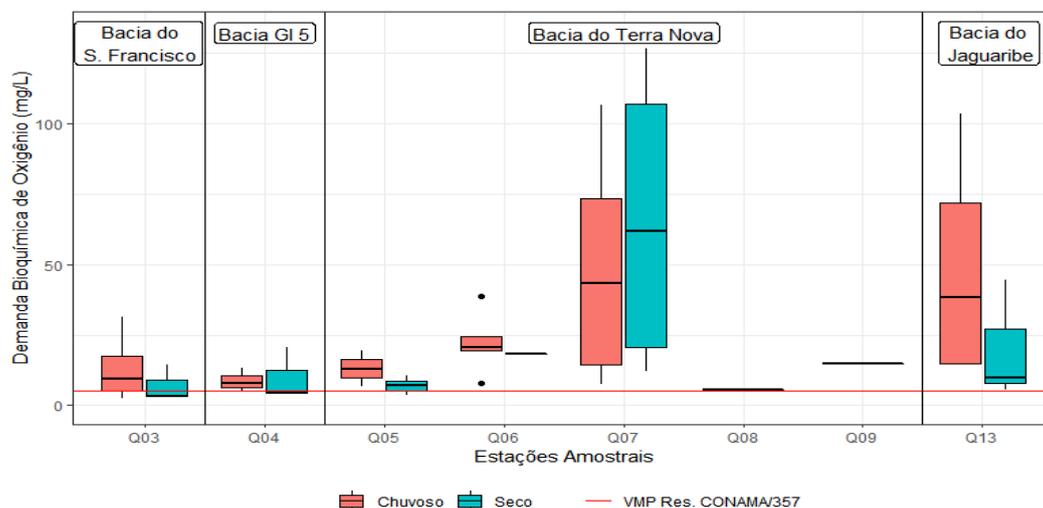


Fonte: A autora (2021).

Nas observações apontadas pela equipe de coleta foi registrada a presença de animais de pastagem, ocupação humana, cultura irrigada em vários pontos para as campanhas estudadas, principalmente nos pontos P06 e P07, e, em algumas campanhas identificação do lançamento de esgotos nesses reservatórios, fatores que favorecem na obtenção de valores de turbidez elevada.

Os resultados obtidos para a concentração de matéria orgânica com base na Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) foram em sua maioria superiores ao limite estabelecido pela legislação, que é de 5,00mg/L O₂ segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe 2 (Figura 14).

Figura 14 - Variação da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

Destacaram-se com maiores valores encontrados, os pontos Q07 (Reservatório Nilo Coelho) na Bacia do Terra Nova e Q13 (Reservatório de Atalho) na Bacia do Jaguaribe. Ambos são reservatórios existentes e que nas campanhas analisadas não receberam águas do PISF.

A maior DBO obtida foi na Bacia do Terra Nova, com valor de 126,5 mg/L O₂ no ponto Q07, período seco, campanha 23 em 2017. Os relatórios de coleta para este período, destacaram que a água apresentava coloração esverdeada, havia presença de material em decomposição, lançamento de esgoto bruto no local com odor característico, além de cultura irrigada e animais de pastagens nas margens do reservatório, fatores estes que contribuem para a elevação da concentração da matéria orgânica no local. Nas campanhas posteriores, o valor da DBO foi reduzido significativamente, chegando a 7,5 mg/L O₂ na campanha 25, período chuvoso, mas ainda assim permanecendo acima do estabelecido.

O maior valor obtido na bacia do Jaguaribe para o ponto Q13 foi de 103,3 mg/L O₂, período chuvoso, campanha 18 em 2015. Os relatórios da coleta para o ponto nesse período, apontaram que a água apresentava coloração pardacenta e que sua aparência era de água barrenta, nas margens do reservatório havia criação de animais de pastagem e ocupação humana, fatores que contribuem para a elevação do valor de DBO obtido. Nas campanhas posteriores, o valor da DBO foi reduzido significativamente, chegando a 5,7 mg/L O₂ na campanha 25, período seco, mas ainda assim permanecendo acima do estabelecido.

Na Bacia do São Francisco o maior valor encontrado foi de 31,40 mg/L O₂ no ponto Q03, período chuvoso, campanha 20 em 2016. Já na bacia do GI 5, o maior valor obtido foi de 20,60 mg/L O₂ no ponto Q04, período seco, campanha 21 em 2016.

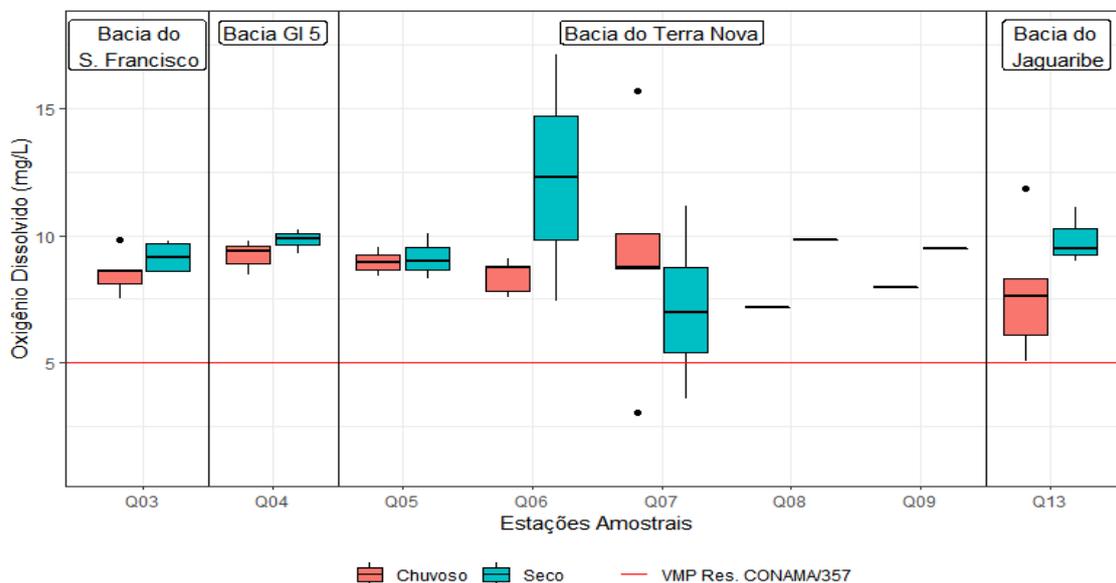
Autores relatam valores elevados de DBO em diferentes reservatórios do semiárido brasileiro, atribuindo essas ocorrências ao lançamento de efluentes sanitários e ao aporte de sedimentos, que podem ter origem em processos erosivos e agrícolas (FREIRE et al., 2013; LIMA; ALVES, 2017; SILVA, 2018; OLIVEIRA, 2019).

A concentração de matéria orgânica com base no parâmetro de DBO possui relação com a concentração do oxigênio dissolvido (OD) na água, uma vez que a DBO da água é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável (CETESB, 2019).

A Resolução CONAMA nº 357/2005 recomenda para Oxigênio Dissolvido (OD) o valor mínimo de 5 mg/L O₂ para águas doces Classe 2. Com a Figura 15 foi possível demonstrar que quase todos os resultados obtidos se encontram dentro do estabelecido pela

legislação, com exceção do ponto Q07, que possui valor de 3,05 mg/L O₂, período chuvoso, campanha 25 em 2019 e valor de 3,56 mg/L O₂, período seco, campanha 23 em 2017. Os demais valores variam de 5,06 a 17,12 mg/L O₂, com pouca variação dos resultados para o mesmo ponto nas campanhas em estudo, com exceção dos pontos Q06, Q07 e Q13.

Figura 15 - Variação do oxigênio dissolvido (OD) nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

No ponto Q07 se obteve valores fora do limite estabelecido, e, neste foi identificado pela equipe de coleta das amostras de qualidade de água que nas proximidades do reservatório havia animais de pastagem, cultura irrigada e presença de lançamento de esgoto bruto, atividades que contribuem para o aumento de DBO e consequentemente redução dos teores de OD na água. Quando a água apresenta baixos teores de OD, geralmente relaciona-se às altas cargas de poluição no corpo hídrico, levando à morte de peixes e outras espécies (NACAR; METE; BAYRAM, 2020).

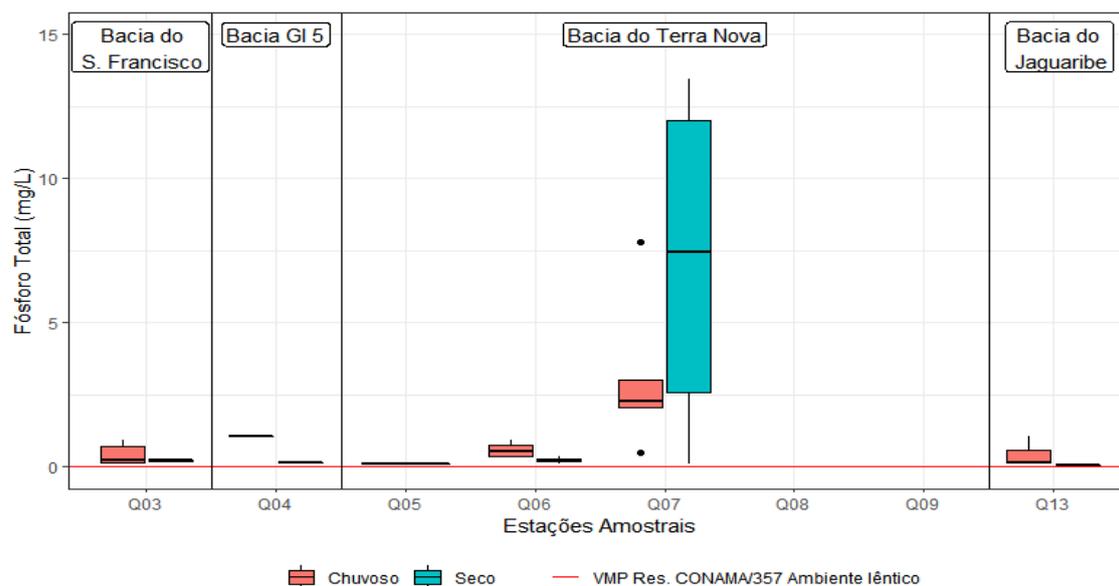
Os menores valores foram identificados no período chuvoso, com exceção do ponto Q07, e valores similares foi encontrado por Oliveira (2019) para o trecho do Submédio da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, entre os reservatórios de Sobradinho e Itaparica.

Todos os resultados obtidos para o Fósforo Total excederam ao limite estabelecido pela legislação CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe 2 que é de 0,03mg/L P para ambientes lênticos e 0,05 para ambientes intermediários conforme demonstrado a

Figura 16. Uma parte das amostras apresentou resultados abaixo do limite de quantificação, outros pontos tiveram dados ausentes nos dados disponibilizados como pode ser observado no Anexo A.

O ponto Q07 na Bacia do Terra Nova apresentou quase todos os maiores valores obtidos, onde o maior é 13,42 mg/L, período seco, campanha 23 em 2017. Os demais valores variam de 11,51 a 0,08 mg/L, com pouca variação dos resultados para o mesmo ponto nas campanhas em estudo, com exceção do ponto Q07.

Figura 16 - Variação do fósforo total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

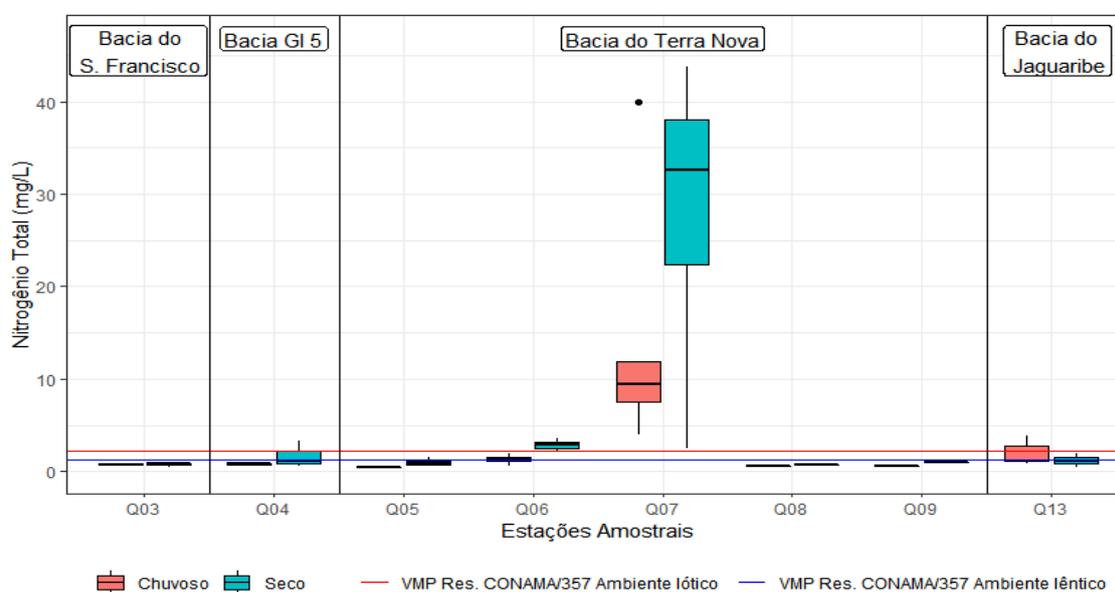
O fósforo pode ser proveniente de fontes naturais (composição de rochas, carregado pelo escoamento superficial, material particulado na atmosfera e outros) e artificiais (esgotos domésticos e industriais, fertilizantes agrícolas e material particulado de origem industrial contido na atmosfera), o aumento desse nutriente na água contribui para o processo de eutrofização, pois favorece o desenvolvimento de algas e macrófitas, consequentemente também contribui para o aumento da concentração de clorofila na água (ESTEVEVES, 2011).

É importante destacar novamente que as equipes de coleta identificaram em quase todos os pontos a presença de animais de pastagem, cultura irrigada, ocupação humana e mais precisamente no ponto Q07 a presença de esgoto doméstico no manancial em algumas campanhas, esses fatores favorecem a presença do fósforo em valores elevados.

Silva, Casé e Lopes (2019) em seu estudo com bacias hidrográficas do Nordeste brasileiro observaram que em torno de 40% as concentrações dessa variável estavam em níveis acima do limite permitido nas bacias do estudo (São Francisco, Paraíba, Pajeú e Moxotó). Os autores citam que os fatores que podem ter contribuído para os altos valores de fósforo total em desacordo com a legislação são a presença de atividades agropecuárias, lançamento de esgoto, degradação da mata ciliar, construções de imóveis e disposição inadequada de resíduos sólidos no entorno das estações. Silva, Azevedo e Alves (2014) trabalharam com a bacia do rio Paraíba e observaram concentrações dessa variável em níveis acima do limite permitido em vários pontos da bacia, atribuindo esses valores ao recebimento constante de cargas orgânicas de efluentes domésticos sem tratamento.

Os limites recomendados pelo CONAMA para o nitrogênio total são 1,27 mg/L N para ambientes lênticos e 2,18 mg/L N para lóticos. É possível verificar que os resultados obtidos (Figura 17) mostram que uma parte se encontra dentro do estabelecido para águas doces Classe 2. Somente o ponto Q03 é ambiente lótico e apresentou valores dentro do estabelecido. Dos pontos que são ambientes lênticos, os pontos Q08 e Q09 foram os únicos que não tiveram algum resultado que ultrapassasse o valor permitido. O ponto Q07 é o único que apresenta todos os valores superiores ao estabelecido. O maior valor encontrado foi 43,8 mg/L N no ponto Q07, período seco, campanha 23 em 2017.

Figura 17 - Variação do nitrogênio total nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



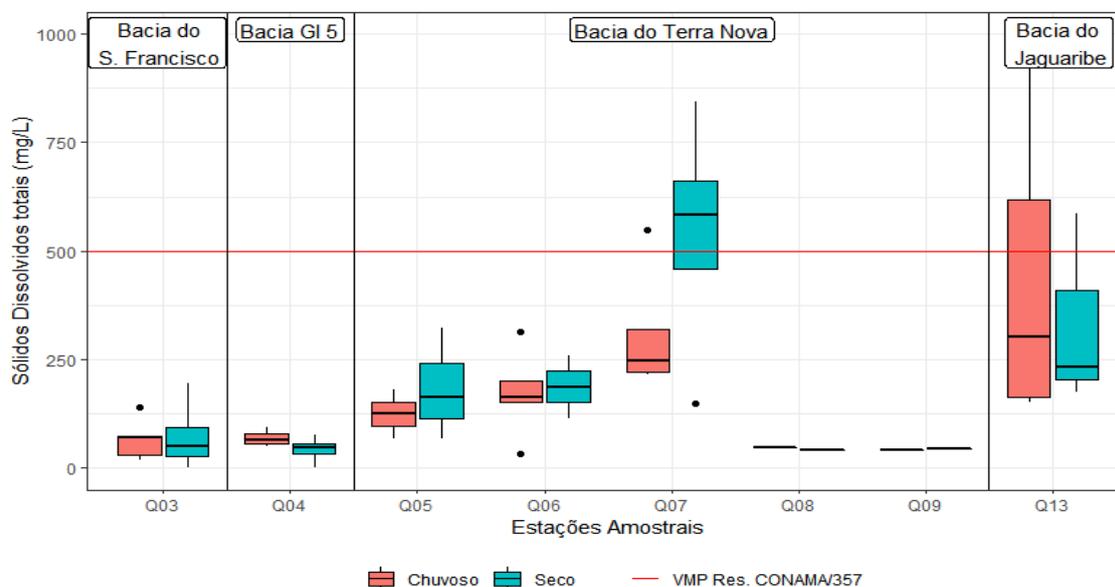
Fonte: A autora (2021).

Barros, Souza e Souza (2011) em seu estudo também obtiveram valores de Nitrogênio Total superiores ao estabelecido pelo CONAMA e atribui essa elevação aos fatores de dispersão difusa de fertilizantes e pesticidas utilizados nas atividades agropastoris, como também ao lançamento de esgotos domésticos. As diversas intervenções antrópicas no entorno dos reservatórios contribuem com o risco de eutrofização dos mananciais.

Silva, Casé e Lopes (2019) trabalharam com Bacias Hidrográficas do Nordeste e também obtiveram valores acima do permitido pela legislação para o Nitrogênio total, com resultados oscilando entre 0,5 mg/L N no reservatório Itaparica a 30 mg/L N na Bacia do rio Paraíba.

A Resolução CONAMA n° 357/2005 recomenda para águas doces Classe 2 o valor máximo de 500 mg/L para a variável sólidos dissolvidos totais. A Figura 18 mostra que apenas os pontos Q07 e Q13 tiveram valores acima do determinado pela Resolução CONAMA. Para o ponto Q07 os valores oscilaram entre 148 a 843 mg/L, com maior valor no período seco, campanha 19 em 2015. O ponto Q13 apresentou valores que oscilaram entre 152 a 926 mg/L, com maior valor no período chuvoso, campanha 18 em 2015.

Figura 18 - Variação dos sólidos dissolvidos totais nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

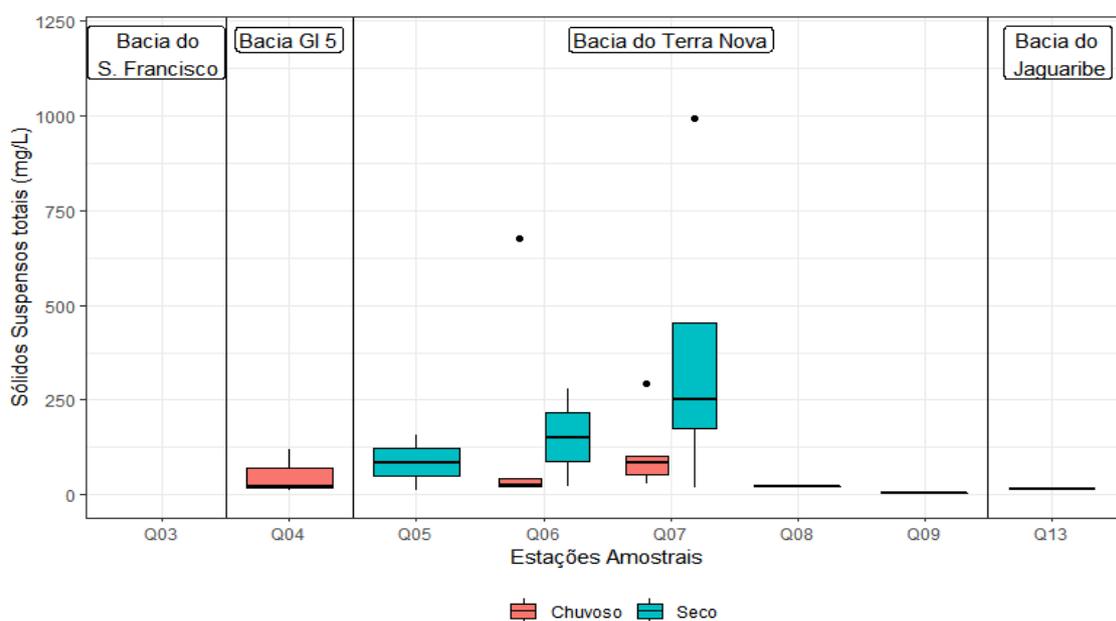
Outros autores também encontraram valores de Sólidos Dissolvidos Totais além do limite estabelecido pelo CONAMA em algumas bacias do Eixo Leste do PISF (CALADO, 2020; CALDAS, 2021).

A Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde que trata do abastecimento público de água, cita que a água deve estar em conformidade com o padrão organoléptico de potabilidade, e estabelece um limite de 1.000 mg/L para o parâmetro de sólidos dissolvidos totais. Neste caso, todos os pontos do estudo atendem ao padrão organoléptico determinado pelo Ministério da Saúde.

A Figura 19 apresenta a concentração de sólidos suspensos totais e mostra que essa variável oscilou bastante nos pontos QQ06 e Q07, ambos na bacia do rio Terra Nova. Alguns pontos, principalmente o Q03 apresentaram amostras com valores abaixo do limite de detecção, não sendo considerados na construção dos *boxplots*, podendo ser visualizado no Anexo A.

O maior valor obtido para o parâmetro foi encontrado no ponto Q07, obtendo resultados que variaram entre 18,00 e 991,00 mg/L, com seu maior valor mostrado como *outlier*, ocorrendo no período seco, campanha 19 em 2015. Já o ponto Q06 teve valores variando entre 18,00 e 674,00 mg/L, sendo seu maior valor mostrado também como *outlier*, período chuvoso, campanha 20 em 2016.

Figura 19 - Variação dos sólidos suspensos totais nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019

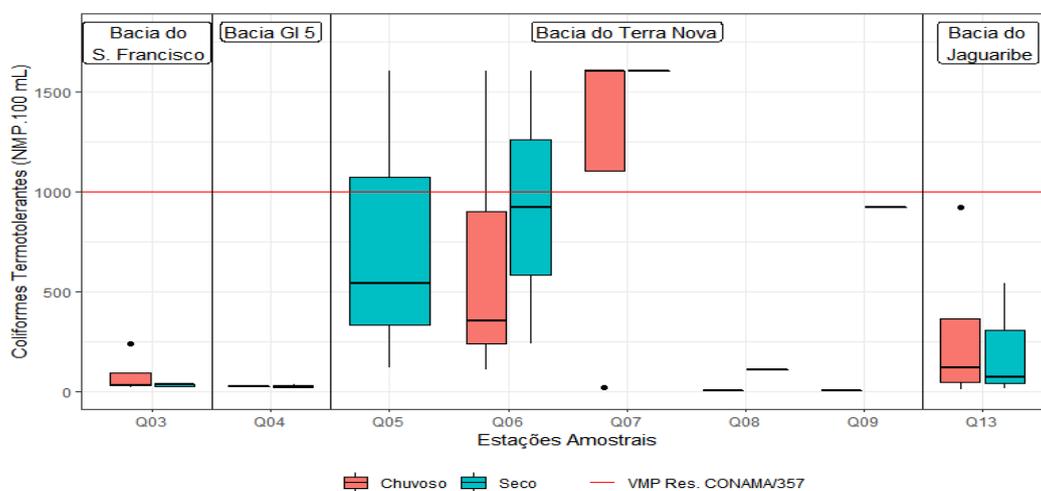


Fonte: A autora (2021).

Caldas (2021) em seu estudo com algumas bacias do Eixo Leste do PISF, encontrou valores semelhantes na Bacia do Paraíba e um valor bem maior na bacia do GI 3 e cita que esse valor extremo pode estar associado a uma redução de volume que o reservatório sofreu no ano da análise.

A Resolução CONAMA nº 357/2005 recomenda para águas doces Classe 2 o valor máximo de 1000 NMP/100 mL para a variável coliformes termotolerantes. É possível verificar na Figura 20 que foram obtidas concentrações de coliformes termotolerantes acima do valor máximo recomendado na Bacia do Terra Nova para os pontos Q05, Q06 e Q07, chegando a obter valores acima de 1600 NMP/100 mL. As demais bacias atenderam ao limite estabelecido pela legislação.

Figura 20 - Variação dos coliformes termotolerantes nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

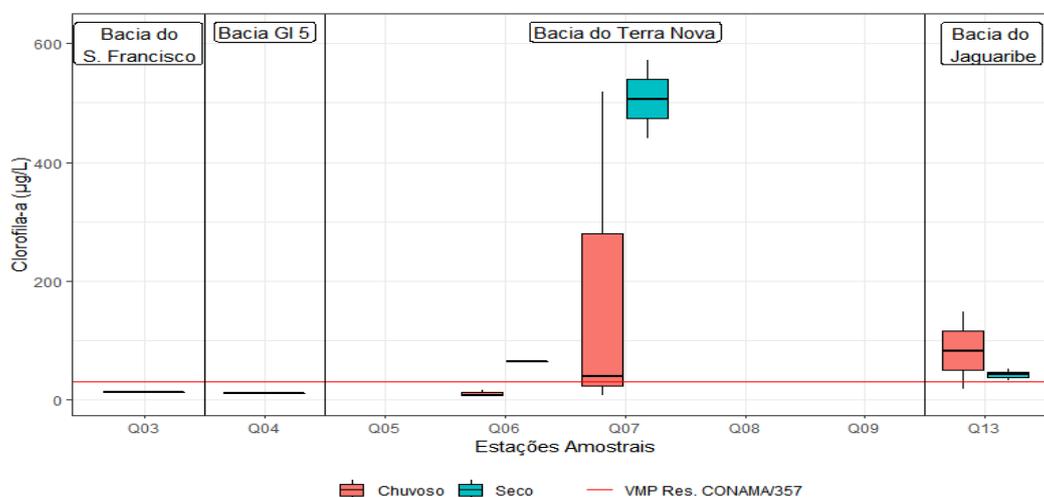
Alguns autores que obtiveram resultados elevados de coliformes termotolerantes, atribuíram o fato principalmente à presença de atividades antrópicas como a agricultura, criação de animais nos arredores dos reservatórios, descarte de resíduos sólidos e lançamento de efluentes sem tratamento, podendo ser agravado também devido às altas temperaturas e à escassez hídrica que afeta os níveis de água causando redução na capacidade de autodepuração do corpo d'água (OLIVEIRA, CAMPOS e MEDEIROS, 2010; LIMA, e ALVES, 2017; SANTOS, 2017; SILVA, CASÉ, e LOPES, 2019). Alguns desses fatores foram observados pela equipe de coleta durante as análises em campo dos dados dessa pesquisa, o que corrobora para os resultados obtidos.

Outros autores também encontraram valores de Coliformes Termotolerantes além do limite estabelecido pela Resolução CONAMA em bacias do Nordeste brasileiro (SILVA et al, 2014; ROSSITER, 2017; CALADO, 2020; CALDAS, 2021).

No tocante à variável clorofila-a, o CONAMA nº 357/2005 estipula como valor máximo permitido 30 µg/L para águas doces Classe 2. Os resultados obtidos no estudo são apresentados na Figura 21, sendo que mais da metade das amostras tiveram valores situados abaixo de limite de detecção, não sendo consideradas na construção dos *boxplots*.

Os pontos Q06, Q07 e Q13 apresentaram valores que ultrapassam o determinado pela Resolução CONAMA, com o maior valor obtido no ponto Q07 que foi de 572,60 µg/L, período seco, campanha 19 em 2015. O Ponto Q13 apresentou valor máximo de 148,5 µg/L, período chuvoso, campanha 16 em 2014. Já o ponto Q06 apresentou valor máximo de 64,20 µg/L, período seco, campanha 21 em 2016.

Figura 21 - Variação da clorofila-a nos pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5, do rio Terra Nova, do rio Jaguaribe, nos períodos chuvosos e secos dos anos de 2014 a 2019



Fonte: A autora (2021).

A clorofila-a é considerada a principal variável indicadora de estado trófico dos ambientes aquáticos, sendo geralmente usada como um indicador de biomassa algal (CETESBb, 2019), onde o aumento dos seus níveis pode estar associado à entrada de nutrientes no corpo hídrico (CALDAS, 2021).

Autores relatam que as maiores concentrações de clorofila-a encontradas em seus estudos podem estar associadas ao estresse hídrico (CALADO, 2020), ao uso do solo nas margens do corpo hídrico (lançamento de efluentes domésticos ou de atividades agropecuárias desenvolvidas de maneira não adequada), além do fato de zonas lacustres serem mais suscetíveis a esse aumento (LOPES et al, 2015; CALADO, 2020).

4.2 ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA E ÍNDICE DE ESTADO TRÓFICO

Os resultados das análises de IQA e IET ao longo das campanhas estudadas são apresentados nas Tabelas 7 e 8. Os pontos analisados que não tiveram seu IQA e IET descritos, são os pontos que não haviam dados suficientes para a execução dos cálculos.

Tabela 7 - Resultados de IQA dos pontos amostrais do Eixo Norte, nas campanhas 16 a 25 dos anos de 2014 a 2019

| Campanha | Bacia | São Francisco | GI5 | Terra Nova | | | | | Jaguaribe |
|-----------------------------|----------|---------------|-------------|---------------|----------------|------------------|----------------|--------------|---------------|
| | Ponto | Q3 Captação | Q4 Tucutu | Q5 Terra Nova | Q6 Nilo Coelho | Q7 N. C. jusante | Q8 Serra do L. | Q9 Mangueira | Q13 Atalho |
| | Ambiente | Lótico | Lêntico | Lêntico | | | | | Lêntico |
| 16 (2014/Chuvoso) | | 56 Boa | ** | ** | 53 Boa | 39 Regular | ** | ** | 41 Regular |
| 18 (2015/Chuvoso) | | 69 Boa | ** | ** | 45 Regular | 22 Ruim | ** | ** | 38 Regular |
| 19 (2015/Seco) | | 78 Boa | 79 Boa | ** | * Boa | 31 Ruim | ** | ** | 51 Regular |
| 20 (2016/Chuvoso) | | 47 Regular | 67 Boa | ** | 42 Regular | 30 Ruim | ** | ** | 48 Regular |
| 21 (2016/Seco) | | 67 Boa | 65 Boa | 75 Boa | 39 Regular | 20 Ruim | ** | ** | |
| 22 (2017/Chuvoso) | | 79 Boa | 78 Boa | 63 Boa | 42 Regular | 28 Ruim | ** | ** | 54 Boa |
| 23 (2017/Seco) | | 58 Boa | 66 Boa | 37 Regular | * Boa | 20 Ruim | ** | ** | 48 Regular |
| 24 (2018/Seco) | | * Boa | * Boa | 65 Boa | 39 Regular | 40 Regular | 73 Boa | 61 Boa | 61 Boa |
| 25 (2019/Chuvoso) | | 63 Boa | 82 Ótima | 82 Ótima | 69 Boa | 38 Regular | 89 Ótima | 85 Ótima | 64 Boa |

* Dados ausentes

** Ponto de monitoramento sem água no momento da coleta

Fonte: A autora (2021).

Pelos resultados do IQA, observa-se que a água do ponto de captação (Q03) geralmente sai para os canais da transposição com qualidade boa para abastecimento público. A partir deste ponto, é esperado um decréscimo na qualidade ao passar pelos reservatórios que ficam próximos das zonas urbanas (PERES, 2012), pois na maioria das vezes os municípios não apresentam serviços adequados de saneamento básico e acabam contaminando os cursos de água. Entretanto, a qualidade mante-se predominantemente boa nos pontos Q04, Q05, Q08 e Q09, que são os pontos que fazem parte do Eixo Norte e chega à ótima na última campanha analisada.

Tal fato não significa que não há problemas de poluição, já que este curso está depurando o que recebe, considerando a enorme vazão do São Francisco ao longo do eixo. O ideal é que os lançamentos de esgotos sejam tratados e que se tenha um monitoramento adequado para que não haja impactos significativos nos reservatórios, com vistas à proteção da fauna e flora nestes pontos (PERES, 2012).

A classificação encontra-se regular apenas na campanha 20 do ponto Q03, e na campanha 23 do Q05, isso porque os valores de DBO, Turbidez e Nitrogênio Total, tiveram valores bem acima do permitido pela Resolução nº 357 da CONAMA.

Os pontos Q06 e Q07 que não fazem parte do Eixo Norte da transposição, são os que possuem as piores classificações de IQA. O Q06 por exemplo, na maioria das campanhas analisadas teve sua água classificada como regular, devido ao fato dos valores altos de DBO, Turbidez, Fósforo Total, Nitrogênio Total, Clorofila-a e Coliformes Termotolerantes, que no total são 6 dos 9 parâmetros para o cálculo do IQA. Já o Q07 encontra-se em estado de alerta, possui resultados em grande parte, de classificação Ruim, obtendo apenas a classificação regular na campanha 16, em 2014, e campanha 25, em 2019. Dos parâmetros que compõem o cálculo do IQA, apenas Temperatura e pH, não excederam o limite permitido nas campanhas, os outros parâmetros, em sua maioria, se encontravam acima do permitido. Sendo assim, é possível observar que alguma contaminação possa estar sendo acometida entre o reservatório Senador Nilo Coelho e a jusante da barragem (Q07), já que a qualidade do ponto a jusante apresenta-se em menor qualidade que a obtida no próprio reservatório.

Para Almeida et al. (2017), a região da Bacia Terra Nova que abrange esses pontos em estado de alerta, apresenta vegetação estressada e área degradada pela ação antrópica. Além disso, Ferreira et al. (2012) observaram que a área possui vegetação seca, solo exposto e forte influência de atividades poluidoras de áreas urbanas. Silva, Casé e Lopes (2019) estudaram algumas bacias hidrográficas do Nordeste do Brasil e evidenciaram a influência antrópica na qualidade de água dos rios e reservatórios avaliados.

Com relação ao ponto Q13 (Reservatório Atalho), este apresenta-se na maioria das campanhas com classificação regular quanto à qualidade de água nesse reservatório. É possível observar melhora na qualidade nas últimas campanhas do estudo, chegando à classificação enquadrada como Boa. É importante destacar que a melhora na qualidade das águas desse reservatório não se deve à transposição, pois até a última campanha analisada, ele não recebeu águas do PISF. Observou-se que houve melhora de quase todos

os parâmetros físico-químicos que integram o cálculo do IQA, o que caracteriza uma menor contaminação desse reservatório.

Os resultados do IET conforme dispostos na Tabela 8, mostram que os pontos apresentam alta tendência ao estado de trofia, com as classificações em sua maioria de Hipereutrófica, Supereutrófica, Eutrófica, e em alguns casos, certa melhora com classificação Mesotrófica nos reservatórios novos da transposição. As consequências futuras, são o excesso de algas, e cianobactérias e macrófitas aquáticas, comprometendo o abastecimento público, caso não haja monitoramento necessário.

Esta situação não é por acaso, uma vez que nos relatórios da coleta em campo, observou-se que nos arredores dos reservatórios, havia atividades irregulares com potencial prejudicial à qualidade da água para abastecimento público. Para Calado (2020), a ineficiência da regulação do uso do solo nos pontos de coleta do PISF, ocasiona conflitos entre os moradores e a gestão, compromete a qualidade da água e aumento dos custos com o tratamento da água e prejuízos a biota aquática. Para converter isto, é recomendável o planejamento detalhado e adaptado a longo prazo em escala local e regional com participação dos interessados.

Tabela 8 - Resultados de IET dos pontos amostrais do Eixo Norte, nas campanhas 16 a 25 dos anos de 2014 a 2019

| Campanha | Bacia São Francisco | GI5 | Terra Nova | | | | | Jaguaribe | |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|--|
| | Ponto Q3 Captação | Q4 Tucutu | Q5 Terra Nova | Q6 Nilo Coelho | Q7 Nilo Coelho jusante | Q8 Serra do Livramento | Q9 Mangueira | Q13 Atalho | |
| | Amb. Lótico | Lêntico | Lêntico | | | | | Lêntico | |
| 16 2014/ Chuvoso | 67 Supereutrófico | ** | ** | 65 | 69 | ** | ** | 74 | |
| 18 2015/ Chuvoso | 63 Eutrófico | ** | ** | 63 | 72 | ** | ** | 60 | |
| 19 2015/ Seco | 63 Eutrófico | 56 Mesotrófico | ** | ** | 81 | ** | ** | 62 | |
| 20 2016/ Chuvoso | 66 Supereutrófico | 68 Hipereutrófico | ** | 66 | 73 | ** | ** | 56 | |
| 21 2016/ Seco | 63 Eutrófico | 60 Eutrófico | 59 Mesotrófico | 69 Hipereutrófico | 84 Hipereutrófico | ** | ** | 62 | |
| 22 2017/ Chuvoso | 63 Eutrófico | 59 Mesotrófico | 59 Mesotrófico | 65 Supereutrófico | 79 Hipereutrófico | ** | ** | 62 | |
| 23 2017/ Seco | 61 Eutrófico | 68 Hipereutrófico | 80 Hipereutrófico | ** | 83 | ** | ** | 88 | |
| 24 2018/ Seco | * Hipereutrófico | * Mesotrófico | 59 Mesotrófico | 80 Hipereutrófico | 82 Hipereutrófico | 59 Mesotrófico | 59 Mesotrófico | 24 Ultraoligotrófico | |
| 25 2019/ Chuvoso | 79 Hipereutrófico | 59 Mesotrófico | 59 Mesotrófico | 59 Mesotrófico | 85 Hipereutrófico | 59 Mesotrófico | 59 Mesotrófico | 81 Hipereutrófico | |

* Dados ausentes

** Ponto de monitoramento sem água no momento da coleta

Fonte: A autora (2021).

A eutrofização em corpos hídricos é um processo gradual, devido ao contínuo aumento de nutrientes que é encontrado e frequentemente apresentam alterações na qualidade de suas águas, podendo comprometer o abastecimento público. As modificações frequentemente encontradas são: no sabor, odor, elevação da turbidez e cor da água, diminuição do oxigênio dissolvido da coluna d'água, crescimento excessivo de plantas aquáticas, mortandade de peixes e outras espécies aquáticas, floração de algas tóxicas e o comprometimento do uso da água (Smith e Schindler, 2009).

O cálculo do valor médio dos resultados de IQA e IET de todas as campanhas analisadas estão dispostos na Tabela 9, o que possibilita uma análise geral das classificações ao longo do Eixo Norte do PISF.

Tabela 9 - Valores médios dos Índice de Qualidade da Água (IQA) e Índice de Estado Trófico (IET) para os pontos amostrais das bacias hidrográficas do rio São Francisco, GI5 e do rio Terra Nova durante o período de estudo

| Bacia | Ponto | Tipo | IQA médio | Classificação | IET médio | Classificação |
|-------------------|------------|---------|-----------|---------------|-----------|----------------|
| Rio São Francisco | Q03 | Lótico | 64,63 | Boa | 65,63 | Supereutrófico |
| GI5 | Q04 | Lêntico | 72,83 | Boa | 61,67 | Eutrófico |
| | Q05 | Lêntico | 64,40 | Boa | 63,20 | Supereutrófico |
| | Q06 | Lêntico | 47,00 | Regular | 66,71 | Supereutrófico |
| | Terra Nova | Q07 | Lêntico | 29,78 | Ruim | 78,67 |
| Terra Nova | Q08 | Lêntico | 81,00 | Ótima | 59,00 | Mesotrófico |
| | Q09 | Lêntico | 73,00 | Boa | 59,00 | Mesotrófico |
| Jaguaribe | Q13 | Lêntico | 50,63 | Regular | 63,38 | Supereutrófico |

Fonte: A autora (2021).

O IQA como já visto, é predominantemente de qualidade Boa, chegando à Ótima no ponto Q08. O ponto Q07 apresenta classificação Ruim, ocasionado pelos valores dos parâmetros físico-químicos acima do permitido pela Resolução nº 357 da CONAMA, e alta influência de atividades antrópicas.

Apesar dos resultados de IQA analisados serem satisfatórios, a CETESB (2008) afirma que a avaliação da qualidade das águas de um manancial por este método possui limitações, não considerando outros parâmetros importantes, como metais pesados, compostos orgânicos com potencial mutagênico ou número de células de cianobactérias por exemplo, fundamentais na determinação da qualidade para o abastecimento público.

Os resultados do IET médio indicam como esperado, que os reservatórios em sua maioria se encontram já eutrofizados, com exceção dos pontos Q08 e Q09, com classificação Mesotrófica, que são novos e possivelmente receberam menos influência de atividades poluentes.

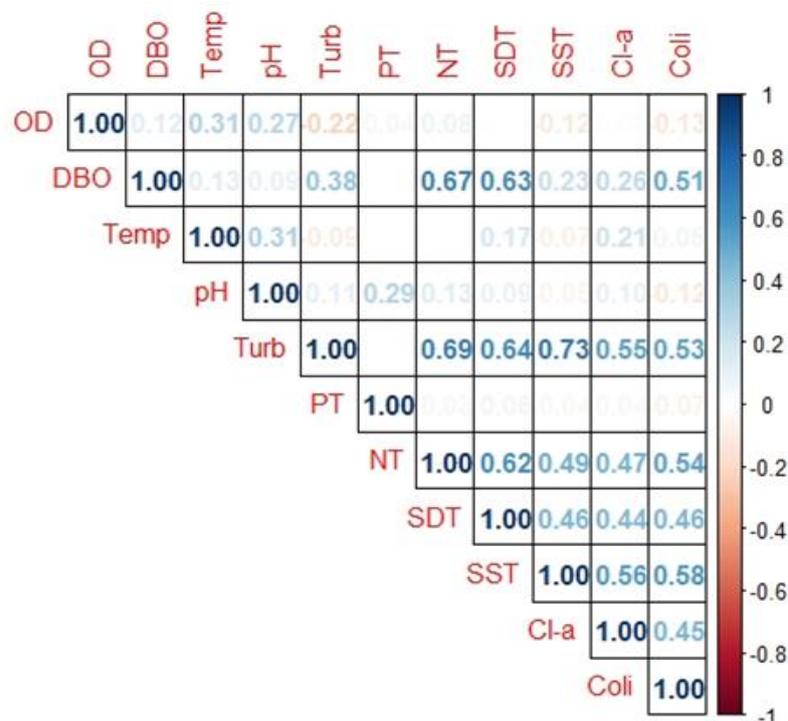
Para Figueirêdo et al. (2006), esses níveis altos de eutrofização são preocupantes. Os valores de nutrientes nos reservatórios são aumentados oriundos das atividades degradadoras do homem pelo processo de urbanização, agropecuária ou desmatamentos, levando ao crescimento excessivo das plantas aquáticas com conseqüente desequilíbrio do ecossistema aquático e progressiva degeneração da qualidade da água dos corpos lânticos.

4.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS

O estudo da análise de componentes principais buscou a obtenção da redução nos dados iniciais com a formação de um conjunto menor de variáveis denominadas Componentes Principais, mas que mantém ao máximo possível a caracterização do conjunto de dados originais.

Inicialmente foi calculada a matriz de correlação de Pearson entre as variáveis, para visualização do grau de relação entre elas (Figura 22). O coeficiente de correlação varia entre os valores de -1 (correlação negativa perfeita) a +1 (correlação positiva perfeita), e quanto mais próximo de 1 (um) for o valor absoluto do coeficiente, mais forte será a relação entre as variáveis. Um valor igual 0 (zero) indica que não há correlação, ou seja, as variáveis são independentes.

Figura 22 - Matriz de correlação de *Pearson* das variáveis estudadas



Fonte: A autora (2022).

Adotando significância de 5%, percebeu-se a inexistência de correlações negativas fortes entre as variáveis analisadas. Por outro lado, identificou-se correlação positiva moderada entre algumas variáveis.

A maior correlação identificada foi o parâmetro Turbidez com os SST, com coeficiente de 0,73. A turbidez também apresentou correlação moderada significativa com o NT, SDT, Cl-a e *E. Coli* com coeficientes de 0,69; 0,64; 0,55 e 0,53; respectivamente. A matéria orgânica (DBO) mostrou-se correlacionada de forma positiva moderada com o NT, SDT e Coli com coeficientes de 0,67; 0,63 e 0,51; respectivamente. O NT também apresentou correlação positiva moderada significativa com SDT e *E. Coli* com coeficientes de 0,62 e 0,54, respectivamente. Os SST apresentaram correlação positiva moderada com Cl-a e *E. Coli*, sendo de 0,56 e 0,58, respectivamente.

Como os parâmetros em análise apresentam escalas de medidas diferentes, foi realizada padronização desses dados antes de tudo, tornando-os com mesma escala relativa. Posteriormente, os dados padronizados foram submetidos a ACP e foi gerada a nova matriz de dados, na qual tem-se onze (11) componentes principais (CPs) conforme descrito na Tabela 10.

Tabela 10 - Componentes principais, autovalores, porcentagens de variância explicada e acumulada para as amostras avaliadas do monitoramento da qualidade da água do PISF

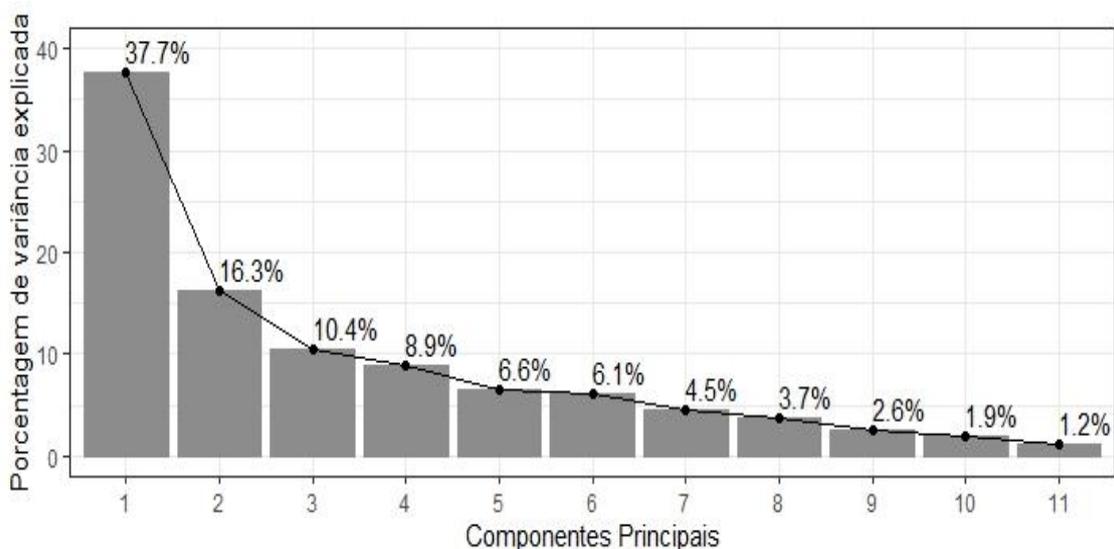
| Componente Principal | Autovalor | Porcentagem de variância explicada | Porcentagem acumulada |
|-----------------------------|------------------|---|------------------------------|
| CP1 | 4,15 | 37,72% | 37,72% |
| CP2 | 1,79 | 16,26% | 53,98% |
| CP3 | 1,15 | 10,43% | 64,41% |
| CP4 | 0,98 | 8,92% | 73,32% |
| CP5 | 0,73 | 6,62% | 79,94% |
| CP6 | 0,67 | 6,07% | 86,01% |
| CP7 | 0,50 | 4,53% | 90,54% |
| CP8 | 0,41 | 3,70% | 94,24% |
| CP9 | 0,29 | 2,61% | 96,85% |
| CP10 | 0,21 | 1,95% | 98,80% |
| CP11 | 0,13 | 1,20% | 100,00% |

Fonte: A autora (2022).

Aplicado o critério selecionando para a pesquisa, tem-se que o melhor comportamento das variáveis relacionados à qualidade da água para que seja explicada mais de 70% da variabilidade total (JOLLIFFE; CADIMA, 2016) foi obtido a partir do número menor de fatores, que contém os quatro componentes principais iniciais (CP1, CP2, CP3 e CP4), no qual esses CPs explicam 73,32% da variância total dos dados de qualidade de água.

Os novos fatores também podem ser observados por meio do gráfico de sedimentação (Figura 23), no qual foi possível visualizar o ponto em que se inicia o processo de estabilização da variável explicada a partir do CP3. Tem-se que as quatro componentes iniciais devem ser retidas pelo percentual de variância explicada acumulado, e as demais são classificadas como variação residual e podem ser desconsiderados (GOTELLI E ELLISON, 2011).

Figura 23 - Gráfico de sedimentação da ACP aplicada às variáveis estudadas



Fonte: A autora (2022).

A matriz das cargas dos parâmetros estudados em relação às quatro primeiras componentes que devem ser retidas no estudo está apresentada na Tabela 11. As cargas encontradas correspondem ao coeficiente de correlação entre a variável e sua respectiva componente principal, e deve ser levado em consideração que os valores com maior proximidade a 1 ou -1 são aqueles que possuem maior influência na variabilidade dos dados, sendo então classificados como os mais representativos. Os valores em negrito indicam existência de correlações significativas com a componente principal.

Tabela 11 - Matriz das cargas das variáveis estudadas em relação às quatro primeiras componentes principais

| Variáveis | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| OD | -0,05 | 0,69 | -0,30 | -0,01 |
| DBO | 0,68 | 0,23 | -0,30 | -0,52 |
| Temp | 0,09 | 0,67 | -0,31 | 0,42 |
| pH | 0,09 | 0,72 | 0,39 | 0,06 |
| Turb | 0,85 | -0,18 | 0,23 | 0,08 |
| PT | 0,01 | 0,34 | 0,78 | -0,22 |
| NT | 0,84 | 0,10 | -0,03 | -0,27 |
| SDT | 0,80 | 0,14 | -0,05 | -0,18 |
| SST | 0,75 | -0,27 | 0,14 | 0,34 |
| Cl-a | 0,69 | 0,08 | 0,09 | 0,49 |
| Coli | 0,75 | -0,18 | -0,17 | 0,03 |
| Autovalor | 4,15 | 1,79 | 1,15 | 0,98 |
| % de variância explicada | 37,72 | 16,26 | 10,43 | 8,92 |
| % de variância acumulada | 37,72 | 53,98 | 64,41 | 73,33 |

Fonte: A autora (2022).

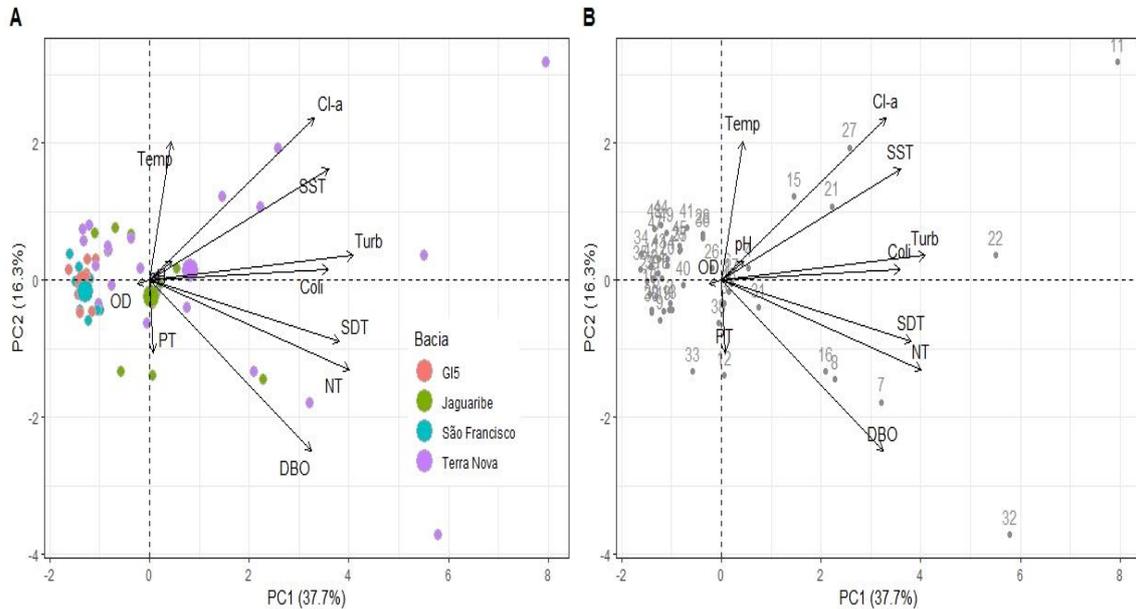
A primeira componente principal (CP1) explica 37,72% da variância dos dados e esboçou cargas positivas significativas para as variáveis físicas, químicas e biológicas: matéria orgânica (DBO), Turbidez, NT, SDT, SST, Cl-a e Coliformes Termotolerantes. A CP2 explica 16,26% da variância e apontou cargas positivas significativas para variáveis físicas e químicas: OD, Temperatura e pH. A CP3 explica 10,43% da variância e apresentou carga positiva considerável para a variável química, Fósforo Total. Por último, o CP4 que explica 8,92% da variância dos dados iniciais mostrou carga negativa relevante para variável DBO.

Para melhor interpretação dos dados resultantes da análise de componentes principais, cuja aplicação teve como objetivo reduzir a dimensionalidade e identificar as variáveis mais significativas, foram gerados dois gráficos *biplot* das variáveis em relação às duas primeiras componentes principais (Figura 24). A posição de cada unidade de estudo no espaço de componentes principais é dada por suas coordenadas, denominadas scores, e estão demonstradas nos gráficos da seguinte forma: A) de acordo com bacia hidrográfica onde estão localizadas, e B) enumeradas com etiquetas de acordo com a ordem do dado na matriz do banco de dados. As flechas correspondem às variáveis (representadas como vetores).

Palacio et al. (2020) atribuem as seguintes regras para interpretação do biplot: (1) as unidades de estudo que são próximas no espaço, têm características similares nas suas

variáveis; (2) o cosseno do ângulo entre dois vetores corresponde a sua correlação; (3) o cosseno do ângulo entre um vetor e uma componente principal corresponde a sua correlação; (4) uma unidade de estudo na direção e sentido de uma variável e afastada do centro de origem tem um valor alto para essa variável.

Figura 24 - Biplot das PC1 e PC2 correspondente aos dados de qualidade da água do PISF com unidades classificadas por bacia hidrográfica (A) e de acordo com a ordem na matriz de dados (B)



Fonte: A autora (2022).

É possível observar a partir da Figura 24a que o ponto de captação na Bacia do São Francisco e a bacia do GI5 apresentam similaridade nos valores de suas variáveis, e que, a bacia do Terra Nova apresenta pontos similares e pontos afastados dessas bacias e do centro de origem. No qual, é possível identificar pela Figura 24b e o Anexo A que os pontos dispersos correspondem aos pontos Q06 e Q07, que não fazem parte do curso do Eixo Norte do PISF, sendo o Reservatório Nilo Coelho pertencente à Bacia do Terra Nova. A bacia do Jaguaribe também apresenta uma quantidade de pontos relativamente significativo dispersos do centro de origem, sendo a bacia composta por um único ponto Q13 com dados e este não recebeu contribuição até o estudo das águas do rio São Francisco.

Dessa forma, pode-se concluir que os pontos que fazem parte do curso do Eixo Norte do PISF apresentam similaridade nos valores das suas variáveis, e, não indicam ocorrência de grandes alterações na qualidade da água proveniente da Bacia do São Francisco ao longo do eixo.

Por outro lado, os pontos Q06 e Q07 na Bacia do Terra Nova e o ponto Q13 na Bacia do Jaguaribe, apresentam maiores diferenciações entre si e em relação às outras bacias e pontos da própria bacia que fazem parte do Eixo Norte, com unidades de estudo afastadas do centro de origem e localizadas na direção e sentido de variáveis relacionadas à poluição. Onde é possível observar na Figura 24b - etiquetas 11, 22 e 32 situadas na parte direita do gráfico, correspondente ao ponto Q07 (jusante do reservatório Nilo Coelho) durante as campanhas 19, 21 e 23, respectivamente, e que apresentou valores altos para matéria orgânica (DBO), Turbidez, PT, NT, SDT, Cl-a e Coliformes termotolerantes. Demonstrando assim, que no geral dos reservatórios em análise, a jusante do Nilo Coelho apresenta a qualidade de água mais comprometida do estudo.

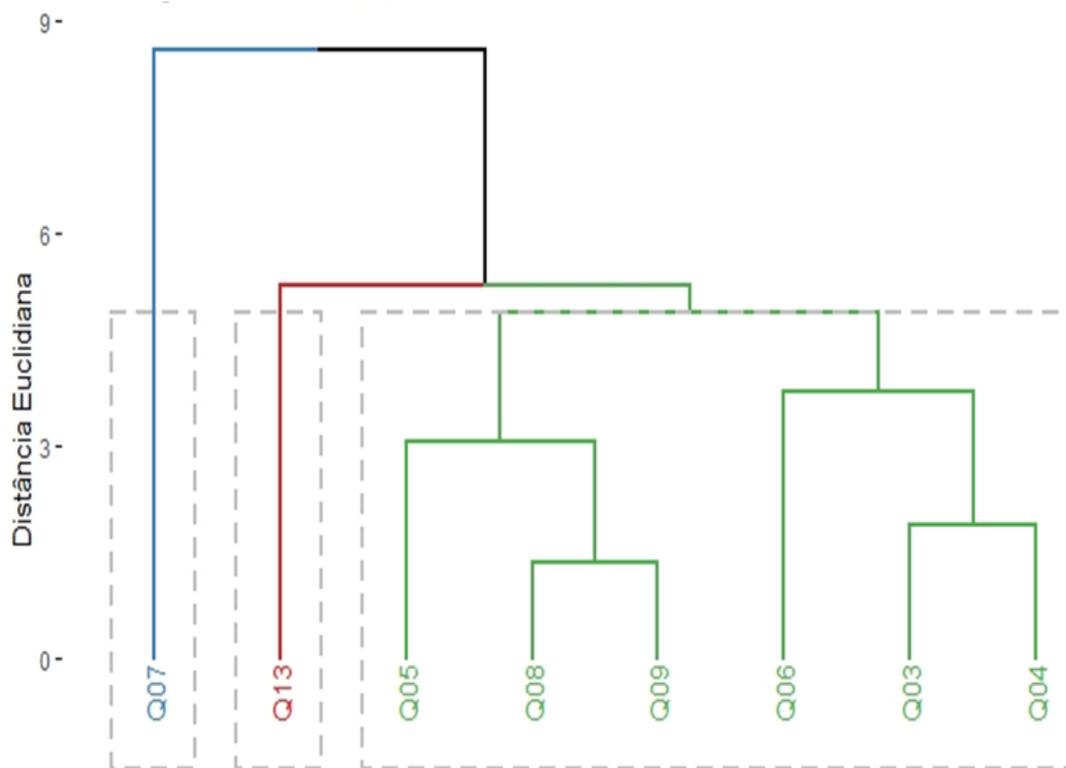
4.4 ANÁLISE DE AGRUPAMENTOS

O estudo de análise de agrupamentos buscou unir os pontos estudados para caracterização da qualidade da água, de acordo com a similaridade de suas características durante os períodos monitorados. Inicialmente, os dados foram separados por períodos secos e chuvosos, e foi extraída a média de cada parâmetro. Posteriormente, os dados foram padronizados e submetidos à técnica que utiliza a distância euclidiana quadrada para construção da matriz de similaridade e o método Ward para formação dos grupos.

Como resultado obteve-se dois dendrogramas, sendo um para o período seco e outro para o período chuvoso, que podem ser visualizados nas Figuras 25 e 26. Para determinação da quantidade de *clusters*, foi utilizado o conhecimento prático dos dados, estabelecendo um ponto de corte nos dendrogramas que caracterize com maior sentido à similaridade dos pontos do estudo.

Com o resultado obtido na Figura 25 para o período chuvoso, é possível identificar três grupos distintos. O grupo 1, é o grupo maior, sendo composto pelos pontos que inclui a captação do Eixo Norte (Q03) e os reservatórios projetados ao longo do eixo (Q04, Q05, Q08 e Q09), mas também faz parte do grupo o Q06, que se refere a um ponto no próprio reservatório Nilo Coelho. Isso mostra que a qualidade da água apresentada no ponto de captação se mantém ao longo do eixo, bem como se assemelha à qualidade da água no reservatório Nilo Coelho no período Chuvoso.

Figura 25 - Dendrograma resultante da Análise de Agrupamentos aplicada aos dados de qualidade da água do PISF no período chuvoso



Fonte: A autora (2022).

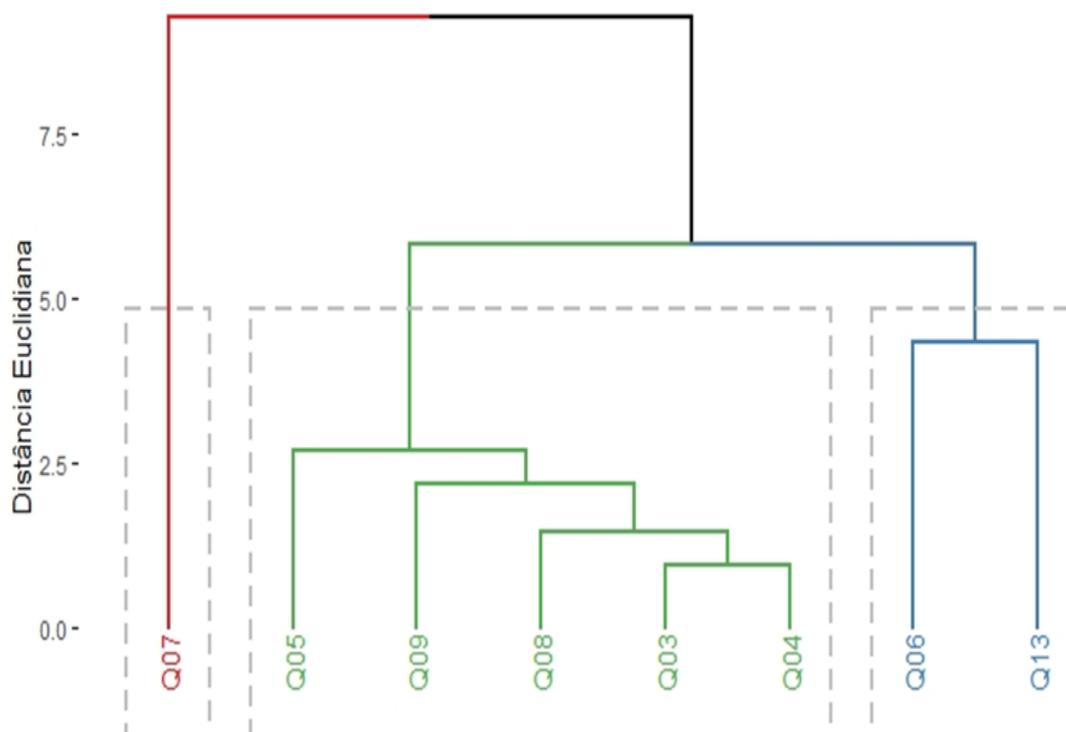
O grupo 2 é composto apenas pelo ponto Q13, correspondente ao reservatório Atalho na Bacia do Jaguaribe. O reservatório não recebeu águas do PISF durante as campanhas do estudo, sendo possível identificar que a qualidade da água presente no mesmo difere da qualidade apresentada pelos reservatórios que operam com águas do PISF.

O grupo 3 é formado apenas pelo ponto Q07, correspondente a jusante do reservatório Nilo Coelho. Diferente do Q06 que é no próprio reservatório e apresenta características similares aos pontos com águas do PISF, mostrando assim uma interferência no percurso do reservatório até a sua jusante, comprometendo a qualidade da água que sai do reservatório para os cursos naturais. Corroborando também com o resultado da ACP, que mostra que o ponto Q07 apresentou valores extremos nos gráficos PC1 x PC2, onde este apresenta valores altos para matéria orgânica (DBO), Turbidez, PT, NT, SDT, Cl-a e Coliformes termotolerantes.

Com o resultado obtido na Figura 26 para o período seco, é possível identificar também a presença de três grupos distintos. A diferença visível entre o período seco e chuvoso é o ponto Q06, que passa a integrar o Grupo 3 juntamente com o ponto Q13 (reservatório de Atalho), essa mudança de grupo pode ser caracterizada pela menor

quantidade de campanhas com dados para o reservatório, por não apresentar lâmina d'água suficiente no período seco, e/ou quando presente apresentar-se em menor quantidade, o que acarreta numa menor qualidade das águas do manancial pela exposição dele.

Figura 26 - Dendrograma resultante da Análise de Agrupamentos aplicada aos dados de qualidade da água do PISF no período seco



Fonte: A autora (2022).

A aplicação da Análise de Agrupamentos pode ser uma ferramenta útil na decisão sobre a manutenção de determinada estação e melhor alocação de recursos. Em redes de monitoramento que possuem pontos localizados geograficamente próximos, algumas estações podem apresentar qualidade da água similar (CALDAS, 2021).

No geral, quanto à rede de monitoramento do Eixo Norte do PISF, as estações localizadas no ponto de captação e nos reservatórios recém-construídos se apresentaram em grupos de qualidade da água similar tanto no período seco, quanto no chuvoso. Isso mostra que a qualidade da água está sendo mantida ao longo dos reservatórios e canais do Eixo Norte do PISF.

4.5 ANÁLISE DO USO DO SOLO NO ENTORNO DOS RESERVATÓRIOS

Todas as informações contidas nesse tópico fazem parte da análise dos seis documentos elaborados para as três sub-bacias na qual estão inseridos os reservatórios do

estudo (Quadro 6). O PACUERA de cada uma das três sub-bacias é composto por: diagnóstico socioambiental e zoneamento ambiental.

Quadro 6 - Documentos utilizados na elaboração da análise do uso do solo no entorno dos reservatórios e seus reservatórios presentes e estudados

| Documento | Reservatórios | Reservatórios analisados |
|--|---|--|
| Diagnóstico socioambiental – Sub-bacia GI5 | Tucutu | Tucutu |
| Zoneamento ambiental – Sub-bacia GI5 | | |
| Diagnóstico socioambiental – Sub-bacia Terra Nova | Terra Nova Serra do Livramento Mangueira Negreiros Milagres | Terra Nova Serra do Livramento Mangueira |
| Zoneamento ambiental – Sub-bacia Terra Nova | | |
| Diagnóstico socioambiental – Sub-bacia Rio Salgado | Jati Atalho Porcos Cana Brava Cipó Boi | Atalho |
| Zoneamento ambiental – Sub-bacia Rio Salgado | | |

Fonte: MI (2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2016e, 2016f).

É importante destacar que embora os PACUERAs abordem todos os reservatórios da sub-bacia, a análise foi realizada apenas com relação aos reservatórios estudados para determinação da qualidade de água. Estes foram escolhidos mediante a existência de dados para classificação da qualidade da água, pois os demais não haviam recebido águas da transposição até a última coleta realizada anteriormente à elaboração desta pesquisa.

Diversos impactos significativos são causados nos meios físico, biótico e socioeconômico com a implantação de reservatórios artificiais. A construção de reservatórios traz à tona uma série de questões relativas às ações de planejamento e gestão, uma vez que as alterações de uso do solo no entorno dos reservatórios podem afetar diretamente sobre a qualidade da água e o aporte de sedimentos, comprometendo assim a vida útil dos reservatórios e, muitas vezes, causando prejuízos que afetam a finalidade para os quais foram construídos.

A APP dos reservatórios construídos pelo PISF foi delimitada em uma faixa 100 metros, uma vez que se trata de reservatórios com objetivo de abastecimento público. Onde ao longo de todo o sistema PISF, foi realizada a desapropriação de uma faixa de no mínimo 100 m a partir das margens dos canais e cursos d'água no entorno dos reservatórios.

O Diagnóstico Socioambiental dos reservatórios foi realizado considerando não somente a Área de Preservação Permanente, mas uma área maior, visando o adequado

entendimento dos componentes socioambientais que subsidiaram o zoneamento e influenciaram a adequada implantação das medidas de conservação e uso,

O Quadro 7 apresenta as sub-bacias e os respectivos reservatórios projetados e que fazem parte do estudo dentro de cada sub-bacia (alvo do PACUERA), bem como os municípios na qual estão inseridos.

Quadro 7 - Sub-bacias e reservatórios estudados

| Sub-bacia Hidrográfica | Reservatórios | Município |
|------------------------|---------------------|--------------------|
| GI 5 | Tucutu | Cabrobó |
| Terra Nova | Terra Nova | |
| | Serra do Livramento | Salgueiro |
| Mangueira | | |
| Salgado / Jaguaribe | Atalho | Jati e Brejo Santo |

Fonte: A autora (2022).

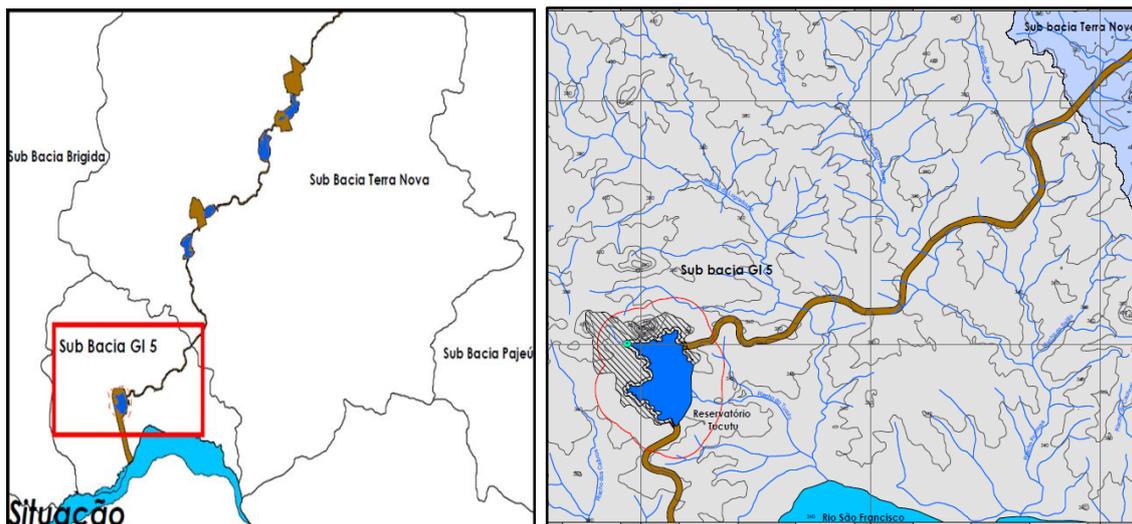
Os reservatórios do estudo estão inseridos em quatro municípios: Cabrobó, Salgueiro, Jati e Brejo Santo. Logo, os planos diretores dos respectivos municípios foram consultados e considerados no levantamento e elaboração dos PACUERAs.

Buscando-se compreender os impactos aos quais os reservatórios estão submetidos, foram levantadas as características do meio físico, biótico e socioeconômico. Um destaque será dado às principais características da ocupação antrópica das áreas localizadas nas proximidades dos reservatórios objetos deste estudo e que interferem de forma direta/indireta nestes. Também serão enfatizados os programas ambientais propostos para esses reservatórios e que objetivam garantir a qualidade da água e vida útil deles.

4.5.1 Sub-bacia GI 5

O grupo de bacias de pequenos rios interiores intermitentes – GI 5 está localizado no Sertão do estado de Pernambuco, abrange parte do município de Cabrobó, incluindo sua sede, e o município de Orocó. Limita-se ao Norte com os riachos da Bacia Terra Nova e Brígida, ao Sul com o rio São Francisco, a Leste com a bacia Terra Nova e a Oeste com a Bacia do rio Brígida (Figura 27).

Figura 27 - Sub-bacia GI 5 e delimitação da área estudada no reservatório de Tucutu



Fonte: MI (2016a).

A bacia do GI 5 apresenta área de 706,67 km², que corresponde a 0,72% da área total do estado de Pernambuco. Ela é constituída por cinco micro sub-bacias, cujos riachos intermitentes desaguam diretamente na margem esquerda do rio São Francisco. Entre as cinco, três se destacam, sendo elas: Jatobá ou Oiti, Logradouro e Formosa. Na sub-bacia do GI 5 analisou-se o uso do solo no entorno do único reservatório projetado no âmbito do PISF, o reservatório de Tucutu.

Reservatório de Tucutu

O reservatório de Tucutu é o primeiro reservatório projetado do Eixo Norte. Recebe água transposta do rio São Francisco pela margem esquerda, e o seu canal de saída se localiza na margem direita e segue em direção ao reservatório de Terra Nova. É formado por uma barragem de enrocamento com núcleo argiloso, com características descritas na Tabela 12.

Tabela 12 - Características físicas do reservatório de Tucutu

| Área inundada | Altura Máxima | Comprimento | Volume útil |
|---------------|---------------|-------------|----------------------|
| 351,98 ha | 27,5 m | 3,34 km | 8,38 hm ³ |

Fonte: MI (2016a).

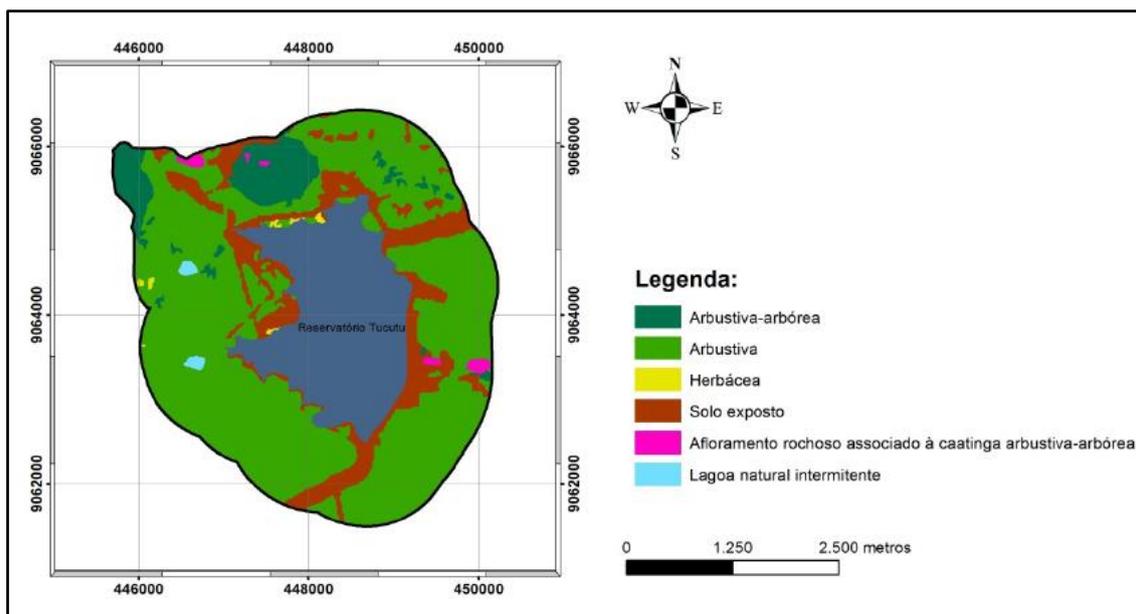
O maior aporte de sedimentos que qualquer reservatório recebe é aquele carreado pelos seus afluentes. O aporte natural de água e de sedimentos para o reservatório Tucutu é feito por meio de dois pequenos riachos intermitentes, sendo o mais importante

denominado riacho Tucutu. O segundo riacho de contribuição, é de menor porte e ficará totalmente afogado pelo reservatório quando cheio.

No que diz respeito ao riacho Tucutu, constatou-se a existência de um açude no local onde o talvegue entra no reservatório Tucutu. Este açude constitui em um fato bastante favorável no sentido de aumentar a vida útil do reservatório, pois irá contribuir para diminuir sensivelmente a velocidade da água das enxurradas do riacho Tucutu, decantando assim a maioria dos sedimentos veiculados. Desta forma, concluiu-se que a contribuição do aporte de sedimentos do riacho Tucutu ao reservatório será insignificante. Mas, recomenda-se a preservação deste açude existente, para garantir que os sedimentos carregados sejam minimizados antes de chegar ao reservatório Tucutu. Quanto ao escoamento difuso no entorno das margens deste, foi considerado insignificante.

Com relação à vegetação existente, de maneira geral, o entorno do reservatório Tucutu apresenta-se com fitofisionomias variadas, sendo identificado que algumas áreas se encontram com um certo grau de perturbação, evidenciado pelo número elevado de espécies pioneiras. A Figura 28 apresenta a variação da vegetação na área do entorno do reservatório.

Figura 28 - Variação do uso do solo e vegetação na área do entorno do reservatório Tucutu



Fonte: MI (2016a).

A fitofisionomia mais representativa na área de estudo é a caatinga arbustiva com 72,81%, estando incluso neste percentual a vegetação arbustiva rala e densa, sendo ela aberta ou fechada. Já a caatinga arbustiva-arbórea ocupa 8,26%, a caatinga herbácea 0,35%, afloramentos rochosos associados à caatinga arbustiva-arbórea 0,79%, áreas

antropizadas 17,33% que correspondem ao solo exposto e as lagoas intermitentes com 0,46%. O estudo constatou que as áreas de APPs no entorno do reservatório Tucutu encontram-se bastante caracterizadas no que diz respeito à sua composição florística, ou seja, apresenta elevado grau de conservação.

Para o estudo do meio socioeconômico foi considerada uma área maior que a estabelecida para área do estudo que é de 1 km ao redor de cada reservatório, acrescida da área da bacia de contribuição. Mas, uma vez que as demandas de uso poderão advir de núcleos populacionais situados além dessa faixa, também foram analisadas as comunidades que, mesmo além da área determinada, possam vir a influenciar os reservatórios.

No caso do Reservatório Tucutu, localizado na área rural do município de Cabrobó (PE), seu entorno de 1 km não está atualmente ocupado. Sendo consideradas algumas localidades numa área maior, são elas: Projeto de assentamento (PA) Juventude, Mãe Rosa e VPR Captação. O Quadro 8 apresenta as principais características desses núcleos populacionais.

Com relação à VPR Captação, esta é uma das 18 Vilas Produtivas Rurais, criada para o reassentamento das famílias desapropriadas pelas obras do PISF, por meio do PBA 08. Este tem como objetivo propiciar às famílias afetadas e que fazem parte do processo de reassentamento, condições que permitam sua reprodução social e econômica em situação, no mínimo, similar à atual, por meio da criação de Vilas Produtivas Rurais (VPR). Além disso, o programa deve possibilitar a qualidade de vida das famílias reassentadas por meio da implantação de infraestrutura de saneamento básico, viária e de apoio, à produção, de serviços de educação, saúde e comunitários.

As famílias classificadas como residentes na faixa de obras foram beneficiadas com casas e lotes agrícolas e as não residentes, apenas com lotes agrícolas. Na VPR Captação foram beneficiadas 17 famílias, sendo 11 (onze) com casas e lotes agrícolas e 06 (seis) apenas com lotes agrícolas. A VPR possui área total de 321,44 hectares. Os reassentados são advindos das localidades Ponta da Ilha e Toco Preto.

Quadro 8 - Características dos núcleos populacionais no entorno do reservatório Tucutu

| Localidade | Distância | Adensamento populacional | Fontes de Renda | Saneamento | Observação |
|-----------------|-----------|--|--|--|--|
| 1. PA Juventude | 7,0 km | Entre 20 e 30 famílias, mas possui 40 casas. | - Agricultura de subsistência | - Água encanada, armazenadas em caixas d'águas, sem tratamento - Fossa rudimentar - Lixo queimado | Não há previsão de abastecimento de água |
| 2. Mãe Rosa | 2,5 km | 108 famílias. 420 pessoas. | - Agricultura de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria - Comércio - Prestação de serviços | - Água encanada captada do rio São Francisco, sem tratamento - Fossa em 41 casas e restante s/ inst. sanitárias - Lixo queimado em 102 casas, as demais depositam a céu aberto | Não há previsão de abastecimento de água |
| 3. VPR Captação | 4,5 km | 17 famílias. 58 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família | - Água encanada – com tratamento - Fossa e vala de infiltração - Lixo queimado e/ou enterrado | Possui sistema de abastecimento de água |

Fonte: MI (2016a).

Com relação aos possíveis conflitos pelos usos da água do reservatório, temos que:

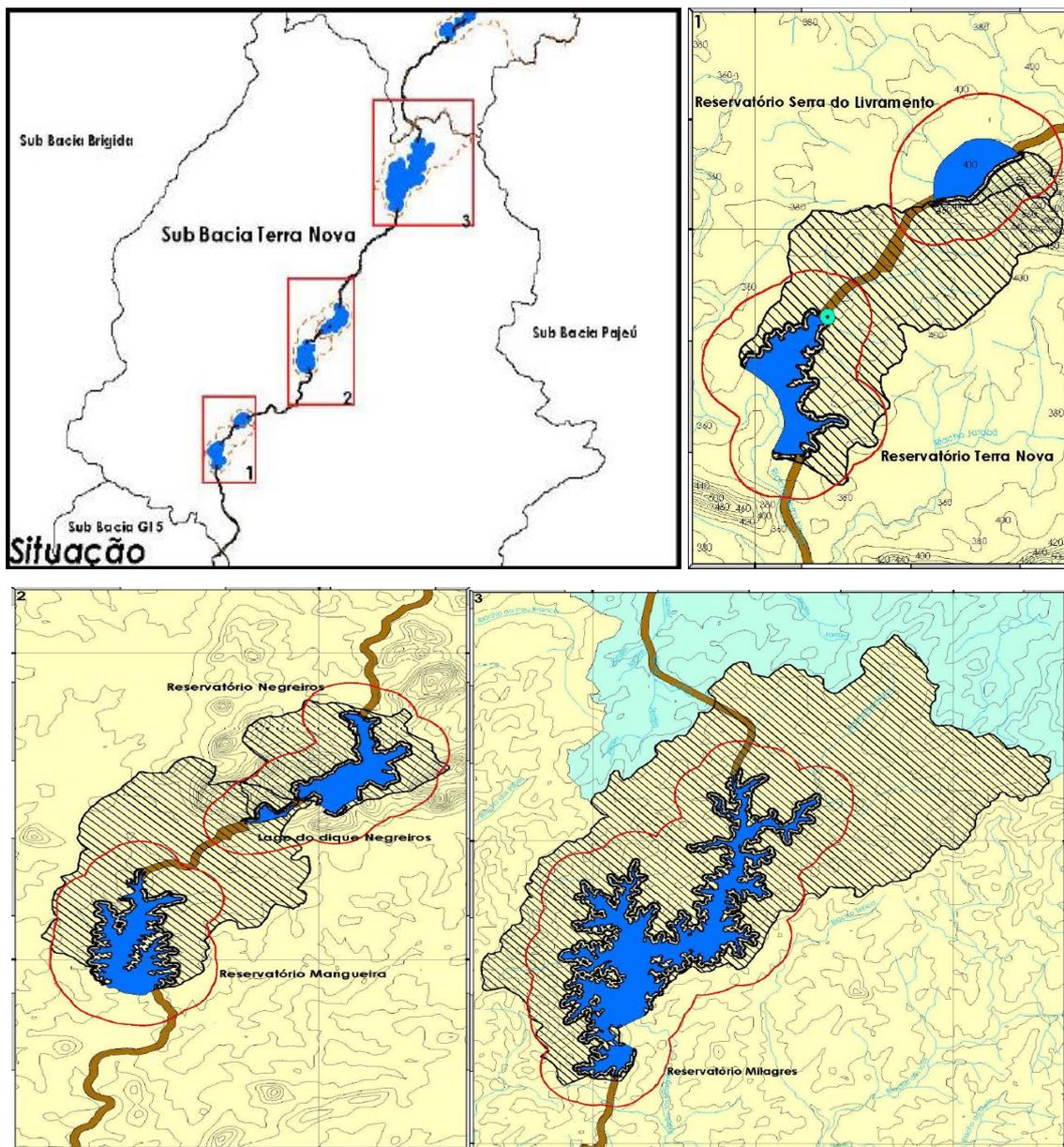
- Na comunidade PA Juventude, a maioria acredita que não haverá conflitos relacionados ao uso das águas do reservatório, mas alguns as demandas gerarão conflitos entre os proprietários, principalmente os grandes agricultores. Ainda foi levantando que “todas as fontes de reserva de água no mundo levaram e levam ao conflito”.
- Na comunidade Mãe Rosa, a maioria acredita que não haverá conflitos relacionados ao uso das águas do reservatório, mas alguns consideram que os limites do reservatório não serão respeitados, e que haverá conflito entre os moradores. Ainda foi levantado que aqueles agricultores que não forem atendidos por projetos de abastecimento irão captar água clandestinamente.
- A VPR Captação acredita que não haverá conflitos relacionados ao uso das águas do reservatório.

No entorno do reservatório de Tucutu foram desapropriadas 40 propriedades, todas situadas no município de Cabrobó (PE), equivalente a uma área aproximada de 1.012 ha.

4.5.2 Sub-bacia Terra Nova

A sub-bacia do rio Terra Nova está localizada no Sertão do estado de Pernambuco. A área de drenagem envolve 12 municípios. Limita-se ao Norte com o estado do Ceará, ao Sul com os Grupos de Bacias de Pequenos Rios Interiores 4 e 5 (GI4 e GI5) e o rio São Francisco, a Leste com a Bacia do rio Pajeú e a Oeste com a Bacia do rio Brígida (Figura 29).

Figura 29 - Sub-bacia Terra Nova e delimitação da área estudada nos reservatórios projetados na bacia



Fonte: MI (2016b).

A bacia do rio Terra Nova apresenta uma área de 4.906,66 km², que corresponde a 4,97% da área do estado de Pernambuco. A área de drenagem da bacia envolve 12 municípios. O rio Terra Nova apresenta uma extensão de 151,7 km, com suas nascentes situadas no limite do estado do Ceará, seu regime fluvial é intermitente ao longo de todo seu curso. Sua rede hidrográfica é constituída por 25 tributários principais, sendo 14 pela margem direita e 11 pela margem esquerda.

Na sub-bacia do rio Terra Nova foram analisados o uso do solo no entorno de três reservatórios projetados no Eixo Norte do PISF, que são: Terra Nova, Serra do Livramento e Mangueira.

4.5.2.1 Reservatório de Terra Nova

O reservatório de Terra Nova é o segundo reservatório projetado do eixo norte, e o primeiro da sub-bacia do rio Terra Nova. Recebe água transposta do rio São Francisco pela margem esquerda, proveniente do reservatório de Tucutu e o seu canal de saída se localiza na margem direita e segue em direção ao reservatório de Serra do Livramento. É formado por uma barragem zoneada terra/enrocamento, com características descritas na Tabela 13.

Tabela 13 - Características físicas do reservatório de Terra Nova

| Área inundada | Altura Máxima | Comprimento | Volume útil |
|---------------|---------------|-------------|---------------------|
| 230,65 ha | 20,0 m | 2,39 km | 2,6 hm ³ |

Fonte: MI (2016b).

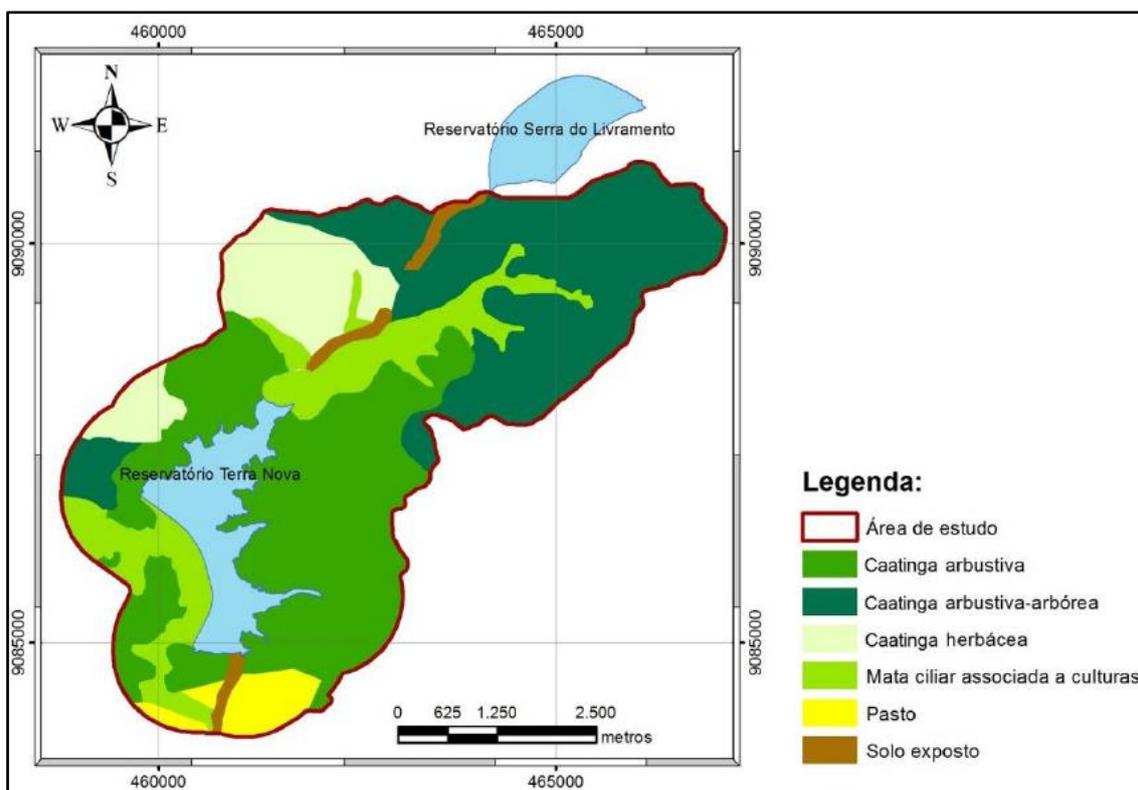
O aporte natural de água e de sedimentos para o reservatório Terra Nova, é feito por meio de três pequenos riachos intermitentes, sendo o mais importante denominado riacho Cacimbinha. O riacho intermitente Cacimbinha é detentor de vastas planícies de inundação, que se constitui em um fato bastante favorável no sentido de aumentar a vida útil do reservatório Terra Nova, pois irá contribuir para diminuir sensivelmente a velocidade da água das enxurradas, decantando assim a maioria dos sedimentos veiculados. Desta forma, concluiu-se que a contribuição do aporte de sedimentos do riacho Cacimbinha ao reservatório será insignificante.

Foi constatada a existência de um açude denominado de açude Sanharó, que estava posicionado no final do reservatório Terra Nova, mas ele ficou afogado pelas obras do canal de saída do reservatório, não sendo considerado mais como contribuição de

afluentes. Quanto ao escoamento difuso no entorno das margens deste, foi considerado insignificante.

Com relação à vegetação existente, de maneira geral, o entorno do reservatório Terra Nova apresenta-se com fitofisionomias bastante variadas, sendo identificado que algumas áreas se encontram com um certo grau de perturbação, evidenciado pelo número elevado de espécies pioneiras. A Figura 30 apresenta a variação da vegetação na área do entorno do reservatório.

Figura 30 - Variação do uso do solo e vegetação na área do entorno do reservatório Terra Nova



Fonte: MI (2016b).

A fitofisionomia mais representativa na área de estudo é a caatinga arbustiva com 37,39% seguida de caatinga arbustiva arbórea (31,82%), mata ciliar associada às culturas (14,06%), caatinga herbácea (11,05%) e áreas antropizadas (5,67%), que correspondem ao solo exposto e áreas de pasto. Onde conclui-se que 94,33% da área apresenta cobertura vegetal.

O estudo do meio socioeconômico considerou três localidades situadas na área do entorno do reservatório Terra Nova, que se encontram na área rural do município de Cabrobó (PE), são elas: Sanharó, Represa e Salgadinho. O Quadro 9 apresenta as principais características desses núcleos populacionais.

Quadro 9 - Características dos núcleos populacionais no entorno do reservatório Terra Nova

| Localidade | Distância | Adensamento populacional | Fontes de Renda | Saneamento | Observação |
|---------------|-----------|-----------------------------|--|---|--|
| 1. Sanharó | 1,6 km | 03 famílias. 16 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água encanada - COMPESA - Sem instalações sanitárias - Lixo queimado | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 2. Represa | 1,1 km | 09 famílias. 44 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água encanada - COMPESA - Sem instalações sanitárias - Lixo queimado | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 3. Salgadinho | 2,6 km | 05 famílias. 25 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água encanada – sem tratamento - Sem instalações sanitárias - Lixo queimado | Não há previsão de abastecimento de água |

Fonte: MI (2016b).

Com relação aos possíveis conflitos pelos usos da água do reservatório, temos que:

- A comunidade de Sanharó acredita que haverá conflitos relacionados ao uso das águas do reservatório e que se encontravam insatisfeitos pelo fato do açude utilizado por eles para irrigação, o açude de Sanharó, estar dentro dos canais de obras do PISF e estarem limitados aos mesmos usos do sistema PISF.
- A comunidade de Represa, assim como em Sanharó, demonstraram insatisfação quanto às interferências da construção do canal com o açude próximo, e declararam que se não for disponibilizada outra fonte de água, entrarão em conflito com o Poder Público.
- A comunidade de Salgadinho acredita que os moradores locais não serão beneficiados pelas águas do reservatório, mas sim aqueles de outros estados, como o Ceará. Afirmaram que haverá conflitos de uso, caso não sejam considerados os interesses dos núcleos habitacionais próximos aos reservatórios e/ou ao canal do PISF.

No entorno do reservatório de Terra Nova foram desapropriadas 27 propriedades, todas inseridas no município de Cabrobó (PE), equivalente a aproximadamente 776 ha.

4.5.2.2 Reservatório de Serra do Livramento

O reservatório de Serra do Livramento é o terceiro reservatório projetado do Eixo Norte, e o segundo da sub-bacia do rio Terra Nova. Recebe água transposta do rio São Francisco pela margem esquerda, proveniente do reservatório de Terra Nova e o seu canal de saída se localiza na margem direita e segue em direção ao reservatório de Mangueira.

É formado por uma barragem zoneada terra/enrocamento, com características descritas na Tabela 14.

Tabela 14 - Características físicas do reservatório de Serra do Livramento

| Área inundada | Altura Máxima | Comprimento | Volume útil |
|----------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 155,88ha | 27,5 m | 3,097 km | 14,15 hm ³ |

Fonte: MI (2016b).

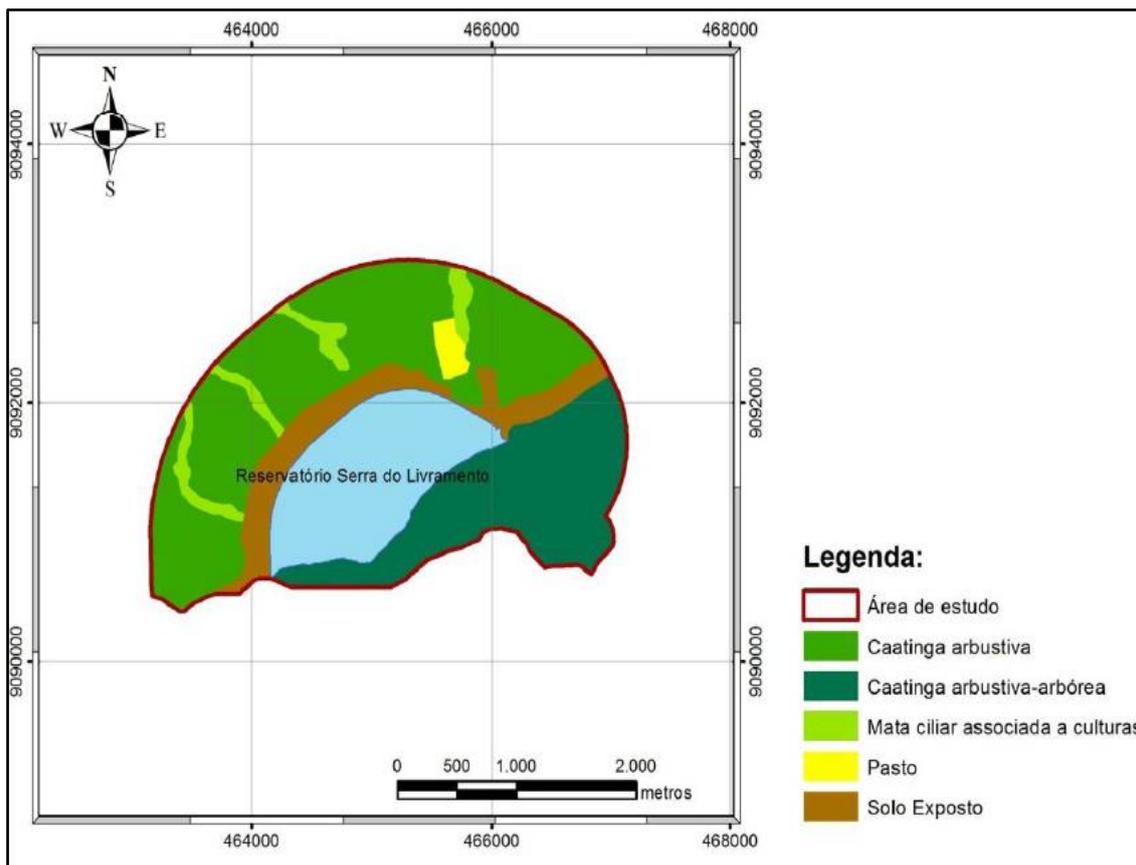
O maior aporte natural de água e de sedimentos para o reservatório Serra do Livramento é feito por meio de pequenos talwegues intermitentes, cujas nascentes se localizam na Serra do Livramento, mas estes pequenos talwegues ficaram quase que totalmente afogados com o enchimento do reservatório, não constituindo nenhum risco de assoreamento dele, garantindo uma maior vida útil ao reservatório. Quanto ao escoamento difuso no entorno das margens deste, foi considerado insignificante. Por fim, não se constatou a existência de nenhum açude decantador de sedimentos na Bacia Hidrográfica do reservatório Serra do Livramento.

Com relação à vegetação existente, de maneira geral, o entorno do reservatório de Serra do Livramento apresenta fitofisionomia com densidades e graus de conservação variados. Foi identificado que algumas áreas se encontram com um certo grau de perturbação, evidenciado pelo número elevado de espécies pioneiras. A Figura 31 apresenta a variação da vegetação na área do entorno do reservatório.

A fitofisionomia mais representativa na área de estudo foi à caatinga arbustiva (50,65%) seguida de caatinga arbustiva arbórea (29,48%). As áreas antropizadas, que correspondem ao solo exposto e áreas de pasto, representam 14,5% da área de estudo. Por fim, a mata ciliar associada às culturas aparece em 5,36% da área de estudo. Desta forma, conclui-se que 85,49% da área de estudo apresenta cobertura vegetal.

O estudo do meio socioeconômico considerou uma das 18 Vilas Produtivas Rurais que fazem parte do PBA 08, a VPR Baixio dos Grandes (antes denominada de Junco), pois esta encontra-se situada na área do entorno do reservatório de Serra do Livramento. O reservatório está estabelecido na área rural do município de Cabrobó (PE), e seu entorno de 1 km não se encontra ocupado atualmente por núcleos populacionais.

Figura 31 - Variação do uso do solo e vegetação na área do entorno do reservatório Serra do Livramento



Fonte: MI (2016b).

Na VPR Baixio dos Grandes foram beneficiadas 83 famílias, sendo que 55 com casas e lotes agrícolas e 28 apenas com lotes agrícolas. Na VPR Baixio dos Grandes residem 236 pessoas que vieram de várias localidades, são elas: Baixio dos Grandes (28 famílias), Curralinho (07 famílias), Junco (15 famílias), Várzea da Queda (04 famílias) e Sanharó (01 família). A VPR Baixio dos Grandes possui área total de 791,21 ha e o núcleo habitacional área de 63,48 ha, estando situado a 2,6 km do reservatório.

A VPR Baixio dos Grandes possui rede elétrica e rede de distribuição de água, a qual inclui reservatório para o núcleo habitacional, Estação de Tratamento de Água (ETA) compacta e rede de distribuição nos lotes individuais. Quanto ao sistema de esgoto, as residências possuem sistemas individuais com fossa. Com relação aos conflitos pelo uso da água do reservatório Serra do Livramento, ou da área do entorno deles, os moradores acreditam que os limites de uso não serão respeitados, assim como não serão respeitadas as cercas construídas.

No entorno do reservatório de Serra do Livramento foram desapropriadas 29 propriedades, situadas nos municípios de Cabrobó e Salgueiro, ambos no estado do Pernambuco, equivalente a uma área aproximada de 445ha.

4.5.2.3 Reservatório de Mangueira

O reservatório de Mangueira é o quarto reservatório projetado do eixo norte, e o terceiro da sub-bacia do rio Terra Nova. Recebe água transposta do rio São Francisco pela ombreira esquerda da barragem, proveniente do reservatório de Serra do Livramento e o seu canal de saída se localiza na margem direita e segue em direção ao reservatório de Negreiros. É formado por uma barragem zoneada terra/enrocamento, com características descritas na Tabela 15.

Tabela 15 - Características físicas do reservatório de Mangueira

| Área inundada | Altura Máxima | Comprimento | Volume útil |
|----------------------|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 320,09 ha | 26,4 m | 1,02 km | 11,50 hm ³ |

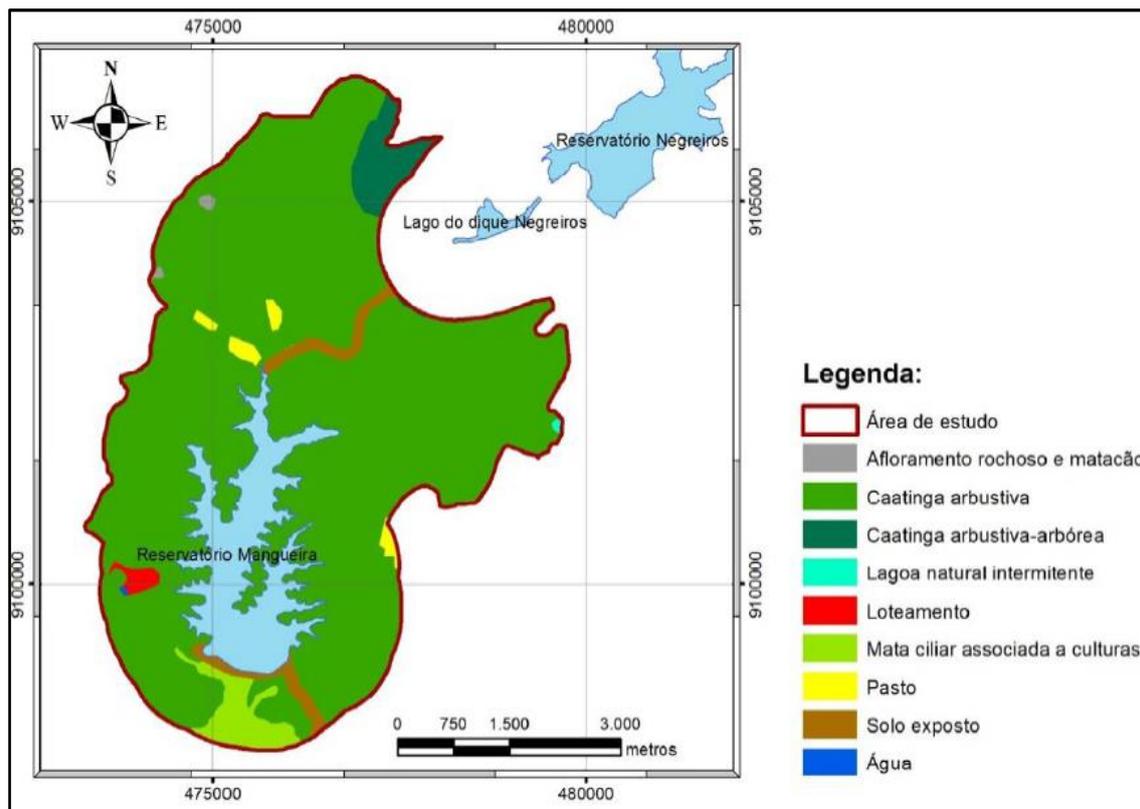
Fonte: MI (2016b).

O aporte natural de água e de sedimentos para o reservatório Terra Nova, é feito por quatro pequenos riachos intermitentes, sendo que os mais relevantes são o Riacho da Barra, que aporta em dos braços esquerdo do reservatório, e um afluente pela margem direita do Riacho da Barra. Esses dois riachos são detentores de vastas planícies de inundação, que ocorrem nos trechos a montante do reservatório. Essas planícies à montante do reservatório contribuem para diminuir sensivelmente a velocidade da água das enxurradas, decantando assim a maioria dos sedimentos veiculados. Desta forma, concluiu-se que a contribuição do aporte do riacho da Barra ao reservatório de Mangueira será insignificante.

Além dessas planícies, constatou-se também a existência de três açudes, mas esses ficaram afogados dentro do reservatório de Mangueira, minimizando assim sua importância no tocante ao tema retenção de sedimentos. Quanto ao escoamento difuso no entorno das margens deste, foi considerado insignificante.

Com relação à vegetação existente, de maneira geral, o entorno do reservatório Terra Nova apresentou diferentes tipos de fisionomias, sendo identificado que algumas áreas apresentam certo grau de perturbação. A Figura 32 apresenta a variação da vegetação na área do entorno do reservatório.

Figura 32 - Variação do uso do solo e vegetação na área do entorno do reservatório Mangueira



Fonte: MI (2016b).

A fitofisionomia mais representativa na área de estudo foi a caatinga arbustiva, com 90,51%, seguida de áreas antropizadas (3,69%), que correspondem ao solo exposto, loteamento e áreas de pasto, caatinga arbustiva arbórea (2,95%), mata ciliar associada a culturas (2,58%), incluindo os afloramentos rochosos e matacões (0,17%), lagoa natural intermitente (0,07%). Conclui-se que 96,04% da área de estudo apresenta cobertura vegetal.

O estudo do meio socioeconômico considerou seis localidades situadas na área do entorno do reservatório Mangueira, que se encontram na área rural do município de Salgueiro (PE), são elas: Malhada do Xique Xique, Barra do Mulungu, Chapada do Mulungu, Várzea do Ramo, Quilombola Contendas e Quilombola Santana. Destaca-se ainda a existência de uma VPR na área do entorno do reservatório, a de Negreiros. O Quadro 10 apresenta as principais características desses núcleos populacionais.

Quadro 10 - Características dos núcleos populacionais no entorno do reservatório Mangueira

| Localidade | Distância | Adensamento populacional | Fontes de Renda | Saneamento | Observação |
|---------------------------|-----------|------------------------------|---|---|--|
| 1. Malhada do Xique Xique | 1,2 km | 02 famílias. 10 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água encanada - COMPESA - 01 casa possui fossa, a outra s/ inst. sanitárias - Lixo queimado | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 2. Barra do Mulungu | 208 m | 12 famílias. 36 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água encanada - COMPESA - Fossa em 04 casas e restante s/ inst. sanitárias - Lixo queimado | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 3. Chapada do Mulungu | 1,3 km | 04 famílias. 14 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Aposentadoria | - Captação em açude distribuída por carro pipa. Armazenamento em caixa d'água - Fossas rudimentares - Lixo queimado | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 4. Várzea do Ramo | 520 m | 29 famílias. 98 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água encanada - COMPESA - Fossa em 22 casas e restante s/ inst. sanitárias - Lixo queimado | Não há previsão de abastecimento de água |
| 5. Quilombola Contendas | 4,8 km | 46 famílias. 166 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água encanada - COMPESA - Fossa em parte das casas (alvenaria) e restante s/ inst. Sanitárias (taipa) - Lixo queimado em 38 casas | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 6. Quilombola Santana | 3,8 km | 56 famílias. 211 pessoas. | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria - Prestação de serviços | - Água encanada - COMPESA - Fossa em 23 casas e restante s/ inst. Sanitárias - Lixo queimado em 47 casas | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |

Fonte: MI (2016b).

Com relação aos possíveis conflitos pelos usos da água do reservatório, temos que:

- A comunidade Malhada Xique Xique acredita que haverá conflitos caso não seja disponibilizada água para os moradores rurais e ainda afirma que “sempre vai existir conflitos, porque o povo é sem ordem e sem limite”.
- A comunidade Barra do Mulungu não soube citar grupos que possam ter interesse no uso do reservatório ou na área do entorno dele, nem tampouco conflitos que possam ocorrer acerca do uso deste.

- A comunidade Chapada do Mulungu acredita que não haverá conflitos.
- A comunidade da Várzea do Ramo não soube apontar nenhum conflito que possa vir a existir acerca do uso do reservatório.
- A comunidade Quilombola Contendas não soube citar grupos que possam ter interesse no uso do reservatório ou na área do entorno dele, nem tampouco conflitos que possam ocorrer acerca do uso deste.
- A comunidade Quilombola Santana acredita que não haverá conflitos, mas que é necessário que exista um vigia para garantir o ordenamento do uso.

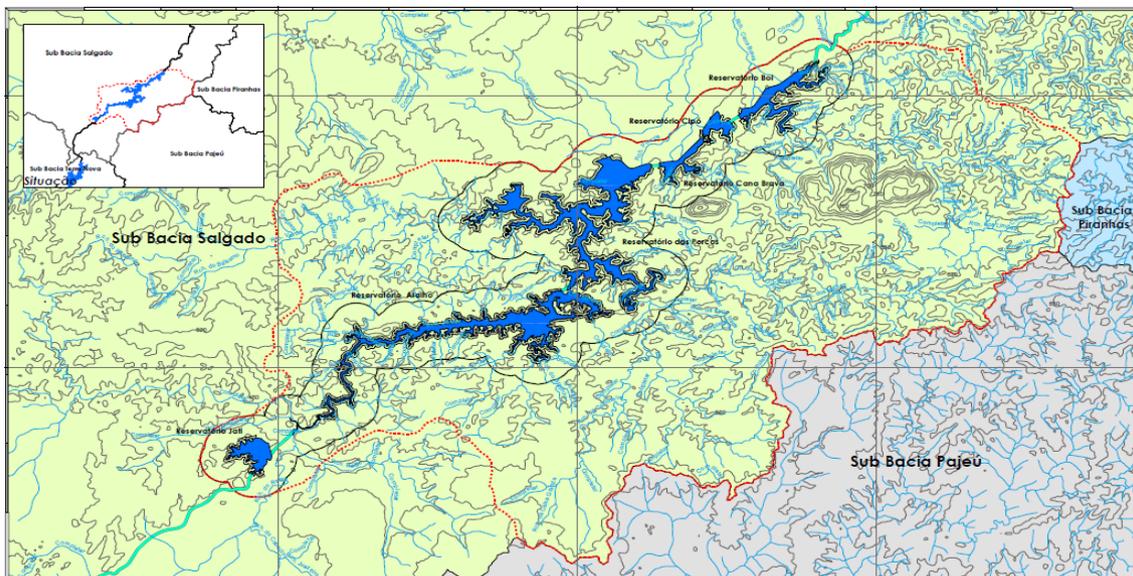
No entorno do reservatório de Mangueira foram desapropriadas 32 propriedades, todas pertencentes ao município de Salgueiro (PE), equivalente a uma área aproximada de 835 ha.

4.5.3 Sub-bacia do rio Salgado

A sub-bacia do rio Salgado é um afluente da Bacia do rio Jaguaribe. A Bacia do rio Jaguaribe está situada em sua quase totalidade dentro dos limites do estado do Ceará, e, o rio Jaguaribe é de dominialidade estadual, pois este nasce e deságua no estado do Ceará. O rio Jaguaribe é o maior curso d'água do território cearense com 610 km de extensão. No seu leito foram construídos dois dos maiores reservatórios cearenses: Orós inaugurado em janeiro de 1960 e Castanhão inaugurado em 2003.

Na sub-bacia do rio Salgado (Figura 33) estão inseridos os reservatórios de Jati, Atalho, Porcos, Cana Brava, Cipó e Boi.

Figura 33 - Sub-bacia do Salgado e delimitação das áreas dos reservatórios



Fonte: MI (2016c).

Esta sub-bacia conta com aproximadamente 650 açudes, sendo que apenas os treze maiores são gerenciados e monitorados, sendo seus domínios: 07 federais, 04 estaduais e 02 municipais. Apresenta uma área de 13.275 km², com área de drenagem envolvendo 23 municípios. A hidrografia do rio Salgado delinea uma rede constituída por 36 tributários intermitentes principais, sendo 15 riachos pela margem direita e 21 pela margem esquerda.

Na sub-bacia do rio Salgado analisou-se o uso do solo no entorno de apenas um reservatório no âmbito do PISF, o reservatório de Atalho.

Reservatório de Atalho

O reservatório de Atalho é oitavo reservatório do Eixo norte do PISF, e o segundo da sub-bacia do rio Salgado, sendo o único já existente do eixo. Recebe água transposta do rio São Francisco pela margem esquerda proveniente do reservatório de Jati e o seu canal de saída localiza-se na margem direita e segue em direção ao reservatório de Porcos. Ele foi construído pelo DNOCS no final da década de 80 e teve sua operação iniciada em 1992, mas passou pelo alteamento de 1,0 m na cota de crista da barragem por parte das obras do PISF, sendo necessário mediante a estudo hidrológico de cheia de projeto de 1.000 anos de tempo. As características do reservatório Atalho estão descritas na Tabela 16.

Tabela 16 - Características físicas do reservatório Atalho

| Área inundada | Altura Máxima | Comprimento | Volume útil |
|----------------------|----------------------|--------------------|------------------------|
| 554,53 ha | 1.885,3 m | 1,02 km | 108,25 hm ³ |

Fonte: MI (2016c).

O aporte natural de água e de sedimentos para o reservatório Terra Nova, é feito por meio do riacho intermitente Jardim. A geomorfologia fluvial do riacho Jardim é bastante singular e diferenciada daquela dos rios permanentes das regiões Sul e Sudeste. Com áreas que são intercaladas de trechos íngremes, como também é intercalado por áreas planas entremeadas de açudes onde são depositados os sedimentos anteriormente escavados nos trechos íngremes, favorecendo para que as águas do riacho Jardim adentrem ao reservatório Atalho praticamente desprovidas de sedimentos. Desta forma, concluiu-se que a contribuição do aporte do riacho Jardim ao reservatório de Atalho é insignificante, garantindo uma maior vida útil ao mesmo. Quanto ao escoamento difuso no entorno das margens deste, também foi considerado insignificante.

Com relação à vegetação existente, de maneira geral, na APP do reservatório de Atalho, que corresponde a uma faixa de 100 m, foram identificadas diversas fitofisionomias, desde as mais conservadas até as mais antropizadas. A fitofisionomia mais representativa na área de estudo foi à vegetação arbustiva arbórea (56%) seguida de vegetação arbustiva (30%), entre outras. As áreas antropizadas, que correspondem às áreas de pasto associado à cultura, representam 8,0% da área de estudo, mata ciliar em 3,0%, vegetação herbácea em 2% e vegetação arbórea em 1% da área de estudo. Desta forma, conclui-se que mais de 90% da área de estudo apresenta cobertura vegetal.

O estudo do meio socioeconômico considerou 10 localidades situadas na área do entorno do reservatório Atalha, que se encontram nas áreas dos municípios de Jati e Brejo Santo, ambos no estado do Ceará, são elas: Barro Branco, Sítio Joãozinho, Rio do Gato, Pebas, Atalhos, Buenos Aires, São José, PA Baixa Grande, Baixio dos Bastos, Queimadas. O Quadro 11 apresenta as principais características desses núcleos populacionais.

Quadro 11 - Características dos núcleos populacionais no entorno do reservatório Atalho

| Localidade | Distância | Adensamento populacional | Fontes de Renda | Saneamento | Observação |
|--------------------|------------------|---------------------------------|---|---|--|
| 1. Barro Branco | 1,5 km | 32 famílias 117 pessoas | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria - Prestação de serviços | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, a captação é de poço - Fossa em 18 casas, as outras s/ inst. sanitárias - Lixo queimado em 07 casas | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 2. Sítio Joãozinho | 1,1 km | 02 famílias 08 pessoas | - Agricultura e pecuária de subsistência - Prestação de serviços | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, captação em açude - Fossas - Lixo queimado | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 3. Rio do Gato | 360 m | 01 família 03 pessoas | - Agricultura e pecuária de subsistência - Aposentadoria | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, captação em açude - Fossas - Lixo enterrado | Não há previsão de abastecimento de água |
| 4. Pebas | 1,4 km | 06 famílias 24 pessoas | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, a captação no açude Atalho - Fossa em 01 casa, demais s/ inst. sanitárias - Lixo queimado em 01 casa | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |

| | | | | | |
|-----------------------|--------|---|--|--|--|
| 5. Atalhos | 110 m | 10 famílias 48 pessoas | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Prestação de serviços | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, a captação é feita em açude - Fossa em 01 casas, as outras s/ inst. sanitárias - Lixo depositado a céu aberto | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 6. Buenos Aires | 250 m | 06 famílias 22 pessoas | - Agricultura pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, captação no açude Atalho - Fossa em 02 casa, demais s/ inst. sanitárias - Lixo é queimado | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 7. São José | 80 m | 03 famílias 09 pessoas | - Agricultura de subsistência - Bolsa família | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, captação no açude Atalho - Sem instalações sanitárias - Lixo é queimado | Prevista infraestrutura de abastecimento de água |
| 8. PA Baixa Grande | 6,0 km | 38 famílias 179 pessoas + 33 famílias 118 pessoas | - Agricultura e pecuária de subsistência - Programa de produção de biodiesel da Petrobrás - Bolsa família - Aposentadoria | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, captação em açude - Fossa em 31 casas e restante s/ inst. sanitárias - Lixo é queimado em 45 casas | Não há previsão de abastecimento de água |
| 10. Baixio dos Bastos | 4,7 km | 31 famílias 93 pessoas | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria - Prestação de serviços | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, captação em barreiro e poço - Fossa em 16 casas e restante s/ inst. sanitárias - Lixo é queimado | Não há previsão de abastecimento de água |
| 11. Queimadas | 4,0 km | 34 famílias 138 pessoas | - Agricultura e pecuária de subsistência - Bolsa família - Aposentadoria | - Água por caminhão pipa, armazenado em cisternas, captação em açude e barreiro - Fossa em 20 casas e restante s/ inst. sanitárias - Lixo é queimado | Não há previsão de abastecimento de água |

Fonte: MI (2016c).

Com relação aos possíveis conflitos pelos usos da água do reservatório, cabe destacar a expectativa de todos os moradores no entorno do reservatório Atalho em ter acesso às águas dos reservatórios e/ou do canal para abastecimento humano e animal, bem como para atividades de irrigação. Entretanto, para alguns dos núcleos populacionais

localizados nas proximidades dos reservatórios não há previsão de instalação de sistemas de irrigação nem de abastecimento de água.

Entre os principais conflitos que as comunidades acreditam acontecer, temos:

- impedimento da população de usufruir da água;
- as águas só serviram “para abastecer os ricos, e para o pobre não vai adiantar em nada”;
- uso irregular se não tiver um vigia para garantir o ordenamento do uso ou algum outro tipo de fiscalização;
- a população não irá respeitar os limites e cercas estabelecidos;
- irão jogar lixo no reservatório, caso não haja controle;
- os limites de uso não serão respeitados, haverá pessoas captando água por meio de bombas para irrigação mesmo sem permissão;
- utilização do reservatório para atividades de lazer e pesca.

4.5.4 Zoneamento Ambiental

O zoneamento pode ser entendido como uma proposta metodológica de uso do território segundo suas potencialidades e vocações físicas, biológicas e antrópicas. Neste sentido, constitui uma técnica caracterizada pelo ordenamento, em áreas homogêneas, de zonas que possuem determinado potencial de uso ou conservação ambiental.

Na elaboração destes, o principal objetivo do planejamento territorial em curso foi a conservação da vida útil e da qualidade da água dos reservatórios, uma vez que estes se destinam prioritariamente ao abastecimento humano e à dessedentação animal. Foram considerado na definição da área de entorno, as áreas das microbacias hidrográficas de contribuição, pois são os sedimentos e/ou poluentes destas áreas que poderão chegar ao espelho d’água dos reservatórios de forma que sua gestão se torna fundamental para garantir a qualidade da água e uma maior vida útil destes.

É importante destacar que o planejamento é um processo contínuo e dinâmico e o PACUERA não deve ser encarado como estanque e definitivo. Muito pelo contrário, sua efetividade como instrumento de planejamento dependerá tanto das ações de monitoramento como de sua revisão periódica, assim como do envolvimento dos sujeitos locais com sua implementação.

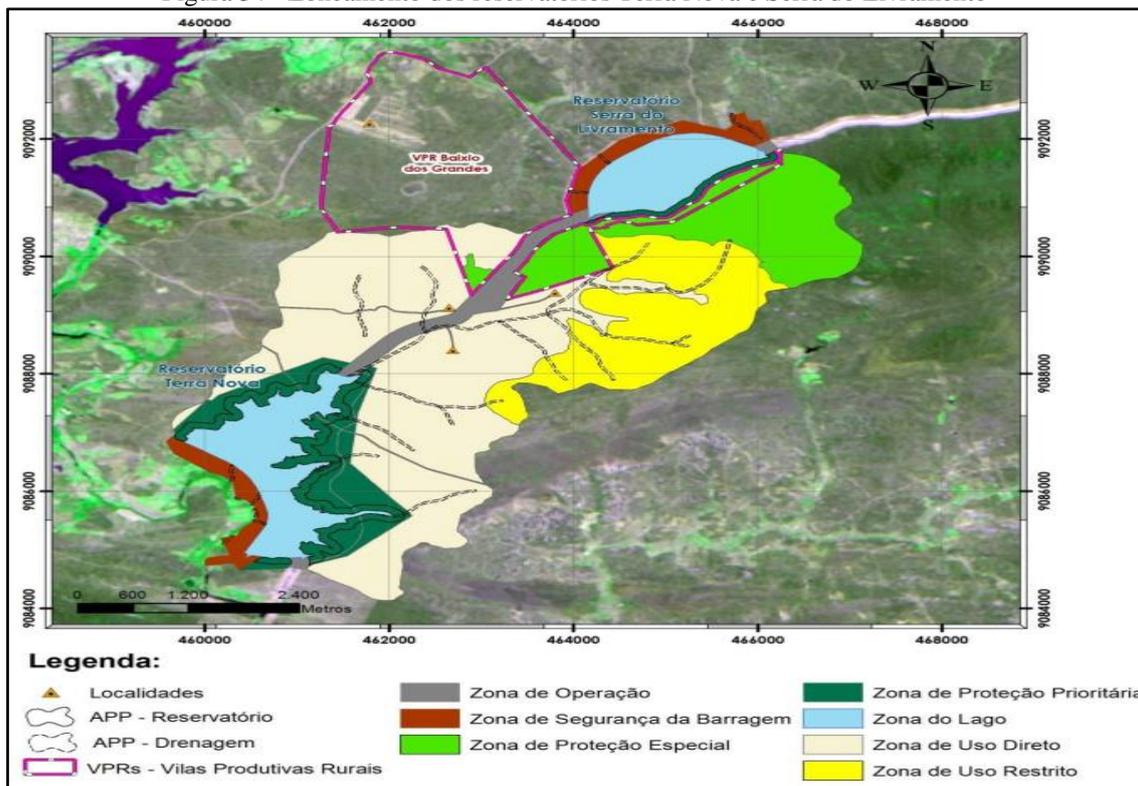
A elaboração dos mapas temáticos foi realizada de acordo com as informações necessárias para fins de zoneamento, contidas no resultado do diagnóstico socioambiental dos reservatórios. Os mapas temáticos elaborados foram:

- Mapa de restrição de uso da terra;
- mapa de unidades fitofisionômicas;
- mapa contendo identificação de Áreas de Preservação Permanente;
- mapa contendo faixa de áreas desapropriadas;
- mapa temático de socioeconomia;
- mapa contendo a área de contribuição do talvegue aportante ao reservatório.

O zoneamento foi realizado a partir do cruzamento dos mapas temáticos de restrição ao uso da terra e unidade fitofisionômicas, gerando ao final um total de 07 Unidades Ambientais Homogêneas (UAHs) definidas por zonas, são elas: Zona do Lago, Zona de segurança da Barragem, Zona de Proteção Prioritária, Zona de Proteção Especial, Zona de Operação, Zona de Uso Restrito e Zona de Uso Direto.

Estas UAHs foram avaliadas de acordo com a tendência ao uso, à conservação ou à recuperação e incluídas nas diferentes zonas de acordo com a tendência. O zoneamento preconiza as vocações e restrições de uso da paisagem do entorno dos reservatórios artificiais e suas respectivas normas e diretrizes de gestão. A Figura 34 e o Quadro 12 apresentam um panorama geral do zoneamento da área de entorno dos reservatórios Terra Nova e Serra do Livramento, com nome e descrição sucinta das zonas definidas, ordenadas do maior ao menor grau.

Figura 34 - Zoneamento dos reservatórios Terra Nova e Serra do Livramento



Fonte: MI (2016e).

Quadro 12 - Vocação, nome e descrição sucinta das zonas definidas para a área de entorno, ordenadas do maior ao menor grau de restrição

| VOCAÇÃO | ZONA | DESCRIÇÃO |
|-----------------------|-------------------------------|---|
| Proteção Ambiental | Zona do Lago | Trata-se da área relativa ao limite do nível máximo de água do reservatório. Zona de máxima proteção para garantir a qualidade das águas. |
| | Zona de Segurança da Barragem | Áreas localizadas a jusante das barragens e próximas ao canal, englobando o vertedouro, bacia de dissipação, descarregador de fundo e canal de restituição. |
| | Zona de Proteção Prioritária | Áreas circundantes ao reservatório que foram desapropriadas e apresentam maior potencialidade de gestão voltada para conservação. |
| | Zona de Proteção Especial | Áreas particulares que apresentam alta restrição ao uso da terra, remanescentes florestais relevantes para formação de abrigos ou microcorredores ecológicos; áreas que apresentam maior aporte de sedimentos aos reservatórios; áreas legalmente protegidas. |
| Função Socioeconômica | Zona de Operação | Compreende a faixa de servidão do canal que se encontra dentro da área de entorno e as estradas vicinais existentes. |
| | Zona de Uso Restrito | Áreas importantes para a sustentabilidade de populações locais, com facilidade de acesso e que apresentam potencial para adensamento populacional, porém com restrições ao uso do solo e/ou maior vulnerabilidade ambiental. |
| | Zona de Uso Moderado | Áreas mais distantes ou menos relevantes para a conservação do reservatório que apresentam potencial para adensamento populacional, porém que apresentam algum tipo de restrição ao uso do solo e/ou vulnerabilidade ambiental. |
| | Zona de Uso Direto | Áreas mais distantes ou menos relevantes para a conservação o reservatório que apresentam potencial para adensamento populacional e não apresentam restrições ao uso do solo ou vulnerabilidade ambiental. |

Fonte: MI (2016f).

O zoneamento foi apresentado neste estudo para os reservatórios Terra Nova e Serra do Livramento como forma demonstrativa para visualização das zonas e a caracterização de cada uma delas. Mas, o zoneamento foi aplicado em todos os reservatórios que integram os eixos da transposição.

Para cada zona foram definidas Normas de Gestão e Recomendações para todos os reservatórios projetados do PISF. A critério exemplificativo, descreveremos apenas as definições para a Zona do Lago dos reservatórios Terra Nova e Serra do Livramento.

Normas de Gestão:

- Qualquer atividade realizada nesta Zona deverá ser previamente autorizada pela operadora do sistema (PISF) e órgãos competentes;

- É permitida a captação de água destinada ao abastecimento de pequenos núcleos populacionais rurais conforme análise prévia da operadora e órgãos competentes;
- É permitida a realização de atividades relativas à operação e manutenção do reservatório;
- É permitido o monitoramento da qualidade da água e a realização de pesquisas científicas;
- A utilização do reservatório para navegação ou para a realização de atividades de lazer como esportes náuticos, pesca ou banho é restrita a situações previamente autorizadas pela operadora;
- Não é permitida a instalação de tanques-rede e/ou quaisquer outras atividades de piscicultura comercial;
- Não é permitido o lançamento de efluentes;
- Não é permitida a introdução de espécies exóticas.

Recomendações:

- Monitoramento contínuo do nível da água do reservatório;
- Monitoramento da qualidade da água e das descargas sólidas e de fundo dos reservatórios, em consonância com o Programa de Monitoramento da Qualidade da Água e Limnologia, item 22 do PBA do PISF;
- Fomento ao enquadramento das águas dos reservatórios pelo Comitê de Bacia responsável, quando existente.

4.5.5 Programas Ambientais dos reservatórios

Os vários estudos realizados no contexto do PISF apontaram que o entorno dos reservatórios ou já estão ocupados por populações humanas ou atrairão novos contingentes indicando a necessidade do desenvolvimento de ações que compatibilizem o uso com a conservação desses mananciais de água.

Os programas aqui expostos foram definidos especificamente para cada reservatório ao qual aborda o PACUERA, pois estes foram elaborados por sub-bacia. Ao todo, são 05 programas existentes para todos os reservatórios do Eixo Norte, incluso nos documentos para o referido eixo. Cada sub-bacia aborda um total de 04 programas que não necessariamente são os mesmos. Os programas foram constituídos de estratégias/ações, projetos ou subprogramas, que objetivam garantir a qualidade de água

e vida útil dos reservatórios. A Tabela 17 apresenta os programas ambientais existentes para cada sub-bacia do estudo.

Tabela 17 - Programas Ambientais presentes nos PACUERAs para cada sub-bacia do PISF

| PROGRAMA | SUB-BACIA |
|---|-------------------------------|
| Educação Ambiental de Comunicação Social | GI 5 Terra Nova Salgado |
| Recuperação Ambiental | |
| Monitoramento Ambiental | |
| Conservação do Solo e da Água | Terra Nova Salgado |
| Redução de Aporte de Sedimentos ao Reservatório | GI 5 |

Fonte: MI (2016d, 2016e, 2016f).

Esses programas elaborados pelos PACUERAs foram compatibilizados com os diversos Programas Ambientais constantes nos PBAs do PISF. Dentre os Programas que apresentam interação de informações e atividades com os Planos Ambientais dos PACUERAs, se destacam os apresentados a seguir:

- PBA 03: Programa de Comunicação Social;
- PBA 04: Programa de Educação Ambiental;
- PBA 09: Programa de Recuperação de Áreas Degradadas;
- PBA 20: Programa de Monitoramento de vetores e Hospedeiros de Doenças;
- PBA 22: Programa de Monitoramento de Qualidade de Água e Limnologia;
- PBA 23: Programa de Conservação da Fauna e da Flora.

A seguir são descritos dois dos programas ambientais elaborados para o entorno dos reservatórios por meio dos PACUERAS em análise.

4.5.10.1 Programa de Educação Ambiental e Comunicação Social

Considerando que existem limitações quanto ao uso do solo no entorno dos reservatórios, e que essas limitações podem gerar conflitos sociais, em função dos vários perfis e interesses existentes, principalmente das populações mais próximas dos mananciais, o referido programa busca o uso de uma abordagem dialógica que fortalece o papel do protagonismo político cidadão.

O objetivo geral do programa é promover a apropriação do PACUERA pelos diferentes atores sociais locais, considerando a dinâmica social local no desenvolvimento de ações formativas em Educação Ambiental formal e não formal.

Os objetivos específicos; são:

- Elaborar material informativo sobre os Planos de Conservação e Uso do Entorno dos Reservatórios Artificiais Terra Nova, Serra do Livramento, Mangueira, Negreiros e Milagres;
- Promover eventos para divulgação dos Planos;
- Realizar oficinas em localidades/comunidades do entorno dos reservatórios visando à construção de Planos de Ação Comunitários, concretizando as interfaces com outros Programas Ambientais e seus requeridos públicos-alvo.

O público-alvo do programa é composto por moradores locais, abrangendo as comunidades tradicionais, comunidades escolares locais das redes estaduais e municipais de Educação e organizações sociais. Também deverão ser envolvidos pelo Programa os gestores públicos locais e organizações governamentais e/ou não governamentais, em especial aquelas voltadas à assistência técnica e extensão rural.

A metodologia adotada é baseada na produção de materiais informativos, realização de oficinas participativas e reuniões, a serem aplicados em linguagem adequada ao público-alvo e distribuídos gratuitamente. Sendo priorizados nessas atividades, temas referentes à necessidade de manutenção da vegetação no entorno do reservatório, bem como da adoção de medidas de controle da poluição gerada pela presença humana e animal no entorno e no próprio reservatório, de modo a garantir a qualidade das águas. Abordando-se também a questão do zoneamento dos reservatórios, principalmente no que se refere às restrições de cada Zona.

4.5.10.1 Programa de Recuperação Ambiental

A escolha do método de recuperação deverá ser realizada considerando as condições atuais da área degradada e seu histórico de uso e degradação. Um fator primordial no processo de recuperação está relacionado às condições do solo na área a ser recuperada.

O objetivo geral do programa é promover a recuperação do entorno dos reservatórios por meio da reposição da paisagem original tanto quanto possível, considerando as características do Bioma Caatinga.

Os objetivos específicos, são:

- Contribuir para o controle da erosão e assoreamento;
- Contribuir para a melhoria do microclima e a regularização hidrológica da microbacia;
- Contribuir para a proteção dos recursos hídricos;

- Contribuir para o controle de processos erosivos;
- Induzir a atração da fauna silvestre e contribuir para o repovoamento faunístico;
- Contribuir para o aumento da biodiversidade.

O público-alvo do programa é composto pela operadora do sistema, gestores públicos e população local.

O primeiro passo para a recuperação de áreas degradadas é o reconhecimento e mapeamento das áreas para posterior caracterização dos locais degradados e determinar-se qual o tipo de recuperação mais apropriado para cada local.

Para o estudo considerou-se utilizar o método de recuperação baseado nas técnicas de nucleação, pois foi identificado que na área existe uma nucleação natural. Entre essas técnicas se destacam: transposição do solo, transposição da galhada e implantação de poleiros naturais/artificiais. Onde, associado ao plantio de mudas, as técnicas de nucleação podem ser uma boa alternativa para a recuperação ecológica grau de degradação. Posteriormente a determinação do grau de degradação da área, da Caatinga.

4.5.6 Avaliação da área de estudo em campo

Em novembro de 2020 realizou-se uma visita técnica na área de estudo com o intuito de conhecer os reservatórios da pesquisa e o entorno destes. No momento, buscou-se observar o uso e ocupação do solo na área. A visita foi realizada com o acompanhamento do Coordenador Geral de Obras e Fiscalização do PISF, o Senhor Thiago José de Barros Portela.

Na ocasião foi possível visitar o ponto de captação do Eixo Norte no rio São Francisco que fica localizado no município de Cabrobó-PE (Figura 35). Visitou-se também uma estação de bombeamento (EBI-3) do eixo e alguns reservatórios (Terra Nova, Serra do Livramento, Negreiros) (Figuras 36 e 37). Embora sem análises para qualidade das águas no período do estudo, os reservatórios de Milagres, Jati e Atalho foram parte da visita durante o percurso, para acompanhamento do andamento das obras do eixo e já se encontravam com águas transpostas do rio São Francisco na ocasião.

Figura 35 - Captação do Eixo Norte no rio São Francisco



Fonte: A autora (2020).

Figura 36 - Reservatórios Terra Nova e Negreiros



Fonte: A autora (2020).

Figura 37 - Estação de Bombeamento EBI-3 do Eixo Norte



Fonte: A autora (2020).

O percurso foi realizado pelo trajeto de obras no sentido paralelo ao eixo e bem próximo a ele, sendo possível acompanhar boa parte da estrutura projetada entre alguns reservatórios. Os canais presentes no acompanhamento do curso já levavam águas para os reservatórios posteriores. Na ocasião, não foi possível verificar o local aproximado dos pontos de coletas para verificação da qualidade das águas dos reservatórios, pois a equipe responsável não se encontrava nas proximidades do Eixo Norte.

Quanto à observação do uso e ocupação do solo no entorno, não foi avistada nenhuma comunidade no percurso realizado, nem interferências antrópicas nos mananciais visitados, embora os relatórios de coleta apontassem animais de pastagem nas margens de vários reservatórios e algum tipo de ocupação humana no local. A maior parte do entorno encontrava-se com vegetação. As áreas sem vegetação durante o trajeto, em sua maioria, faziam parte dos canteiros e áreas para execução das obras do PISF.

Mais recentemente em fevereiro de 2022, uma equipe do Grupo de Gestão Ambiental – GGA foi a campo novamente para fazer novos registros da área do PISF. Nesta ocasião, foram realizados registros aéreos com drones em alguns reservatórios estudados na pesquisa, bem como em alguns trechos dos canais do Eixo Norte. A Figura 38 apresenta o início da captação com um trecho inicial dos canais do PISF. Na Figura 39 é possível observar a chegada das águas na primeira estação de bombeamento (EBI-1) do Eixo Norte e um trecho posterior a ela.

Figura 38 - Captação e início dos canais do Eixo Norte do PISF



Fonte: A autora (2022).

Figura 39 - Primeira Estação de Bombeamento (EBI-1) do Eixo Norte

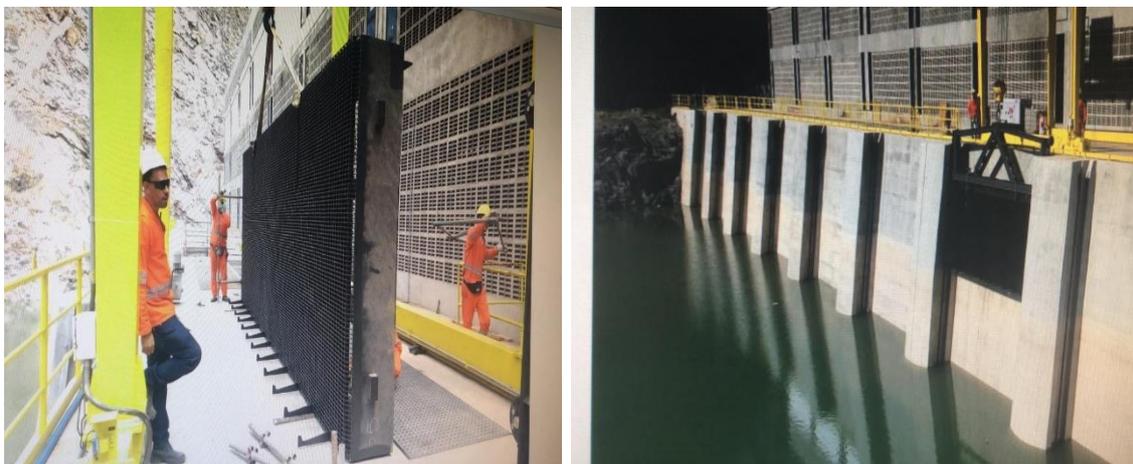


Fonte: A autora (2022).

A EBI-1 encontra-se localizada a 2 km da captação do Eixo Norte. O entorno dos canais apresenta-se a partir das imagens com a vegetação consideravelmente preservada. É possível observar a presença de macrófitas nesse trecho inicial, bem como uma aglomeração delas próximo da EBI-1, ficando retida antes da estação, onde é possível observar que posterior a ela as águas seguem sem presença de macrófitas.

De acordo com o senhor Tiago Portela, a presença dessas macrófitas nesse trecho inicial vem sendo monitorada por uma equipe da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF). A retenção antes da estação se dá pela utilização de uma contenção de biota (grades com malha de 2,5 cm), onde nela fica retida a vegetação que segue pelo leito, bem como peixes de tamanho superior ao da malha (Figura 40). As macrófitas retidas são recolhidas periodicamente com a utilização de barcos.

Figura 40 - Contenção utilizada para retenção de biota que se aproxima da EBI-1



Fonte: Imagens cedidas por Tiago Portela (2022).

A Figura 41 a seguir, mostra a chegada das águas no reservatório Tucutu e uma visão de maior área deste.

Figura 41 - Reservatório Tucutu



Fonte: A autora (2022).

É possível observar a partir das imagens a presença de pessoas no reservatório, mas não é possível identificar se estavam utilizando o manancial para lazer ou alguma atividade de pesca. Com relação à vegetação do entorno do reservatório, identifica-se que está consideravelmente preservada.

As Figuras 42, 43 e 44 a seguir, mostram os reservatórios Serra do Livramento, Mangueira e Negreiros, respectivamente, com uma visão de maior área para visualização dos seus entornos. A partir das imagens não se visualiza nenhuma comunidade próxima a eles e a vegetação do entorno apresenta-se consideravelmente preservada.

Figura 42 - Reservatório Serra do Livramento



Fonte: A autora (2022).

Figura 43 - Reservatório Mangueira



Fonte: A autora (2022).

Figura 44 - Reservatório Negreiros



Fonte: A autora (2022).

O Senhor Tiago Portela destacou que o Eixo Norte se encontra em operação, mas que a responsabilidade até o momento está sendo do Governo Federal. Ou seja, os custos para manter o sistema ainda não foram repassados aos estados que estão sendo beneficiados pelas águas do PISF. Ele cita que a Licença de Operação (LO) do eixo foi requerida a tempo e que embora a Licença de Instalação esteja vencida, mantém-se válida até um posicionamento do IBAMA com relação à solicitação da LO.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta seção serão apresentadas as conclusões obtidas quanto à qualidade da água ao longo do Eixo Norte do PISF obtidas após a análise e discussão dos resultados da pesquisa. Também são recomendadas ações para gestão do Eixo Norte do PISF e para seguimento de trabalhos futuros na área.

5.1 CONCLUSÕES

A maior finalidade do PISF é de garantir o fornecimento de água com qualidade a uma região que sofre com escassez hídrica. O monitoramento para verificar a qualidade da água torna-se imprescindível para alcançar a eficácia do projeto.

Através da análise dos parâmetros físico-químicos foi possível verificar que as águas dos reservatórios projetados possuem qualidade superior as dos reservatórios existentes no estudo (Nilo Coelho e Atalho). Cabe destacar que o reservatório Atalho faz parte do trecho principal do Eixo Norte, mas não chegou a receber águas da transposição nas campanhas do estudo, não sendo possível verificar uma possível mudança na qualidade da água deste com a chegada das águas do PISF.

Os parâmetros DBO e Fósforo Total apresentaram-se em sua maioria fora dos limites recomendados pela Resolução CONAMA 357/2005 para águas doces Classe 2. Os parâmetros Nitrogênio Total e Coliformes Termotolerantes embora a maioria esteja dentro do estabelecido pela Resolução, também apresentaram uma quantidade significativa de dados fora dos limites estabelecidos anteriormente citado, principalmente nos reservatórios existentes.

Os resultados de IQA classificaram as águas do ponto de captação, bem como dos reservatórios projetados no Eixo Norte na classe Boa, chegando à Ótima na maioria dos pontos na última campanha estudada, também se apresentou como Regular em dois pontos, na captação na campanha 20 e no reservatório Terra Nova na campanha 23. Quanto ao reservatório Nilo Coelho na Bacia do rio Terra nova, o IQA apresentou-se predominantemente com classe Regular no ponto do reservatório, e predominantemente Ruim no ponto à sua jusante, observando que nas duas últimas campanhas analisadas houve melhora na qualidade das águas, com classes Boa e Regular, reservatório e jusante, respectivamente. O reservatório Atalho na Bacia do rio Jaguaribe, teve seu IQA predominantemente na classe Regular, com melhora nas últimas campanhas analisadas para classe Boa.

Em relação ao IET, nos reservatórios projetados foi observada a maioria de ocorrências na classe Mesotrófico. Já no ponto de captação foi observado o grau de trofia entre eutrófico e Hipereutrófico. A jusante do reservatório Nilo Coelho o IET apresentou-se como Hipereutrófico em todas as campanhas do estudo, e o ponto analisado no reservatório esteve predominantemente entre Supereutrófico e Hipereutrófico, indicando possíveis cargas de contaminação na água deste reservatório. O reservatório Atalho teve o seu grau de trofia variando entre todas as classes existentes de IET, mostrando a grande tendência de contaminação do seu leito.

A Análise de Componentes Principais evidenciou que quatro componentes principais (CPs) explicam mais de 70% da variabilidade total. A composição da qualidade das águas do Eixo Norte teve alta participação de variáveis de física, química e biológica, como DBO, Turbidez, Nitrogênio Total, Sólidos Totais, Fósforo e Coliformes Termotolerantes. Justifica-se a importância de quase todos os parâmetros do estudo na ACP, para o cálculo do IQA.

Os dendrogramas gerados através da Análise de Agrupamentos formaram três grupos de amostras semelhantes, porém, no primeiro caso, os reservatórios projetados, o ponto na calha principal do reservatório Nilo Coelho e o ponto de captação no reservatório Itaparica formaram um grande grupo. No caso do período seco, o ponto do reservatório Nilo Coelho se une ao segundo grupo com o reservatório de Atalho. Já o ponto a jusante do reservatório Nilo Coelho permanece em ambos os casos sozinho no terceiro grupo obtido, o que evidencia sua grande diferença de parâmetros obtidos em relação aos demais pontos.

No levantamento realizado quanto aos usos do solo nos reservatórios, constatou-se que as populações locais têm expectativas de acesso à água dos reservatórios e/ou do canal para abastecimento humano e animal, bem como para atividades de irrigação, mesmo havendo limitação de uso inclusive das terras marginais ao Projeto, onde várias comunidades relativamente próximas dos reservatórios não têm infraestrutura de rede de abastecimento de água previsto pelo PISF. Essa limitação de uso pode não estar livre de gerar conflitos sociais, em função dos vários perfis e interesses verificados, principalmente das populações que estão em maior proximidade da água.

5.2 RECOMENDAÇÕES

A partir das conclusões encontradas nesta pesquisa, são propostas recomendações para os órgãos envolvidos com a gestão do Eixo Norte do PISF e os reservatórios existentes abordados.

As informações sobre a dinâmica da qualidade da água no Eixo Norte ainda são limitadas devido à recém pré-operação do projeto. Espera-se que as águas do São Francisco melhorem a qualidade dos parâmetros observados nas bacias receptoras, porém vários fatores devem ser levados em consideração nesta questão.

Um problema bem agravante no Semiárido é a deficiência no saneamento básico da região, principalmente com relação ao tratamento de esgotos, que é quase inexistente na maior parte, que por vezes acabam sendo despejados de forma direta nos cursos de águas. Outro fato que deve ser considerado é a poluição difusa gerada pela agricultura. Esses fatores têm potencial de prejudicar de forma relevante o funcionamento do PISF como provedor de água para abastecimento humano, um projeto de alto custo e valor, que não pode ser negligenciado.

Dessa forma, precisam ser examinadas estratégias para controle do aporte de nutrientes nos corpos hídricos envolvidos no projeto, com o tratamento e o reuso dos efluentes vindos das áreas urbanas, bem como da carga proveniente do uso de agrotóxicos nos perímetros irrigados estabelecidos na região. Esta verificação deve incluir minimamente as condições da APP, a implementação das propostas dos PACUERAs e a identificação das atividades potencialmente poluidoras nas áreas de influência dos reservatórios.

Ao MDR, como responsável pelo PISF, além de manter o monitoramento da qualidade da água, em acordo com as exigências do licenciamento ambiental do projeto, ampliar a frequência em pontos que demonstrem condições desfavoráveis e ameaçadoras ao uso da água para abastecimento humano.

Recomenda-se também o fortalecimento da parceria entre as instituições que realizam o controle ambiental nos diversos níveis (ANA, Secretarias Estaduais e Municipais de Meio Ambiente e Recursos Hídricos), no sentido de garantir acompanhamento, regularização e fiscalização mais eficazes nas citadas atividades que causam impactos na qualidade da água.

À comunidade científica, é recomendada a elaboração de estudos complementares nos próximos anos abordando todo o Eixo Norte que já se encontra com as obras

finalizadas, a fim de verificar se com o passar do tempo a qualidade da água dos reservatórios irá conservar as características da água captada no rio São Francisco e se houve evolução na qualidade das águas nos reservatórios existentes, fiscalização das atividades realizadas no entorno do reservatório, aproximando a região de um cenário de segurança hídrica. É importante que seja realizado um estudo hidrológico, a fim de verificar se os períodos descritos como seco e chuvoso na pesquisa, de fato correspondem ao que foi descrito, fortalecendo a interferência que a variação do clima causa nas águas dos reservatórios e canais.

Com o presente estudo, espera-se contribuir no avanço das pesquisas acerca da qualidade da água do Eixo Norte do PISF, auxiliando a tomada de decisão e o planejamento de estratégias que viabilizem o uso sustentável dos recursos hídricos na região. Esse empreendimento de alta complexidade necessita da participação dos diversos atores na sua gestão, cada um com seu papel fundamental no sucesso dos esforços praticados.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, D. F de S.. *Avaliação da qualidade hídrica pelo índice de Qualidade de Água (IQA) e seus indicadores segmentados: um estudo de caso do rio Piranga nos trechos urbanos da cidade de Ponte Nova (MG)*. 114p. 2016. Monografia – Curso de Geografia da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2016.
- AIT-KADI, M. Water for Development and Development for Water: Realizing the Sustainable Development Goals (SDGs) Vision. *Aquatic Procedia*, v. 6, p. 106–110, 2016.
- ALMEIDA, D. N. O., OLIVEIRA, L. M. M., SILVA, C. B., BEZERRA, U. A., FARIAS, M.O., CANDEIAS, A.L.B. *Análise das Bacias Hidrográficas do Rio Brígida, Rio Terra Nova e Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores 9 (Gi9) de Pernambuco Usando Índices de Ve-getação e de Umidade*. In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia. Anais... Rio de Janeiro – RJ: INPE, 06 a 09 de novembro de 2017.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Conjuntura Recursos Hídricos no Brasil 2017: relatório pleno*. p. 169, 2017.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual*. p. 72, 2018.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual*. p. 100, 2019.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual*. p. 77, 2020.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021/Gestão da água*. Disponível em: <<https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/gestao-da-agua>>. Acesso em: 11 abr. 2022.
- AZEVEDO, L. G. T. DE et al. *Série Água Brasil: Transferência de água entre bacias hidrográficas*. 1a Edição ed. Brasília: Banco Mundial, 2005.
- BARRETO, L. V.; ROCHA, F. A.; OLIVEIRA, M. S. C. Monitoramento da qualidade da água na microbacia Hidrográfica do rio catolé, em Itapetinga - BA. *Centro Científico Conhecer – Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v.5, n.8, p.1-9, 2009.
- BARROS, R. V. G.; SOUZA, H. M. de L.; SOUZA, C. A. Determinação do índice de qualidade da água (IQA) na sub-bacia do Córrego André em Mirassol D'Oeste, Mato Grosso. *Revista Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal, v.8, n.3, p.138 -153, 2011.
- BRASIL. Decreto No 24.643, de 10 de julho de 1934. *Decreta o Código de Águas*. Rio de janeiro, 1934 a.

BRASIL. Decreto No 23.793, de 23 de janeiro de 1934. *Decreta o Código Florestal*. Rio de Janeiro, 1934 b.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Brasília, 1988.

BRASIL. Lei no 9.433, de 08 de janeiro de 1997. *Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei no 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989*. Brasília, 09 jan. 1997.

BRASIL. Resolução CONAMA no 302, de 20 de março de 2002. *Dispõe sobre os parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente de reservatórios artificiais e o regime de uso do entorno*. Brasília, 13 de maio 2002. n. 90, p. 67-68.

BRASIL. Resolução no 411, de 22 de setembro de 2005. *Dispõe sobre a outorga do Direito de Uso de Recursos Hídricos do Rio São Francisco*. Brasília, 23 set. 2005.

BRASIL. Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012. *Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa*. *Diário Oficial da União*. Brasília, 28 maio 2012.

BRASIL. *Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/cnrh/cnrh/sistema-nacional-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

BRASIL. *Inaugurada a última etapa da obra física do Eixo Norte do Projeto de Integração do Rio São Francisco*. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2021/10/inaugurada-a-ultima-etapa-da-obra-fisica-do-eixo-norte-do-projeto-de-integracao-do-rio-sao-francisco>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

BRASIL. *Novo Plano Nacional de Recursos Hídricos para 2022-2040 é aprovado*. Disponível em: <<https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/novo-plano-nacional-de-recursos-hidricos-para-2022-2040-e-aprovado>>. Acesso em: 11 abr. 2022.

CABRAL, J. B. P.; ROCHA I. R. da; NOGUEIRA, P. F.; BECEGATO, V. A.. Avaliação sazonal e monitoramento das águas do rio Doce - GO. *Geoambiente - Revista Eletrônica do Curso de Geografia - UFG/REJ*, Jataí, n.24, p.115-133, 2015.

CALADO, T. de O.. *Análise da relação do uso do solo com a qualidade da água do açude Epitácio Pessoa no Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco*. 147p. 2020. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em desenvolvimento e meio ambiente – PRODEMA, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2020.

CALDAS, H. F. M.. *Análise da evolução espaço-temporal da qualidade da água no eixo leste do projeto de integração do rio São Francisco*. 2021. 134p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGEC, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2021.

CARVALHO, A. P.; MORAES NETO, J. M.; LIMA, V. L. A.; SOUSA, R. F.; SILVA, D. G. K. C. Aspectos qualitativos da água do açude de Bodocongó em Campina Grande - PB. *Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal, v.5, n.2, p.94-109, 2008.

CASTRO, César Nunes de. *Transposição do rio São Francisco: Análise de oportunidade do projeto*. Texto para discussão 1577/ Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. 60 p., 2011.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Apêndice D: Índices de Qualidade das Águas. In: CETESB. *Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo 2018*. São Paulo: CETESB, 2019. p. 1-32.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Apêndice E: Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. In: CETESB. *Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo 2018*. São Paulo: CETESB, 2019b. p. 1-58.

CIGAGNA, C. et al. Trophic state index (TSI) and physico-chemical characteristics of a shallow reservoir in southeast Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 2, p. 1–11, 2016.

CODEVASF - COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA. *O que é o Projeto de Integração do São Francisco*. Disponível em: <<https://www.codevasf.gov.br/linhas-de-negocio/projeto-sao-francisco/o-que-e-o-projeto-de-integracao-do-sao-francisco>>. Acesso em: 12 abr. 2022.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*. Brasília, 18 mar. 2005. n. 053, p. 58-63.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. DO C.; LAMPARELLI, M. C. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tr}). *Ecological Engineering*, v. 60, p. 126–134, 2013.

DE LIRA AZEVÊDO, E. et al. How do people gain access to water resources in the Brazilian semiarid (Caatinga) in times of climate change? *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 189, n. 8, 2017.

ESTEVEZ, F. A. *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 3ª edição, 826 p., 2011.

FERREIRA, J. G. et al. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 93, n. 2, p. 117–131, 2011.

FERREIRA, A. L. N. *Análise integrada da qualidade de água dos corpos hídricos do projeto de integração do Rio São Francisco no nordeste do Brasil*. 2016. 148 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, CTG, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.

FERREIRA, J. G. A transposição das águas do Rio São Francisco na resposta à seca do Nordeste brasileiro. Cronologia da transformação da ideia em obra. *Campos Neutrais – Revista Latino-Americana de Relações Internacionais*, v. 1, n. 2, p. 53–72, 2019.

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 Re-servatórios à eutrofização. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 12, n. 4, p. 399-409, 2007.

FORNARELLI, R. et al. An empirical modeling approach to predict and understand phytoplankton dynamics in a reservoir affected by interbasin water transfers. *Water Resources Research*, v. 49, n. 6, p. 3626–3641, 2013.

FORNARELLI, R.; ANTENUCCI, J. P. The impact of transfers on water quality and the disturbance regime in a reservoir. *Water Research*, v. 45, n. 18, p. 5873–5885, 2011.

FORNARELLI, R.; ANTENUCCI, J. P.; MARTI, C. L. Disturbance, diversity and phytoplankton production in a reservoir affected by inter-basin water transfers. *Hydrobiologia*, v. 705, n. 1, p. 9–26, 2013.

FREIRE, F. G. C. et al. Indicadores de qualidade da água no Rio Jaguaribe em São João do Jaguaribe-CE, Brasil. *Brazilian Journal of Irrigation and Drainage*. V. 18, n. 4, p. 700-707, 2013.

FONSECA NETO, G. C. do; SILVA, S. R. da; SILVA JUNIOR, M. A. B. da; CABRAL, J. J. da S. P.; SILVA, A. C. Abordagem hidro-social de reservatórios no semiárido Pernambucano: estudo de caso do reservatório Nilo Coelho no rio Terra Nova. In: XXIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2021, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte, 2021.

GARCIA, H. L.; SILVA, V. L.; MARQUES, L. P.; GARCIA, C. A. B.; ALVES, J. P. H.; SILVA, M. G.; CARVALHO, F. O. Nível trófico do reservatório de Jacarecica. I – Sergipe - Brasil. *Scientia Plena*, Sergipe, v. 8, n. 7, 2012.

GIRI, S.; QIU, Z. Understanding the relationship of land uses and water quality in Twenty First Century: A review. *Journal of Environmental Management*, v. 173, p. 41–48, 2016.

GIRI, S. Water quality prospective in Twenty First Century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: A review. *Environmental Pollution*, v. 271, p. 116332, 2021.

GUIDOTTI, V. et al. Changes in Brazil's Forest Code can erode the potential of riparian buffers to supply watershed services. *Land Use Policy*, v. 94, n. July 2018, p. 104511, 2020.

GOMES, M. C. R.; ANJOS, J. A. S. A.; DALTRO, R. R.. Multivariate statistical analysis applied to the evaluation of groundwater quality in the central-southern portion of the state of Bahia - Brazil. *Revista ambiente e água*, v. 15, n. 1, e2408 – Taubaté, 2020.

GOTELLI, N.J.; ELLISON, A.M. Princípios de estatística em ecologia. Porto Alegre: Artmed, 2011. 528p.

GUPTA, J.; VAN DER ZAAG, P. Interbasin water transfers and integrated water resources management: Where engineering, science and politics interlock. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 33, n. 1–2, p. 28–40, 2008.

HAIR, J. J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. Análise multivariada de dados. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 687 p.

HAN, J. et al. Source contribution analysis of nutrient pollution in a P-rich watershed: Implications for integrated water quality management. *Environmental Pollution*, v. 279, 2021.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. *Portaria nº 715, de 20 de setembro de 1989*. Enquadra os cursos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, na classificação estabelecida pela RESOLUÇÃO CONAMA nº 20/1986. Brasília, 1989.

JOLLIFFE, I.T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. I: Artificial *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, Vol. 21, No. 2 p. 160-173, 1972.

JOLLIFFE, I.T. Discarding Variables in a Principal Component Analysis. II: Real Data. *Journal of the Royal Statistical Society*, v. 22, n. 1, p. 21–31, 1973.

LATTIN, James; CARROLL, J. Douglas; GREEN, Paul E. Análise de dados multivariados. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 455 p.

LE MOAL, M. et al. Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of the Total Environment*, v. 651, p. 1–11, 2019.

LI, Y. et al. The role of freshwater eutrophication in greenhouse gas emissions: A review. *Science of the Total Environment*, v. 768, 2021.

LIMA, W. S.; GARCIA C. A. B. Qualidade da água em Ribeirópolis - SE: O Açude do Cajueiro e a Barragem do João Ferreira. *Scientia Plena*, Sergipe, v.4, n. 12, 2008.

LIMA, R. S.; ALVES, J. P. H.. Avaliação da qualidade da água dos reservatórios localizados nas bacias hidrográficas dos rios Piauí – Real, utilizando o índice de qualidade da água (IQA). *Scientia Plena*, Sergipe, v. 3, n. 10, p.1-10, set. 2017.

LOPES, H.; SOBRAL, M. C.; GUNKEL, G.; CANDEIAS, A. L.; MELO, G. Comportamento espacial da clorofila-a no reservatório de Itaparica, rio São Francisco. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro, v. 20, n. 3, p. 475-484, 2015.

MDR – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. *Projeto de Integração do Rio São Francisco. Ministério da Integração Nacional*. 2016. Disponível em: <http://www.mi.gov.br/web/projeto-sao-francisco/entenda-os-detalhes>. Acesso em: 19 jun. 2021.

MDR – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL, 2019. *Projeto São Francisco*. Disponível em: < <https://www.gov.br/mdr/pt-br/noticias/integracao-nacional-aciona-segunda-estacao-elevatoria-do-eixo-norte-do-pisf> >. Acesso em: 13 ago. 2020.

MDR – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. *Sumário Executivo - Projeto de Integração do Rio São Francisco*. Brasília: MDR, 23 p, 2019.

MDR – MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. *Sumário Executivo - Projeto de Integração do Rio São Francisco*. Brasília: MDR, 23 p, 2020.

MELLO, K. DE et al. Multiscale land use impacts on water quality: Assessment, planning, and future perspectives in Brazil. *Journal of Environmental Management*, v. 270, n. March, p. 110879, 2020.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *RIMA - Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional*. Brasília: MIN, 2004, 136p.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Diagnóstico socioambiental: Sub-Bacia GI5 Reservatório Tucutu*. Brasília: MIN, 255 p., 2016a.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Diagnóstico socioambiental: Sub-Bacia Terra Nova Reservatórios Terra Nova, Serra do Livramento, Mangueira, Negreiros, Milagres*. Brasília: MIN, 475 p., 2016b.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Diagnóstico socioambiental: Sub-Bacia do Rio Salgado Reservatórios Jati, Atalho, Porcos, Cana Brava, Cipó, Boi*. Brasília: MIN, 297 p., 2016c.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Zoneamento ambiental: Sub-Bacia GI5 Reservatório Tucutu*. Brasília: MIN, 255 p., 2016d.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Zoneamento ambiental: Sub-Bacia Terra Nova Reservatórios Terra Nova, Serra do Livramento, Mangueira, Negreiros, Milagres*. Brasília: MIN, 475 p., 2016e.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Zoneamento ambiental: Sub-Bacia do Rio Salgado Reservatórios Jati, Atalho, Porcos, Cana Brava, Cipó, Boi*. Brasília: MIN, 297 p., 2016f.

MI - MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. *Sumário Executivo - Projeto de Integração do Rio São Francisco*. Brasília: MI, 28p, 2018.

MOSLEY, L. M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Reviews*, v. 140, p. 203–214, 2015.

- MOTTEW, M. et al. Comparing the effects of climate and land use on surface water quality using future watershed scenarios. *Science of the Total Environment*, v. 693, p. 133484, 2019.
- MS - MINISTÉRIO DA SAÚDE. *Portaria de consolidação de nº 5 de 28 de setembro de 2017*. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Ministério da Saúde, 2017.
- NACAR, S., METE, B. & BAYRAM, A. Estimation of daily dissolved oxygen concentration for river water quality using conventional regression analysis, multivariate adaptive regression splines, and TreeNet techniques. *Environ Monit Assess*, v. 192, p. 1-21, 2020.
- NONG, X. et al. Evaluation of water quality in the South-to-North Water Diversion Project of China using the water quality index (WQI) method. *Water Research*, v. 178, p. 115781, 2020.
- OFFICE OF THE SOUTH-TO-NORTH WATER DIVERSION PROJECT CONSTRUCTION COMMITTEE, P. The South-to-North Water Diversion Project. *Engineering*, v. 2, p. 265–267, 2016.
- OLIVEIRA, L. C.; GOMES, B. M.; BAUMGARTNER, G.; SEBASTIEN, N. Y. Variação espacial e temporal dos fatores limnológicos em riachos da microbacia do Rio São Francisco Verdadeiro. *Engenharia Agrícola*, v. 28, n. 4, p. 770-781, 2008.
- OLIVEIRA, C. N.; CAMPOS, V. P.; MEDEIROS, Y. D. P. Avaliação e identificação de parâmetros importantes para a qualidade de corpos d'água no semiárido baiano. Estudo de caso: bacia hidrográfica do rio Salitre. *Química Nova*, São Paulo, v. 33, n. 5, p. 1059-1066, 2010.
- OLIVEIRA, C. R. *Modelagem espaço-temporal e análise de cenários do uso da água para irrigação no trecho submédio da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco*. 2019. 197 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. *Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil*. 2022. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 5 abr. 2022.
- PAK, H. Y. et al. Effects of land use configuration, seasonality and point source on water quality in a tropical watershed: A case study of the Johor River Basin. *Science of the Total Environment*, v. 780, p. 1–18, 2021.
- PALACIO, F. X.; APODACA, M. J.; CRISCI, J. V. (2020). Análisis multivariado para datos biológicos: teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R. 1ª ed. Fundación de Historia Natural Félix de Azara, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, 268p.

PERES, J. M.. *Avaliação da qualidade da água do rio São Francisco nos municípios de Petrolina-PE e Juazeiro-BA*. 108p. 2012. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

PORTAL FEDERATIVO. *Brasil cumpriu sete dos oito objetivos de desenvolvimento do milênio*. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/secretariadegoverno/pt-br/portalfederativo/arquivos-privados/noticias/internacionais/brasil-cumpriu-sete-dos-oito-objetivos-de-desenvolvimento-do-milenio>>. Acesso em: 5 abr. 2022.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2010. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 01 set. 2019.

ROSSITER, K. W. L. *Efeito da redução da vazão efluente do reservatório de Sobradinho na qualidade da água a jusante, sob o enfoque da vazão ecológica*. 2017. 145 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SANTIN, J. R.; GOELLNER, E. A Gestão dos Recursos Hídricos e a Cobrança pelo seu Uso. Sequência: *Estudos Jurídicos e Políticos*, v. 34, n. 67, p. 199–221, 2013.

SANTOS, I. V. *Avaliação da qualidade da água do açude Epitácio Pessoa em relação ao nível de água acumulado no período de 2016 e 2016*. 2017. 73 f. TCC - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2017.

SALES, J. W. de F.; STUDART, T. M. de C.; BECKER, H.; GOMES, R. B.; SOUSA FILHO, F. de A.; SOUSA, M. C. de B.. Indicadores de qualidade de água utilizando técnicas de análise multivariada. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15, 2009, Campo Grande - MS. *Anais...* Campo Grande, 2009.

SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; ALMEIDA, H. R. R. C. Variabilidade da qualidade de água na bacia hidrográfica do rio São Francisco e atividades antrópicas relacionadas. *Qualit@s Revista Eletrônica*, v. 9, n.3, 2010.

SILVA, M. B. R.; AZEVEDO, P. V.; ALVES, T. L. B. Análise da degradação ambiental no alto curso da bacia hidrográfica do Rio Paraíba. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 34, n. 1, p. 35-53, 2014.

SILVA, M. B. R.; AZEVEDO, P. V.; NETO, J. D.; ALVES, T. L. B.. Diagnóstico das condições microbiológicas da água do Alto Curso do Rio Paraíba. In: X Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas, 7, 2014, Poços de Caldas. *Anais...* Poços de Caldas: IF Sul de Minas Gerais, 2014.

SILVA, T. J. M. *Efeitos da descarga de fundo em reservatórios em cascata: qualidade da água e fitoplâncton do reservatório de Xingó/AL*. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

- SILVA, A. M. C.; CASÉ, M.; LOPES, D. V. Qualidade da água como reflexo de atividades antrópicas em bacias hidrográficas do Nordeste, Brasil. *Geosul*, Florianópolis, v. 34, n. 72, p. 102-123, mai./ago. 2019.
- SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: where do we go from here?. *Trends in ecology & evolution*, v. 24, n. 4, p. 201-207, 2009.
- SPERLING, M. VON. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Volume 1. Belo Horizonte: UFMG: [s.n.].
- SUDEMA - SUPERINTENDÊNCIA DE ADMINISTRAÇÃO DO MEIO AMBIENTE. *Diretriz nº 205, de 03 de março de 1988*. Enquadramento dos corpos d'água da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba. Paraíba, 1988.
- SWEENEY, B. W.; NEWBOLD, J. D. Streamside forest buffer width needed to protect stream water quality, habitat, and organisms: A literature review. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 50, n. 3, p. 560–584, 2014.
- TRINDADE, A. L. C.. *Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais da porção mineira da bacia do rio São Francisco*. 2013. 181p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. *Limnologia*. São Paulo: Oficina de Textos: [s.n.].
- UN - UNITED NATIONS. *The Sustainable Development Agenda*. 2022. Disponível em: <<https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>>. Acesso em: 5 abr. 2022.
- VINÇON-LEITE, B.; CASENAVE, C. Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. *Science of the Total Environment*, v. 651, p. 2985–3001, 2019.
- WADA, Y. et al. Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, v. 9, n. 1, p. 175–222, 2016.
- WESTSTRATE, J. et al. The Sustainable Development Goal on Water and Sanitation: Learning from the Millennium Development Goals. *Social Indicators Research*, v. 143, n. 2, p. 795–810, 2019.
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Millennium Development Goals (MDGs)*. 2018. Disponível em: <[https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/millennium-development-goals-\(mdgs\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/millennium-development-goals-(mdgs))>. Acesso em: 5 abr. 2022.
- WILSON, C.; WENG, Q. Assessing surface water quality and its relation with urban land cover changes in the Lake Calumet Area, Greater Chicago. *Environmental Management*, v. 45, n. 5, p. 1096–1111, 2010.

ZENG, Q.; QIN, L.; LI, X. The potential impact of an inter-basin water transfer project on nutrients (nitrogen and phosphorous) and chlorophyll a of the receiving water system. *Science of the Total Environment*, v. 536, p. 675–686, 2015.

ZHAO, Z. Y.; ZUO, J.; ZILLANTE, G. Transformation of water resource management: a case study of the South-to-North Water Diversion project. *Journal of Cleaner Production*, v. 163, p. 136–145, 2017.

ZHENG, Y.; HAN, F. Markov Chain Monte Carlo (MCMC) uncertainty analysis for watershed water quality modeling and management. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 30, n. 1, p. 293–308, 2016.

ZHUANG, W. Eco-environmental impact of inter-basin water transfer projects: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 23, n. 13, p. 12867–12879, 2016.

ANEXO A – DADOS DE QUALIDADE DA ÁGUA

Tabela A1 Resultados das análises de qualidade da água realizadas para as campanhas 16 a 25 do PISF

| Nº | Campanha | Bacia | Ponto | Período | OD | DBO | Temp | pH | Turb | PT | NT | SDT | SST | Cl-a | Coli |
|----|----------|---------------|-------|---------|-------|--------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| 1 | 16 | São Francisco | Q03 | Chuvoso | 8,67 | 13,10 | 25,78 | 7,58 | 19,20 | 0,950 | 0,60 | 141 | <LQ | <LQ | 240,00 |
| 2 | 16 | Terra Nova | Q06 | Chuvoso | 8,77 | 19,40 | 26,44 | 7,22 | 62,80 | 0,700 | 1,60 | 34,00 | 21,00 | <LQ | 110,00 |
| 3 | 16 | Terra Nova | Q07 | Chuvoso | 8,69 | 14,30 | 28,00 | 8,13 | 104,00 | 3,000 | 11,90 | 320,00 | 55,00 | <LQ | 17,00 |
| 4 | 16 | Jaguaribe | Q13 | Chuvoso | 8,31 | 61,20 | 30,60 | 9,19 | 73,60 | 1,060 | 2,80 | 301,00 | 19,00 | 148,50 | A |
| 5 | 18 | São Francisco | Q03 | Chuvoso | 8,61 | 6,00 | 26,23 | 6,60 | 25,00 | 0,220 | 0,90 | 73,00 | <LQ | <LQ | 90,00 |
| 6 | 18 | Terra Nova | Q06 | Chuvoso | 8,78 | 24,30 | 29,86 | 7,42 | 78,50 | 0,360 | 1,90 | 314,00 | 26,00 | <LQ | 900,00 |
| 7 | 18 | Terra Nova | Q07 | Chuvoso | 15,70 | 73,40 | 30,42 | 7,92 | 199,00 | 7,800 | 40,00 | 549,00 | 102,00 | <LQ | 1100,00 |
| 8 | 18 | Jaguaribe | Q13 | Chuvoso | 11,86 | 103,30 | 32,33 | 7,84 | 95,30 | 0,140 | 3,90 | 926,00 | 18,00 | <LQ | 920,00 |
| 9 | 19 | São Francisco | Q03 | Seco | 8,57 | 2,99 | 24,46 | 6,97 | 1,40 | 0,230 | 0,50 | 195,00 | <LQ | 13,00 | 33,00 |
| 10 | 19 | GI5 | Q04 | Seco | 9,75 | 4,70 | 26,25 | 6,92 | 2,79 | <LQ | 1,20 | 49,80 | <LQ | <LQ | 33,00 |
| 11 | 19 | Terra Nova | Q07 | Seco | 7,92 | 12,00 | 27,39 | 7,74 | 830,00 | 3,400 | 29,00 | 843,00 | 991,00 | 572,60 | 1600,00 |
| 12 | 19 | Jaguaribe | Q13 | Seco | 9,02 | 44,32 | 25,28 | 7,21 | 3,93 | 0,080 | 0,50 | 586,00 | <LQ | 33,04 | 70,00 |
| 13 | 20 | São Francisco | Q03 | Chuvoso | 9,82 | 31,40 | 27,59 | 6,92 | 22,90 | 0,720 | 0,93 | 71,00 | <LQ | <LQ | 29,00 |
| 14 | 20 | GI5 | Q04 | Chuvoso | 9,37 | 4,90 | 27,69 | 7,25 | 2,30 | 1,060 | 0,70 | 95,00 | 121,00 | 12,00 | 24,00 |
| 15 | 20 | Terra Nova | Q06 | Chuvoso | 7,57 | 20,40 | 28,06 | 7,21 | 55,00 | 0,950 | 1,30 | 152,00 | 674,00 | 7,90 | 1600,00 |
| 16 | 20 | Terra Nova | Q07 | Chuvoso | 10,10 | 106,40 | 27,48 | 6,99 | 51,60 | 2,270 | 9,50 | 220,00 | 294,00 | 40,10 | 1600,00 |
| 17 | 20 | Jaguaribe | Q13 | Chuvoso | 5,06 | 14,40 | 30,03 | 7,21 | 111,00 | <LQ | 1,20 | 617,00 | 11,00 | <LQ | 180,00 |
| 18 | 21 | São Francisco | Q03 | Seco | 9,68 | 14,40 | 27,63 | 8,53 | 1,89 | 0,193 | 0,900 | 62,00 | <LQ | <LQ | 41,00 |
| 19 | 21 | GI5 | Q04 | Seco | 9,99 | 20,60 | 26,39 | 7,68 | 0,62 | 0,149 | 3,259 | 44,00 | <LQ | <LQ | 14,00 |
| 20 | 21 | Terra Nova | Q05 | Seco | 8,99 | 3,50 | 28,24 | 8,13 | 2,34 | <LQ | 0,900 | 162,00 | 13,00 | <LQ | 120,00 |
| 21 | 21 | Terra Nova | Q06 | Seco | 7,42 | 18,00 | 29,31 | 8,14 | 493,00 | 0,352 | 3,600 | 259,00 | 280,00 | 64,20 | 1600,00 |
| 22 | 21 | Terra Nova | Q07 | Seco | 11,15 | 100,40 | 32,38 | 8,75 | 287,00 | 11,510 | 36,110 | 562,00 | 226,00 | 441,10 | 1600,00 |
| 23 | 22 | São Francisco | Q03 | Chuvoso | 8,12 | 2,40 | 26,73 | 6,93 | 17,40 | 0,159 | <LQ | 20,00 | <LQ | <LQ | 27,00 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|---------------|-----|---------|-------|--------|-------|------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---------|
| 24 | 22 | GI5 | Q04 | Chuvoso | 9,76 | 13,40 | 28,30 | 7,33 | 1,79 | <LQ | <LQ | 65,00 | 22,00 | <LQ | <LQ |
| 25 | 22 | Terra Nova | Q05 | Chuvoso | 9,52 | 19,37 | 30,29 | 9,52 | 4,69 | 0,115 | <LQ | 180,00 | <LQ | <LQ | <LQ |
| 26 | 22 | Terra Nova | Q06 | Chuvoso | 9,09 | 38,52 | 30,48 | 8,53 | 58,60 | 0,333 | 0,60 | 202,00 | 43,00 | 17,20 | 350,00 |
| 27 | 22 | Terra Nova | Q07 | Chuvoso | 8,77 | 43,39 | 30,13 | 7,56 | 134,00 | 2,042 | 7,60 | 248,00 | 84,00 | 518,80 | 1600,00 |
| 28 | 22 | Jaguaribe | Q13 | Chuvoso | 6,09 | 15,18 | 31,31 | 7,13 | 220,00 | 0,121 | 0,90 | 163,00 | 16,00 | 17,80 | 54,00 |
| 29 | 23 | São Francisco | Q03 | Seco | 8,59 | 3,40 | 24,06 | 8,90 | 10,30 | 0,220 | 0,90 | 37,00 | <LQ | ND | 17,00 |
| 30 | 23 | GI5 | Q04 | Seco | 9,29 | 4,00 | 24,43 | 8,08 | 6,90 | <LQ | 0,60 | 77,00 | <LQ | ND | <LQ |
| 31 | 23 | Terra Nova | Q05 | Seco | 8,30 | 10,50 | 23,76 | 8,42 | 375,00 | <LQ | 1,50 | 323,00 | 159,00 | <LQ | 540,00 |
| 32 | 23 | Terra Nova | Q07 | Seco | 3,56 | 126,50 | 22,79 | 8,28 | 636,00 | 13,420 | 43,80 | 602,00 | 275,00 | ND | 1600,00 |
| 33 | 23 | Jaguaribe | Q13 | Seco | 9,47 | 9,90 | 28,09 | 9,25 | 39,40 | 0,253 | 2,00 | 233,00 | <LQ | 52,40 | 14,00 |
| 34 | 24 | São Francisco | Q03 | Seco | 9,77 | A | 28,56 | 7,36 | 2,64 | A | A | 0,06 | A | A | A |
| 35 | 24 | GI5 | Q04 | Seco | 10,25 | A | 27,23 | 7,69 | 1,46 | A | A | 0,06 | A | A | A |
| 36 | 24 | Terra Nova | Q05 | Seco | 10,06 | <LQ | 29,31 | 8,24 | 12,00 | <LQ | 0,54 | 69,00 | <LQ | <LQ | 1600,00 |
| 37 | 24 | Terra Nova | Q06 | Seco | 17,12 | 18,50 | 30,43 | 9,00 | 13,00 | 0,120 | 2,17 | 115,00 | 23,00 | <LQ | 240,00 |
| 38 | 24 | Terra Nova | Q07 | Seco | 6,01 | 23,40 | 25,92 | 6,50 | 4,10 | 0,100 | 2,49 | 148,00 | 18,00 | <LQ | 1600,00 |
| 39 | 24 | Terra Nova | Q08 | Seco | 9,81 | 5,60 | 27,16 | 7,39 | 1,60 | <LQ | 0,69 | 42,00 | <LQ | <LQ | 110,00 |
| 40 | 24 | Terra Nova | Q09 | Seco | 9,51 | 14,80 | 27,33 | 7,48 | 3,62 | <LQ | 0,99 | 46,00 | <LQ | <LQ | 920,00 |
| 41 | 24 | Jaguaribe | Q13 | Seco | 11,11 | 5,70 | 31,08 | 8,73 | 9,16 | <LQ | 1,16 | 174,00 | <LQ | <LQ | 540,00 |
| 42 | 25 | São Francisco | Q03 | Chuvoso | 7,53 | <LQ | 27,54 | 7,69 | 7,59 | 0,104 | 0,700 | 31,00 | <LQ | <LQ | 17,00 |
| 43 | 25 | GI5 | Q04 | Chuvoso | 8,44 | 7,80 | 28,51 | 8,51 | 3,64 | <LQ | 0,976 | 50,00 | 13,00 | <LQ | <LQ |
| 44 | 25 | Terra Nova | Q05 | Chuvoso | 8,39 | 6,70 | 31,25 | 8,24 | 13,40 | <LQ | 0,520 | 69,00 | <LQ | <LQ | <LQ |
| 45 | 25 | Terra Nova | Q06 | Chuvoso | 7,80 | 7,70 | 29,87 | 8,53 | 9,66 | <LQ | 1,180 | 163,00 | 18,00 | 6,25 | 240,00 |
| 46 | 25 | Terra Nova | Q07 | Chuvoso | 3,05 | 7,50 | 26,83 | 7,05 | 33,90 | 0,485 | 4,030 | 215,00 | 29,00 | 8,33 | 1600,00 |
| 47 | 25 | Terra Nova | Q08 | Chuvoso | 7,15 | <LQ | 29,37 | 8,04 | 2,85 | <LQ | 0,580 | 48,00 | 22,00 | <LQ | 2,00 |
| 48 | 25 | Terra Nova | Q09 | Chuvoso | 7,94 | <LQ | 30,40 | 8,17 | 6,93 | <LQ | 0,640 | 43,00 | 4,00 | <LQ | 5,00 |
| 49 | 25 | Jaguaribe | Q13 | Chuvoso | 7,63 | <LQ | 30,78 | 7,67 | 12,60 | 0,159 | 1,110 | 152,00 | 15,00 | <LQ | 8,00 |

Legenda: A = Parâmetro ausente; <LQ = Abaixo do limite de detecção. Fonte: Ministério do Desenvolvimento Regional, 2019.

Obs: os resultados destacados em vermelho correspondem às violações dos padrões recomendados pela resolução CONAMA 357/2005.