



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRAÚLICA E AMBIENTAL
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL – SANEAMENTO AMBIENTAL

JOSEFA MARCIANA BARBOSA DE FRANÇA

ESTUDO DA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DO CEARÁ
– UMA ABORDAGEM INOVADORA

FORTALEZA

2021

JOSEFA MARCIANA BARBOSA DE FRANÇA

ESTUDO DA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DO CEARÁ –
UMA ABORDAGEM INOVADORA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Capelo Neto.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F881e França, Josefa Marciana Barbosa de.
ESTUDO DA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DO CEARÁ – UMA
ABORDAGEM INOVADORA / Josefa Marciana Barbosa de França. – 2021.
109 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2021.
Orientação: Prof. Dr. José Capelo Neto.

1. Sistema em cascata.. 2. Práticas inovadoras.. 3. Gestão de recursos hídricos. I. Título.

CDD 628

JOSEFA MARCIANA BARBOSA DE FRANÇA

ESTUDO DA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DO CEARÁ –
UMA ABORDAGEM INOVADORA

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará como requisito para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 07/05/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Capelo Neto (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – DEHA/UFC

Profa. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes
Universidade Federal do Ceará – DEHA/UFC

Dr. Berthyer Peixoto Lima
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH

Dr. Ismael Kesley Carloto Lopes
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Profa. Dra. Samiria Maria Oliveira da Silva
Universidade Federal do Ceará – DEHA/UFC

A Deus.

Aos meus pais, irmãos, companheiro e
colaboradores.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo resulta de significativas contribuições que auferi nesse ínterim de quatro anos que estive cursando o curso de doutorado, assim como, da disponibilidade de dados cedido pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos e pela oportunidade que o Professor Dr. José Capelo Neto me concedeu.

Primeiramente agradecer a Deus, pela vida e por conceder tudo que conseguir alcançar com muito esforço, assim como, pela saúde, pela vida e por todos que fazem parte dela.

Aos meus pais, Noberta Borges Barbosa (*in memoriam*) e Jobem Defensor Barbosa, pelos seus incentivos, princípios, valores e sentimentos a me instruídos.

Aos meus irmãos Acassiana, Kátia e Wilami, pelo sincero e recíproco carinho e afeição.

À meu companheiro, Nelson, pelo carinho, incentivo, cumplicidade e compreensão quanto aos momentos de abdicação e omissão.

Agradeço ao Prof. Dr. José Capelo Neto, meu Orientador, referencial de profissional, pela sua orientação, bem como, pela sua paciência, direcionamento, presteza e sugestões. Grata pelo exemplo diário de dedicação, esforço e ética que deve sempre me inspirar.

Grata à professora, Samiria Oliveira pelas sugestões nos artigos que foram de valiosa contribuição para a elaboração da tese e por sua atenção.

Agradeço ao professor Iran E. Lima Neto, pelo apoio e incentivo na disciplina de modelagem matemática.

Aos professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) por compartilhar os conhecimentos durante o curso de doutorado. Assim como, sou grata à biblioteca pela disponibilidade de acervo técnico e a secretaria do curso, em nome da Shirley, pela sua atenção e por tirar dúvidas sobre as etapas do curso.

A Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) pela liberação para participar do curso de doutorado, e pela disponibilidade dados de monitoramento qualitativo/quantitativo para a realização desta pesquisa. Em nome do Presidente, João Lúcio; ao ex-diretor, Ubirajara; ao gerente da GEDOP, Walt Disney; e ao gerente da GEMET, Cláudio Gesteira.

Aos colegas de trabalho, Francimeyre, Luciana, Deilton, Bruno Rebouças, Alisson, Raquel, Ronaldo, pela gentileza de ajudaram com informações complementares a realização deste trabalho.

Aos colegas de laboratório, Seção Laboratorial de Qualidade da Água (SELAQUA), em especial a Diana, Aparecida, Samylla, Alam e Marianna pelas explicações dos experimentos no período em que estive no laboratório.

Aos professores e participantes da banca examinadora: Ana Barbara, Berthyer, Capelo, Fernando, Ismael, Samiria, pelas colaborações e sugestões.

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e participaram de mais esta etapa importante de minha vida da conclusão desse trabalho! E peço desculpa caso tenha esquecido de mencionar alguém....Muito obrigada e desejo a todos: sorte, saúde e paz.

“O importante não é aquilo que fazem de nós, mas o que nós mesmos fazemos do que os outros fizeram de nós.”

Jean-Paul Sartre

RESUMO

A construção de infraestrutura para transportar água entre bacias hidrográficas e a exploração de água subterrâneas tornam-se necessárias, devido ao aumento da demanda por água atender ao crescimento populacional e demais categorias de usos. E para mitigar os conflitos pelo uso e evitar e reduzir os desperdícios faz-se necessário o gerenciamento desses recursos escassos e limitados na natureza. A partir da análise do monitoramento quantitativo e qualitativo, utilizando ferramentas da estatística multivariada, ambos referenciados na presente tese; concomitantemente aos instrumentos de gestão de recursos, previstos na legislação estadual do Ceará e demais arcabouço jurídico, almeja-se contribuir com uma gestão mais eficiente do sistema em análise. Constatou-se, a partir da análise dos processos de outorga, que as vazões dos poços na zona cristalina, a média é de $1,20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, e nos subsolo sedimentares, $4,27 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, destinados principalmente para irrigação, abastecimento humano e indústria. Constatou-se também que, 69% das solicitações de outorga em 2017, eram para captações em águas subterrâneas. No entanto, a predominância em 73% das vazões outorgadas foi captada de fontes superficiais. Identificou-se que o acelerado processo de eutrofização ocorre de montante para jusante no SCRMF, onde se identificou a proliferação de cianobactérias dentro do canal da Integração. A liberação das vazões pela camada hipolimnética do reservatório Castanhão contribui com altas cargas de nitrogênio e fósforo, que oscilam conforme a vazão operada pelo sistema de monitoramento, assim como, ocasionou a desoxigenação por uma extensão de 43,50km a jusante no canal. As altas temperaturas (máximo: $33,64 \text{ }^\circ\text{C}$, mínimo: $27,27 \text{ }^\circ\text{C}$) identificadas no canal da Integração, também contribuem para manter o sistema com altas densidades de cianobactérias, cuja predominância representou mais de 93% do fitoplâncton, com um total de 38 táxons de cianobactérias, cujos gêneros dominantes no SCRMF foram: *Oscillatoria* sp. e *Microcystis* sp., e as demais identificadas como abundantes: *Merismopedia* sp., *Cylindrospermopsis* sp., *Pseudanabaena* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Aphanocapsa* sp., *Dolichospermum* sp., *Planktothrix* sp., *Raphidiopsis* sp. De maneira geral, verificou-se que o reservatório Gavião sofreu maior magnificação do processo de eutrofização, pois quantificou uma maior densidade de cianobactérias, com predominância no período de águas estratificadas. Também foi possível identificar que ocorreu estratificação termal sazonal nos reservatórios Castanhão e Gavião, com processo de estratificação no primeiro semestre, e permaneceu desestratificada no segundo semestre.

Palavras-chave: Sistema em cascata. Práticas inovadoras. Gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

The construction of infrastructure to transport water between hydrographic basins and the exploitation of underground water become necessary, due to the increase in the demand for water to meet population growth and other categories of uses. And to mitigate conflicts over use and avoid and reduce waste, it is necessary to manage these scarce and limited resources in nature. From the analysis of quantitative and qualitative monitoring, using multivariate statistical tools, both referenced in this thesis; concomitantly with the resource management instruments, provided for in the state legislation of Ceará and other legal frameworks, the aim is to contribute to a more efficient management of the system under analysis. It was found from the analysis of the granting processes that the flow of crystalline aquifers, the average is $1.20 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, and in the sedimentary subsoil, $4.27 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$, intended mainly for irrigation, human supply and industry. It was also found that 69% of grant applications in 2017 were for abstraction in groundwater. However, the predominance in 73% of the flows granted was captured from surface sources. It was identified that the accelerated eutrophication process occurs from upstream to downstream in the SCRMF, where the proliferation of cyanobacteria within the Integration channel has been identified. The release of flows through the hypolimnetic layer of the Castanhão reservoir contributes to high loads of nitrogen and phosphorus, which fluctuate according to the flow rate operated by the monitoring system, as well as causing deoxygenation for a length of 43.50 km downstream in the Canal. The high temperatures (maximum: $33.64 \text{ }^\circ\text{C}$, minimum: $27.27 \text{ }^\circ\text{C}$) identified in the Integração canal, also contribute to maintaining the system with high densities of cyanobacteria, whose predominance represented more than 93% of phytoplankton, with a total of 38 taxa of cyanobacteria, whose dominant genera in the SCRMF were: *Oscillatoria* sp. and *Microcystis* sp., and the others identified as abundant: *Merismopedia* sp., *Cylindrospermopsis* sp., *Pseudanabaena* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Aphanocapsa* sp., *Dolichospermum* sp., *Planktothrix* sp., *Raphidiopsis* sp. In general, it was found that the Gavião reservoir underwent a greater magnification of the eutrophication process, as it quantified a higher density of cyanobacteria, with predominance in the stratified water period. It was also possible to identify that there was a seasonal thermal stratification in the Castanhão and Gavião reservoirs, with a stratification process in the first semester, and remained unstratified in the second semester.

Keywords: Cascading system. Innovative practices. Water resource management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Histórico dos processos de outorga e da precipitação no Ceará (2009 a 2017).....	31
Figura 2	– Localização dos poços conforme vazão outorgada em 2017 no Ceará..	36
Figura 3	– Mapa de localização do açude Gavião e do ponto de coleta de água.....	43
Figura 4	– Dados de precipitação, velocidade do vento e insolação do ano de 2016..	46
Figura 5	– Nível volumétrico do açude Gavião do ano de 2016.....	46
Figura 6	– Perfil da coluna de água: temperatura (A), oxigênio dissolvido (B) e pH (C) no ano de 2016.....	48
Figura 7	– Localização do Sistema em Cascata da Região Metropolitana de Fortaleza com zoom na bacia hidrográfica metropolitana.....	66
Figura 8	– Infográfico do Sistema em Cascata da Região Metropolitana de Fortaleza (SCRMF) indicando as distâncias em relação ao açude Castanhão, altitudes do sistema, bacias hidrográficas e pontos das coletas.....	69
Figura 9	– Mapa de uso e ocupação das seis bacias hidrográfica dos reservatórios do SCRMF.....	71
Figura 10	– Análise de agrupamento dos pontos de monitoramento nos reservatórios do SCRMF, em função da similaridade quanto aos parâmetros de qualidade de água - ano de 2017.....	73
Figura 11	– Mapa de localização do açude sistema em cascata Fortaleza.....	89
Figura 12	– Estação de bombeamento (EB Castanhão).....	90
Figura 13	– Dados climatológicos da área de estudo: precipitação (A), velocidade do vento (B) e insolação (C).....	92
Figura 14	– Perfil da coluna da água das variáveis ambientais: temperatura da água oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais para o período de 2017 a 2019. O eixo Y representa a profundidade e o X o mês de monitoramento.....	95
Figura 15	– Evolução volumétrica do reservatório Castanhão.....	97

Figura 16	– OD, pH e temperatura médios nos pontos analisados para os anos de 2017 – 2019.....	98
Figura 17	– Carga de NT do Castanhão para o canal da Integração no período de 2017 a 2019 (A) e boxplot dos valores de NT para o período em análise (B).....	101
Figura 18	– Carga de PT do Castanhão para o canal da Integração no período de 2017 a 2019 (A) e boxplot dos valores de PT para o período em análise (B).....	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Processos de outorga conforme a categoria de uso (2009 a 2017).....	32
Gráfico 2	– Histórico da vazão outorgada, conforme a categoria de uso de 2009 a 2017.....	32
Gráfico 3	– Distribuição da vazão outorgada por categoria de usos em 2017.....	33
Gráfico 4	– Processos de outorga e de vazões outorgadas por manancial (2009 a 2017).....	35
Gráfico 5	– Densidade de cianobactéria e precipitação na área em estudo ao longo do ano de 2016.....	51
Gráfico 6	– Gêneros de cianobactérias predominantes no açude Gavião no ano de 2016.....	52
Gráfico 7	– Variação do volume dos reservatórios do SCRMF e precipitação média mensal em 2017.....	72
Gráfico 8	– Concentrações médias de nitrogênio total (NT), fósforo total (PT) e cianobactérias ao longo do SCRMF.....	76
Gráfico 9	– Abundância relativa (%) média de cianobactérias no SCRMF no período amostral.....	77
Gráfico 10	– Densidade relativa dos valores médios de cianobactérias ao longo do SCRMF no período estudado (2017).....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Vazão outorgada e custo de água em 2017.....	33
Tabela 2	– Classificação dos poços, conforme a vazão outorgada em 2017 no Ceará.....	35
Tabela 3	– Variáveis do monitoramento qualitativo do açude Gavião no ano de 2016	44
Tabela 4	– Análise descritiva das variáveis físico-químicas e biológicas.....	50
Tabela 5	– Resultado da análise da componente principal para o ano de 2016.....	55
Tabela 6	– Parâmetros qualitativos analisados no SCRMF ano de 2017.....	67
Tabela 7	– Dados de localização, idade, volume e áreas das bacias hidráulicas dos reservatórios considerados no estudo.....	68
Tabela 8	– Uso e ocupação das seis bacias hidrográficas dos reservatórios do SCRMF	70
Tabela 9	– Médias dos parâmetros nos <i>Clusters</i> formados na análise de agrupamentos. Valores em negrito indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo Teste U.....	74
Tabela 10	– Dados de localização dos pontos de monitoramento, volume e área da hidráulica dos açudes considerados no estudo.....	90
Tabela 11	– Parâmetros qualitativos analisados no período de 2017 a 2019.....	91
Tabela 12	– Valores das variáveis limnológicas nos períodos de estratificação no reservatório Castanhão.....	96
Tabela 13	– Resultado do Teste U para as variáveis ambientais.....	100
Tabela 14	– Resultados do Teste T para o nitrogênio nos pontos monitorados.....	101
Tabela 15	– Resultados do Teste T para o fósforo nos pontos monitorados.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CE	Condutividade elétrica
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CONERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará
CPRM	Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recurso Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPECE	Instituto de Pesquisa do Ceará
NT	Nitrogênio total
pH	Potencial hidrogeniônico
PT	Fósforo total
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
SCRMF	Sistema em cascata da região metropolitana de Fortaleza
TEMP	Temperatura
UFC	Universidade Federal do Ceará
B. H.	Bacia hidráulica
OD	Oxigênio dissolvido
TH ₂ O	Temperatura da água

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO - INTRODUÇÃO GERAL.....	18
1.1	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	21
1.2	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA.....	21
1.3	ESTRUTURA DA TESE.....	22
1.4	CONEXÃO ENTRE OS ARTIGOS.....	22
	REFERÊNCIAS.....	23
2	CAPÍTULO - PANORAMA DAS OUTORGAS DE USO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DO CEARÁ NO PERÍODO DE ESTIAGEM 2009 - 2017.....	25
2.1	INTRODUÇÃO.....	26
2.2	METODOLOGIA.....	27
2.3	ARCABOUÇO JURÍDICO.....	27
2.3.1	Aspectos legais.....	27
2.3.2	Uso sustentável dos poços.....	29
2.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
2.4.1	Seca e outorga.....	31
2.4.2	Outorgas por tipologias de fonte.....	34
2.5	CONCLUSÕES.....	37
	REFERÊNCIAS.....	37
3	CAPÍTULO - ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE ESTRATIFICAÇÃO E DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO GAVIÃO (CEARÁ - BRASIL).....	40
3.1	INTRODUÇÃO.....	41
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.2.1	Área de estudo.....	42
3.2.2	Aquisição dos dados.....	43
3.2.3	Análise estatística dos dados.....	44
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
3.3.1	Caracterização hidrometeorológica.....	45
3.3.2	Processo de estratificação.....	47
3.3.3	Processo de eutrofização	49
3.3.4	Avaliação multivariada dos dados.....	53
3.4	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS.....	56

4	CAPÍTULO - QUALIDADE DA ÁGUA EM UM SISTEMA DE RESERVATÓRIOS EM CASCATA – UM ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	61
4.1	INTRODUÇÃO.....	62
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	64
4.2.1	Área de estudo.....	64
4.2.2	Amostragem de campo e parâmetros analisados.....	66
4.2.3	Análise dos dados.....	69
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	70
4.5	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS.....	80
5	CAPÍTULO - IMPACTO DA DINÂMICA DE ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA SOBRE A QUALIDADE DE ÁGUA EM SISTEMA EM CASCATA - ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	86
5.1	INTRODUÇÃO.....	87
5.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	88
5.2.1	Área de estudo.....	88
5.2.2	Estudo das vazões e da qualidade da água.....	90
5.2.3	Análise estatística.....	91
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	92
5.3.1	Dados climatológicos.....	92
5.3.2	Dinâmica do processo de estratificação do reservatório Castanhão.....	93
5.3.3	Análise da qualidade de água do sistema de transferência de água.....	96
5.3.4	Estimativa das cargas de nutrientes provenientes do reservatório Castanhão.....	100
5.4	CONCLUSÕES.....	103
	REFERÊNCIAS.....	104
6	CAPÍTULO – CONCLUSÕES GERAIS.....	107

1. CAPÍTULO – INTRODUÇÃO GERAL

Os ecossistemas de água doce estão entre os mais ameaçados, em consequência dos processos relacionados: as mudanças climáticas, a degradação da qualidade das águas dos mananciais, ao rápido crescimento, sem planejamento das demandas, e ao represamento dos rios, que originam reservatórios artificiais em cascatas nos sistemas de transferência hídrica (REID *et al.*, 2019).

A eutrofização é um dos problemas ambientais recorrentes, que ocasiona a degradação da qualidade das águas dos ecossistemas aquáticos de forma drástica (PAERL; PAUL, 2012). Este fenômeno é a resposta biológica do ecossistema representada pelo aumento da produtividade, devido ao enriquecimento do corpo d'água diante ao aumento das concentrações de nutrientes, especialmente de nitrogênio (N) e fósforo (P), através de efluentes domésticos, agrícolas e industriais (MCQUATTERS-GOLLOP *et al.*, 2009). Uma das principais consequências da eutrofização é o aumento da biomassa fitoplanctônica. Neste contexto, certas espécies desaparecem, enquanto outras, oportunistas, tornam-se dominantes sendo essas, em geral, as cianobactérias, que incluem espécies potencialmente tóxicas (GLADYSHEV; GUBELIT, 2019).

As concentrações de P podem ser controladas mais facilmente do que o nitrogênio, de modo que o controle da eutrofização geralmente se concentra no P (SMITH; SCHINDLER, 2009; CAVALCANTE *et al.*, 2021). Experimentos mostraram que uma redução nas entradas de P pode causar uma reversão bem sucedida da eutrofização de reservatórios (SCHINDLER, 2012). No entanto, em alguns casos, um atraso na recuperação foi observado porque os sedimentos do lago podem atuar como uma fonte de P: o P acumulado no sedimento pode retornar à coluna d'água por meio de um processo chamado carregamento interno, também denominado de processo de desestratificação (SØNDERGAARD *et al.*, 2001; CAVALCANTE *et al.*, 2021).

A liberação de P dos sedimentos pode contribuir significativamente para a quantidade de P biodisponível na água do reservatório, alimentando o processo de eutrofização. No carregamento externo, o P entra no sistema em grande parte na forma de partículas, que não é usado diretamente pelo fitoplâncton; no entanto, com carga interna, o P está predominantemente na forma dissolvida inorgânica, que está diretamente disponível para o crescimento dos organismos fitoplanctônicos (BORMANS *et al.*, 2016).

Com relação à construção de reservatórios artificiais, o número tem aumentado significativamente nas últimas seis décadas, sobretudo em países em desenvolvimento e de economias emergentes do Sudeste da Ásia, América do Sul e África, e apenas uma pequena

fração de rios no mundo permanece inalterada por essas ações antrópicas (NILSSON *et al.*, 2015, VOROSMARTY *et al.*, 2010). O Brasil é um dos maiores construtores mundiais de barragens e o segundo país que gera mais energia hidrelétrica no mundo, atrás da China (SANTOS, 2016).

O Brasil é o maior país da América do Sul, ocupando uma área de 8.544.416 km², é o quinto maior país do mundo, depois da Rússia, China, Canadá e Estados Unidos. E apesar do Brasil dispor de uma alta produção hídrica. No entanto, o Nordeste, com 1,56 milhão de km² (18,20% do território nacional), estar incluso a maior parte da região Semiárida do Brasil, cujas precipitações médias anuais são muito irregulares, com médias que podem variar de 200 a 700 mm por ano, e abriga a parcela mais pobre da população brasileira, com ocorrência de graves problemas sociais (TUCCI, 2001).

Conforme o CGEE (2012), a maioria das bacias hidrográficas do Nordeste, apresenta situação de criticidade, quanto ao balanço hídrico, pois existe, um descompasso entre a oferta e a demanda de água, agravado pela má utilização na irrigação e pelo desperdício nos sistemas urbanos. A disponibilidade e os usos múltiplos da água na região semiárida do Nordeste do Brasil é uma questão crítica, em relação ao seu desenvolvimento sustentável.

Além da escassez hídrica, ou seja, possui apenas 3% da disponibilidade de água do país e abriga 28% da população brasileira, cujas águas subterrâneas, nestas regiões, são em mais de 80% constituído por rochas cristalinas, onde ocorre predominância de águas com teor elevado de sais captados em poços de baixa vazão: da ordem de 1,00 m³/h, exceção ocorre nas formações sedimentares, onde as águas normalmente são de melhor qualidade e podem-se extrair maiores vazões (CIRILO, 2008; CIRILO *et al.*, 2009; CASTRO, 2011).

Com relação ao estado do Ceará, ao qual se realizou a presente pesquisa. Este tem área de 146.817 km², que corresponde a 1,70 % da área do Brasil e a 9,40 % da área do Nordeste, onde predomina solo inserido na zona semiárida do Nordeste, que corresponde a dois terços da área do Estado, se que assentam em rocha cristalina, sobre a qual estão solos rasos, mas de diferentes tipos e vocações, e no terço restante se enquadram as áreas sedimentares, especialmente ao longo dos vales dos rios (COSTA *et al.*, 2002)

No Ceará, entre 2010 e 2016, o Estado enfrentou o que pode ser considerado o período mais severo de seca dos últimos 100 anos (CORTEZ, 2017). Embora tenham sido registradas, em 2011, chuvas em torno da média, contudo, a distribuição da precipitação não foi favorável ao aporte de água nos reservatórios (CORTEZ, 2017, MARCHADO *et al.*, 2017).

No contexto de região semiárida, o marco institucional no Ceará, ocorreu com a criação da Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH), em 1987, e como arcabouço legal a lei nº 11.996/92, atualizada e revogada pela lei nº 14.844/10, a qual define a Política Estadual, cria o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGERH e estabelece os instrumentos de gestão: a fiscalização, a outorga, a cobrança, o enquadramento, o sistema de informações geográficas e o fundo estadual de recursos hídricos (SRH, 2018).

O Estado do Ceará, inserido significativamente no espaço tropical semiárido, vem trabalhando e aprimorando sua política de Recursos Hídricos, desde o final da década de 1980, onde foram implementados pelos órgãos de gestão, diversas tipo de políticas públicas de gerenciamento dos recursos hídricos, tais como: a) construções de reservatórios artificiais, atualmente são 155 monitorados, que corresponde a uma capacidade de armazenamento de 18,64 bilhões m³; b) vales perenizados e transposição de águas entre bacias hidrográficas; c) captação de águas subterrâneas para atender zonas urbanas, principalmente, em comunidades isoladas, através de construção de poços e aquisição de dessalinizadores para reduzir o alto teor de sais das águas localizadas em áreas com solos cristalinas (programa água doce – PAD); d) construção de barragens subterrâneas; e) adoção de programas de construção de cisternas; f) construção de adutoras e canais; g) incentivo ao reuso da água, tendo em vista que o usuário não é tarifado pela água de retorno ao sistema de origem; h) projeto de dessalinização da água do Mar, que se encontra em análise de viabilidade técnica e financeira (COGERH, 2020; CEARÁ, 2010; MARCHADO *et al.*, 2017).

Destaca-se o projeto Malha D'Água, que conforme a SRH (2020), corresponde a proposta de uma matriz hídrica diferenciada, que visa adensar a rede de adutoras, considerando todos os centros urbanos do Estado, sendo que, as captações de distribuição da água serão realizadas, diretamente, nos mananciais com maior garantia hídrica e implantação das estações de tratamento de água (ETAs).

Por último, enfatiza-se a transposição do rio São Francisco, que segundo Castro (2011), é um projeto do governo federal, sob a responsabilidade do Ministério da Integração, destinado a assegurar a oferta de água, a cerca de 12 milhões de habitantes de pequenas, médias e grandes cidades da região semiárida dos estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte (CASTRO, 2011).

Constatou-se que as pesquisas limnológicas, em escala mundial, regional e local, na maioria das vezes, são realizadas em reservatórios isolados e desconsideram o fluxo dos rios e canais de transferência. Neste contexto, o presente estudo visa contribuir com aspectos relacionados, à gestão quantitativa dos recursos hídricos e da qualidade da água em

reservatórios em cascata da região metropolitana de Fortaleza (SCRMF), e especificamente, enfatiza o eixo de transferência de água em cascata entre bacias hidrográficas, que se inicia no reservatório Castanhão, localizado na bacia hidrográfica do Médio Jaguaribe, até ao reservatório Gavião, localizado na bacia hidrográfica Metropolitanas.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

De maneira geral, a presente tese intitulada: “ESTUDO DA QUALIDADE DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DO CEARÁ - UMA ABORDAGEM INOVADORA”, teve o objetivo de avaliar a qualidade da água e os processos estratificação, desestratificação, cargas de nutrientes e processo de eutrofização do SCRMF no intuito de prover conhecimento para a melhoria da gestão da qualidade da água.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar o comportamento quantitativo das tipologias de uso da água, com base nos processos das outorgas para um período de seca prolongado de 2009 a 2017;
- Caracterizar os processos de estratificação/desestratificação e eutrofização utilizando-se de variáveis ambientais qualitativas e quantitativas em um reservatório isolado;
- Analisar as variações limnológicas da qualidade de água no sistema de transposição do SCRMF.
- Avaliar o impacto da estratificação térmica e das cargas de nutrientes no sistema de transposição do SCRMF.

1.2 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

Diante das lacunas, em relação ao conhecimento limnológico em reservatórios em cascata em regiões semiáridas, em consequência da falta de dados, que ainda são escassos, e tendo em vista que, não há registros de trabalhos em relação ao macrossistema em cascata da região metropolitana de Fortaleza. Neste contexto, a tese tem o objetivo de contribuir para uma gestão mais eficiente a partir do entendimento das variáveis quantitativas e qualitativas do sistema de transferência de água do SCRMF. Saliente-se que o presente estudo foi realizado em período anterior a transposição de água proveniente do Rio São Francisco, que ocasionará mudanças na dinâmica dos sistemas aquáticos; e que este estudo poderá servir de base para pesquisas futuras em relação à gestão e ao gerenciamento, desde que, enfatize o tema abordado nesta tese.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A tese foi organizada em seis capítulos, sendo que, cada um deles foi redigido no formato de um manuscrito com diferente abordagem. Dos quais, quatro capítulos foram elaborados no formato de artigo e submetidos à publicação em revistas especializadas em Engenharia I. Os artigos submetidos para publicação foram escritos de forma distinta, quanto aos tópicos: introdução, objetivos, materiais e métodos, resultados e discussões e conclusões.

No capítulo 1- INTRODUÇÃO GERAL expõe-se os principais avanços no estado do Ceará com relação ao gerenciamento dos recursos hídricos, e enfatizou-se a relevância da tese.

No capítulo 2 - PANORAMA DAS OUTORGAS DE USO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DO CEARÁ NO PERÍODO DE ESTIAGEM 2009-2017. Artigo publicado pela revista Associação Brasileira de Águas Subterrâneas (ABAS).

No capítulo 3 - ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE ESTRATIFICAÇÃO E DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO GAVIÃO (CEARÁ – BRASIL). Artigo aprovado pelo Departamento de Águas e Esgotos (DAE)

No capítulo 4 - QUALIDADE DA ÁGUA EM UM SISTEMA DE RESERVATÓRIOS EM CASCATA – UM ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. Artigo aprovado pela revista de Engenharia Sanitária e Ambiental (ESA).

No capítulo 5 – IMPACTO DA DINÂMICA DE ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA SOBRE A QUALIDADE DE ÁGUA EM SISTEMA EM CASCATA - ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. Artigo em análise pela revista de Engenharia Sanitária e Ambiental (ESA).

No capítulo 6 - CONCLUSÕES GERAIS discorreu-se sobre as principais conclusões identificados nos quatros artigos e apresenta algumas ideias inovadoras.

1.4 CONEXÃO ENTRE OS ARTIGOS

O longo período de escassez hídrica, que assola o estado do Ceará, desde 2010, ocasionou muitas alterações na disponibilidade hídrica para atender aos diversos tipos demanda de captações superficiais e subterrâneas. Essas alterações serão visualizadas no Capítulo 2, onde se fez uma análise dos processos de outorga do período de 2009 a 2017. Observá-las foi importante, pois se constatou a transição do abastecimento das sedes

municipais para fontes subterrâneas, que tem uma melhor qualidade de água em áreas rurais, quando se compara as fontes superficiais. A estiagem, além de comprometer a disponibilidade hídrica superficial, constatado pelo monitoramento quantitativo e pelo aumento da demanda para fontes subterrâneas, também é considerado um dos fatores que ocasionou a degradação da qualidade água do sistema em cascata da região metropolitana de Fortaleza (SCRMF) estudado nos Capítulos 3,4 e 5.

REFERÊNCIAS

BORMANS, M.; MARŠÁLEK, B.; JANČULA, D. Controlling internal phosphorus loading in lakes by physical methods to reduce cyanobacterial blooms: a review. **Aquatic Ecology**, 2016, 50(3), 407-422. <http://dx.doi.org/10.1007/s10452-015-9564-x>.

CAVALCANTE, H.; ARAÚJO, F.; BECKER, V.; BARBOSA, J. E. L. Internal phosphorus loading potential of a semiarid reservoir: an experimental study. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 2021, vol. 33, e6.

CASTRO, C. N. **Transposição do rio São Francisco: análise de oportunidade do projeto**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Rio de Janeiro, 2011.

CEARÁ, Secretaria dos Recursos Hídricos. **Programa de Ação Estadual de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**, PAE-CE, Fortaleza: Ministério do Meio Ambiente / Secretaria dos Recursos Hídricos, 2010.372p.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (Brasil). A Questão da Água no Nordeste / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, **Agência Nacional de Águas**. – Brasília, DF: CGEE, 2012.

CIRILO, J. A. MONTENEGRO, S. M. G. L. CAMPOS J. N. B. In book: **Águas no Brasil: Análises Estratégicas** Chapter: 5, Publisher: **Academia Brasileira de Ciências**, Editors: Project: Gestão de águas. 2009.

CIRILO, J.A. 2008. **Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido Brasileiro**. Universidade de São Paulo, São Paulo. Vol. 63: 61-82

COGERH – Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. **Portal Hidrológico de Ceará**. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/hidro-ce-zend/acude/nivel-diario>. Acesso em: 22 set. 2020.

COSTA, C. T.; PUERARI, E. M.; CASTRO, M. A. H. Barragem subterrânea: a experiência do estado do Ceará. **XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. 2002.

GLADYSHEV, M. I.; GUBELIT, Y. I. 2019. GREEN TIDES: New Consequences of the Eutrophication. Legendre, P., De Cáceres, M. 2013. Beta diversity as the variance of Community data: dissimilarity coefficients and partitioning. **Ecology Letters** 16(8): 951-963.

MACHADO, T. T. V.; DIAS, J. T.; SILVA, T. C. Evolução e avaliação das políticas públicas para a atenuação dos efeitos da seca no semiárido Brasileiro. ISSN 1981-1268. **Gaia Scientia** (2017). Volume 11(2): 84-103

MCQUATTERS-GOLLOP, A., GILBERT, A.J., MEE, L.D., VERMAAT, J.E., ARTIOLI, Y., HUMBORG, C., WULFF, F. 2009. How well do ecosystem indicators communicate the effects of anthropogenic eutrophication? **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 82(4): 583-596.

NILSSON, C.; POLVI, L. E.; GARDESTRÖM, J.; HASSELQUIST, E. M.; LIND, L.; SARNEEL, J. M. Riparian and in-stream restoration of boreal streams and rivers: Success or failure? **Ecohydrology** 2015, 8, 753–764.

PAERL, H. W.; PAUL, V. J. 2012. Climate change: links to global expansion of harmful cyanobacteria. **Water Research** 46(5): 1349-1363.

REID, A. J.; CARLSON, A. K.; CREED, I. F.; ELIASON, E. J.; GELL, P. A.; JOHNSON, P. T. J.; KIDD, K. A.; MACCORMACK, T. J.; OLDEN, J. D.; ORMEROD, S. J. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity. **Biological Reviews**. 2019, 94, 849–873.

SANTOS, N. C. L. **Sistemas de reservatórios em série : respostas ecológicas à fragmentação de habitat e alteração do regime de fluxo**. Maringá, 2016. 85 f. Tese (doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais). Universidade Estadual de Maringá, Biologia, 2016.

SCHINDLER, D.W. The dilemma of controlling cultural eutrophication of lakes. Proceedings of the Royal Society B: **Biological Sciences**, 2012, 279(1746), 4322-4333. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2012.1032>.

SMITH, V. H.; SCHINDLER, D. W. Eutrophication science: Where do we go from here? Trends in **Ecology & Evolution**, 2009, 24(4), 201-207. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tree.2008.11.009>. PMID:19246117.

SØNDERGAARD, M., JENSEN, J. P.; JEPPESEN, E. Retention and Internal Loading of Phosphorus in Shallow, Eutrophic Lakes. **The Scientific World Journal**, 2001, 1, 427-442. <http://dx.doi.org/10.1100/tsw.2001.72>. P Mid: 12806078.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano de ações estratégicas de recursos hídricos do Ceará**. 2018.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos. **Projeto Malha D'Água**. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/projeto-malha-dagua/?repeat=w3tc>. Acesso em: 23 set. 2020.

TUCCI, CARLOS E. M. **Gestão da água no Brasil**– Brasília : UNESCO, 2001.156p.

VÖRÖSMARTY, C. J.; MCINTYRE, P. B.; GESSNER, M. O.; DUDGEON, D.; PRUSEVICH, A.; GREEN, P.; GLIDDEN, S.; BUNN, S.E.; SULLIVAN, C.A.; REIDY LIERMANN, C. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature** 2010, 467, 555–561.

2. CAPÍTULO 2 - PANORAMA DAS OUTORGAS DE USO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO ESTADO DO CEARÁ NO PERÍODO DE ESTIAGEM 2009-2017

RESUMO - A escassez hídrica no Ceará, referente ao período de 2009 a 2017, ocasionou a baixa recarga nos 155 reservatórios monitorados pelo Estado, resultando, no final de 2017, em um armazenamento de apenas 7,28% da capacidade total. No entanto, o aporte para suprir a todas as categorias de uso da água bruta, para esse intervalo de tempo, ainda foi, predominantemente, proveniente de fontes superficiais em 2017 (73%). Contudo, parte do atendimento da demanda para abastecimento das sedes municipais, que era predominantemente de aporte superficial em 2009 (100%), alterou-se para fontes subterrâneas em 2017 (54%) dos 127 municípios com outorgas. No ano de 2017, foram cadastrados 4.758 poços no Estado, destes, 1.468 foram considerados como bateria de poços, assim, houve a concessão de outorga para 3.290 poços isolados, 895 localizados na zona cristalina, com vazão média de $1,20 \text{ L.s}^{-1}$ ($4,32 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$) e 2.395 na zona sedimentar, com vazão média de $4,27 \text{ L.s}^{-1}$ ($15,37 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$). Constatou-se que a irrigação foi o principal consumidor de água bruta, seguida do atendimento para abastecimento humano e industrial, entretanto, como a outorga é subsidiada para esses dois tipos de uso, é a indústria que paga mais caro, quando se compara com as demais categorias de uso.

Palavras-chave: Outorgas. Água Subterrânea. Recursos Hídricos. Gestão.

ABSTRACT - The water shortage in Ceará for the period from 2009 to 2017 caused the low recharge in the 155 reservoirs monitored by the State, resulting, at the end of 2017, in a storage of only 7,28% of the total capacity. However, the stored to supply all categories of raw water use, for this time interval; it was still predominantly from superficial sources (73%) in 2017. Though, part of the demand for supply to municipal thirst, which was predominantly of surface input in 2009 (100%), moved to underground sources in 2017 (54%) of the 127 municipalities with grants. In 2017, 4,758 aquifers were registered in the database, subdivided into: wells battery (1,468) and unit isolated aquifers (3,290). These, 895 are located in the crystalline zone, with an average flow of 1.20 L.s^{-1} ($4.32 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$) and 2,395 aquifers in the sedimentary zone, with an average flow of 4.27 L.s^{-1} ($15.37 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$). It was verified that irrigation was the main consumer of raw water, followed by the supply for human and industrial supply; however, as the grant is subsidized for these two types of use, it is the industry that pays more expensive when compared to the other categories of use.

Keywords: Grants. Groundwater. Water Resources. Management.

2.1 INTRODUÇÃO

No Nordeste Brasileiro, os debates sobre recursos hídricos, normalmente abordam questões relacionadas às águas superficiais, cuja exploração foi impulsionada pela construção de açudes ao longo dos anos, devido ao fato de serem visíveis e prontamente exploráveis (CAMPOS; STUDART, 2001).

A política de açudagem adotada no estado do Ceará foi moldada pela predominância do embasamento cristalino, que recobre cerca de 75% do território e influencia negativamente a quantidade e a qualidade da água subterrânea disponível (SILVA *et al.*, 2007). Assim, o abastecimento das cidades predominantemente acontece utilizando-se as águas superficiais. Desta forma, o Ceará construiu diversos reservatórios ao longo dos anos, a fim de garantir água para a população na época de estiagem, além disso, construiu uma infraestrutura de transferência, utilizando adutoras e canais, de modo a tentar garantir, o mais que possível, uma melhor distribuição espacial deste recurso. Os maiores investimentos nesta área ocorreram nas décadas de 1990 e 2000 (DO AMARAL FILHO, 2000).

Segundo mapeamentos realizados pela FUNCEME, o estado do Ceará possui 1.326 reservatórios com espelhos d'água com área acima de 20 hectares (MARTINS *et al.*, 2007). Os açudes mais estratégicos deste Estado, em um total de 155, que são monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) e correspondem a uma capacidade total de armazenamento de 18,64 bilhões m³. Em dezembro de 2017 o volume chegou a 1,36 bilhão m³, ou seja, 7,28% da capacidade total de armazenamento (COGERH, 2017b).

Em consequência disso, o poder público e a iniciativa privada intensificaram o investimento em projetos para captação/produção de água, tais como dessalinização da água do mar e de águas salobras e/ou salinas, construção de sistemas para captação de água de chuvas, reuso de efluentes tratados e, principalmente, construção de poços. Neste cenário, a pressão sobre os escassos mananciais subterrâneos tem se intensificado, alertando para a necessidade de uma maior atenção aos instrumentos de gestão disponíveis.

Os usos da água são definidos como as atividades humanas que provocam alterações nas suas condições naturais como, por exemplo, a irrigação, abastecimento, geração de energia hidroelétrica, entre outros. De forma a garantir o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos por todos, utiliza-se o mecanismo de gestão denominado outorga de direito de uso, o qual tem como objetivo assegurar o efetivo controle da quantidade dos usos da água.

A presente pesquisa objetivou identificar as principais alterações na tipologia da demanda hídrica no estado do Ceará e avaliar as mudanças relacionadas à transição de um período de chuvas regulares, com elevada disponibilidade hídrica superficial, para um longo período de seca, tendo como base a análise dos processos de outorga submetidos à Companhia de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) entre os anos de 2009 a 2017.

2.2 METODOLOGIA

Os dados dos processos de outorga dos anos de 2009 a 2017 foram processados, a partir da disponibilidade do banco de dados COGERH. As demais informações foram pesquisadas, a partir da legislação pertinente ao assunto abordado no presente artigo.

2.3 ARCABOUÇO JURÍDICO

2.3.1 Aspectos legais

Instrumentos de gestão de recursos hídricos têm sido utilizados em todo o mundo, adotando-se especificidades para cada região. Um exemplo de sistema de outorga em região semiárida, com mudanças sazonais, é o estado americano de Utah, o qual prevê que a água pertence ao povo, e é ele quem determina quem tem direito ao uso da água e regula esse uso. A regra aplicada é baseada na doutrina de que, o usuário do sistema que detém o direito mais antigo à sua água possui uma “prévia apropriação”, o que significa que a água disponível deve ser distribuída de acordo com um sistema prioritário, ou seja, a água é ofertada primeiro para a pessoa que solicitou o direito do uso ao Estado “água mais velha por direito”, a segunda pessoa seria a próxima água mais velha, e assim por diante (OLRGC, 2012). No entanto, existe um responsável por monitorar a água do rio e os desvios, de acordo com o direito de uso e supervisionar as águas subterrâneas. É verificada a variação da vazão nos rios, que ocorre de forma sazonal (à proporção que as temperaturas aumentam e a neve derrete ou quando ocorre precipitação adicional), além das variações anuais de acordo com os anos úmidos e secos. À medida que o fluxo de água disponível diminui, o responsável deve supervisionar a diminuição dos desvios, com base na prioridade do direito de água e na porcentagem de água disponível (OLRGC, 2012).

A outorga no estado do Ceará está amparada pela Política Estadual dos Recursos Hídricos, fundamentada na Lei 14.844/2010 (CEARÁ, 2010). Para a concessão do direito de

uso são realizados estudos referentes à disponibilidade hídrica os quais avaliam a vazão outorgável naquela área. Nesse processo, busca-se respeitar o critério geral, definido pela legislação, que estabelece o limite de uso da água em 90% da vazão regularizada com 90% de garantia. Esse critério reserva, portanto, 10% da vazão regularizada com 90% de garantia como vazão remanescente à jusante dos reservatórios. Para o caso das águas subterrâneas, a vazão de referência adotada tem sido a vazão nominal de teste de vazão do poço e/ou a capacidade de recarga do aquífero (CEARÁ, 2012c).

A legislação que rege a outorga de água no Ceará prevê situações anômalas e, por conseguinte, formas de contorná-las. Assim, tem-se pelo Decreto Estadual nº 31.076 de 17/12/2012 (CEARÁ, 2012a), referente à outorga de direito de uso dos recursos, que:

Art. 21 - O aumento de demanda ou insuficiência de oferta hídrica para atendimento aos usuários permitirá a suspensão temporária da outorga, sua readequação, ou sua extinção;

§1º O direito de uso poderá ser temporariamente limitado ou suspenso, na superveniência de casos fortuitos ou de força maior, inclusive de fenômenos climática críticos que possibilitem ou dificultem extraordinariamente as condições de oferta hídrica.

O Decreto 31.077 de 12/12/2012 (CEARÁ, 2012b), que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, no seu Artigo 29, destaca que: o consumo humano e a dessedentação de animais são usos prioritários em situação de escassez, nos termos do inciso VIII do art. 3º da Lei nº 14.844 de 28 de dezembro de 2010 (CEARÁ, 2010):

.....deverá o órgão gestor tomar uma ou mais das seguintes providências, visando à preservação ou à manutenção do equilíbrio natural das águas subterrâneas ou dos serviços de abastecimento público: I – Determinar a suspensão da outorga de uso, até que o aquífero se recupere, ou seja, superada a situação que determinou a carência de água; II – Determinar a restrição ao regime de operação outorgado; III – Revogar a outorga para uso da água subterrânea; IV – Restringir as vazões captadas por poços em toda a região ou em áreas localizadas; V – Estabelecer distâncias mínimas entre captações a serem executadas; VI – Estabelecer áreas de proteção, restrição e controle; VII – Estabelecer perímetro de proteção sanitária e perímetro de alerta.

Com base nestes dois Decretos, 31.076 e 31.077, várias foram as decisões dos gestores, por meio do Conselho Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará

(CONERH), para minimizar as condições de risco que se instalaram no período de 2009 a 2017, tais como:

a) Lei Nº 16.103/2016 (CEARÀ, 2016), que cria a tarifa de contingência pelo uso dos recursos hídricos em período de situação crítica de escassez hídrica, onde se destaca que a implementação será de forma progressiva, ou seja, será aplicada na proporção do volume outorgado e conforme categorias de usos; assim como, prevê a isenção da tarifa para os pequenos produtores rurais.

b) Resolução CONERH Nº 03/2015, que decreta a suspensão das emissões de outorgas de direito de uso para novas captações de água de domínio do Estado, ou da União Federal, por delegação, no Sistema Integrado Jaguaribe – Região Metropolitana de Fortaleza, compreendendo os trechos perenizados dos rios Jaguaribe e Banabuiú e nos canais do Trabalhador e Eixão das Águas, abastecidos pelos reservatórios do açude Castanhão, Banabuiú e Orós, nas finalidades de irrigação e aquicultura. A referida resolução faz exceção para suspensões relacionadas com: I - as renovações de outorgas, sem aumento de vazões e volumes captados; II – as outorgas relacionadas a agricultura irrigada com área menor que 5 (cinco) hectares; III - os requerimentos de outorga para captações superficiais e subterrâneas localizadas nas áreas citadas anteriormente, terão suas análises temporariamente suspensas, excetuando-se os requerimentos de renovação de outorgas sem ampliação de vazões.

c) Lei Nº 16.033/2016, que dispõe sobre a política de reuso de água não potável no âmbito do Estado o Ceará, cuja modalidade de reuso são para fins: urbanos; agrícolas; florestais; ambientais; industriais e aquicultura, vedado o reuso de água não potável para fins de abastecimento humano, sendo que, a aplicação de técnicas de reuso de água não exclui a utilização de outros métodos de uso racional de água, como a redução do consumo.

2.3.2 Uso sustentável dos poços

Globalmente, a água subterrânea é a fonte de um terço das captações de água doce, fornecendo cerca de 36%, 42% e 27% da água usada para uso doméstico, fins

agrícolas e industriais, respectivamente, e na Europa, 65% da água potável é originária de água subterrânea (TAYLOR *et al.*, 2013; KLØVE *et al.*, 2014).

De maneira geral, o uso dos poços no Ceará se intensificou a partir da década de setenta e segue crescendo por diversos fatores: a) avanços das técnicas de perfuração de poços; b) redução dos custos de extração; c) menor suscetibilidade climática destes mananciais; d) a qualidade das águas subterrâneas; e) o aumento da demanda, e f) a degradação das águas superficiais (REBOUÇAS, 2006).

A utilização dos recursos hídricos subterrâneos apresenta vantagens aos usuários, tais como, custo de produção até dez vezes inferior ao de fontes superficiais, áreas de captação e proteção menores, curto prazo de construção da obra, livres de evaporação, dentre outros (FREIRE *et al.*, 1998). Além disso, o armazenamento de longo prazo e a filtragem pela zona não saturada geralmente melhora a qualidade da água. Outros aspectos que incentivam a perfuração de poços é o baixo custo para construção em relação à construção de açude e as menores distâncias para a adução (SAHUQUILLO; LLURIA, 2002).

Os poços construídos, principalmente em regiões metropolitanas apresentam impactos decorrentes do crescimento desordenado da exploração e da diminuição da recarga, deixando-os vulneráveis à ação de diversos fatores como: a intrusão salina e a subsidência do solo. Em consequência disto, é necessário a contínua implementação e execução de políticas e planos de recursos hídricos que priorizem a participação da sociedade e o uso mais racional e sustentável da água subterrânea (COSTA; FEITOSA, 2007). Várias cidades brasileiras usam demasiadamente a água subterrânea, tais como: Natal, Maceió, Recife, sendo que nesta última, em alguns locais a perfuração de poços não é mais permitida (FREIRE, 2002). O estado do Rio Grande do Sul proíbe o uso de água de fontes alternativas nas zonas servidas por rede gerais, tendo em vista problemas relacionados à saúde pública, ambientais e de comprometimento da manutenção e ampliação da rede de saneamento básico, o que vem resultando em diversas ações das companhias de água solicitando os tribunais para o fechamento de poços (VIEGAS, 2007).

O monitoramento dos níveis de água e da descarga dos poços pode prover conhecimento para operações mais adequadas de sistemas de bombeamento e fornecer subsídios imprescindíveis para os modelos de fluxo, os quais são ferramentas fundamentais para a gestão sustentável de um aquífero (COSTA; FEITOSA, 2007). Um melhor conhecimento sobre os poços combinado com políticas públicas de gestão efetiva, das quais a outorga é componente fundamental, é, e será cada vez mais, essencial para o uso sustentável deste manancial que, apesar de oferecer relativa baixa vazão no Ceará, pode complementar a

matriz hídrica do Estado e fornecer uma maior garantia para o abastecimento humano, principalmente nas comunidades rurais mais isoladas.

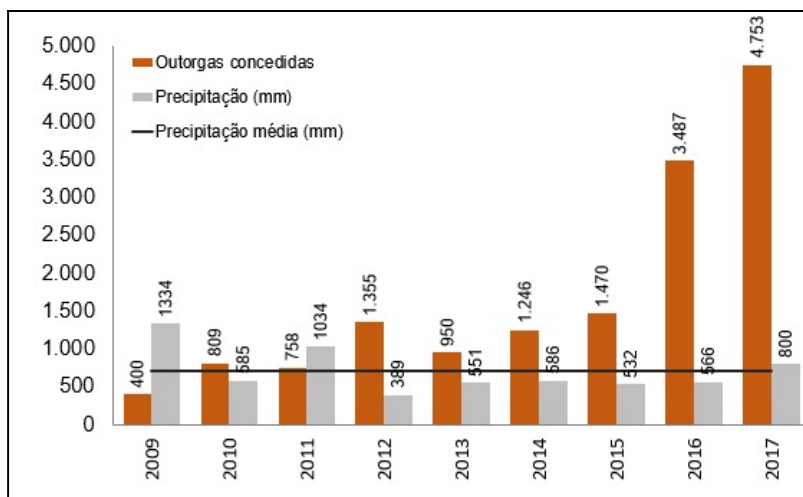
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

2.4.1 Seca e outorga

O presente trabalho estudou as tipologias de oferta hídrica e as alterações de demandas de água no intervalo de 2009 e 2017, no estado do Ceará. Neste período ocorreu a transição de um período de chuvas acima da média (2009 – 1334 mm; 2011 - 1034 mm), onde os reservatórios apresentaram capacidade de 70,3%, para um período de estiagem prolongada, cujos índices pluviométricos foram inferiores à média de 800 mm, com exceção do ano de 2017 (CPRM, 2014). Entre 2009 e 2017 houve um aumento no número de concessões de outorgas passando de 400 para 4.753, representando um incremento de 1200% (Figura 1). Em 2017, dos 4.753 processos de outorgas, 3.290 foram referentes a fontes subterrâneas (poço tubulares, poço amazonas e fontes) e 1.463 a fontes superficiais (açudes, rios, riachos, lagoas) (COGERH, 2017a). Outro aspecto a considerar é que, dentre os 3.290 processos de outorgas para fontes subterrâneas, 485 consideraram o uso de bateria de poços, acumulando adicionalmente 1.468 poços cadastrados, totalizando 4.758 poços.

O aumento nas solicitações dos processos de outorga, principalmente nos anos de 2016 e 2017 pode estar relacionado ao período de estiagem prolongado, tendo em vista que, o usuário requerente queria garantir a concessão do direito de uso dos recursos hídricos em relação aos demais usuários não regularizados.

Figura 1 – Histórico dos processos de outorga e da precipitação no Ceará (2009 a 2017)

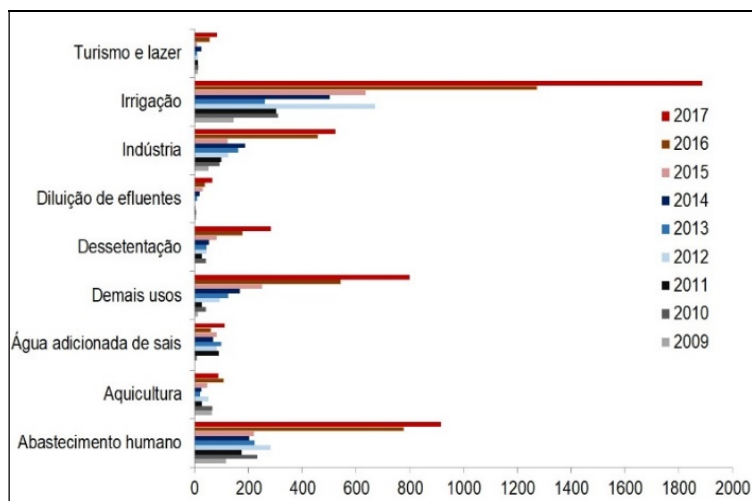


Fonte: elaborado com dados da Cogerh (2017).

Dentre as diversas categorias de uso da água bruta no estado do Ceará destaca-se a irrigação e abastecimento humano (Gráfico 1). As demais concessões: indústria, demais usos, aquicultura, dessedentação animal, turismo e lazer, água adicionada de sais e diluição de efluentes apresentam menores volumes outorgados (COGERH, 2017).

Apesar do aumento no número dos processos de outorga em 2016 e 2017, ocorreu a redução da vazão outorgada (Gráfico 2), principalmente no que se refere à demanda para irrigação, quando comparado ao ano de 2011. Assim, pressupõe-se que para muitos processos referentes à irrigação, as solicitações foram negadas, com base nos usos prioritários, decreto estadual N° 31.077, e na resolução CONERH N° 03/2015.

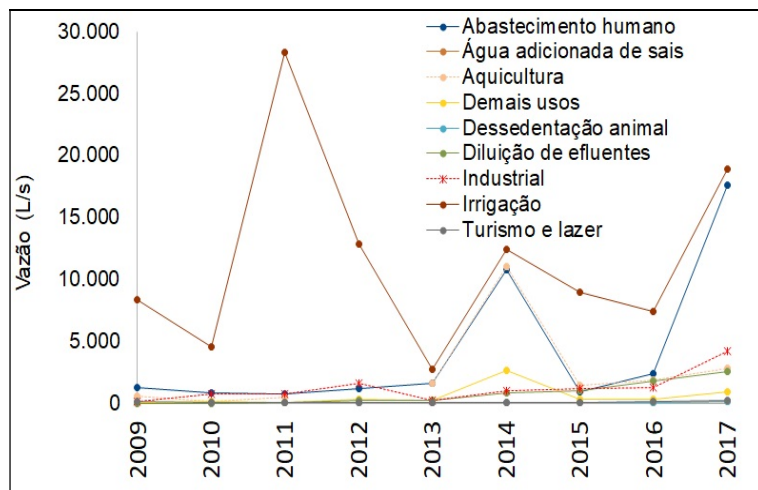
Gráfico 1 - Processos de outorga conforme as categorias de uso (2009 a 2017)



Fonte: elaborado com dados da Cogerh (2017).

Gráfico 2 – Histórico da vazão outorgada, conforme a categoria de uso de 2009 a

2017

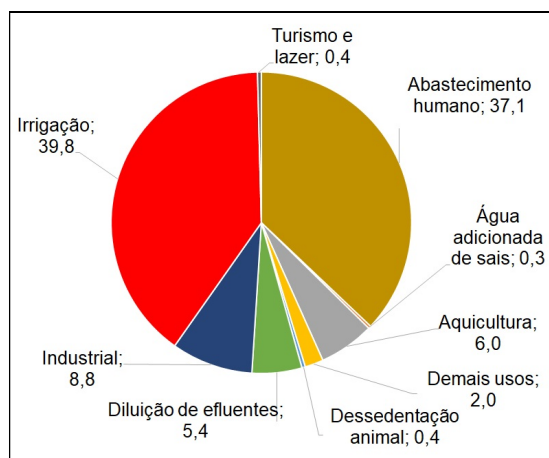


Fonte: elaborado com dados da Cogerh (2017).

O principal uso para a vazão outorgada em 2017 foi a irrigação, representando 39,8%, seguido pelo abastecimento humano, representando 37,1% do volume outorgado (Gráfico 3). Embora a irrigação possua uma tarifa menor (0,002 R\$/m³)(Tabela 1), já que o Ceará utiliza o conceito de cobrança subsidiada, ou seja, determinadas categorias pagam mais caro para ter a concessão, conforme estabelece o Decreto 32.422/2017 (CEARA, 2017). As estimativas apresentadas na Tabela 1, não consideram os custos com adução. Dentre as categorias de usos, a indústria e água adicionada de sais, apresentam as tarifas mais elevadas.

Em relação à outorga para diluição de efluentes, que representou 5,4% da vazão outorgada em 2017, os valores delineiam a necessidade de se avançar na disposição adequada dos efluentes no Estado, de modo que, o esgoto tratado atenda ao padrão estabelecido. Ao contrário do que acontece na Alemanha, onde a cobrança pelo uso das águas subterrâneas é mais onerosa que a superficial (FREIRE, 2002), não existe diferença de valores cobrados entre captações superficial ou subterrânea no Ceará. No entanto, considero mais coesa, a tarifa maior para águas subterrâneas, tendo em vista, a melhor qualidade da água, principalmente nas zonas rurais, e devido ao elevado tempo para recarga dos aquíferos subterrâneos.

Gráfico 3 - Distribuição da vazão outorgada por categoria de usos em 2017



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 1 – Vazão outorgada e custo de água em 2017

Categoria de usos	Vazão (L.s ⁻¹)	R\$/m ³	Vazão x R\$
Industrial	4.177	0,693	12.220,19
Abastecimento humano	17.633	0,159	2.803,77
Aquicultura	2.835	0,057	161,60
Demais usos	948	0,159	150,78
Água adicionada de sais	134	0,693	93,19
Irrigação	18.941	0,002	37,88
Dessedentação animal	174		
Diluição de efluentes	2.553		
Turismo e lazer	195		

Fonte: elaborado pelo autor.

2.4.2 Outorga por tipologia de fonte

Analisando-se as outorgas realizadas no período de 2009 a 2017, verifica-se que as solicitações para captações subterrâneas foram superiores na maioria dos anos (Gráfico 4A). No entanto, com relação à vazão outorgada, o aporte predominante (73%) em 2017 foi proveniente ainda de fontes superficiais: açudes, canais, rios, lagoas (Gráfico 4B). Destaca-se que a outorga para captações subterrâneas aumentou em 2017, em consequência da escassez hídrica das fontes superficiais.

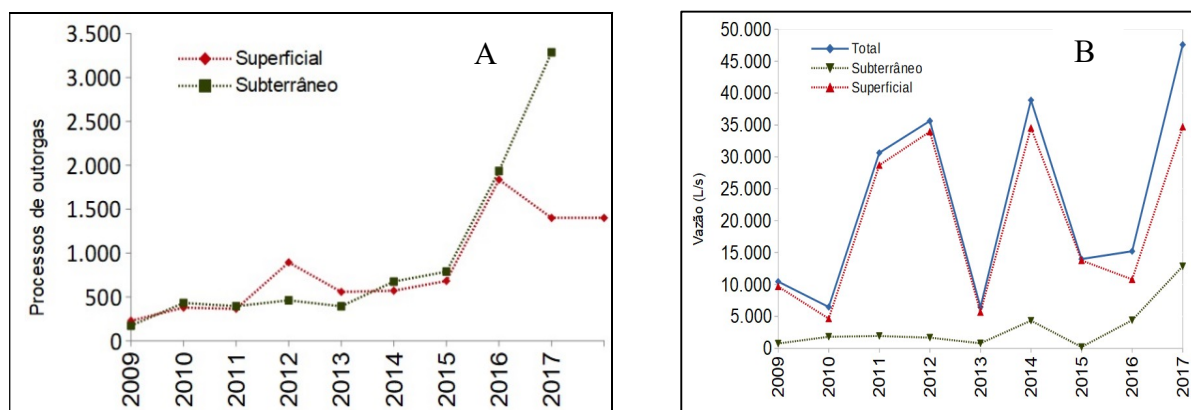
Do total de outorgas solicitadas em 2009 para abastecimento humano nas sedes municipais, captados pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CACECE) e pelos Sistemas Autônomos de Água e Esgoto (SAAE), 100% foram provenientes de fontes superficiais. Contudo, em 2017 em média 54% das sedes, dos 127 municípios com outorgas, foram abastecidas por fontes subterrâneas (poços, fontes e cacimbões).

Em 2017 havia 4.753 processos de outorgas em vigência, sendo 1.463 de fontes superficiais (açudes, rios, riachos, lagoas) e 3.290 de fontes subterrâneas (poços tubulares, poços amazonas e fontes), ou seja, 69% dos processos em 2017 eram de fontes subterrâneas (Gráfico 4A), no entanto, a vazão corresponde a apenas 27% (Gráfico 4B). Em relação às fontes subterrâneas, 895 poços estavam localizados no embasamento cristalino e 2.395 na formação sedimentar (Tabela 2).

Em 2016, a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) catalogou um total de 21.473 poços no Ceará (CPRM, 2016). Confrontando os dados da CPRM com os 3.290 processos de outorgas de fontes subterrâneas em vigência na COGERH em 2017, verifica-se que muito ainda precisa ser feito para uma melhor gestão das águas subterrâneas no Estado.

A outorga é um importante instrumento de gestão de recursos hídricos, necessário para que possa haver o controle quantitativo dos usos da água, permitindo uma distribuição adequada e controlada desse recurso à sociedade, por isso, é necessário que ocorra a ampliação para todos os poços cadastrados pela CPRM. A partir dela, é possível garantir aos seus usuários o efetivo exercício dos direitos de acesso aos recursos hídricos, minimizando assim, possíveis conflitos entre diversos setores.

Gráfico 4 - Processos de outorga e de vazões outorgadas por manancial (2009 a 2017)



Fonte: elaborado pelo autor com dados da COGERH.

Tabela 2 – Classificação dos poços, conforme a vazão outorgada em 2017 do Ceará

Litologia	Quantidade de poços analisados em 2017 - vazões (L.s ⁻¹)						
	>=1	1 - 5	5 - 10	10 - 20	20 -30	30 - 40	40 - 50
Cristalino	478	358	35	15	3	4	2
Sedimentar	1229	900	149	62	15	18	22
Total	1707	1258	184	77	18	22	24

Fonte: elaborado pelo autor.

Levando em consideração a vocação hidrogeológica do embasamento cristalino, que considera vazões superiores a 5,50 L.s⁻¹ como anômalas (CIRILO *et al.*, 2007), recomenda-se revisar os processos no cristalino com vazões superiores a 5,00 L.s⁻¹. No que concerne a esse aspecto, supõem-se que pode haver erros em aproximadamente 59 processos, os quais podem estar relacionados com o teste de vazão e/ou coordenadas plotadas incorretamente. Quando se consideram todos os 895 poços localizados no cristalino, a vazão média é 2,49 L.s⁻¹ (8,96 m³.h⁻¹).

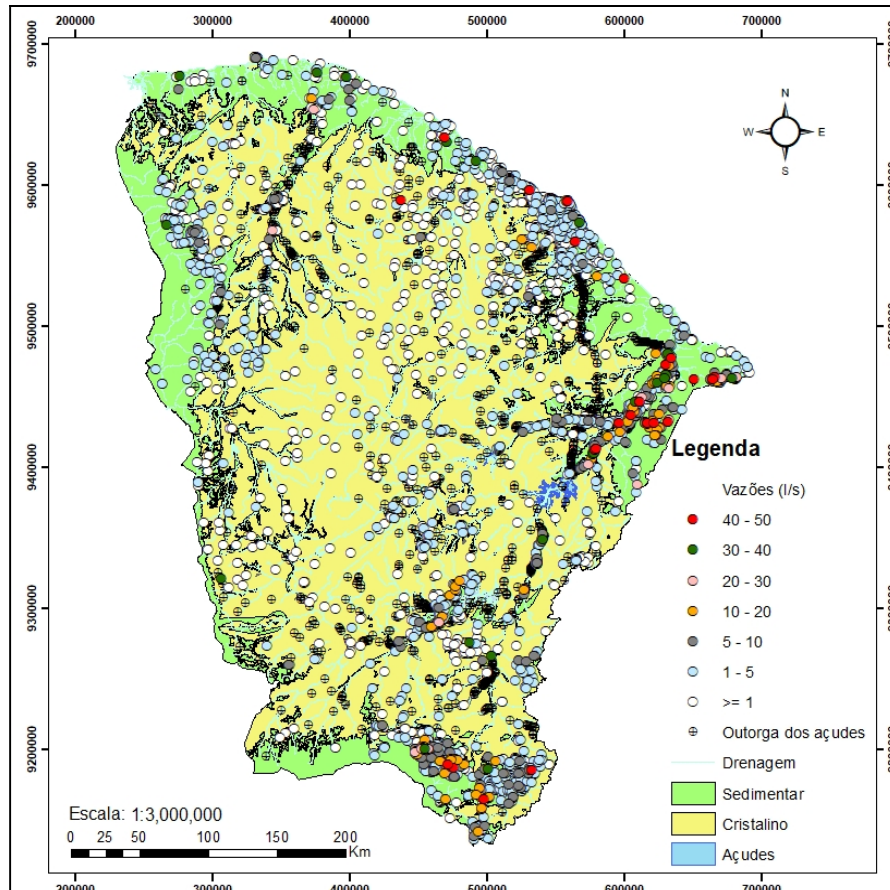
No entanto, quando se retira os valores identificados como anômalos, altera-se a vazão média para 1,20 L.s⁻¹, sendo esta uma figura mais realista. Os poços localizados na zona cristalina ou fissurais apresentam um “baixo potencial”, pois se encontram inseridos em áreas de rochas, sendo as zonas de fraturas os únicos condicionantes da ocorrência d’água. A recarga destas fraturas ocorre somente no período chuvoso, através dos rios e riachos que estão encaixados nestas estruturas (CEARÁ, 2009). Em meios fissurais é difícil determinar o comportamento do fluxo devido a questões relacionadas a: 1) como as fraturas ocorrem; 2) como elas estão conectadas; 3) quais seus comprimentos; 4) qual o tamanho do reservatório e

suas reversas, e conseqüentemente é complexo determinar a vazão de produção, ou seja, durante quanto tempo uma vazão seria garantida, sem exaurir o reservatório (CIRILO *et al.*, 2007).

Apesar de todas estas dificuldades, a principal vantagem deste manancial é a sua distribuição espacial no estado do Ceará, o que pode possibilitar o abastecimento da população rural em grande parte do seu território, considerados os devidos cuidados (CEARÁ, 2008).

Em relação aos poços localizados na litologia sedimentar (Figura 2), identificou-se vazão média de $4,27 \text{ L.s}^{-1}$ ($15,37 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$). Neste domínio existem cinco ocorrências principais: 1) na faixa costeira (poços Barreiras e Dunas); 2) na região da Chapada do Apodi (aquíferos Açú e Jandaíra); 3) na região do Cariri Cearense (principais aquíferos: Rio da Batateira, Missão Velha, Barbalha e Exu), 4) na região da Serra da Ibiapaba (Aquífero Serra Grande); 5) e na Bacia do Iguatu (CEARÁ, 2008). Destacam-se, ainda, os depósitos aluvionares sedimentares distribuídos ao longo das drenagens, principalmente os associados aos rios Banabuiú, Jaguaribe e Acaraú (CEARÁ, 2008; CPRM, 2014).

Figura 2 – Localização dos poços conforme vazão outorgada em 2017 no Ceará



Fonte: elaborado pelo autor.

2.5 CONCLUSÕES

Neste estudo, identificou-se a transição para captações de fontes subterrâneas para atendimentos do abastecimento humano no estado do Ceará, em consequência do período de estiagem, que se alonga desde 2010, as reservas de águas superficiais encontram-se com capacidade de armazenamento comprometidas, e em consequência disto, as solicitações de outorgas de fontes subterrâneas predominaram em 2017, que em relação às de fontes superficiais. No entanto, as maiores vazões outorgadas para todo o período em análise, continuaram relacionadas às águas superficiais.

Em relação às fontes subterrâneas constatou-se que em 2017, existiam 4.758 poços catalogados, 54% dedicados ao abastecimento humano dos 127 municípios com outorgas. De maneira geral, verificou-se que a vazão média concedida foi de $1,20 \text{ L.s}^{-1}$ ($4,32 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$) para os poços localizados na litologia cristalina, após exclusão dos valores anômalos, e para os 2.395 poços localizados na zona sedimentar, de $4,27 \text{ L.s}^{-1}$ ($15,37 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$).

E com relação às demandas das categorias de usos, constatou-se que, mesmo no período de escassez, a irrigação se manteve como principal consumidor ao longo dos anos, seguida do atendimento para abastecimento humano e industrial. Em relação à cobrança, como a outorga é subsidiada para abastecimento humano e irrigação, verificou-se que a industrial continuou pagando mais caro pela água e a irrigação apresenta menor custo.

REFERÊNCIAS

BRASIL. LEI Nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico**; altera as Leis nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Diário Oficial da União, 08 jan. 2010.

CAGECE - Companhia de Água e Esgoto do Ceará. **Atendimento virtual: estrutura tarifária.** Disponível em: https://www.cagece.com.br/atendimentovirtual/faces/publico/home.xhtml?page=estrutura_tarifaria. Acesso em: 12 fev. 2018.

CAMPOS, N.; STUDART, T. M. C. **Gestão de águas princípios e práticas.** Porto Alegre: ABRH 2001.

CEARÁ. LEI Nº 11.996, DE 24 DE JULHO DE 1992. **Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos – SINGERH e dá outras providências.** Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 26 jul. 1992.

CEARÁ. Cenário atual dos recursos hídricos do Ceará. **Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará.** Fortaleza: INESP, 2008.

CEARÁ. Caderno regional das bacias metropolitanas. **Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará.** Fortaleza: INESP, 2009.

CEARÁ. Governo do Estado. LEI Nº 14.844, de 28 de dezembro de 2010. **Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, institui o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos - SIGERH, e dá outras providências.** Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 30 dez. 2010.

CEARÁ. Governo do Estado. Decreto nº 31.076, de 12 de dezembro de 2012. **Regulamenta os artigos 6 a 13 da Lei Nº 14.844, de 28 de dezembro de 2010, referentes à outorga de direito de usos dos recursos hídricos e de execução de obras e serviços de interferência hídrica, cria o sistema de outorga para uso da água e de execução de obras, e dá outras providências.** Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 16 dez. 2012a.

CEARÁ. Governo do Estado. Decreto nº 31.077, de 12 de dezembro de 2012. **Regulamenta a lei Nº 14.844, de 28 de dezembro de 2010, que dispõe sobre a política estadual de recursos hídricos, no que diz respeito à conservação e à proteção das águas subterrâneas no Estado do Ceará, e dá outras providências.** Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 17 dez. 2012b.

CEARÁ. Governo do Estado. Decreto nº 32.422, de 14 de novembro de 2017. **Dispõe sobre a cobrança pelo uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos de domínio do Estado do Ceará ou da União por delegação de competência, e dá outras providências.** Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 17 nov. 2012c.

CEARÁ. Governo do Estado. Lei Nº 16.103/2016, de 02 de setembro de 2010. **Cria a Tarifa de Contingência pelo uso dos Recursos Hídricos em período de situação crítica de escassez hídrica.** Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, CE, 02 set. 2016.

CIRILO, J. A.; CABRAL, J. J. P.; FERRRIRA, J. P. C. L.; OLIVEIRA, M. J. P. M.; LEITÃO, T. E.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; GÕES, V. C. **O uso sustentável dos recursos hídricos em regiões semiáridas.** Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2007. 508 p

COGERH - Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. **Outorgas solicitadas/concedidas.** Disponível em: http://outorgasvigentes.cogerh.com.br/paginaSemValidacao/outorgaVigente/outorgas_fh.xhtml. Acesso em: 31 dez. 2017a.

COGERH - Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. **Resenha diária do monitoramento.** Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/uplo-ads/documentos/28-12-2017-resenha-diaria-do-monitoramento-2017.pdf>. Acesso em: 31 dez. 2017b.

COSTA, W. D.; FEITOSA, F. A. C. **Comportamento das bacias sedimentares da região semiárida do Nordeste brasileiro.** Serviço Geológico do Brasil – CPRM, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, 2007.

CPRM - Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais. **SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**. 2016.

DO AMARAL FILHO, J. **Desenvolvimento local e descentralização na América Latina: el caso del Estado de Ceará**, Brasil: Proyecto CEPAL/GTZ sobre De-sarrollo Económico Local y Descentralización, Santiago de Chile, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2000.

FREIRE, C. C. **Modelo de gestão para a água subterrânea**. Tese (Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 134 p. 2002.

FREIRE, C. C. Outorga e cobrança: instrumentos de gestão aplicados à água subterrânea. **CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**, 12., 2002. Anais... Maceió/AL. 2002.

FREIRE, C. C.; PEREIRA, J.S.; RIBEIRO; M. M. R.; KIRCHHEIM, R.; A importância dos recursos hídricos subterrâneos. SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE RECURSOS HÍDRICOS, 1998. **Anais...** Gramado, Porto Alegre: ABRH, 1998.

KLØVE, B.; ALA-AHO, P.; BERTRAND, G.; GURDAK, J.J.; KUPFERSBERGE, H.; KVÆRNER, J.; MUOTKA, T.; MYKRÄ, H.; PREDÄ, E.; ROSSI, P. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. **J. Hydrol.** 2014, 518, 250–266.

MARTINS, E. S. P. R.; MENESCAL, R. A.; SHERER-WARREN, M.; CARVALHO, M. S. B. S.; MELO, M. S.; PERINI, D. S.; OLIVEIRA, F. A. J. Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. SIMPÓSIO BRASI-LEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007. **Anais...** Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 969-976.

OLRGC - Office of Legislative Research and General Counsel. 2012. How Utah Water Works. An Overview of Sources, Uses, Funding, and Pricing. **Briefing Paper Utah Legislature**. 2012.

REBOUÇAS, A. C. Águas Subterrâneas. In: REBOUÇAS, A. C; BRAGA, B; TUN-DISI, J.G. (Orgs). Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: **Escrituras editora**, 2006.

SAHUQUILL, A.; LLURIA, M. **Conjunctive use as potential solution for stressed aquifers: social Constraints**. Sahuquillo.qxd 02-10-2002 21:01.

SILVA, F. J. A.; ARAÚJO, A. L. SOUZA, R. O. Águas subterrâneas no Ceará – aquíferos instalados e salinidade. **Rev. Tecnol**, Fortaleza, v. 28, n. 2, p. 136-159, dez. 2007.

TAYLOR, R.G.; SCANLON, B.; DÖLL, P.; RODELL, M.; VAN BEEK, R.; WADA, Y.; LONGUEVERGNE, L.; LEBLANC, M.; FAMIGLIETTI, J.S.; EDMUNDS, M.. Ground water and climate change. **Nat. Clim. Chang.** 2013, 3, 322–329.

VIEGAS, E. C. Nova lei restringe uso de aquíferos artesianos. **Revista do Ministério Público** (Rio Grande do Sul), v. 59, p. 9-24, 2007.

3. ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE ESTRATIFICAÇÃO E DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RESERVATÓRIO GAVIÃO (CEARÁ – BRASIL)

RESUMO – O reservatório Gavião no Estado do Ceará é considerado estratégico, já que é ponto final do sistema que atende às demandas do abastecimento de água de Fortaleza. A presente pesquisa focou na dinâmica dos processos de estratificação térmica e seus impactos na qualidade da água. Para essa avaliação, foram analisados dados climatológicos, de gestão do regime operacional e do monitoramento das variáveis ambientais. Foi observada forte estratificação da coluna d'água em vários momentos do primeiro semestre do ano, com termoclina na profundidade de 6,50 a 7,50 m abaixo da superfície. Neste período, ocorreu maior densidade de cianobactérias, com predominância da *Pseudonabaena* sp., em relação aos demais gêneros. No segundo semestre, constataram-se processos de desestratificação com maior frequência e predominância da *Planktothix* sp., que se relaciona ao menor aquecimento da camada superficial, à maior velocidade dos ventos, ao manejo operacional da transferência de água entre bacias hidrográficas e à retirada pela tomada d'água para atender à demanda da Capital e municípios adjacentes.

Palavras-chaves: Estratificação térmica. Qualidade de Água. Sazonalidade. Densidade de Cianobactéria.

ABSTRACT – The Gavião Reservoir in the state of Ceará is considered strategic because it is part of the system that meets the demand for human supply in Fortaleza. This research focused on the processes of eutrophication and stratification processes and designation of the water column. Based on the climatological data, management of the operational regime, quantitative and qualitative monitoring of the environmental variables, it was possible to identify seasonal stratification, with stratification process of the water column in the first semester, where it is observed the termination at depth of 6.50 to 7.50 m below the surface. In this season, there was higher cyanobacterial density, with predominance of *Pseudonabaena* sp., compared to other genres. In the second semester, it was verified the processes of de-stratification and predominance of the *Planktothix* sp., which is related to the lower heating of the surface layer, the higher wind speed, the operational management of water transfer between hydrographic basins and the withdrawal by the water intake to meet the demand of the Capital and adjacent municipalities.

Keywords: Thermal Stratification. Water quality. Seasonality. Cyanobacteria density.

3.1 INTRODUÇÃO

O barramento dos rios e córregos para a construção de reservatórios artificiais pode promover perda de hábitat, perturbação e introdução de espécies. Além disto, estes ecossistemas são frequentemente influenciados pela intensificação da degradação ambiental causada por atividades humanas, especialmente associadas ao aumento da densidade populacional, com consequente elevação da carga de efluentes industriais, domésticos e de áreas agrícolas (BOTELHO *et al.*, 2012). Dessa forma, a construção de reservatórios ocasiona mudanças nos processos bióticos e abióticos, resultando em alteração dos regimes hidrológico, térmico, de nutrientes, sedimentos e química da água (OLDEN; NAIMAN, 2003). Em reservatórios rasos, um conjunto complexo de fatores regula a dinâmica aquática, que é representada especialmente em região tropical pela chuva e radiação (FONSECA; BICUDO, 2008).

Em relação à interferência na qualidade de água causada pelo regime operacional de reservatório da tomada d'água, pesquisa realizada por Príncipe (2010), identificou ser necessário ampliar o conhecimento destes processos para reservatórios pequenos e com pequena capacidade de regulação, uma vez que, a maioria do conhecimento se relaciona a reservatórios de grande capacidade de regularização de vazão. Por conseguinte, é possível realizar a integração do controle operacional de reservatórios, a partir de técnicas apropriadas, para aprimorar a eficiência do manejo da qualidade da água, no sentido de minimizar os impactos negativos da eutrofização (PRINCIPE, 2010).

Outro fator que altera o comportamento hidrodinâmico é a vazão afluyente, que é responsável pelo transporte de massa na água, podendo determinar a disponibilidade de nutrientes e interferir nos processos de deposição e ressuspensão de sedimentos, assim como, no tempo de residência hidráulica (BRAUNSCHWEIG *et al.*, 2003).

A camada de mistura pode ser restrita ao epilímnio ou avançar até o hipolímnio, fazendo com que a circulação vertical, principalmente provocada pelo vento, ocorra ao longo de toda a coluna de água (ANDREOLI *et al.*, 2011). No metalímnio, encontra-se a termoclina, que corresponde ao plano que passa no ponto de inflexão do perfil térmico e cuja formação ocorre por interações entre a turbulência gerada pelo vento e o empuxo devido ao gradiente de densidade; esse processo de formação é instável mesmo quando as condições ambientais são estáveis (ANDREOLI *et al.*, 2011).

O gerenciamento da qualidade da água exige que sejam estabelecidas formas de acompanhar a variação de indicadores da qualidade da água, permitindo observar alterações nas condições de um corpo hídrico (PORTO, 1991).

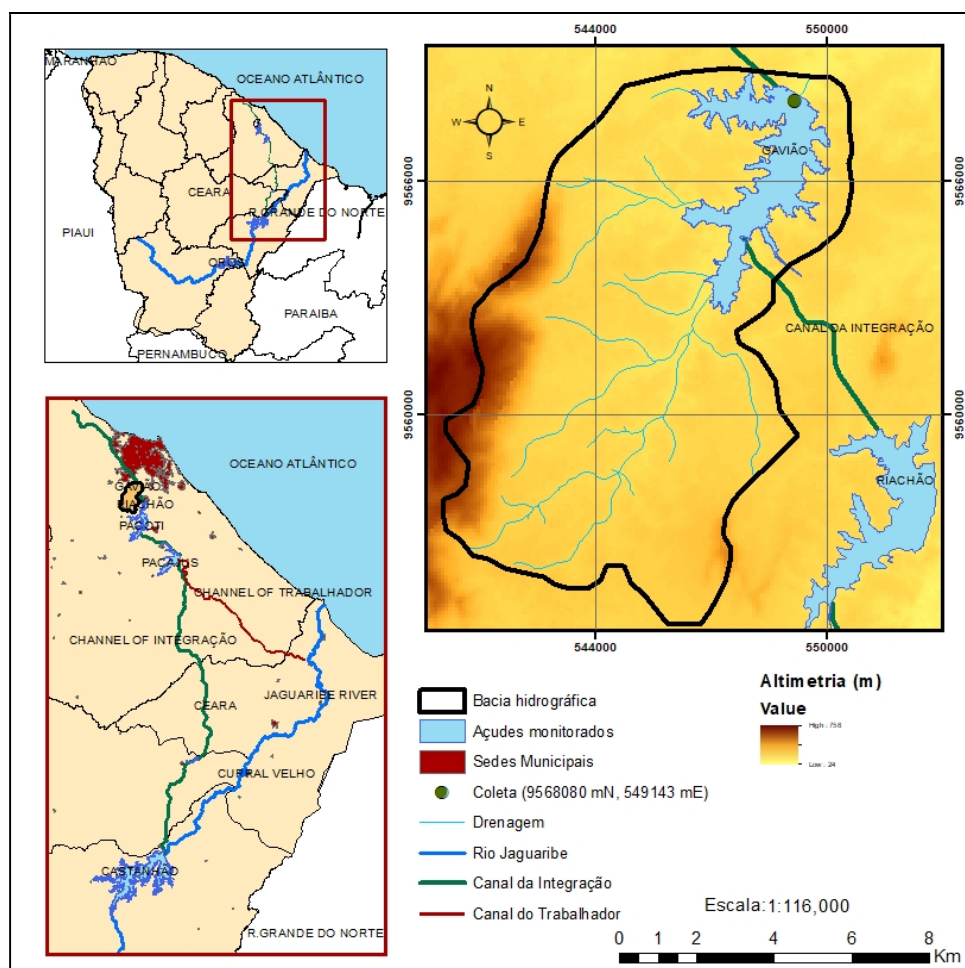
Neste contexto, a presente pesquisa visa ampliar o conhecimento dos processos de eutrofização, estratificação e desestratificação, considerando variáveis ambientais qualitativas e quantitativas, assim como, fatores climáticos da área do reservatório Gavião em relação aos processos físicos, químicos e biológicos que condicionam o processo de eutrofização. O referido reservatório, apesar de pequena capacidade de armazenamento (32,9 hm³) é de grande importância do ponto de vista operacional já que é o ponto final do macro sistema e atende à demanda urbana e industrial da região metropolitana de Fortaleza.

3.2 MATERIAIS E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

O açude Gavião foi construído no ano de 1973 pelo governo Federal e está localizado no município de Pacatuba, Bacia Hidrográfica Metropolitana, com capacidade de armazenamento de 32,9 hm³ e área da bacia hidráulica e hidrográfica de 06 e 97 Km², respectivamente. O referido reservatório integra o macrossistema composto pelos reservatórios: Castanhão, Curral Velho, Pacajus, Pacoti, Riachão, Gavião e pelo canal da Integração, canal do Trabalhador e pelo rio Jaguaribe, além de túneis e outros pequenos trechos de canais (Figura 3). Toda essa infraestrutura tem o objetivo de atender à demanda do abastecimento do município de Fortaleza e regiões circunvizinhas (SRH, 2016).

Figura 3 - Mapa de localização do açude Gavião e do ponto de coleta de água



Fonte: elaborado pelo autor.

3.2.2 Aquisição de dados

Para desenvolver o presente estudo, empregaram-se dados climatológicos, tais como: regime de chuvas, insolação e velocidade dos ventos do ano de 2016 da estação meteorológica (338002) (INMET, 2020), confrontando-os com as variáveis físico-químicas e biológicas.

Os dados do monitoramento qualitativo (Tabela 3) e quantitativo (volume) referentes ao ano de 2016 foram acessados a partir do banco de dados secundários disponibilizados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do estado do Ceará (COGERH, 2020).

As amostras de água foram coletadas a uma profundidade de 0,3 m, entre 10:00 e 11:00 horas, com intervalo mensal e na zona lacustre no ponto com coordenadas: 9568080 mN, 549143 mE (Figura 3). O ponto de amostragem dos dados era localizado próximo da captação da Companhia de Água e Esgoto do Ceará

(CAGECE). No mesmo local, horário e dia em que se coletaram as amostras, foi realizada a perfilagem da coluna de água com uso de sonda YSI 6820 multiparâmetros, a cada 0,5 m e até a profundidade de aproximadamente 11 m. A sonda era calibrada em laboratório antes do uso e os dados da perfilagem eram armazenados na sonda, e posteriormente descarregados para o computador.

Tabela 3 – Variáveis do monitoramento qualitativo do açude Gavião no ano de 2016

Parâmetros	Sigla	LQ	Método
Alcalinidade de bicarbonato (mg CaCO ₃ /L)	HCO ₃ ⁻	8,95	Titrimetria Ácido-Base (2320 B) - APHA, 201
Condutividade elétrica (mS/cm)	CE	0,002	Condutimetria (2510 B) - APHA, 2012
Cálcio (mg Ca/L)	Ca	0,40	Titrimetria com EDTA (3500-Ca B) - APHA, 2012
Cloretos (mg Cl-/L)	Cl	7,35	Argentimétrico (4500-Cl-B) - APHA, 2012
Clorofila-a (µg/L)	Cl-a	1,00	Espectrofotométrico (10200 H) - APHA, 2012
Cianobactérias (Células/mL)	Cian	-	Sedgewick-Rafter - do Standard Methods for the Examination of Water e Wastewater, 2012
Demanda química de oxigênio	DQO	20,00	Refluxo fechado/ Espectrofotometria (410.4) – EPA, 1993
Demanda biológica de oxigênio	DBO	2,00	Iodometria (5210 B) - APHA, 2012
Fósforo Total (mg P/L)	PT	0,010	Método do Persulfato (4500-P-J) e (4500-P-E) – APHA, 201
Magnésio (mg Mg/L)	Mg	0,240	Método do Cálculo (3500-Mg B) - APHA, 2012
Nitrogênio total (mg N/L)	NT	0,937	Método do Persulfato (4500-P-J) e (4500-NO ₃ -E)– APHA, 2012.
Oxigênio dissolvido (mg O ₂ /L)	OD	-	Sonda YSI 6600
pH	pH	-	Sonda YSI 6600
Potássio (mg K/L)	K	2,00	Fotometria de Emissão de Chama (3500-K-B) - APHA, 2012.
Salinidade	Sal	-	Sonda YSI 6600
Sódio (mg Na/L)	Na	2,00	Fotometria de Emissão de Chama (3500-Na-B) - APHA, 201
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	SDT	2,00	Gravimetria (2540 D) e Cálculo - APHA, 2012.
Sólidos totais (mg/L)	ST	2,00	Gravimetria (2540 B) - APHA, 2012.
Sulfatos (mg/L)	SO ₄	7,68	Turbidimetria – (4500-SO ₄ ²⁻ E) - APHA, 2012.
Temperatura da água (°C)	T _{H2O}	-	Sonda YSI 6600
Turbidez (NTU)	Turb	0,1	Nefelométrico (2130B) - APHA, 2012

Fonte: COGERH, 2016.

3.2.3 Análise estatística dos dados

Foram aplicadas técnicas da estatística descritiva de forma a observar o comportamento e descrever os dados coletados. Os dados foram inicialmente organizados em gráficos e tabelas de forma a facilitar interpretação e a descrição do fenômeno. Logo após, efetuou-se a normalização dos dados e aplicou-se a análise da componente principal (ACP). Esta técnica foi utilizada para geração de agrupamento de informações, transformando linearmente um conjunto original de variáveis correlacionadas entre si, num conjunto

substancialmente menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto original (HONGYU *et al.*, 2016). O procedimento estatístico foi realizado com uso do programa BioEstat 5.

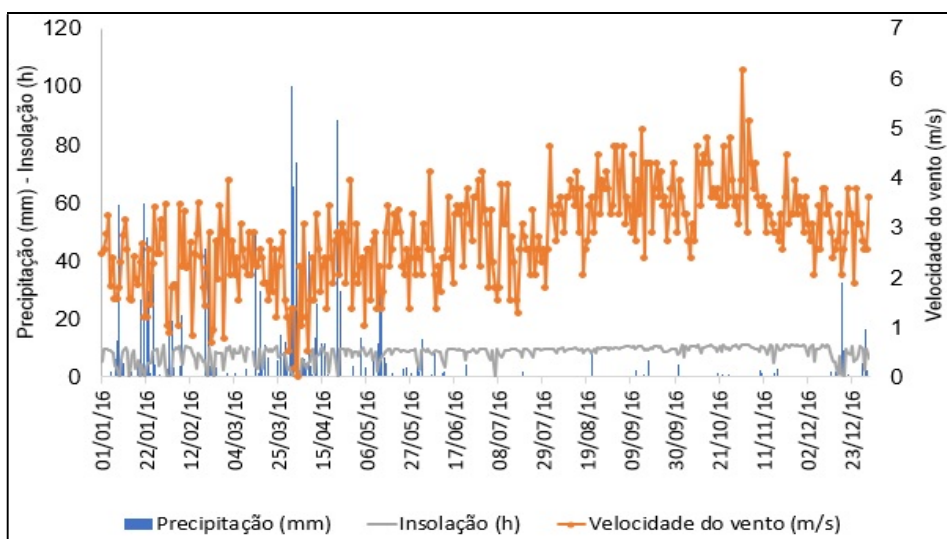
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.3.1 Caracterização hidrometeorológica

A recarga hídrica do açude Gavião, assim como, da maioria dos reservatórios dos estados do Nordeste é dependente da precipitação concentrada no primeiro semestre (SILANS, 2003). Outra característica importante, quando se comparado à maioria dos sistemas manejados no Ceará, é o aporte de água ao reservatório através da transposição de água de outras bacias hidrográficas, com adução a partir de canais e rios proveniente de outros reservatórios à montante (COGERH, 2016). A vazão média que passa no canal da Integração, a montante do açude Gavião é de $9,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, principalmente no segundo semestre; já que a recarga do reservatório no primeiro semestre (período de chuvas) reduz a necessidade de adução aos reservatórios a jusante (COGERH, 2020).

Conforme apresentado na Figura 4, a insolação na área em estudo apresenta depressões mais significativas na estação de chuvas, haja vista que, neste período o sol fica frequentemente encoberto por nuvens, diminuindo a insolação média disponível para crescimento fitoplactônico e aquecimento da camada superior do manancial no período. A frequência de chuvas foi também maior no primeiro semestre, apresentando eventos de chuvas de até 100 mm. Observa-se ainda que, a velocidade média dos ventos aumentaram no segundo semestre passando de cerca de 2 para quase $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, com um pico de aproximadamente $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ no mês de novembro.

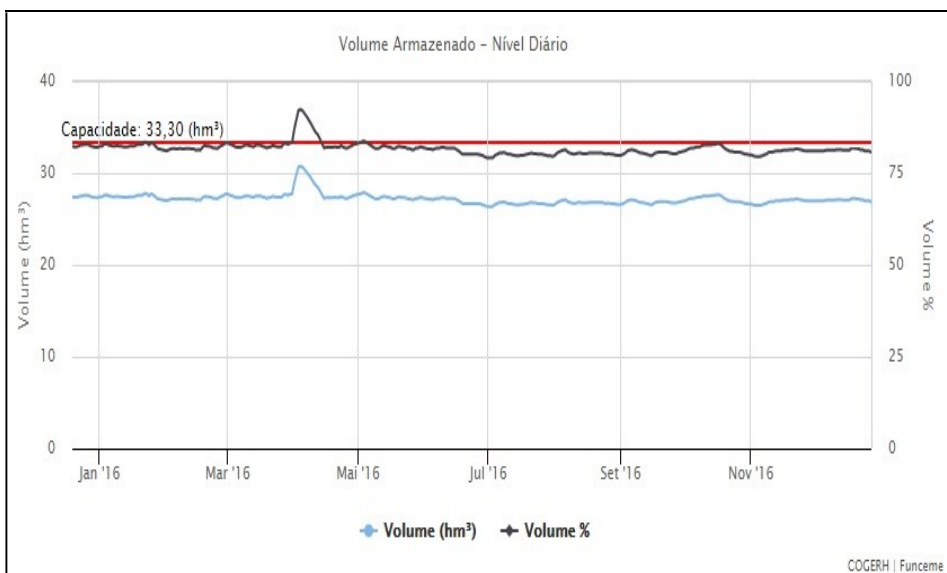
Figura 4 – Dados de precipitação, velocidade do vento e insolação do ano de 2016



Fonte: elaborado com dados do INMET (2020).

Em consequência das chuvas na região, o açude atingiu a cota de sangria (36 m) no mês de abril (Figura 5). No restante do período, o controle operacional manteve o volume reservado praticamente estável em 30,49 hm³ na cota 34,5 m com objetivo de fornecer água por gravidade para a estação de tratamento de água do Gavião (COGERH, 2020). O aporte de água pelo canal da integração na estação de chuvas é reduzido ou mesmo paralisado, intentando-se economizar esse recurso hídrico para o semestre subsequente.

Figura 5 – Nível volumétrico do açude Gavião do ano de 2016



Fonte: Cogeh (2016).

3.3.2 Processo de estratificação

Identificou-se uma predominância de estratificação térmica e química no primeiro semestre pela avaliação dos parâmetros temperatura (Figura 6A), oxigênio dissolvido (Figura 6B) e pH (Figura 6C), principalmente devido à maior variação na densidade da água em diferentes profundidades e menor velocidade dos ventos. Já a partir do mês de maio até dezembro, a coluna d'água demonstrou uma tendência a desestratificar. Na camada superficial, a temperatura apresentou uma tendência de resfriamento gradual de 28,80 °C no mês de maio a 27,60 °C no mês de junho, julho e outubro (período que ocorre a desestratificação), voltando a aumentar em seguida retornando a 28,8 °C em dezembro.

É comum ocorrer à redução da vazão afluyente pelo macro sistema para atender à demanda da estação de tratamento de água da CAGECE, em consequência do período de chuvas, na área da bacia hidrográfica do açude Gavião, cujo volume atingiu a máxima capacidade em abril de 2016 (COGERH, 2016). A redução da transposição de água entre as bacias hidrográficas, concomitantemente com a menor velocidade dos ventos na área de estudo, são os fatores apontados para manter o perfil clinogrado nos quatro primeiros meses do primeiro semestre, que é considerado o período de maior precipitação na região (Figura 6A, 6B, 6C).

Mesmo em baixas latitudes onde as diferenças sazonais são menos intensas que em climas temperados, os ecossistemas aquáticos experimentam regimes térmicos que variam de acordo com as taxas diárias e anuais (OLDEN; NAIMAN, 2010) como foi observado nesta pesquisa. Em regiões tropicais, como as do Nordeste do Brasil, as variáveis climáticas sugerem que a maioria dos reservatórios de baixa latitude, se não todos, apresentam estratificação sazonal (WINTON *et al.*, 2019). Já foi comprovado por diversas pesquisas que fatores climáticos como insolação, precipitação e vento contribuem para alterações nos processos térmicos em reservatórios (SOUSA, 2014; FERREIRA; CUNHA, 2013).

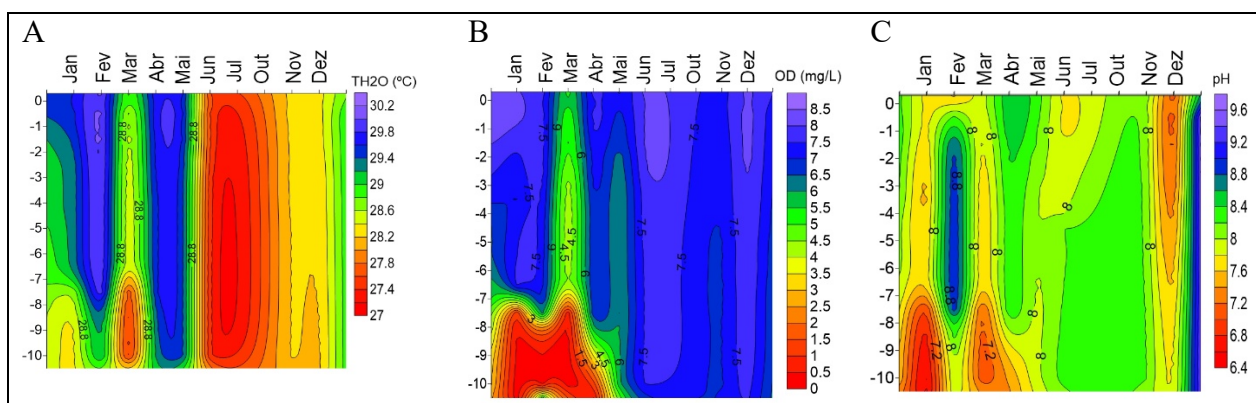
Pode-se visualizar no perfil de oxigênio dissolvido (Figura 6B) que durante o período de janeiro a abril o oxigênio atingiu os menores valores (aproximadamente 1,5 mg.L⁻¹) no hipolimínio. No mês de março o oxigênio atingiu o menor valor na superfície (aproximadamente 5,5 mg.L⁻¹), mesmo mês de maior precipitação na área em estudo (Figura 4) e seguindo um padrão gráfico similar ao da temperatura para o mesmo período. O perfil ortogrado presente no segundo semestre pode estar relacionado principalmente a dois fatores: 1) turbulência ocasionada pela transposição de águas pelo macrossistema; 2) maior velocidade dos ventos. Depreende-se dos fatores supracitados, que a desestratificação do reservatório no segundo semestre, ocasionou o aumento da turbidez, cuja média aumentou de 7,75 UNT no

primeiro semestre para 10,81 UNT no segundo semestre (Tabela 4). Em relação aos reservatórios artificiais, como é o caso do açude Gavião, estes podem ter uma estratificação térmica mais variável do que os lagos naturais, devido ao sistema de gestão operacional pela tomada de água a jusante ou pela recepção de água de outros reservatórios a montante (HARRIS; BAXTER, 1996; HAN, 2000).

A proliferação das bactérias aeróbicas e facultativas decompositoras de matéria orgânica provoca o rápido consumo de oxigênio. Caso a produção do oxigênio pelo fitoplâncton não consiga suprir essa demanda, os níveis de oxigênio são reduzidos causando impactos diretos nos seres aquáticos aeróbios, principalmente os de vida superior, que desaparecem, empobrecendo a biodiversidade local (BÁRBARA *et al.*, 2009).

O pH também demonstrou a tendência de estratificação nos primeiros meses do ano e de desestratificação no final do ano. O pH na superfície variou em torno de 8,2 demonstrando o consumo de CO₂ pelos produtores primários, enquanto que nas camadas mais profundas o valor do pH apresentou valores de até 7,2 no mês de janeiro e março, indicando a possibilidade de ambientes anaeróbios e a geração de CO₂ pelos organismos decompositores (SILVA *et al.*, 2008). E, além disto, a hipóxia ou anoxia no hipolímnio promove a formação de gases como amônia, metano, sulfetos. Quando ocorre a mistura da coluna de água, além destes gases, ocorre a liberação de nutrientes (fósforo, ferro) e ressuspensão de sedimentos, que retorna para a zona eufótica no momento da desestratificação, aumentando a turbidez (ARAUJO *et al.*, 2008) como foi o caso do reservatório do Gavião.

Figure 6 – Perfil da coluna de água: temperatura (A), oxigênio dissolvido (B) e pH (C) no ano de 2016



Fonte: elaborado pelo autor.

3.3.3 Processo de eutrofização

Depreende-se da estatística descritiva apresentada na Tabela 4, que ocorreu maior concentração dos parâmetros: Ca, Cl, Cl-a, Cian, DBO, DQO, OD, pH, Na, SO₄ e TH2O no primeiro semestre enquanto as demais variáveis: HCO₃-, CE, Mg, PT, NT, K, Sal, SDT, ST e Turb foram mais elevadas no segundo semestre do ano.

Com base nos perfis de temperatura apresentados anteriormente, estima-se que a maior concentração de fósforo e nitrogênio no segundo semestre pode estar relacionado com o aporte da transposição e ciclagem interna em consequência do processo de desestratificação. A modelagem da recirculação interna do fósforo (P) no lago Okeechobee, quantificou que os fluxos internos de P excedem as entradas externas em média por um fator de 2,6. Neste caso, as medidas mitigadoras relacionadas ao manejo na bacia hidrográfica, não será eficiente para melhorar a qualidade da água do lago (POLLMAN; JAMES, 2011). Valores médio de fósforo total (0,08 e 0,09 mg.L⁻¹) e de clorofila-a (54 e 51 µg.L⁻¹) para ambos os períodos, classificam o reservatório como hipereutrófico para ambos os períodos (resultado do IET: 68), conforme Lamparelli (2004), equação 1.

$$\text{IET: } \frac{((10^{(6-(1,77-0,42*(\ln(PT*1000)/\ln(2))))})+(10^{(6-((0,92-0,34*(\ln(Cl-a))/\ln(2))))}))/2}{\text{Equação 1}}$$

Em relação à densidade de cianobactérias em água natural, preconiza-se para dessedentação animal valores inferiores 50.000 células.mL⁻¹ (classe 2). Para esta mesma classe, recomenda-se tratamento convencional e, para valores superiores a 100.000 células.mL⁻¹ (classe 3), é recomendado tratamento avançado para abastecimento humano (Brasil, 2005). Podem-se visualizar na Tabela 4, que os valores médios de cianobactérias registrados no primeiro (217.783 células.mL⁻¹) e segundo semestre (144.596 células.mL⁻¹) foram superiores aos advertidos anteriormente. Neste caso, ocorreu predominância cianobactérias no período de águas estratificas.

Tabela 4 – Análise descritiva das variáveis físico-químicas e biológicas

Parâmetros	Primeiro semestre			Segundo semestre		
	Média	Coefficiente de variação	Desvio padrão	Média	Coefficiente de variação	Desvio padrão
HCO ₃ ⁻	108,64	8,66	9,41	115,70	9,59	11,09
CE	0,51	6,50	0,03	0,55	4,50	0,02
Ca	12,58	15,82	1,99	10,51	87,43	9,19
Cl	104,69	12,83	13,44	97,37	4,85	4,73
Cl-a	54,47	45,53	24,80	51,05	26,08	13,31
Cian	217.783	72,52	157.936	144.596	103,36	149.453
DBO	8,02	36,67	2,94	5,39	105,88	5,71
DQO	41,54	11,86	4,93	32,66	33,03	10,79
PT	0,08	51,39	0,04	0,09	72,12	0,06
Mg	17,67	3,81	0,67	18,72	12,84	2,40
NT	1,47	53,53	0,79	1,62	21,18	0,34
OD	7,31	13,94	1,02	7,24	9,94	0,72
pH	8,43	4,05	0,34	8,42	2,81	0,24
K	11,71	16,41	1,92	14,50	17,31	2,51
Sal	0,26	4,02	0,01	0,28	7,54	0,02
Na	70,83	8,53	6,04	67,67	11,77	7,97
SDT	304,33	6,26	19,06	323,45	11,03	35,66
ST	314,42	7,04	22,13	334,00	9,67	32,29
SO ₄	8,88	59,81	5,31	8,02	77,21	6,20
TH ₂ O	29,53	1,40	0,41	28,13	1,87	0,53
Turb	7,75	64,01	4,96	10,81	36,79	3,98

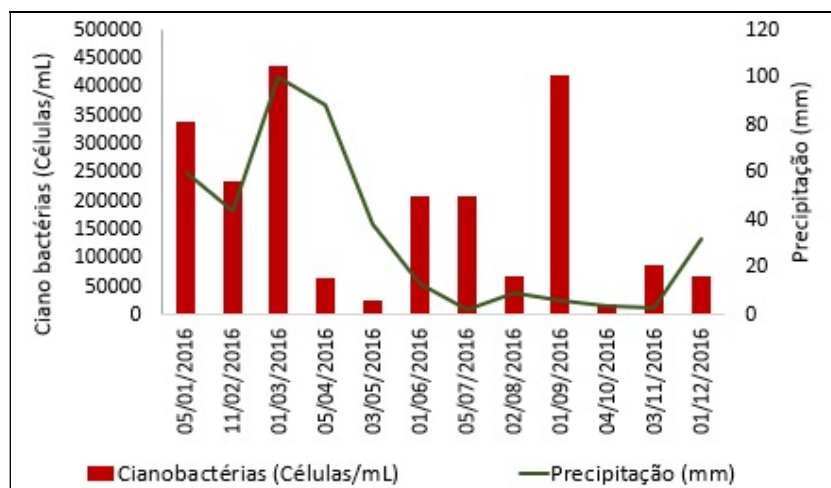
Fonte: elaborado pelo autor.

Visualiza-se no Gráfico 5, que nos meses de abril e maio as florações de cianobactérias foram reduzidas. Esse evento pode ser ter sido ocasionado pela intensa precipitação na área em estudo. Já no segundo semestre, houve em média uma menor quantidade de cianobactérias com exceção do mês de setembro quando foi observada uma floração similar à do mês de março. A instabilidade e a competição entre os organismos fitoplanctônicos prejudicaram o estabelecimento de florações, levando a mudanças na composição e biomassa da comunidade de cianobactéria em reservatórios tropicais (DANTAS *et al.*, 2011; HUANG *et al.*, 2014). Além desses fatores, a distribuição e proliferação de cianobactérias são comumente influenciados pela concentração e proporção de nitrogênio e fósforo, temperatura, oxigênio, pH, herbivoria e estabilidade de coluna de água, que pode atuar sinergicamente ou de forma antagônica (PAERL, 2008).

Os padrões temporais de distribuição fitoplanctônica são influenciados por fatores ambientais a favor do aumento ou diminuição da diversidade, culminando na dominância de

determinadas espécies de cianobactérias (RANGEL *et al.*, 2009). Neste período, as condições favoráveis de estabilidade da coluna d'água, de temperatura, de pH, de concentração de nutrientes proporcionaram a proliferação demasiada de Cianobactérias (SALVO; ISAAC, 2002).

Gráfico 5 – Densidade de cianobactéria e precipitação na área em estudo ao longo do ano de 2016



Fonte: elaborado pelo autor.

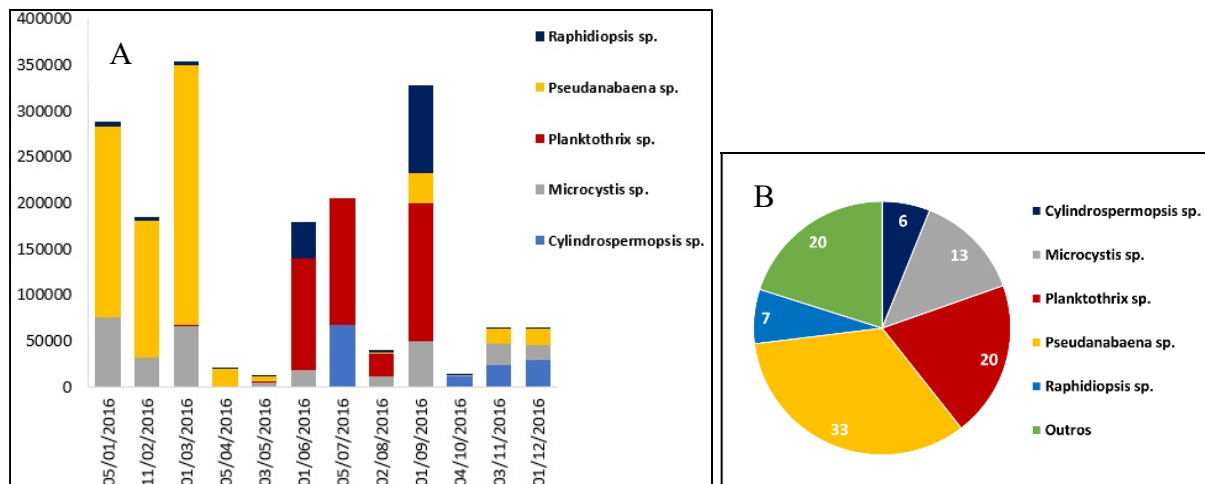
Conforme a Gráfico 6, observa-se a codominância dos gêneros de cianobactérias *Pseudanabaena* sp. (33%), *Planktothrix* sp. (20%), *Microcystis* sp. (13%), *Raphidiopsis* sp. (7%), *Cylindrospermopsis* sp. (6%), em relação à densidade dos demais fitoplânctons (20%). No período de chuvas (primeiro semestre), em que a coluna de água apresentou processo de estratificação, ocorreu a predominância de *Pseudanabaena* sp. No segundo semestre, em águas misturadas, predominou a *Planktothrix* sp. As elevadas densidades identificadas de cianobactéria (>100.000 células.mL⁻¹) foram compostas por gêneros potencialmente tóxicas, e estabelecem potencial risco para a saúde pública (BELLÉM, 2011).

As cianotoxinas podem ser classificadas de acordo com seu mecanismo de ação em: (i) hepatotóxicas, que são as microcistina e nodularinas; (ii) neurotóxicas, representadas pela anatoxina-a, homocianotoxina-a, anatoxina-a (s) e um grande grupo chamado saxitoxinas; (iii) citotóxica, a cilindrospermopsina; e (iv) as dermatotoxinas que são as toxinas lipopolissacarídicas, comuns a várias espécies de cianobactérias (VAN APELDOORN *et al.*, 2007). O tipo mais comum de intoxicação envolvendo cianobactérias é ocasionado por hepatotoxinas, que apresentam uma ação mais lenta, podendo causar morte num intervalo de poucas horas a poucos dias (SOARES, 2009; MOLICA; AZEVEDO, 2009).

Os gêneros *Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Nodularia* sp., *Oscillatoria* sp., *Nostoc* sp., *Cylindrospermopsis* sp., *Planktothrix* sp., *Radiocystis* sp. e *Arthrospira* sp. foram

identificadas como produtoras dessas hepatotoxinas (MERILUOTO; CODD, 2005; MOLICA; AZEVEDO, 2009). O predomínio das Cianobactéria em reservatórios tropicais eutróficos deve-se a um conjunto de fatores, como elevadas temperaturas, baixa precipitação, pH alcalino e altas concentrações de nutrientes, principalmente N e P (BOUVY *et al.*, 2000; CHELLAPPA; COSTA, 2003).

Gráfico 6 – Gêneros de cianobactérias predominantes no açude Gavião no ano de 2016



Fonte: elaborado pelo autor.

Existe diversos estudos sobre a dinâmica de variação das populações de cianobactérias (COSTA *et al.*, 2009; MOLISANI *et al.*, 2010; DANTAS *et al.*, 2011; LIRA *et al.*, 2011). As gêneros que fixam nitrogênio atmosférico, como *Dolichospermum sp.*, *Aphanizomenon sp.* e *Cylindrospermopsis sp.*, usualmente dominam ambientes com águas pobres em nutrientes. *Microcystis sp.* é dominante em lagos eutróficos com grande estabilidade térmica, e as oscilatórias e as filamentosas como *Pseudanabaena sp.* e *Planktothrix sp.* dominam o plâncton de ambientes polimíticos eutróficos, que contam com elevada turbidez e baixa penetração de luz (TUNDISI; T. TUNDISI, 2008). Gêneros coloniais, como *Microcystis*, *Anabaena* e *Aphanizomenon* formam colônias contendo células em forma de cocos e filamentos, gerando espumas na superfície. Muitas delas possuem vesículas de gás, sendo uma vantagem competitiva durante águas calmas ou em períodos de baixa intensidade luminosa, porém as mesmas não conseguem se estabelecerem ambientes com maior turbulência na coluna d'água (BLOTTIERE *et al.*, 2016).

3.3.4 Avaliação multivariada dos dados

No total foram vinte e um parâmetros utilizados, cujos resultados da ACP explicam 90% e 100% da variação para o primeiro e segundo semestre, respectivamente (Tabela 5). As cargas dos fatores podem ser classificadas como muito significante, significante e insignificante correspondendo aos valores absolutos iguais a $> 0,75$; $0,75 - 0,50$; $< 0,50$, respectivamente (HAIR, 2005). Em relação ao primeiro semestre (Tabela 5), o CP1 apresenta convergência positiva das variáveis: Sal, CE, Cian, pH, T_{H_2O} ; e negativa: SO_4 , Cl-a, PT (explica 27% da variância). O CP2 tem relação positiva dos parâmetros: HCO_3^- , Cl; e negativa: DBO, Mg, OD (explica 24% da variância). O CP3 inclui relação positiva: ST, SDT, DQO; e negativa: NT (explica 20% da variância). O CP4 compreende variáveis positivas: Turb, K; e negativa: Ca e Na (explica 19% da variância).

Com relação a CP1, identificou-se que a densidade de cianobactérias se mostrou correlacionada principalmente com a salinidade e temperatura, o que culminou com maior densidade celular. Resultados semelhantes a esse, foi constatado por Fonseca *et al.* (2010), ao pesquisar vários mananciais no estado de São Paulo.

A correlação negativa entre cianobactérias e Clorofila-a pode ser devido ao fato que este estudo considerou apenas a comunidade de cianobactérias, no entanto, outros grupos de fitoplânctons estavam presentes nas amostras e também possuem estes pigmentos. Resultados semelhantes a este foi constatado por Lira *et al.* (2011), ao estudar reservatórios no estado de Pernambuco. Outro fator que se correlaciona com o aumento de densidade fitoplanctônica (CP1) é o pH, tendo em vista, que a atividade fotossintética reduz a disponibilidade de CO_2 , com consequente aumento do pH (PALMA *et al.*, 2010). Uma correlação positiva entre o pH e o fitoplâncton também foi encontrada em pesquisas realizadas em reservatório do estado de São Paulo (CUNHA; CALIJURI, 2011).

Em referência a CP3, os resultados refletem o comportamento da concentração dos ST e SDT que se associam com o aumento de DQO, provavelmente ao arraste de matéria orgânica alóctone (SANTI, 2013). Esse resultado pode refletir o aumento da poluição no local amostrado (ARAUJO *et al.*, 2008).

No que concerne a CP4, os cátions: Ca e Na que tem maior concentração no primeiro semestre, e concatena-se negativamente a Turb e K, que apresenta maior concentração no semestre posterior, conforme apresentado na análise descritiva (Tabela 5). Os referidos íons conferem dureza na água (SILVA *et al.*, 2017). E as principais fontes podem ser áreas de agricultura, efluentes e/ou proveniente da bacia hidrográfica, local onde se constata

processos antrópicos, ocasionados pelo uso desordenado das áreas (ISLAM *et al.*, 1997). A maior concentração de sulfatos presentes na água do reservatório na primeira estação pode ser proveniente de processos naturais do solo, como intemperismo das rochas sedimentares e a mudanças na intensidade desses processos; e insumos antropogênicos, ou seja, fertilizantes à base de enxofre (S) (GRASBY *et al.*, 1997).

No segundo semestre, conforme a Tabela 5, o CP1 apresenta correlação positiva das variáveis: HCO_3^- , CE, Sal, Na, SDT, ST, $T_{\text{H}_2\text{O}}$; e negativa: Cian e Turb, (explica 34% da variância). O CP2 tem participação positiva dos parâmetros: Ca, Cl, DQO, NT, K, SO_4 ; e negativa: Cl-a, (explica 30% da variância). O CP3 inclui reciprocidade positiva: DBO, CE; e negativa: PT, Mg (explica 22% da variância). O CP4 compreende as variáveis positivas: OD; e negativa: pH (explica 14% da variância). Ainda com relação a CP1, verificou-se que a $T_{\text{H}_2\text{O}}$ se correlacionou negativamente com a produtividade primária. Com referência ao aumento da concentração das demais variáveis ST, SDT, Sal, CE, HCO_3^- , há indícios de ser consequência da turbulência ocasionada pela transferência de água entre bacias hidrográficas, retirada de água pela tomada de água pela CAGECE ou instabilidade da coluna de água pelo processo de desestratificação, que podem ocasionar a redução da densidade das Cianobactérias (VIDOTTI; ROLLEMBERG, 2003).

Em menção a CP2, as variáveis Ca, Cl, DQO, NT, K, SO_4 estão correlacionadas negativamente com a Cl-a. Nesta matriz, a Cl-a é considerada uma medida indireta do aumento da densidade celular (KNOLL *et al.*, 2015). Nesta componente o NT, pode ser considerado como o nutriente limitante. Em alusão a CP3, as variáveis DBO e CE se agrupam com sinal oposto ao PT e Mg. Neste caso, a degradação e mineralização da matéria orgânica (DBO) teve como consequência o aumento do nutriente na coluna d'água (BRAUNSCHWEIG *et al.*, 2003). A respeito da CP4 a redução do pH, pode ser consequência da mistura coluna de água e incorporação de gás da coluna e/ou mesmo da atmosfera; assim como pode ser causa da poluição por ureia e compostos químicos originados das áreas de pecuária e agricultura (MORAIS; SILVA, 2012). No entanto, o aumento da concentração de OD, pode ser proveniente da maior velocidade dos ventos pertinentes ao seu aumento no segundo semestre.

Tabela 5 – Resultado da análise da componente principal para o ano de 2016

Dados	Primeiro semestre				Segundo semestre			
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1	PC2	PC3	PC4
HCO ₃ ⁻	-0.10	0.89**	0.19	0.41	0.70*	0.36	0.11	0.61
DBO	-0.05	-0.93**	0.07	0.21	-0.02	-0.19	0.97**	0.16
Cl-a	-0.88**	0.12	0.03	0.46	-0.46	-0.73*	0.46	-0.20
Ca	-0.21	0.37	0.06	-0.89	0.38	0.74*	-0.54	0.09
Cl	0.43	0.77*	0.14	-0.09	0.06	0.85**	0.43	0.28
DQO	0.27	0.32	0.79**	-0.33	0.27	0.95**	0.06	0.14
Cian	0.75*	0.63	0.13	-0.09	-0.80**	0.29	0.10	0.52
OD	-0.13	-0.59*	0.02	0.30	0.36	0.24	0.47	0.77**
CE	0.76**	0.62	0.21	0.01	0.62	0.38	0.67*	-0.14
K	0.12	0.35	0.30	0.87**	0.43	0.85**	0.24	0.21
Mg	0.44	-0.76**	-0.18	0.42	0.05	-0.05	-0.99**	-0.14
Na	-0.08	0.20	0.24	-0.94**	0.65*	0.40	0.65	0.06
pH	0.53*	-0.52	0.37	0.15	0.08	-0.04	0.23	-0.97**
Sal	0.96**	0.04	-0.07	0.03	0.94**	-0.24	-0.04	0.24
SO ₄	-0.88**	0.10	-0.17	-0.37	0.16	0.74*	0.08	0.65
SDT	-0.07	0.18	0.94**	-0.07	0.81**	0.57	-0.13	-0.12
T _{H2O}	0.75*	0.12	-0.07	0.11	0.83**	0.47	-0.25	0.17
NT	0.18	0.41	-0.72*	-0.01	-0.23	0.92**	-0.31	-0.03
ST	-0.07	0.18	0.98**	0.03	0.76**	0.61	-0.15	-0.17
PT	-0.62*	-0.35	0.43	0.53	0.22	0.15	-0.91**	0.32
Turb	-0.35	-0.36	-0.43	0.73*	-0.93**	-0.36	-0.08	-0.05

**Muito significativa (>0,75); *significante (0,75 - 0,50); insignificante (<0,50).

3.4 CONCLUSÕES

Identificou-se que o reservatório apresenta diferentes processos de estratificação/desestratificação em função da época do ano: a) estratificou no primeiro semestre, período de maiores precipitações, menores incidência da insolação e velocidade dos ventos; b) desestratificou no segundo semestre, período de menor precipitação e maior intensidade dos ventos e insolação, assim como, presença do aporte de água advindo da transposição de outras bacias hidrográficas para atender ao abastecimento da Capital. Ainda não se pode afirmar que a transposição de águas entre bacias induz a desestratificação deste reservatório, sendo necessários mais estudos na área para um maior esclarecimento sobre o assunto.

No segundo semestre, a coluna de água estava desestratificada, e ocorreu a redução na densidade das cianobactérias em 33,61%, que é inversamente proporcional à disponibilidade de nutrientes e insolação.

Em ambos os períodos as águas estavam hipereutrofizadas, apresentando elevado IET e altas concentrações de cianobactérias, destacando-se os gêneros potencialmente tóxicos tais como a *Pseudanabaena* sp., *Planktothrix* sp., *Microcystis* sp., *Raphidiopsis* sp, *Cylindrospermopsis* sp. No primeiro semestre, ocorreu a predominância da espécie

Pseudonabaena sp., e no semestre seguinte, o gênero *Planktothix* sp. sobressaiu-se no ambiente. Esta característica de alternância cíclica de gêneros pode representar um desafio para o tratamento de água para abastecimento humano, já que as estratégias de tratamento podem variar dependendo dos organismos predominantes. Outro ponto a se destacar com esta alternância é a necessidade de se adaptar os mecanismos de monitoramento de toxinas em função da variação da composição fitoplanctônica.

A partir da aplicação de ACP observou-se se um resfriamento gradual da água no segundo semestre, assim como, redução da densidade de cianobactérias. De forma contraditória, entretanto, identificou-se correlação positiva entre temperatura e cianobactéria no primeiro semestre e negativa no segundo.

Também se constatou que no segundo semestre ocorreu o aumento da concentração de nutrientes e da turbidez, que se relaciona com o processo de desestratificação da coluna de água. Essas variações identificam que as estratégias de tratamento de água do açude gavião devem ser programadas de forma a se adequar às sazonalidades da qualidade da água, ou seja, a partir do monitoramento da sonda multiparâmetros é possível desenvolver um sinal de alerta para as estações de tratamento da água (ETAs), e assim, o tratamento ser modificado conforme a qualidade da água predominante.

REFERÊNCIAS

APHA; AWWA; WPG. **Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. American Public Health Association.** 19^a Ed.-Washington D. C. 1995. 953p.

ANDREOLI, C.V.; CARNEIRO, C.; GUTSEIT, K.; XAVIER, C.F. (2011). Caracterização geral da bacia. In: CUNHA, C.L.N. **Eutrofização em reservatórios: gestão preventiva. Estudo interdisciplinar na bacia do Rio Verde**, PR. Curitiba: UFPR. p. 39-58.

ARAUJO, M.; COSTA, M. F.; AURELIANO, J.T.; SILVA, M. A. (2008). Mathematical Modelling of Hydrodynamics and Water Quality in a Tropical Reservoir, Northeast Brazil. **Braz. J. Aquatic Science and Technology**.,12(1):19-30.

BÁRBARA, V. F.; SIQUEIRA, E. Q.; CUNHA, A. C. Estimativa do coeficiente de reaeração (K₂) para o Rio Araguari-AP (Amazônia) para posterior utilização no modelo de qualidade de água QUAL2E. In Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 25, Recife, 2009. Anais...Recife: **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2009.

BELLÉM, F.; NUNES, S.; MORAIS, M. **Toxicidade a Cianobactérias: Impacte Potencial na Saúde Pública em populações de Portugal e Brasil**. XIV Encontro da Rede Luso-Brasileira de estudos ambientais – Vulnerabilidade Socioambiental na África, Brasil e Portugal: dilemas e desafios à memória do professor Manuel Serrano Pinto. Setembro 2011, Recife (PE), Brasil.

BOTELHO, R. G.; FROES, C. M.; SANTOS, J. B. 2012. Toxicity of herbicides on *Escherichia coli* growth. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, n. 1, pp. 141-146.

BLOTTIERE, L., JAFAR-BANDJEE, M., JACQUET, S., HULOT, F. D.; Effets of water mixing on the pelagic food web in shallow lakes; **Freshwater Biology**, vol. 61, 2016.

BOUVY, M. A.; FALCÃO, D.; MARINHO, M.; PAGANO, M.; MOURA, A. Occurrence of *Cylindrospermopsis* (Cyanobacteria) in 39 Brazilian tropical reservoirs during the 1998 drought. **Aquatic Microbiol Ecology**. 2000; 23:13-27.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional de 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 publicada no dou nº 053, de 18/03/2005. Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011. **Diário Oficial da União**.

BRAUNSCHWEIG F.; MARTINS. F.; NEVES. R.; MARTINS.; PINA. P.; SANTOS. M.; SARAIVA. S. 2003. A importância dos processos físicos no controle da eutrofização em estuários.

CARPENTER, S.R.; CARACO, N.F.; CORRELL, D. L.; HOWARTH, R.W.; SHARPLEY, A.N.; SMITH, V.H. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. **Ecological Applications**. 1998, 8, 559–568.

CHELLAPPA N. T, COSTA M. A. M. Dominant and co-existing species of cyanobacteria from a eutrophicated reservoir of Rio Grande do Norte State, Brazil. **Acta Oecologica**. 2003, 24. 3-10.

COGERH - Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. Resenha diária do monitoramento. Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/uploads/documentos/28-12-2017-resenha-diaria-do-monitoramento-2017.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2020.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C. 2011. Variação sazonal dos grupos funcionais fitoplanctônicos em braços de um reservatório tropical de usos múltiplos no estado de São Paulo (Brasil). **Acta Botanica Brasilica**. 25(4): 822-831.

DANTAS, E. W.; MOURA, A. N.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C., 2011. Cyanobacterial blooms in stratified and destratified eutrophic reservoirs in semi-arid region of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, vol. 83, no.4, p. 1327-1338.

FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 1, jan./mar. 2013.

FONSECA, B. M.; BICUDO, C .E. M. 2008. Phytoplankton seasonal variation in a shallow stratified eutrophic reservoir (Garças Pond, Brazil). **Hydrobiologia** 600: 267-282.

Grasby, S. E.; Hutcheon, I.; Krouse, H. R., (1997). Application of the stable isotope composition of SO_4^{2-} to tracing anomalous TDS in Nose Creek, southern Alberta, Canada. **Applied Geochemistry**, 12 (5), 567-575.

HAIR, J. F.; TATHAM, R. L.; ANDERSON, R. E.; BLACK, W. (2006). Análise Multivariada de Dados. 5ª ed. Porto Alegre: **Bookman**.

HAN, B. P; ARMENGOL, J.; GARCIA, J. C.; COMERMA, M.; ROURA, M.; DOLZ, J.; STRASKRABA, M. 2000. The thermal structure of Sau Reservoir (NE: Spain): a simulation approach. **Ecological Modelling**. 125:109–122.

HARRIS GP, BAXTER G. 1996. Interannual variability in phytoplankton biomass and species composition in a subtropical reservoir. **Freshwater biology**. 35:545–560.

HONGYU, K., SANDANIELO, V. L. M., JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *EeS - **Engineering and Science***, (2016), 5:1.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso: fev/2020.

ISLAM, F.; SHARMIN, R.; JUNAIT, J. **A Detailed Analysis on Industrial Pollution in Bangladesh; Workshop Discussion Paper, The World Bank Dhaka Office**: Dhaka, Bangladesh, 1997.

JONES, I.D.; WINFIELD, I.J.; CARSE, F. Assessment of long-term changes in habitat availability for Arctic charr (*Salvelinus alpinus*) in a temperate lake using oxygen profiles and hydroacoustic surveys. **Freshwater biology**. 2010, 53, 393–402.

KNOLL, L. B.; HAGENBUCH, E. J.; STEVENS, M. H.; VANNI, M. J.; RENWICK, W. H.; DENLINGER, J. C.; HALE, R. S.; GONZALEZ, M. J. 2015. Predicting eutrophication status in reservoirs at large spatial scales using landscape and morphometric variables. **Inland Waters**. 5:203–214.

LAMPARELLI, M. C. 2004. **Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento**. São Paulo: USP/ Departamento de Ecologia., 2004. 235 f. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo.

LIRA, G; A. E.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M.C; MOURA, A. N. 2011. Hytoplankton abundance, dominance and coexistence in an eutrophic reservoir in the state of Pernambuco, northeast Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**. 83: 1313-1326.

MERILUOTO, J. e CODD, G.A. Toxic Cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis. Åbo Akademi University Press. **Acta Academiae Aboensis**, 2005.

MOLICA, R.; AZEVEDO, S. Ecofisiologia de cianobactérias produtoras de cianotoxinas. **Oecologia brasiliensis.**, 13(2): 229-246, 2009.

MOLISANI, MM., BARROSO, HS., BECKER, H., MOREIRA, MOP., HIJO, CAG, MONTE, TM. and VASCONCELLOS, GH., 2010. Trophic state, phytoplankton assemblages and limnological diagnosis of the Castanhão Reservoir, CE, Brazil. **Acta Limnologica Brasiliensia**, vol. 22, no. 1, p. 1-12.

MORAIS, R. C. S.; SILVA, C. E. Diagnóstico ambiental do balneário Curva São Paulo no rio Poti em Teresina, Piauí. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol.17 n.1, 2012. p. 41-50.

OLDEN, J.D.; NAIMAN, R. J. Incorporation thermal regimes into environmental flows: assessments: Modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. January 2010. *Freshwater Biology*. 55(1):86 - 107

PAERL, H. W. 2008. Nutrient and Other Environmental Controls of Harmful Cyanobacterial. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 619: 217-213.

PALMA P, ALVARENGA P, PALMA VL, FERNANDES RM, SOARES AMVM AND BARBOSA IR. 2010. Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: a case study of the Alqueva's reservoir, Portugal. *Environmental Monitoring and Assessment*. 165(1-4): 539-552.

POLLMAN, C. D.; JAMES, R. T. (2011). A simple model of internal loading of phosphorus in Lake Okeechobee. *Journal Lake and Reservoir Management*. V. 27, pp. 15-27.

PORTO, M. F. A. Estabelecimento de parâmetros de controle da poluição. In: **Hidrobiologia ambiental**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1991. 411p.

PRINCIPE, R. E. Ecological effects of small dams on benthic macroinvertebrate communities of mountain streams (Córdoba, Argentina). *Annales de limnologie – International Journal of Limnology*. 2010. 46:77-91.

RANGEL, L. M.; SILVA, L. H. S.; ARCIFA, M. S.; PERTICARRARI, A. 2009. Driving forces of the diel distribution of phytoplankton functional groups in a shallow tropical lake (Lake Monte Alegre, Southeast Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, vol. 69, p. 75-78.

SALVO. M. T.; ISAAC, R. L. **Avaliação da eficiência de remoção de cianobactérias e cianotoxinas por processos do tratamento convencional e por carvão ativado em pó para águas do rio Atibaia (SP - BR)**. Doutoranda, engenheira química, DSA/FEC/UNICAMP e FEFAAP 2002.

SANTI, T. Operação e controle no tratamento secundário de efluentes. Série Seminário Meio Ambiente – Capítulo II. **Revista O Papel**. 2013.

SILANS, A. M. B. P. Redução da evaporação de açudes – o estado da arte. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 2, p. 101–109, 2003.

SILVA, A. E. P.; ANGELIS C. F.; MACHADO, L. A. T.; WAICHAMAN, A. V. Influência da precipitação na qualidade da água do Rio Purus. *Acta Amazica* [online]. vol.38, n.4, pp. 733-742, 2008.

SILVA, E. M.; GONCALVES, W.; SILVA, E. M.; MUROLO, A. C. **Estatística 1**, Atlas, ed. 2, 1996.

SILVA, H. M.; DUARTE, F. V.; OLIVEIRA, A. G. Avaliação do abrandamento de água calcária utilizando hidróxido de cálcio e carbonatação. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 4, p. 310-315, 2017. 310.

Secretaria dos Recursos Hídricos – SRH. **Sistema de Informações dos Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/>. Acesso em: 15 mar. 2016.

SOARES, M.C.S.; ROCHA, M. I. A.; MARINHO, M. M.; AZEVEDO, A. M.F.O.; BRANCO, C. W.C.; HUSZAR V. L. M. Changes in species composition during annual cyanobacterial dominance in a tropical reservoir: physical factors, nutrients and grazing effects. **Aquatic Microbial Ecology**. 57:137-149, 2009.

SOUZA, F. F. C.; RIBEIRO, C. B. M.; JÚNIOR, C. R. F.; OTENIO, M. H. Modelagem do regime térmico de um reservatório tropical de abastecimento público. Juiz de Fora, MG, Brasil. **Revista Ambiente & Água**. vol. 11 n. 1 Taubaté – Jan. / Mar. 2016.

TUNDISI, J. G. TUNDISI, T. M. ABE, D.S. The ecological dynamics of Barra Bonita (Tietê River, SP, Brazil) reservoir: implications for its biodiversity. **Brazilian Journal of Biology**, vol. 68, pag. 1079-1098, 2008.

VAN APELDOORN, M. E.; VAN EGMOND, H. P.; SPEIJERS, G. J.; BAKKER, G. J. Toxins of cyanobacteria. *Mol.Nutr. Food Res.*, v. 51, n. 1, p. 7-60, 2007.

VIDOTTI, E. C.; ROLLEMBERG, M. C. Algas: da economia nos ambientes aquáticos à biorremediação e à química analítica. **Química Nova**, v.27, n.1, p.139-45, 2004.

WANG, S.; QIAN, X.; HAN, B.P.; LUO, L.C.; HAMILTON, D.P. 2012. Effects of local climate and hydrological conditions on the thermal regime of a reservoir at Tropic of Cancer, in southern China. **Water Resistant**. 46(8): 2591-2604.

WINTON, R. S. CALAMITA, E. WEHRLI, B. Dams, water quality and tropical reservoir stratification. **Biogeosciences**, 16, 1657–1671, 2019.

4. QUALIDADE DA ÁGUA EM UM SISTEMA DE RESERVATÓRIOS EM CASCATA – UM ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO – A escassez hídrica e o aumento da demanda de água para usos múltiplos incentivaram a construção de diversos reservatórios e sistemas de transferências hídricas entre bacias hidrográficas em diversas partes do mundo, principalmente em regiões áridas e semiáridas. Apesar de estas medidas mitigarem os aspectos quantitativos do abastecimento, a diminuição da qualidade da água disponível pode se tornar uma limitação importante. Este estudo teve por objetivo avaliar a qualidade da água no sistema de transferência que abastece a Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. Foram analisados 20 parâmetros de qualidade de água ao longo do sistema. Aplicou-se em seguida a análise de agrupamento utilizando a distância euclidiana associada ao método de ligação de Ward para agrupar os 13 pontos de coleta que foram estabelecidos conforme suas similaridades. A piora da qualidade da água ficou evidente ao longo do sistema, com o aumento da concentração de cianobactérias, pH, nitrogênio total, oxigênio dissolvido, turbidez e clorofila-*a*. Com relação às cianobactérias, duas gêneros mostraram-se dominantes: *Oscillatoria* sp. e *Microcystis* sp. e sete abundantes: *Merismopedia* sp., *Cylindrospermopsis* sp., *Pseudanabaena* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Aphanocapsa* sp. e *Dolichospermum* sp. A presença de cianobactérias potencialmente tóxicas e a piora da qualidade da água tornam a realização de monitoramentos frequentes e o desenvolvimento de sistemas de alerta essenciais para a adequada gestão dos recursos hídricos tanto do ponto de vista ambiental quanto de saúde pública.

Palavras-chaves: Eutrofização; transferência de água; cianobactérias; abastecimento público.

ABSTRACT - Water scarcity and increasing water demand for multiple uses encourage the construction of reservoirs and water transfer systems between watersheds in various parts of the world, especially in arid and semi-arid regions. Although these measures may mitigate the quantitative aspects of water supply, the quality decrease of the available water has become an important limitation. This study aimed to evaluate the water quality in the water transfer system that supplies the metropolitan region of Fortaleza, Ceará. Twenty water quality parameters were analyzed throughout the system followed by the application of the Euclidean distance and Ward's method to group the 13 sampling points according to their similarities, observing the formation of 3 distinct groups. The worsening of the water quality was evident with increasing cyanobacterial concentration, pH, total nitrogen, dissolved oxygen, turbidity and chlorophyll-*a*. In contrast, there was a reduction in the concentration of salts. Regarding cyanobacteria, two genders were

dominant: *Oscillatoria* sp. and *Microcystis* sp. while seven were abundant: *Merismopedia* sp., *Cylindrospermopsis* sp., *Pseudanabaena* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Aphanocapsa* sp. e *Dolichospermum* sp. The presence of potentially toxic cyanobacteria and the worsening of water quality make frequent monitoring and the development of alert systems essential for the management of water resources both from an environmental and public health point of view.

Keywords: Eutrophication; Water transfer; Cyanobacteria, public water supply.

4.1 INTRODUÇÃO

Reservatórios ou represas artificiais são mananciais construídos pelo homem, normalmente através do barramento de um rio. Os reservatórios artificiais localizados em sequência, ao longo do mesmo rio ou não, possuem processos físico-químicos e ecológicos interligados, sendo a qualidade da água, a estrutura e a composição do fitoplâncton influenciadas pela morfologia, tamanho, idade, presença de tributários, atividades humanas e procedimentos de operação do sistema rio-reservatório (FANG; DENG, 2011; POMPÊO *et al.*, 2013; STRASKRABA; TUNDISI 2013). Reservatórios em cascata podem causar mudanças significativas na qualidade da água de um rio, impactando suas características físicas, químicas e biológicas e no funcionamento dos reservatórios a jusante (BARBOSA *et al.*, 1999).

Os reservatórios artificiais de grande porte são, geralmente, sistemas compartimentados e com elevada complexidade espacial (altimetria, área, volume) e temporal (tempo de residência) (NOGUEIRA *et al.*, 1999). Grande parte de sua variabilidade ocorre ao longo do seu eixo principal, sendo influenciada pelos: gradientes longitudinais de velocidade da água, tempo de retenção, profundidade e largura, transparência e penetração de luz e possíveis estratificações térmicas ocorrida no plano vertical devido ao gradiente de aquecimento da coluna d'água (TUNDISI, 1990; ARMENGOL *et al.*, 1999). Os reservatórios artificiais podem ser divididos em zonas fluvial, de transição e lacustre que são unidades dinâmicas do ponto de vista espacial e temporal, podendo variar em função dos aportes da bacia hidráulica, das características da água de entrada e da operação do sistema de saída.

Com relação à dinâmica do rio represado, o reservatório tem potencial de influenciar na qualidade da água não só no reservatório, mas também à montante e à jusante dele. Vários fatores contribuem para esta alteração como: dinâmica de erosão e deposição de sedimentos; decomposição da biomassa submersa, que causa desoxigenação da água e aumenta a concentração de nutrientes e a acidez da água; tempo de retenção da água e

evaporação; acúmulo de nutrientes e sais; e aumento da turbidez e da temperatura da água (GAETA *et al.*, 2014; SHARMA, 2015). Além disso, tanto a abundância quanto a diversidade da comunidade planctônica varia significativamente em ambientes represados, já que as barragens promovem uma descontinuidade de fluxo, induzindo mudanças consideráveis na organização das comunidades ao longo do gradiente longitudinal (GUMIERO; SALMOIRAGHI, 1998).

Para Wang *et al.* (2016), os sistemas de transferência de água e de reservatórios em cascata geram efeitos complexos nas condições hidrológicas, na qualidade da água e na estrutura ecológica aquática, em consequência da variação do tempo de residência e da recirculação de nutrientes. As novas conexões de tempo-espço advindas desses sistemas revelam a necessidade de repensar a gestão de recursos hídricos, uma vez que os impactos em nível local não são mais determinados apenas por fatores locais, e podem ser também influenciados pelo uso e ocupação de bacias hidrográficas distantes (SILVA *et al.*, 2017).

No Brasil, destacam-se projetos relevantes de transferência de água entre bacias hidrográficas com reservatórios em cascata, tais como: o sistema Paraíba do Sul/Guandu/região metropolitana do Rio de Janeiro; a Bacia do Piracicaba/região metropolitana de São Paulo; a Bacia do Alto Tietê e a reversão para a Baixada Santista; os Eixos de Integração Hídrica no Estado do Ceará; a Transposição do Rio São Francisco para o Nordeste Setentrional. Dessa forma, a utilização cada vez mais frequente dessas infraestruturas revela a importância de avaliar a dinâmica da qualidade da água como ferramenta de tomada de decisão pelos órgãos de gestão dos recursos hídricos, no intuito de monitorar o aporte de nutrientes, e a qualidade da água ao longo desses sistemas. Apesar da grande importância deste tópico, estudos detalhados da influência de reservatórios em cascata sobre a biota aquática e os fatores limnológicos ainda são escassos no Brasil (NOGUEIRA *et al.*, 2010).

Um dos grandes problemas nas águas superficiais tem sido a presença das cianobactérias que são um grupo importante de organismos em termos de abundância no planeta devido, principalmente, ao seu modo de vida fotoautotrófico que garante sua presença em diversos ambientes (PADE; HAGEMANN, 2015). Embora tenham o papel extremamente relevante de produzir de 30% a 40% do total de oxigênio atmosférico na biosfera, esses organismos podem causar alguns efeitos nocivos nos ecossistemas aquáticos, como o fenômeno conhecido por floração ou *bloom*, o qual inibe o desenvolvimento de vários organismos, limita o acesso à luz e libera metabólitos prejudiciais no meio aquático (CEPOI, 2019). Alguns táxons de cianobactérias produzem metabólitos secundários tóxicos, como

microcistinas, cilindropermopsinas e saxitoxinas, enquanto outros produzem compostos de sabor e odor, como a geosmina e o 2-metilisoborneol (MIB), que mesmo não causando efeitos negativos à saúde humana, atribuem características organolépticas desagradáveis à água potável e para os produtos da aquicultura (OLSEN *et al.*, 2016).

Ressalta-se que estudos realizados nesse tema até o momento, referenciam majoritariamente os reservatórios artificiais dos sistemas integrados e desconsideram as variáveis qualitativas e quantitativas nos trechos principais dos rios e canais. Adicionalmente, apenas alguns esforços foram realizados para determinar como seu funcionamento afeta a estrutura ecológica dos rios que foram barrados (BARBOSA *et al.*, 1999; JORCIN; NOGUEIRA, 2005; NALIATO *et al.*, 2009).

Assim, o presente artigo teve como objetivo avaliar a variação da qualidade da água, em especial à concentração e classificação de cianobactérias, em reservatórios artificiais, canais, rios, túneis e adutoras componentes do sistema de transferência de água em cascata da Região Metropolitana de Fortaleza (SCRMF), Ceará. Devido às observações oriundas do monitoramento realizado pela companhia de gestão dos recursos hídricos (COGERH) ao longo dos anos, a hipótese de que a qualidade da água tende a degradar-se ao longo do sistema em cascata foi avaliada.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no sistema em cascata da RMF (SCRMF) que é composto por seis reservatórios localizados em distintas bacias hidrográficas (BH), conforme divisão das macrorregiões de planejamento da política estadual de recursos hídricos do Ceará (Figura 7), em cujas áreas dos reservatórios estão inseridos:

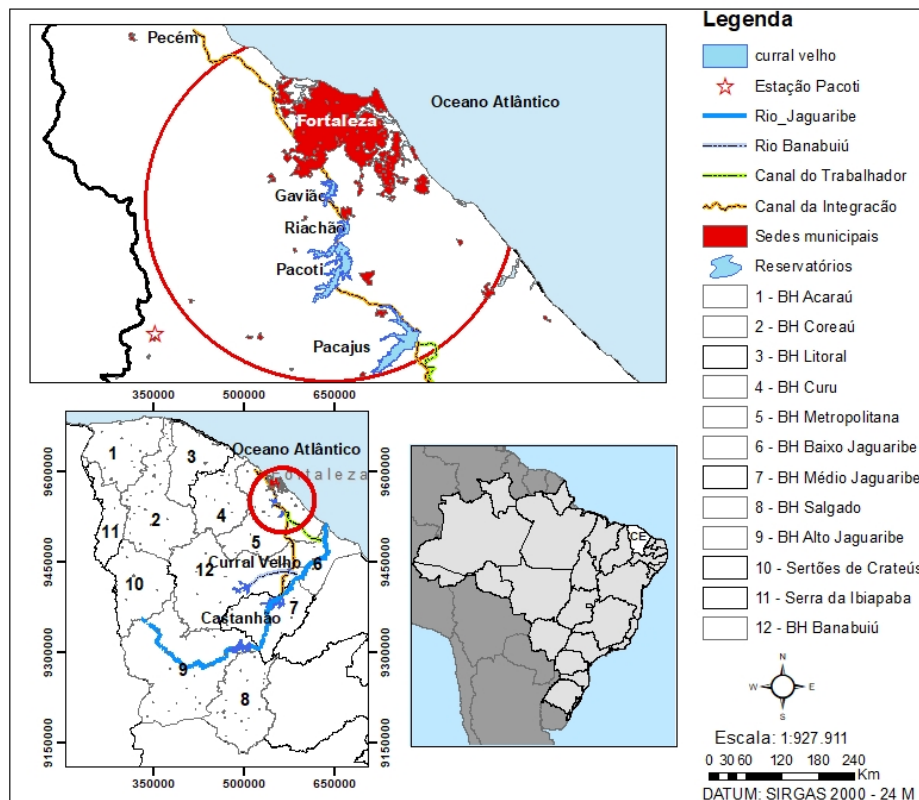
- BH Médio Jaguaribe - reservatório Castanhão;
- BH Banabuiú - reservatório Curral Velho;
- BH Metropolitana – reservatórios: Pacajus, Pacoti, Riachão e Gavião. Importante destacar que essa divisão de bacia hidrográfica é política, não havendo uma única bacia física com o nome Metropolitana.

O sistema em estudo atende a diversas demandas, incluindo o abastecimento do município de Fortaleza com 2.452.185 de habitantes (IBGE, 2010), polos industriais (Pecém, Maracanaú e Eusébio) e dos municípios adjacentes como: Caucaia, Guaiúba, Maranguape,

Pacatuba, Chorozinho, Horizonte, Pacajus, Aquiraz, Itaitinga, São Gonçalo do Amarante. Um aspecto relevante a destacar-se no SCRMF é que os reservatórios menores localizam-se a jusante no sistema, o que difere da maioria dos sistemas em cascatas onde estes se encontram a montante (GÜNTNER *et al.*, 2004).

O sistema é formado por seis reservatórios de distintos tamanhos, estações de bombeamento, canais, sifões, adutoras e túneis que realizam a transposição das águas até o reservatório Gavião, localizado na bacia hidrográfica metropolitana. O principal sistema de adução, a partir do reservatório Castanhão, é o canal da Integração, denominando de “Eixão das Águas”, com aproximadamente 172 km de extensão (COGERH, 2017). A transferência de água pelo Eixão das Águas tem vazão regularizada de projeto entre 19 a 22 m³.s⁻¹ (SRH, 2015). No entanto, a média de transferência para o SCRMF é 9 m³.s⁻¹ (COGERH, 2017), em virtude da limitação de capacidade de um sifão que compõe o canal. Nesse estudo, o reservatório Orós foi desconsiderado, visto que no período das coletas de dados este ofertava água apenas para a demanda local. O reservatório Pacajus, tem suas águas integradas ao sistema pelo canal Ererê até o reservatório Pacoti, assim como existem também o canal do Trabalhador que integra o sistema (COGERH, 2017).

Figura 7 – Localização do Sistema em Cascata da Região Metropolitana de Fortaleza com zoom na bacia hidrográfica metropolitana



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.2 Amostragem de campo e parâmetros analisados

As informações foram obtidas a partir de um banco de dados da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) utilizados para monitoramento da qualidade da água transposta e estão disponíveis em COGERH (2017). Entre os vinte parâmetros analisados, dezenove são abióticos e um biótico, referenciando as características físicas, químicas e biológicas dos corpos hídricos. As coletas foram realizadas em 13 pontos ao longo do SCRMF (Figura 8) a uma profundidade de 30 cm da superfície nos meses de fevereiro, abril, agosto e outubro de 2017, e levadas imediatamente para análise em laboratório. O *shape* do uso e ocupação do solo foi feito o *download* do site do instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE, 2017).

As metodologias de análise e os limites de detecção dos métodos são apresentados na Tabela 6. As contagens de células de cianobactérias foram realizadas usando um microscópio invertido (Zeiss Axio A1) com uma câmara Sedgewick-Rafter (APHA, 2012). Os campos foram contados em ampliações múltiplas (200x ou 400x dependendo do tamanho do fitoplâncton) até que pelo menos 100 indivíduos ou colônias / filamentos (≥ 4 células) fossem observados para cada amostra de forma a garantir uma cobertura suficiente da diversidade

fitoplanctônica ambiental (YOO *et al.*, 2018). Todas as classificações seguiram as chaves existentes para cianobactérias (ANAGNOSTIDIS; KOMÁREK, 1998; KOMÁREK; ANAGNOSTIDIS, 1989, 1990, 2005).

Em relação à densidade de cianobactérias, considerou-se espécie dominante aquelas cujos valores de densidade foram superiores a 50% do total encontrado em cada ponto monitorado; e espécies abundantes, quando os valores de densidade foram superiores à média destes organismos naquele ponto, conforme metodologia descrita por Lobo e Leighton (1986). As cianobactérias com densidades inferiores a 5% da densidade total foram agrupadas em “outras cianobactérias” para facilitar a visualização e interpretação dos dados, seguindo a recomendação de Carlos (2013).

Tabela 6 – Parâmetros qualitativos analisados no SCRMF ano de 2017

Parâmetros	Sigla	LQ	Método
Alcalinidade de bicarbonato (mg CaCO ₃ /L)	AB	8,95	Titrimetria Ácido-Base (2320 B)
Condutividade elétrica (µS/cm)	CE	0,01	Condutimetria (2510 B) - APHA, 2012 Sonda YSI Pro Plus Multi-Parameter Water Quality Meter
Cálcio (mg Ca/L)	Ca	0,40	Titrimetria com EDTA (3500-Ca B) - APHA, 2012
Cloretos (mg Cl ⁻ /L)	Cl	7,35	Argentimétrico (4500-Cl-B) - APHA, 2012
Clorofila-a (µg/L)	Cl-a	1,00	Espectrofotométrico (10200 H) - APHA, 2012. Solvente de extração Metanol – Espectrofotometro: HACH - DR1900-01H
Cianobactérias (Células/mL)	Cian	-	Sedgewick-Rafter - APHA, 2012
Feofitina (µg/L)	Feo	1,00	Espectrofotométrico (10200 H) - APHA, 2012 Solvente de extração Metanol – Espectrofotometro: HACH - DR1900-01H
Fósforo Total (mg P/L)	PT	0,01	Método do Persulfato (4500-P-J) e (4500-P-E) – APHA, 2012
Magnésio (mg Mg/L)	Mg	0,24	Método do Cálculo (3500-Mg B) - APHA, 2012
Nitrogênio total (mg N/L)	NT	0,02	Método do Persulfato (4500-P-J) e (4500-NO ₃ --E)– APHA, 2012
Oxigênio dissolvido (mg O ₂ /L)	OD	-	YSI Pro Plus Multi-Parameter Water Quality Meter
pH	pH	-	YSI Pro Plus Multi-Parameter Water Quality Meter
Potássio (mg K/L)	K	2,00	Fotometria de Emissão de Chama (3500-K-B) - APHA, 2012
Salinidade	Sal	-	YSI Pro Plus Multi-Parameter Water Quality Meter
Sódio (mg Na/L)	Na	2,00	Fotometria de Emissão de Chama (3500-Na-B) -

APHA, 2012			
Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	SDT	2,00	Gravimetria (2540 D) e Cálculo - APHA, 2012
Sólidos totais (mg/L)	ST	2,00	Gravimetria (2540 B) - APHA, 2012
Sulfatos (mg/L)	SO ₄	7,68	Turbidimetria – (4500-SO42-E) - APHA, 2012.
Temperatura da água (°C)	Temp	0,1	YSI Pro Plus Multi-Parameter Water Quality Meter
Turbidez (NTU)	Turb	0,1	Nefelométrico (2130B) - APHA, 2012 Turbidímetro: HACH - 2100Q

Fonte: elaborado pelo autor. * LQ – Limite de Quantificação definido em laboratório ou pelo fabricante das sondas.

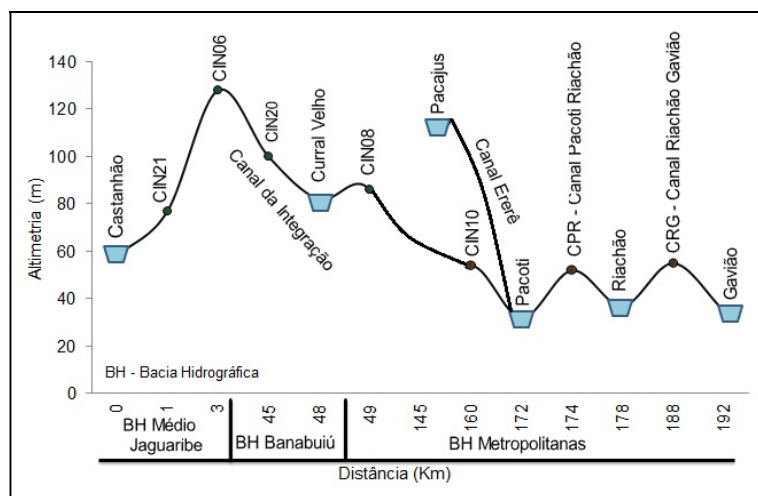
Informações sobre precipitação pluviométrica, bem como de volume dos reservatórios, foram utilizadas para subsidiar uma discussão sobre o impacto da estiagem na qualidade de água observada. Todos os dados referentes às características dos reservatórios e condições climáticas também foram obtidos na Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH). Na Tabela 7 e na Figura 8, observa-se a localização dos pontos de coleta e a descrição técnica dos reservatórios considerados.

Tabela 7 – Dados de localização, idade, volume e áreas das bacias hidráulicas dos reservatórios considerados no estudo

Ponto	Coordenadas (UTM 24M –Sirgas 2000)		Ano de inauguração	Volume (hm ³)	Área da B. hidráulica (Km ²)
	S	E			
Castanhão	560466	9392963	2003	921	6.700,00
CIN21	561214	9393802	-	NA	NA
CIN06	560737	9395806	-	NA	NA
CIN20	571149	9435426	-	NA	NA
Curral Velho	576873	9438016	2007	187	12,17
CIN08	577017	9438537	-	NA	NA
CIN10	555602	9542223	-	NA	NA
Pacoti	551164	9553220	1981	456	380,00
Pacajus	567919	9533329	1993	390	240,00
CPR	550087	9554497	-	NA	NA
Riachão	552601	9558003	1981	460	46,95
CRG	549823	9563691	-	NA	NA
Gavião	549266	9568234	1973	45	32,90

Fonte: elaborado pelo autor. - Bacia Hidráulica - área molhada quando o reservatório está em sua plena capacidade. - NA: Não se Aplica. Não consideramos volume, área e tempo de detenção em trechos de canais e de rios.

Figura 8 – Infográfico do Sistema em Cascata da Região Metropolitana de Fortaleza (SCRMF) indicando as distâncias em relação ao açude Castanhão, altitudes do sistema, bacias hidrográficas e pontos das coletas



Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.3 Análise dos dados

Ao analisar uma base de dados, um dos principais desafios é resumir a informação coletada de forma que a análise de torne mais fácil. Em muitos casos, quando contamos com um grande número de observações, pode ser de interesse criar grupos. Dentro de cada grupo os elementos devem ser semelhantes entre si e diferentes dos elementos dentro dos outros grupos. Efetuou-se a normalização dos dados e aplicou-se a análise de agrupamento das medianas das concentrações de cada parâmetro, recorrendo-se a utilização da medida de dissimilaridade métrica da distância euclidiana agregada ao o método de agrupamento hierárquico Ward (JONHSON; WICHERN, 2002). O corte em relação aos agrupamentos foi realizado por variação percentual das distâncias.

Na sequencia, o Teste U ou teste de Wilcoxon-Mann-Whitney foi aplicado para duas amostras independentes previamente estabelecidas pela análise de agrupamento adotando-se um $\alpha = 5\%$, pois as amostras não apresentaram distribuição normal. Essa metodologia estatística permitiu embasar a discussão e avaliar, com 95% de confiança, se a qualidade de água ao longo do sistema muda significativamente.

O teste de Shapiro-Wilk foi aplicado para verificar a normalidade dos dados. A análise estatística dos dados foi realizada com o programa Statística 9.0.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As áreas urbanizadas, indicadas na Tabela 8, como áreas artificiais, tiveram um aumento significativo de montante para jusante, ou seja, cresceram de 0,58% na bacia do reservatório Castanhão, para 21,30% na bacia do Riachão e 3,26% na bacia do Gavião. Esse aumento relativo, entretanto, não garante que as áreas urbanizadas sejam as principais responsáveis pelo aumento no nível trófico dos reservatórios, já que do ponto de vista absoluto a bacia hidrográfica do reservatório Castanhão, com área de 44.723 km², é a maior unidade hidrográfica desse sistema e corresponde 30% da área do Estado do Ceará (Figura 9) enquanto as bacias dos reservatórios do Riachão e do Gavião têm apenas 25,49 e 104,42 km², respectivamente.

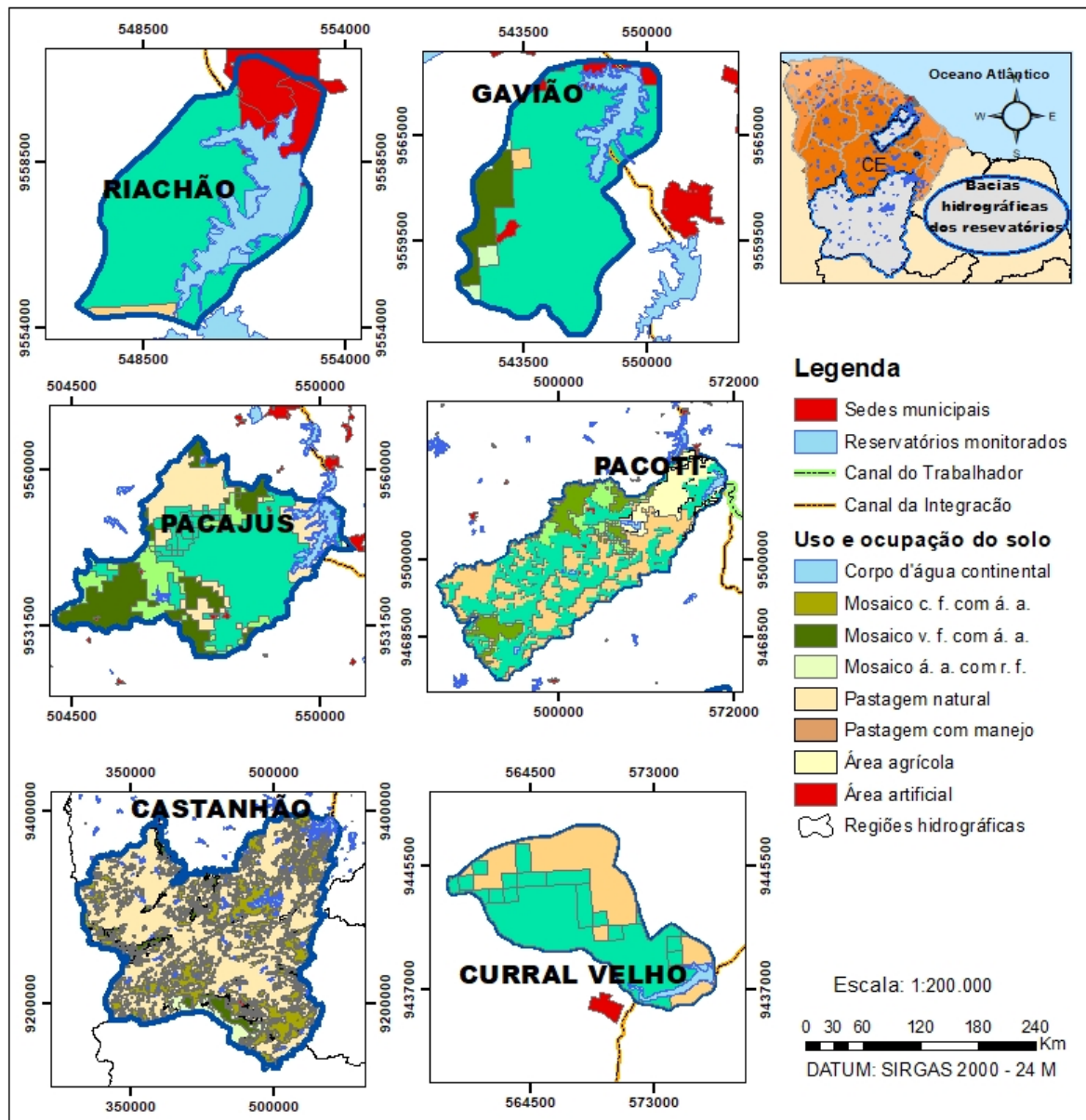
A área da bacia do reservatório Castanhão é, majoritariamente, destinada a pastoreio de animais e áreas agrícolas (IPECE, 2011). Conley *et al.* (2009), apontam que atividades agropecuárias e urbanas são consideradas as principais fontes de nitrogênio e fósforo para os ecossistemas aquáticos. Para Varol e Şen (2012), o excesso desses nutrientes pode causar problemas variados, como florações de organismos fitoplanctônicos, desoxigenação da água, alterações no paladar e odor, morte de peixes e outros organismos aquáticos bem como perda de biodiversidade.

Tabela 8 – Uso e ocupação das bacias hidrográficas dos reservatórios do SCRMF

Tipo de Uso e ocupação das bacias hidrográficas	Castanhão		Curral Velho		Pacajus		Pacoti		Riachão		Gavião	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Área agrícola	259,40	0,58	-	-	508,00	11,31	4,10	0,38		-		-
Área artificial	120,70	0,27	-	-	16,30	0,36	0,80	0,07	5,43	21,30	3,40	3,26
Corpo d'água continental	530,50	1,19	1,00	1,20	54,60	1,22	29,00	2,70	1,99	7,81	5,00	4,79
Mosaico de área agrícola com remanescentes florestais	1.524,70	3,41	-	-	336,60	7,49	132,00	12,27	-	-	2,22	2,13
Mosaico de vegetação florestal com áreas agrícolas	1.717,00	3,84	-	-	477,60	10,63	231,20	21,50	17,35	68,07	14,20	13,60
Pastagem com manejo	10,00	0,02		-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pastagem natural	25.149,10	56,23	37,32	44,71	1.509,40	33,60	243,80	22,67	0,72	2,82	3,20	3,06
Mosaico de campestre florestal com área agrícola	15.410,50	34,46	45,15	54,09	1.589,80	35,39	434,58	40,41	-	-	76,40	73,17
Total	44.723,30	100	83,47	100	4.492,34	100	1.075,50	100	25,49	100	104,42	100

Fonte: Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 9 – Mapa de uso e ocupação das seis bacias hidrográficas dos reservatórios do SCRMF

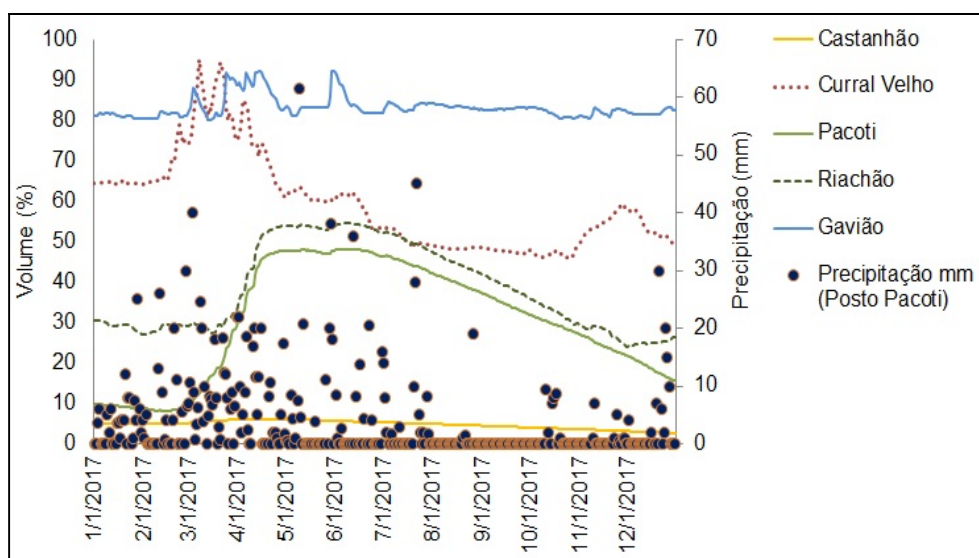


Fonte: elaborado pelo autor com dados IBGE (2017). c. f. (campestre florestal); á. a. (área agrícola); v. f. (vegetação florestal); r. f. (remanescentes florestais).

Um ponto importante que deve ser observado quando se avalia o aumento do nível trófico em reservatórios artificiais como, o volume de chuvas precipitado sobre suas bacias hidrográficas contribuintes. O Estado do Ceará encontra-se em situação de seca desde 2010 (CORTEZ, 2017). Em 2017, apesar da pluviometria anual de 554,5 mm estar em torno da média histórica, os volumes armazenados nos reservatórios em estudo permaneceram abaixo da capacidade volumétrica, conforme exposto na Gráfico 7 (COGERH, 2017).

A reserva hídrica do açude Castanhão, principal reservatório do sistema, atingiu o percentual de 2,71% (179,70 hm³) de sua capacidade no final do ano de 2017 (Gráfico 7). Em contraponto, o reservatório Gavião, com menor capacidade de armazenamento, oscilou em torno do volume de 80% (26,63 hm³), em grande parte do período, com exceção de alguns picos de enchimento, ocorrido devido a precipitações pluviométricas pontuais. O açude Gavião é mantido artificialmente neste volume através da transferência de água no período de estiagem e pelo aporte de água de sua bacia hidrográfica com objetivo de manter o fornecimento de água por gravidade para a estação de tratamento de água da Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), que atende ao abastecimento de água da Capital.

Gráfico 7 – Variação do volume dos reservatórios do SCRMF e precipitação média mensal em 2017



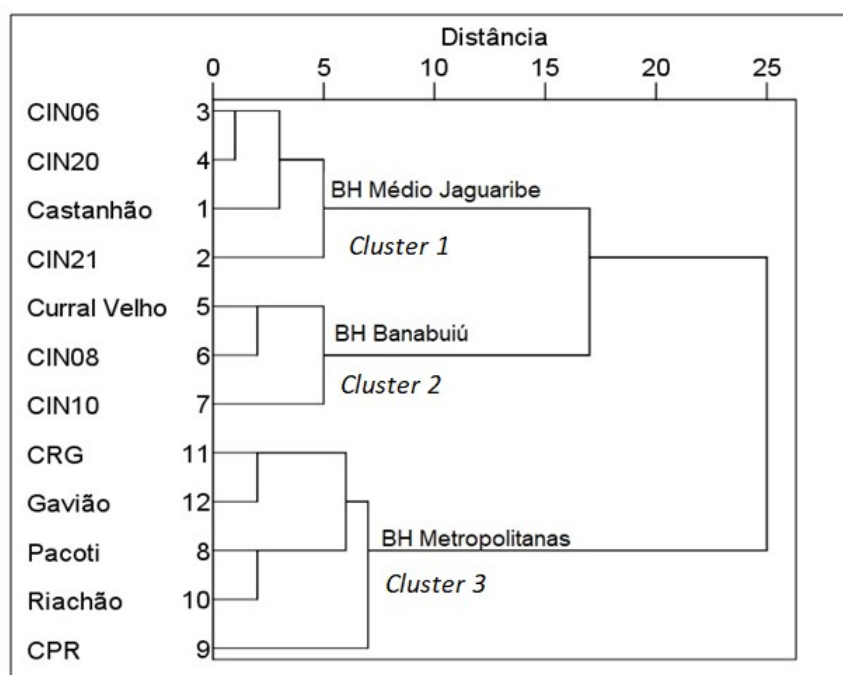
Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme SNIRH (2020), 39,76% os esgotos no Ceará são coletado e tratado, os demais são destinados: 30,49% tem solução individual, 25,77% não é coletado e não tem tratamento e 3,98% é coletado e não tratado.

As medianas dos vinte parâmetros observados da água em cada ponto de amostragem possibilitou a formação de três *clusters* (agrupamentos) distintos conforme apresentado na Figura 10. A localização das estruturas hídricas (reservatórios e canais), e mais especificamente a proximidade entre si, foi o fator preponderante para a formação dos agrupamentos. Isto pode indicar que a bacia hidrográfica contribui de forma perceptível na qualidade da água, mesmo após a transposição da água entre bacias através do sistema de transferência.

Observa-se também que as bacias do Médio Jaguaribe e a do Banabuiú aproximaram-se em um sub-*cluster*, se diferenciando da bacia metropolitana, provavelmente também pela proximidade entre as duas. No entanto, não é possível informar que a interligação não interferiu nos agrupamentos já que não dispomos de informações sobre o comportamento destes equipamentos antes da interligação do sistema.

Figura 10 – Análise de agrupamento dos pontos de monitoramento nos reservatórios do SCRMF, em função da similaridade quanto aos parâmetros de qualidade de água - ano de 2017.



Fonte: elaborado pelo autor.

Quando as medianas dessas variáveis são comparadas, onze das vinte variáveis ambientais monitoradas apresentaram diferenças significativas ($p < 0,05$) ao longo do sistema de transferência (Tabela 9). Dentre essas, AB, CE, K, SDT e ST tiveram seus valores reduzidos ao longo do SCRMF, indicando uma melhoria na qualidade da água no que se refere à quantidade de sais e sólidos. A redução dos valores dessas variáveis pode estar associada às características geológicas das bacias (com solos menos salinos) mais a jusante do sistema, assim como a redução de sólidos particulados em suspensão devido à sedimentação nos reservatórios (MAAVARA *et al.*, 2015; LU *et al.*, 2016).

Por outro lado, as concentrações de Cian, pH, NT, OD, Turb e Cl-a tiveram aumento significativo ao longo do sistema, indicando um aumento da atividade fotossintética,

que está ligada à produtividade primária e à eutrofização, de montante para jusante. O incremento do pH, OD, Turb e da Cl-a está normalmente relacionado ao aumento da concentração do fitoplâncton, neste caso de cianobactérias. O aumento de Cian, por sua vez, apresentou uma estreita associação com o incremento do NT, podendo indicar uma relação causal (CUNHA *et al.* 2013), já que o outro macro nutriente relacionado com a eutrofização, o PT, não apresentou aumento significativo ($p < 0,05$) (Tabela 9).

O aumento de NT pode estar relacionado às contribuições difusas e pontuais de nutrientes das áreas mais urbanizadas (CONLEY *et al.*, 2009), à redução dos volumes de armazenamento pela evaporação e, conseqüentemente, aumento da concentração de nutrientes (JEPPESSEN *et al.*, 2015) ou à recarga interna de nutrientes (*internal loading*), que mantém elevado o nível trófico em reservatórios mais antigos, mesmo quando a qualidade da água afluyente apresenta uma melhor qualidade (MOURA *et al.*, 2020). O excesso de N e P pode causar problemas variados como a floração de fitoplâncton, desoxigenação e alterações no paladar e odor da água, morte de peixes e outros organismos aquáticos, bem como perda de biodiversidade (VAROL; ŞEN, 2012).

Tabela 9 – Médias dos parâmetros nos *Clusters* formados na análise de agrupamentos. Valores em negrito indicam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo Teste U

Parâmetros	Unidades	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
AB	(mg	136,49	113,86	100,10
CE	(μ S/cm)	0,54	0,53	0,48
Ca	(mg Ca/L)	15,40	141,43	15,09
Cl	(mg Cl L ⁻¹)	75,93	80,19	82,35
Cl-a	(μ g/L)	22,86	78,07	58,52
Cian	(Células/mL)	39.405,00	94.585,00	165.049,00
Mg	(mg Mg/L)	17,01	16,73	14,40
NT	(mg N/L)	1,96	2,46	2,09
PT	(mg P/L)	0,12	0,17	0,16
Feo	(μ g/L)	5,02	3,88	5,95
SDT	(mg/L)	323,75	321,25	289,65
OD	(mg O ₂ /L)	5,37	8,05	7,92
pH	-	8,04	9,07	8,52
K	(mg K/L)	15,00	16,00	11,00
Salinidade	(mg Na/L)	0,25	0,26	0,22
Na	(mg/L)	57,00	60,00	52,50
ST	(mg/L)	315,50	331,50	303,50
SO ₄	(mg/L)	14,95	14,54	17,60
Temp	(°C)	29,1	28,4	28,9
Turb	(NTU)	4,8	11,9	15,1

Fonte: elaborado pelo autor.

As concentrações de PT ficaram acima do limite de $0,03 \text{ mg.L}^{-1}$ para ambientes lênticos classe 2 (BRASIL, 2005) ao longo de todo SCRMF (Gráfico 8). De acordo com Smith (1979) uma limitação por fósforo (P) é definida quando razões entre NT:PT ficam acima de 21:1, enquanto razões abaixo de 13:1 indicam uma limitação por Nitrogênio (N). Razões intermediárias indicam que N e P colimitam o crescimento fitoplanctônico. Neste contexto, no caso dos Clusters 1, 2 e 3, esses valores foram 16:1, 14:1 e 13:1 indicando uma tendência de colimitação por N e P a uma limitação pelo N.

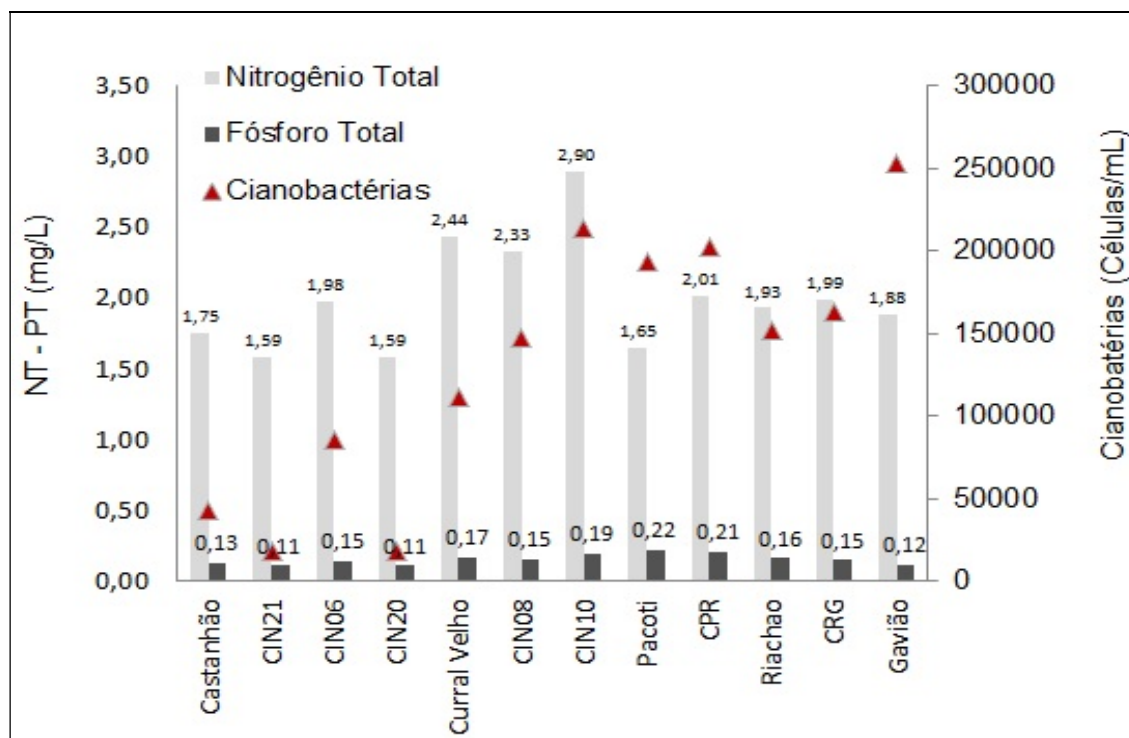
Por outro lado, Hecky e Kilham (1988) encontraram diferentes razões N:P ótimas para diferentes espécies fitoplanctônicas variando entre um extremo de razão N:P abaixo do proposto por Redfield (1958): *Aulacoseira* sp. e *Microcystis* sp. Com uma razão N:P ≤ 10 e no outro extremo a espécie *Scenedesmus quadricauda*, com uma razão N:P de 87:1. Adicionalmente, o crescimento de uma espécie pode variar devido à diferentes fatores como a taxa de crescimento, a temperatura e a luz por exemplo.

O Gráfico 8 apresenta a variação das concentrações médias, ao longo do período amostral, de nitrogênio, fósforo e cianobactérias totais ao longo do SCRMF. A concentração de cianobactérias manteve-se acima do limite definido pela resolução Conama 357/2005 (BRASIL, 2005) para ambientes lênticos classe 2 ($50.000 \text{ células.mL}^{-1}$), com exceção dos pontos Castanhão, CIN21 e CIN20. O pH alcalino encontrado ao longo de todo o sistema indica uma elevada atividade fotossintética (WATSON *et al.*, 1997), neste caso com a dominância das cianobactérias.

A dominância de cianobactérias em reservatórios em regiões semiáridas tropicais pode ser explicada pelo fato das cianobactérias possuírem estratégias para assimilação de nutrientes como a fixação de nitrogênio e acumulação de fósforo, capacidade de utilizar diversos comprimentos de onda de luz visível, capacidade de ajustar sua profundidade na coluna d'água dentre outros (COSTA *et al.*, 2016).

A alta densidade das cianobactérias pode estar relacionada ao elevado tempo de residência da água em reservatórios e às características climáticas locais de altas temperaturas e radiação solar em regiões tropicais (COSTA *et al.*, 2016). Em ambientes lênticos eutróficos, além da influência das concentrações elevadas de nutrientes (Gráfico 8), outros fatores ambientais podem ser associados à dominância de cianobactérias, como baixa turbulência, condições de pouca luz na coluna d'água, dependendo da espécie, e a elevada temperatura (WANG *et al.*, 2011).

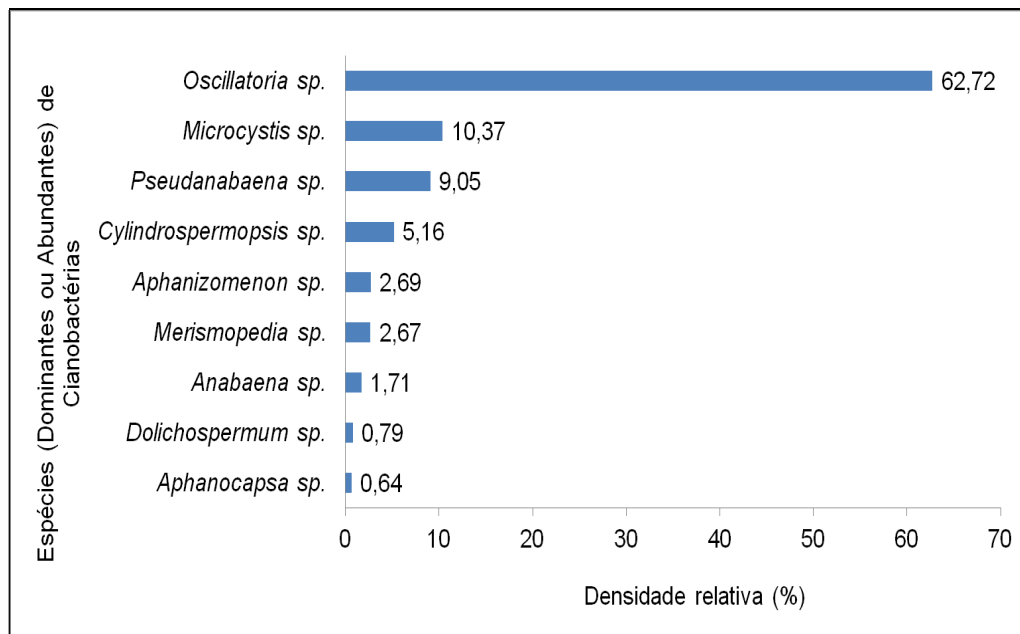
Gráfico 8 – Concentrações médias de nitrogênio total (NT), fósforo total (PT) e cianobactérias ao longo do SCRMF



Fonte: elaborado pelo autor.

O Gráfico 9 apresenta a densidade relativa média de gêneros de cianobactérias no SCRMF ao longo do período amostral. As cianobactérias representaram mais de 93% da densidade do fitoplâncton com um total de 38 gêneros. Verificaram-se dois gêneros dominantes: *Oscillatoria* sp (62,72%) e *Microcystis* sp (10,39%), e sete abundantes: *Merismopedia* sp, *Cylindrospermopsis* sp, *Pseudanabaena* sp, *Anabaena* sp, *Aphanizomenon* sp, *Aphanocapsa* sp, *Dolichospermum* sp. A espécie *Oscillatoria* sp. dominou sobre as demais na maioria dos pontos de amostragem, exceto nos pontos: CIN20 e CIN08.

Gráfico 9 – Abundância relativa (%) média de cianobactérias no SCRMF no período amostral



Fonte: elaborado pelo autor.

No cluster 3 predominou a espécie *Oscillatoria sp.*: CIN10 (56%), Pacoti (84%), CPR (86%), Riachão (81%), CRG (69%) e Gavião (69%). A dominância da *Oscillatoria sp.* também foi observada por Chellappa e Costa (2003) no reservatório Gargalheiras (RN) durante o período seco. Esta dominância, apesar de alternada com outras cianobactérias, foi atribuída pelos autores à diminuição da transparência da água pelo auto sombreamento provocado pelas elevadas densidades celulares.

Cardoso *et al.* (2017), estudaram a composição e a distribuição fitoplanctônica em rios e reservatórios da Bacia do Rio Piranhas-Açu (RN) entre 2010 e 2011. Entre algumas espécies de cianobactérias identificadas como potencialmente produtoras de toxinas, *Oscillatoria sp.* apresentou alto índice de abundância indicando risco potencial à saúde das populações abastecidas.

Aragão (2011) estudou a taxonomia e distribuição das cianobactérias em reservatórios do estado de Pernambuco entre fevereiro de 2009 e janeiro de 2010. Dos 19 reservatórios estudados, 12 apresentam florações de cianobactérias, dentre elas a *Oscillatoria sp.*, apresentando densidade e biomassa, a partir de 10^7 células.mL⁻¹ e 10^2 mg.L⁻¹, respectivamente. Essa espécie também dominou no reservatório Sidi Abderrahmane, localizado na cidade de Safi (Marrocos), tanto no verão, com presença de alta temperatura, quanto no inverno, em baixas temperaturas (BELOKDA *et al.*, 2017). Na Tailândia em 2015,

observou-se que 95% do fitoplâncton presente no reservatório Songkhla era composto por *Oscillatoria* sp. (THAMMASANE; KAOSOL, 2016).

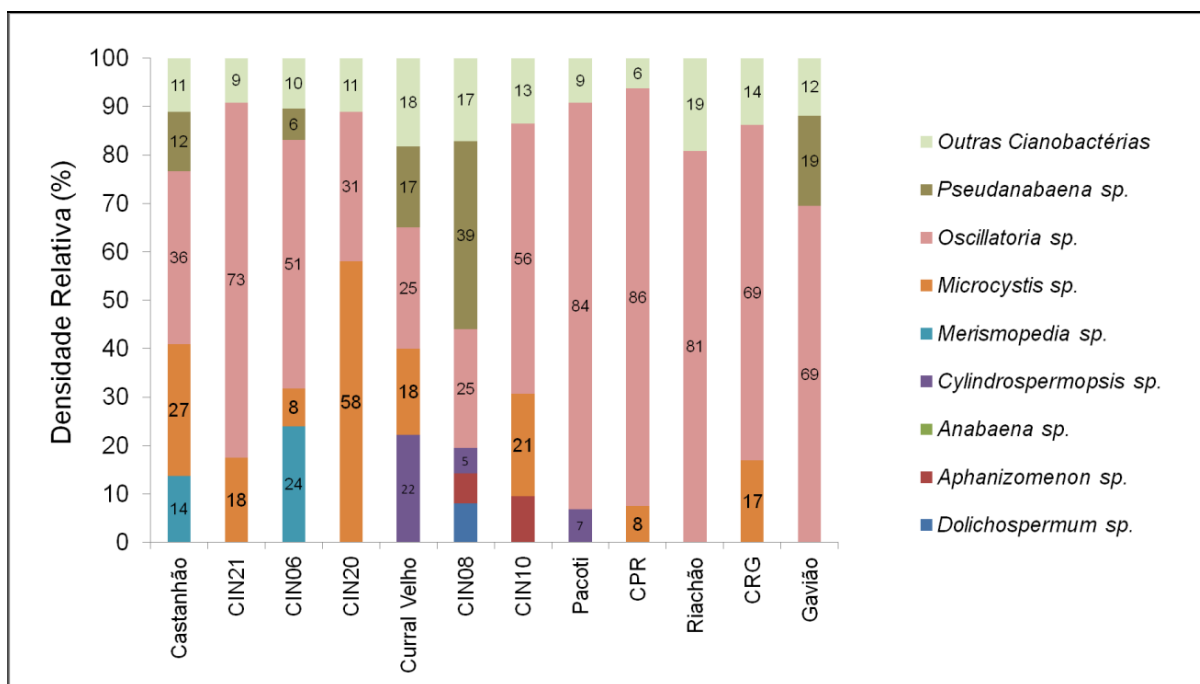
Pesquisas identificaram que algumas espécies do gênero *Oscillatoria* são produtoras de Microcistinas, um grupo de hepatotoxinas heptapeptídicas cíclicas (RINEHART *et al.*, 1994; WARD *et al.*, 1997). Estes metabólitos são altamente tóxicos à saúde de seres humanos e outros mamíferos acima de determinadas concentrações ($1 \mu\text{g.L}^{-1}$), fazendo-se necessária à sua detecção, quantificação e, caso estejam presentes, sua remoção (BELL; CODD, 1996).

O Gráfico 10 apresenta a densidade relativa de cianobactérias baseada nos valores médios das análises no período amostral. O reservatório Gavião, apesar de apresentar o menor tempo de residência hidráulica em consequência do manejo operacional e menor capacidade volumétrica, apresentou maior densidade de cianobactérias dentre os reservatórios analisados (Gráfico 8). Acredita-se que este fato esteja associado principalmente ao acúmulo de nutrientes ao longo das bacias hidrográficas do SCRMF, mas também aos usos e ocupação das bacias hidrográficas de reservatórios mais próximos da RMF que apresentam um maior grau de ocupação urbana.

O SCRMF apresentou características mais eutróficas de montante para jusante, tendência de qualidade de água diferente de outros sistemas em cascata brasileiros. No sistema Cantareira, na região metropolitana de São Paulo, composto por cinco reservatórios em cascata e interconectados por 48 km de canais, verificou-se que os reservatórios à montante eram mais eutrofizados com maior carga de nutrientes que os localizados a jusante, devido provavelmente à proximidade daqueles às áreas com fortes concentrações urbanas (SMITH *et al.*, 2014). Já no caso do Ceará a lógica é inversa, uma vez que os maiores centros (portanto maiores cargas) estão à jusante do sistema.

Houve uma diminuição no transporte específico de poluentes ao longo dos rios Una, Sorocabuçu e Sorocamirim, evidenciando a influência dos reservatórios na mitigação das cargas poluidoras (CONCEIÇÃO *et al.*, 2015). Nos seis reservatórios do baixo e médio Tietê (SP), identificou-se ao longo do rio uma melhora na qualidade ambiental no sentido montante-jusante, o que impactou na composição das macrófitas, no tipo de sedimento e na transparência dos habitats (SMITH *et al.*, 2014). Na bacia hidrográfica do São Francisco, a condição trófica dos reservatórios variou conforme a posição espacial de cada reservatório em cascata: Três Marias (MG), Sobradinho, Itaparica, Complexo de Paulo Afonso e Xingó, com tendência de oligotrofização crescente no sistema (LIMA; SEVERI, 2014).

Gráfico 10 – Densidade relativa dos valores médios de cianobactérias ao longo do SCRMF no período estudado (2017)



Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 CONCLUSÕES

O abastecimento da região metropolitana de Fortaleza, com mais de três milhões de habitantes, é garantido por um macro sistema de transferência de água entre bacias hidrográficas: Médio Jaguaribe, Banabuiú e Metropolitanas. Neste complexo sistema, os reservatórios com maior capacidade de armazenamento estão localizados a montante, diferindo-se, neste aspecto, da maioria dos sistemas em cascata brasileiros. Com base na análise de agrupamento, identificou-se que os três *clusters* foram formados em função da proximidade geográfica das bacias hidrográficas: Médio Jaguaribe, Banabuiú e Metropolitana, corroborando com o aumento das áreas artificiais do sistema de montante para jusante e indicando que as características de uso e ocupação das bacias tem um papel importante na definição da qualidade da água deste sistema.

Observou-se uma evidente piora da qualidade da água de montante para jusante sendo que, dos vinte parâmetros de qualidade de água analisados ao longo do SCRMF, os parâmetros associados à eutrofização (Cianobactéria, pH, nitrogênio total, oxigênio dissolvido, turbidez e clorofila-a) apresentaram aumento significativo de concentração. A dominância das cianobactérias sobre o fitoplâncton ficou evidente em todo o sistema,

representando mais de 93% da densidade, destacando-se a dominância dos gêneros potencialmente produtoras de toxinas, com ênfase para *Oscillatoria* sp. e *Microcystis* sp.

O que torna os resultados ainda mais preocupantes é que o reservatório na ponta do sistema, o açude Gavião, responsável pelo fornecimento de água para cerca de metade da população cearense, sofreu a maior magnificação dos efeitos da eutrofização causados pelo sistema de transferência em cascata, apresentando a maior densidade de cianobactérias. Por outro lado, os parâmetros associados a sais e sólidos facilmente sedimentáveis apresentaram uma redução significativa ao longo do sistema.

Uma limitação dos nossos estudos foi o fato que o período em análise foi um ano com pluviometria abaixo da média em toda a região, e portanto, não foi possível identificar o impacto das diferenças sazonais na qualidade de água. Assim, como o conhecimento acumulado sobre sistemas em cascatas em regiões semiáridas ainda é restrito, acreditamos que nossos estudos devem ser estendidos, incluindo inclusive, anos com precipitações pluviométricas em torno da média histórica ou acima dela.

REFERÊNCIAS

ANAGNOSTIDIS, K.; KOMÁREK, J. 1990. Modern approach to the classification system of cyanophytes 5 – Stigonematales. **Algological Studies**, Stuttgart, v. 79, p. 1-73.

ARAGÃO, N. K. C. V. (2011). **Taxonomia, distribuição e quantificação de populações de cianobactérias em reservatórios do estado de Pernambuco** (Nordeste do Brasil). Dissertação (Mestrado em Botânica), 157 f.

BARBOSA F. A. R.; PADISÁK, J.; ESPÍNDOLA, E. L. G.; BORICS, G.; ROCHA, O. (1999). The cascading reservoir continuum concept (CRCC) and its application to the river Tietê basin, São Paulo State, Brazil, [in:] Tundisi J.G., Straškraba M. (eds), Theoretical reservoir ecology and its applications, **Backhuys, Leiden**: 425–437.

BELL, S. G.; CODD, G. A. (1996) Detection, analysis and risk assessment of cyanobacterial toxins. In: Agricultural Chemicals and the Environment, Issues in Environmental Science and Technology, no. 5 (Hester, R.E. and Harrison, R.M., Eds.), pp. 109–122. **Royal Society of Chemistry**, Cambridge.

BELOKDA, W.; KHALIL, K.; LOUDIKI M.; AZIZ, F.; ELKALAY, K. First assessment of phytoplankton diversity in a Moroccan shallow reservoir (Sidi Abderrahmane). **Journal of Biological Sciences** 26 (2019) 431–438.

BRASIL, J.; ATTAYDE, J. L.; VASCONCELOS, F.R.; DANTAS, D. D. F.; HUSZAR, V. L. M. Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. **Hydrobiologia**, 2016, 770(1), 145-164. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-015-2578-5>.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. RESOLUÇÃO Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005 - Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>> Acesso em: 23 dez. 2018.

CARDOSO, A.S.; MARWELL, D.T.B.; SOBRAL, M.C.M.; MELO, G.L.; CASÉ, M.C.C. (2017) Análise da presença do fitoplâncton em bacia integrante do Projeto de Integração do Rio São Francisco, região semiárida, Nordeste brasileiro - **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.22, n.2 , p.261-269

CARLOS, A. C. **Dinâmica da população de cianobactérias em um reservatório eutrófico do semiárido Brasileiro no período de seca**. Dissertação (Ciência e Tecnologia Ambiental). Universidade Estadual da Paraíba. 2013.

CEPOI, L., "Environmental and Technological Stresses and Their Management in Cyanobacteria". Cyanobacteria: From Basic Science to Applications, [S.l.], **Academic Press - Elsevier**, 2019. p. 217–244. DOI: 10.1016/B978-0-12-814667-5.00011-8.

CHELLAPPA, N.T. & COSTA, M.A.M. (2003). Dominant and co-existing species of cyanobacteria from a Eutrophicated reservoir of Rio Grande do Norte State, Brazil. –‘24: S3–S10.

COGERH. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Portal Hidrológico. (2017) Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/>. Acesso em: 15 nov. 2018.

CONCEIÇÃO, F. T.; SARDINHA, D. S.; GODOY, L. H.; FERNANDES A. M.; PEDRAZZI, F. J. M. (2015) Influência sazonal no transporte específico de metais totais e dissolvidos nas águas fluviais da bacia do Alto Sorocaba (SP) (Seasonal influence on the specific transport of total and dissolved metals in the fluvial waters of the Alto Sorocaba basin), **Geochim. Bras.** 29(1): 23–34 (in Portuguese).

CONLEY, D. J.; PAERL, H. W.; HOWARTH, R. W.; BOESCH, D. F.; SEITZINGER, S. P.; HAVENS, K. E.; LANCELOT, C. (2009) Controlling eutrophication: Nitrogen and phosphorus. *Science*, 323(5917), 1014–1015. (New York, N.Y.). doi:10.1126/science.1167755.

COSTA, M. R. A.; ATTAYDE, J. L.; BECKER, V. Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes. **Hydrobiologia**, 2016, 778(1), 75-89. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-015-2593-6>.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C.; LAMPARELLI, M. C. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSIts). *Ecological Engineering*, v. 60, p. 126-134, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.07.058>.

EPA - United States Environmental Protection Agency. Cyanobacteria and Cyanotoxins: Information for Drinking Water Systems. **Office of Water** Mail Code 4304T. EPA - 810F11001 September 2014.

FANG, Y.P.; DENG, W. (2011) The critical scale and section management of cascade hydropower exploitation in Southwestern China. **Energy**, vol. 36, no. 10, p. 5944-5953. <http://dx.doi.org/10.1016/j.Energy.2011.08.022>.

GAETA, J. W.; SASS, G. G.; CARPENTER, S. R. (2014) Drought-driven lake level decline: effects on coarse woody habitat and fishes. **Can. J. Fish. Aquat. Sci.** 71:315-325.

GUMIERO, B.; SALMOIRAGHI, G. (1998) Influence of an impoundment on benthic macroinvertebrate habitat utilization. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, vol. 26, p. 2063-2069.

GÜNTNER, A.; KROL, M. S.; ARAÚJO, J. C. D.; BRONSTERT, A. Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region / modélisation simple du bilan hydrologique de systèmes de réservoirs de surface dans une grande région semi-aride pauvre en données. **Hydrological Sciences Journal**, v. 49, n. 5, p. 901–918, 2004.

HECKY, R.E.; KILHAM, P. (1988) Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment. **Limnol. Oceanogr.** 33:796–822.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?dados=1&uf=23>. Acesso em: 04 ago. 2020.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cartas temáticas oriundas do Projeto Radam. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/cartas-tematicas.html>. Acesso: 22 mar. 2017.

IPECE - Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Os Recursos Hídricos do Ceará: Integração, Gestão e Potencialidades. Fortaleza: IPECE, 2011. 268 p.

JEPPESEN, E.; BRUCET, S.; NASELLI-FLORES, L.; PAPASTERGIADOU, E.; STEFANIDIS, K.; NÖGES, T.; NÖGES, P.; ATTAYDE, J. L.; ZOHARY, T.; COPPENS, J.; BUCAK, T.; MENEZES, R. F.; FREITAS, F. R. S.; KERNAN, M.; SØNDERGAARD, M.; BEKLIÖĞLU, M. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. **Hydrobiologia**, 2015, 750(1), 201-227. <http://dx.doi.org/10.1007/s10750-014-2169-x>.

JORCIN, A.; NOGUEIRA, M. G. 2005. Phosphate distribution along a cascade of reservoirs (Paranapanema River, SE, Brazil). In SERRANO, L. and GOLTERMAN, HL. (Eds.). Phosphates in Sediments: proceedings of the 4th International Symposium. Leiden: **Backhuys Publishers**. p. 77-86.

KOMÁREK, J; ANAGNOSTIDIS, K. 1989. Modern approach to the classification system of cyanophytes 4 – Nostocales. **Algological Studies**, Stuttgart, v. 56, p. 247-345.

KOMÁREK, J; ANAGNOSTIDIS, K 1998. Cyanoprokaryota: 1. Teil. Chroococcales. In: Ettl, H. et al. (Ed.) Süßwasserflora von Mitteleuropa. Berlin: **Gustav Fischer**, 1998. v.19.

KOMÁREK, J; ANAGNOSTIDIS, K, 2005. Cyanoprokariota: 2. Teil Oscillatoriales. In: Büdel, B. et al. (Ed.) Süßwasserflora Von Mitteleuropa. **Berlin: Heidelberg: Elsevier/Spectrum**, 2005. v.19.

LIMA, A. E., SEVERI, W. (2014) Estado trófico na cascata de reservatórios de um rio no semiárido brasileiro (Trophic state of reservoirs in the cascade of a river in the Brazilian semiarid), **Rev. Bras. Ciênc. Agrár.** 9(1): 124–133 (in Portuguese, English summary).

LIMA, P. L. S. C.; PESSOA, E. K. R.; CHELLAPPA, S.; CHELLAPPA, N. T. Phytoplankton diversity and physical-chemical aspects of water quality of Lake Jiqui, Rio Grande do Norte, Brazil. **Biota Amazônica**, v.3, n.3, p. 97-112, 2013.

LOBO, E. A.; LEIGHTON, G. Estructuras comunitárias de las fitocenosis planctónicas de los sistemas de desembocaduras de ríos Y esteros de la zona central de Chile. **Rev. Biol. Mar.**; v. 22, n. 1, p.1-29, 1986.

LU, T.; CHEN, N.; DUAN, S.; CHEN, Z.; HUANG B. Hydrological controls on cascade reservoirs regulating phosphorus retention and downriver fluxes. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 23, n. 23, p. 24166-24177, 2016.

MAAVARA, T.; CHRISTOPHER, T.; RIDENOUR, P. C.; STOJANOVIC, S.; DÜRR, H. H.; POWLEY, HELEN R.; CAPPELLEN, P. VAN. Global phosphorus retention by river damming. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 112, n. 51, p.15603–15608. 2015.

MOURA, D.S.; DE ALMEIDA, A. S. O.; PESTANA, C.J.; GIRÃO, L. G.; CAPELO-NETO, J. Internal loading potential of phosphorus in reservoirs along a semiarid watershed. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 25, 2020.

NALIATO, D.; NOGUEIRA, M. G.; PERBICHE-NEVES, G. 2009. Discharge pulses of hydroelectric dams and their effects in the downstream limnological conditions: a case study in a large tropical river (SE, Brazil). **Lakes and Reservoirs: Research and Management**. vol. 14, p. 301-314.

NOGUEIRA, M. G.; FERRAREZE, M.; MOREIRA, M. L.; GOUÊA, R. M. 2010. Phytoplankton assemblages in a reservoir cascade of a large tropical-subtropical river (SE, Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, vol. 70, no. 3, p. 781-793. PMID:21085783. <http://dx.doi.org/10.1590/S1519-69842010000400009>.

OLSEN, B. K., CHISLOCK, M. F., WILSON, A. E. "Eutrophication mediates a common off-flavor compound, 2-methylisoborneol, in a drinking water reservoir", **Water Research**, v. 92, p. 228–234, 2016. DOI: 10.1016/j.watres.2016.01.058. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.058>.

PADE, N., HAGEMANN, M. "Salt acclimation of cyanobacteria and their application in biotechnology", **Life**, v. 5, n. 1, p. 25–49, 2015. DOI: 10.3390/life5010025. .

PAERL, H. W. 2009. Controlling Eutrophication along the Freshwater–Marine Continuum: Dual Nutrient (N and P) Reductions are Essential. **Estuaries and Coasts**, 32:593–601.

PEREIRA, P. S.; VEIGA, B. V. DZIEDZIC, M. Avaliação da Influência do Fósforo e do Nitrogênio no Processo de Eutrofização de Grandes Reservatórios Estudo de Caso: Usina Hidrelétrica Foz do Areia RBRH–**Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume18n.1 – Jan/Mar2013,43 - 52.

POMPÊO, M.; PADIAL P. R.; MARIANI, C. F.; CARDOSO-SILVA, S.; MOSCHINI-CARLOS, V.; SILVA, D. C. V. R.; BRAZIL, T. C.P.; BRANDIMARTE, A. L. 2013. Bioavailability of metals in the sediment of an urban tropical reservoir (Guarapiranga reservoir, São Paulo, Brazil): is there potential toxicity and spatial heterogeneity?, **Geochim. Bras.** 27(2): 104– 119 (in Portuguese, English summary). Scitotenv.2015.07.029.

REDFIELD, A.C. (1958) The biological control of chemical factors in the environment. *Am. Sci.* 46: 205-222.

RINEHART K. L.; NAMIKOSHI, M.; CHOI, B.W. (1994) Structure and biosynthesis of toxins from blue-green algae (cyanobacteria) **J. Appl. Phycol.**6, 159–176.

SHARMA, D. K. Impact of dams on river water quality. *International Journal of Current Advanced Research.* Vol 4, Issue 7, pp176-181, July 2015.

SILVA, S. M. O.; SOUZA FILHO, F. A de.; CID, D. A. C.; AQUINO, S. H. S.; XAVIER, L. C. P. Proposta de gestão integrada das águas urbanas como estratégia de promoção da segurança hídrica: o caso de Fortaleza. **Eng Sanit Ambient**, v.24 n.2, mar/abr 2019, p. 239-250. 2019.

SILVA, S. M. O.; SOUZA FILHO, F. A. de.; CID, D. A. C.; AQUINO, S. H. S. Avaliação do risco da alocação de água em período de escassez hídrica: o caso do Sistema Jaguaribe–Metropolitano. **Eng Sanit Ambient**, v.22, n.4, jul/ago 2017, p. 749-760. 2017.

SMITH, V. H. 1979. Nutrient dependence of primary productivity in lakes. **Limnol. Oceanogr.** 24(6): 1051-1064.

SMITH, W. S.; ESPÍNDOLA, E. L. G.; ROCHA, O. (2014) Environmental gradient in reservoirs of the medium and low Tietê River: limnological differences through the habitat sequence, **Acta Limnologica Brasiliensia** 26(1): 73–88.

SRH - Secretaria de Recursos Hídricos. Atlas Eletrônico dos Recursos Hídricos do Ceará. (2015) Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/>. Acesso em: 24 out. 2018.

THAMMASANE, S.; KAOSOL, T. (2016) Single and combined chemical coagulants for *Oscillatoria* sp. removal in raw water for water treatment plant. **KKU Eng. J.** 43(S2), 247e249.

VAROL, M.; E ŞEN, B. (2012) Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey. *Catena*, 92(July), 1–10. doi:10.1016/j. **Catena.** 2011.11.011.

WANG, L.; CAI, Q.; TAN, L.; KONG, L. Phytoplankton development and ecological status during a cyanobacterial bloom in a tributary bay of the Three Gorges Reservoir, China. *The Science of the Total Environment*, v. 409, n. 19, p. 3820-3828, 2011. PMid:21752429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.06.041>.

WANG, Y. A.; ZHANG, W. A.; ZHAO, Y. B.; PENG, HONG. C.; YINGYUAN, S. Modelling water quality and quantity with the influence of inter-basin water diversion projects and cascade reservoirs in the Middle-lower Hanjiang River. **Journal of Hydrology** 541 (2016)

1348–1362.

WARD, C. J.; BEATTIE, KENNETH, A. E.; LEE, D. Y.C. CODD, G. A. Colorimetric protein phosphatase inhibition assay of laboratory strains and natural blooms of cyanobacteria: comparisons with high-performance liquid chromatographic analysis for microcystins. **FEMS Microbiology Letters**, Volume 153, Issue 2, 1 August 1997, Pages 465–473, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1997.tb12611.x>.

WATSON, S. B.; MCCAULEY, E.; DOWNING, J.A. (1997) Patterns in phytoplankton taxonomic composition across temperate lakes of differing nutrient status. **Limnology and Oceanography**, v. 42, n.3, p.487-495.

YOO, Y.D., SEONG, K.A., KIM, H.S., JEONG, H.J., YOON, E.Y., PARK, J., KIM, J.I., SHIN, W., PALENIK, B. 2018. Feeding and grazing impact by the bloom-forming euglenophyte *Eutreptiella eupharyngea* on marine eubacteria and cyanobacteria. **Harmful Algae** 73, p. 98-109.

5. CAPÍTULO – IMPACTO DA DINÂMICA DE ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA SOBRE A QUALIDADE DE ÁGUA EM SISTEMA EM CASCATA - ESTUDO DE CASO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO - Pesquisas relacionadas às alterações ecológicas ocasionadas pelas construções de barragens, em países tropicais, ainda são esparsos e fragmentário. Neste contexto, o presente estudo focou no aporte de cargas dos macronutrientes (NT e PT) e na influência da estratificação do reservatório Castanhão em relação à transposição de água do canal da Integração até ao ponto a jusante do açude Curral Velho. Cujas metodologia de análise baseou-se na análise dos perfis da coluna de água e na aplicação de testes estatísticos para as variáveis ambientais. Com referência aos perfis, averiguo-se um padrão sazonal da variável temperatura, com processos de estratificação no primeiro semestre e desestratificação no segundo. O OD e pH apresentaram estratificação irregular. A CE e os SDT não estabeleceram nenhum padrão. Também se verificou que existe diferença significativa para temperatura, OD e pH, entre os pontos Castanhão e CIN21, que ocasionou a desoxigenação nos pontos CIN21 e CIN08. A oxigenação natural (média de 6,91 mg.L⁻¹) foi constatada a 43,50 km (CIN20), a jusante do reservatório Castanhão. Nos demais pontos não se identificou diferença entre as médias das variáveis. Em relação às cargas de nutrientes NT e PT, essas tem tendência a oscilar conforme a vazão liberada pela operação de gerenciamento do reservatório e não foi possível identificar se no período de inverno ocorre aumento de cargas de nutrientes, que pode ser consequência do pequeno volume de recarga para o período em análise.

Palavras-chaves: Transferência de água. Reservatórios em cascata. Cargas de nutrientes.

ABSTRACT - Research related to ecological changes caused by the construction of dams in tropical countries is still sparse and fragmentary. In this context, the present study focused on the contribution of macronutrient loads (TN and TP) and the influence of the stratification of the Castanhão reservoir in relation to the water transposition from the Integration Channel to the point downstream of the Curral Velho reservoir. The analysis methodology was based on the analysis of the water column profiles and the application of statistical tests for environmental variables. With reference to the profiles, a seasonal pattern of the temperature variable is investigated, with stratification processes in the first semester and de-stratification in the second. OD and pH showed irregular stratification. The EC and TDS have not set any standards. It was also found that there is a significant difference for temperature, DO and pH, between Castanhão and CIN21 points, which caused deoxygenation at points CIN21 and CIN08. Natural oxygenation (average of 6.91 mg.L⁻¹) was found at 43.50 km (CIN20),

downstream of the Castanhão reservoir. In the other points, there was no difference between the means of the variables. Regarding the TN and TP nutrient loads, these tend to oscillate according to the flow released by the reservoir management operation and it was not possible to identify whether in the winter period there is an increase in nutrient loads, which may be a consequence of the small volume of nutrients. recharge for the period under review.

Keywords: Water transfer. Cascading reservoirs. Loads of nutrients.

5.1 INTRODUÇÃO

Barragens e transferências de água já existem há milhares de anos, mas apenas nos últimos 50-75 anos, eles se tornaram massivos em tamanho e alcance, e estima-se que, mais que 45.000 barragens com mais de 15 m de altura são registradas no mundo e muitas centenas de milhares de barragens menores foram construídas em rios e em fazendas, e avalia-se que, no hemisfério norte, apenas 23% da vazão em 139 dos maiores rios não foi afetado por reservatórios (DYNESIUS; NILSSON, 1994).

A construção de barragens além de alterar e/ou limitar a disponibilidade de água para as pessoas e ecossistemas a jusante, pode alterar drasticamente suas características físico-químicas e biológicas (FRIEDL; WÜEST, 2002; KUNZ *et al.*, 2011). Muitos são os desafios para a gestão dos reservatórios situados em regiões tropicais, pois a qualidade da água associado ao represamento, ocasionam diversas alterações relacionados aos processos de estratificação térmica e química da coluna de água (BOEHRER; SCHULTZE, 2008).

Corpos de águas localizados em áreas de baixa latitude, como as zonas tropicais são fundamentalmente imprevisíveis ou sazonais, e pesquisas assinalam que nessas regiões os processos de estratificação são predominantemente oligomíticos (misturando irregularmente) ou polimíticos (misturando muitas vezes por ano) (BOEHRER; SCHULTZE, 2008). Contudo, a pouca disponibilidade de dados de reservatórios inseridos em áreas tropicais e subtropicais dificulta as investigações limnológicas nestes ecossistemas (GRANZOTTI *et al.*, 2018).

Estudar os processos de estratificação em reservatórios é fundamental para entender, as diversas alterações físicas e químicas no corpo d'água, como distribuição de gases dissolvidos e nutrientes na água; assim como, acúmulo de substâncias e elementos químicos no hipolímnio, que ocasiona a formação de substâncias redutoras, e, por conseguinte, a desoxigenação desta camada favorece eventos de eutrofização, devido à recirculação interna (BENETTI *et al.*, 2006; LOPES, *et al.*, 2018).

Embora a diferença entre superfície e águas profundas em lagos tropicais é tipicamente menor, e pode variar de 3 a 5 °C, do que em latitudes mais altas (LEWIS, 1996). Nestas regiões, é possível ocorrer maiores variações a exemplo do lago Kariba que atingiu diferença 7 °C entre as águas superficiais e profundas (MAGADZA, 2010). A estratificação térmica é um fator importante na regulação de processos químicos e biológicos, já que as diferenças de densidade influenciam a mistura vertical e a distribuição de organismos, de substâncias químicas, de íons e de partículas, que além de outras consequências, podem alterar a distribuição do fitoplâncton no perfil vertical da coluna d'água de reservatórios (BECKER *et al.*, 2008).

Em reservatórios de regiões tropicais é mais comum à ocorrência de estratificação e desestratificação térmica diária (ESTEVES, 2011). A principal hipótese que explica essa condição é o resfriamento do ar nos períodos noturnos e a forte incidência solar durante o dia (BARBOSA; TUNDISI, 1980). Quando esses reservatórios liberam água para um sistema a jusante, através de uma tomada d'água no fundo do reservatório, essa variabilidade diária pode implicar na liberação de águas hipolimnéticas mais frias e anóxicas e impactar na qualidade da água do rio ou canal por centenas de quilômetros, portanto, pode ser uma fonte de degradação ambiental, destruindo serviços ecossistêmicos e econômicos prestados às comunidades ribeirinhas (KUNZ *et al.*, 2011).

Neste contexto, o presente artigo tem como objetivo avaliar o impacto da estratificação térmica do reservatório Castanhão sobre parâmetros limnológicos relacionados à eutrofização de corpos hídricos no início do macrossistema em cascata da região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. As hipóteses testadas foram: (a) a estratificação térmica do açude Castanhão interfere na qualidade da água do sistema a jusante, (b) as concentrações de nutrientes não apresentam diferenças significativas entre os diversos pontos estudados.

5.2 MATERIAS E MÉTODOS

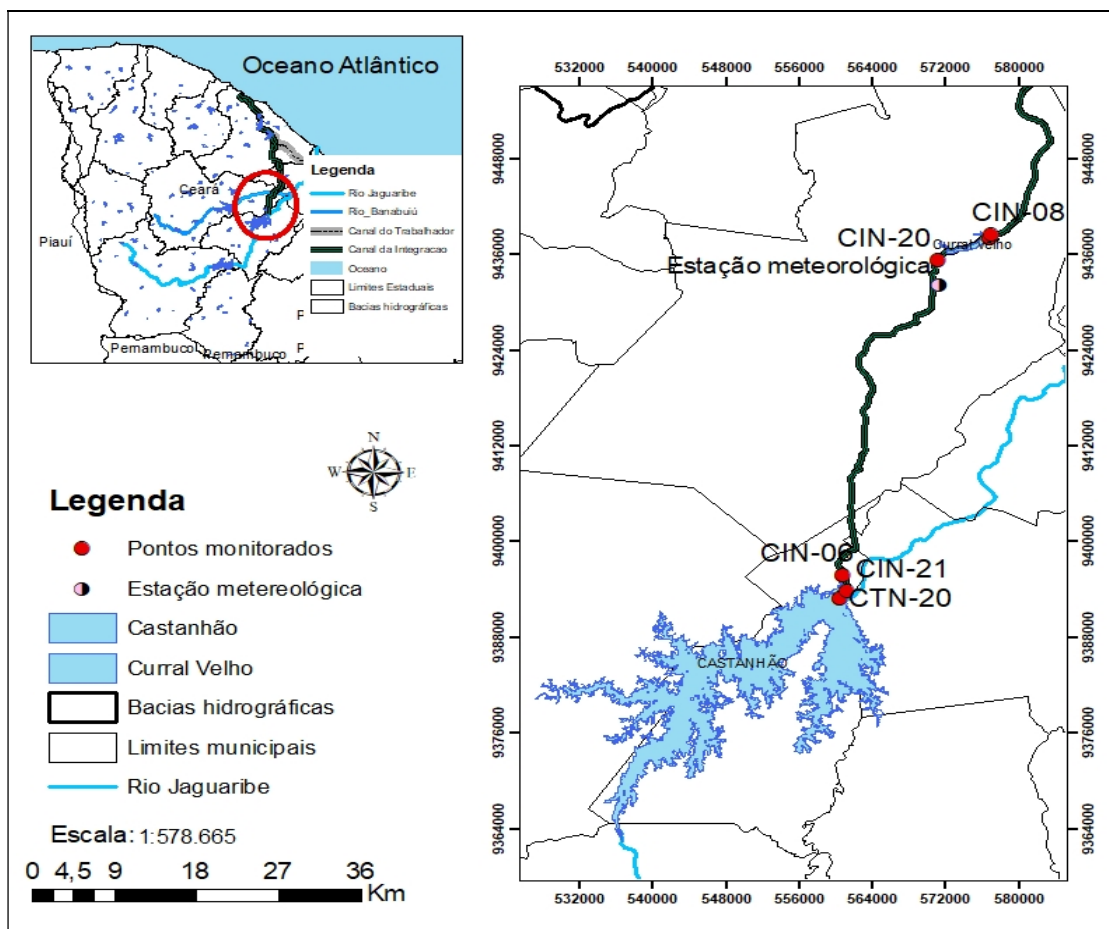
5.2.1 Área de estudo

O reservatório Castanhão, maior reservatório do Ceará, foi construído em 2003, está localizado no município de Alto Santo e tem capacidade de armazenamento de 6.700,00 hm³. A principal finalidade deste manancial é manter a transposição de água pelo canal da Integração para atender aos múltiplos usos, mas principalmente o abastecimento humano da Região Metropolitana de Fortaleza (COGERH, 2019). O canal da Integração apresenta 05 trechos: trecho 1 – açude Castanhão ao açude Curral Velho; trecho 2 – açude Curral Velho à

Serra do Felix; trecho 3 – Serra do Felix ao açude Pacajus; trecho 4 – açude Pacajus aos açude Gavião; trecho 5 – açude Gavião ao porto do Pecém, totalizando 256,8 km de extensão e capacidade de aduzir entre 9,00 e 22,00 m³/s (SRH, 2019). Das águas liberadas pelas comportas de fundo do açude Castanhão, parte vai por gravidade para o rio Jaguaribe e o restante é bombeado para o canal da Integração (Figura 11).

A liberação de vazão do reservatório Castanhão para o canal da Integração é realizado pelo órgão de gerenciamento Cogerh e ocorre a partir de descarga de fundo, cuja tomada d’água tem galeria com 194 m de comprimento e 3.700 mm de diâmetro (SRH, 2020). O sistema de monitoramento das vazões do canal de Integração é realizado pela quantidade de horas trabalhadas pelas bombas localizadas na estação de bombeamento (EB Castanhão), localizado a jusante do reservatório (Figura 12).

Figura 11 – Mapa de localização dos reservatórios no sistema em cascata Fortaleza



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12 – Estação de bombeamento (EB Castanhão)



Fonte: SRH, 2019.

5.2.2 Estudo das vazões e da qualidade da água

Com relação ao monitoramento de qualidade de água, este estudo investigou seis pontos de monitoramento, iniciando no reservatório Castanhão até o ponto localizado a jusante do reservatório Curral Velho, denominado de CIN08. As coordenadas de localização da campanha de monitoramento, ano de construção, volume e área das bacias hidráulicas dos reservatórios, encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados de localização dos pontos de monitoramento, volume e área da hidráulica dos açudes considerados no estudo

Número	Descrição	Coordenadas (UTM 24M –Sirgas 2000)		Ano de construção	Volume (hm ³)	Área da bacia hidráulica (Km ²)
		E	N			
1	Castanhão (Superfície e fundo)	560.466	9.392.963	2003	6.700	32,50
2	CIN21	561.214	9.393.802	-	-	-
3	CIN06	560.737	9.395.806	-	-	-
4	CIN20	571.149	9.435.426	-	-	-
5	Curral Velho	576.873	9.438.016	2007	12,17	4,13
6	CIN08	577.017	9.438.537	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Foram realizadas doze campanhas para o monitoramento da qualidade da água, com frequência trimestral no período de 2017 a 2019. As coletas foram feitas a 30 cm da superfície nos reservatórios e nos canais. No período em análise, a coluna de água do Castanhão tem aproximadamente 19 m de profundidade, que fica localizado próximo à

estrutura dos taludes de barramento da tomada de água. Os parâmetros analisados e os métodos utilizados são citados na Tabela 11. Estas informações foram obtidas dos bancos de dados da Cogerh. Os dados climatológicos: precipitação, velocidade do vento e insolação foram retirados do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 11 – Parâmetros qualitativos analisados no período de 2017 a 2019

Parâmetros	Sigla	LQ	Método
Condutividade elétrica (mS.cm ⁻¹)	CE	0,01	Sonda YSI 6600
Cianobactérias (Células.mL ⁻¹)		-	Câmara de Sedgewick-Rafter - Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater, 2012
Fósforo total (mg.L ⁻¹)	PT	0,01	Método do Persulfato (4500-P-J) e (4500-P-E) – APHA, 201
Nitrogênio total (mg.L ⁻¹)	NT	0,94	Método do Persulfato (4500-P-J) e (4500-NO3--E) – APHA, 2012.
Oxigênio dissolvido (mg.L ⁻¹)	OD	0,05	Sonda YSI 6600
pH	pH	0,01	Sonda YSI 6600
Sólidos dissolvidos totais (mg.L ⁻¹)	SDT	2,00	Gravimetria (2540 D) e Cálculo - APHA, 2012.
Temperatura da água (°C)	T	0,01	Sonda YSI 6600

Fonte: COGERH. LQ – Limite de Quantificação.

5.2.3 Análise estatística

Para a representação gráfica dos dados empregou-se o Boxplot, ou Box-and-whisker plot. Dada a amostra y , o Boxplot mostra uma caixa do tamanho da distância interquartil, com uma barra interna representando a mediana. São identificadas e removidas da amostra as observações potencialmente surpreendentes (*outliers*), representadas no gráfico como pontos isolados. Uma vez retirados os *outliers*, são gerados segmentos denotando os valores mínimo e máximo restantes. O Boxplot é particularmente útil para comparar várias amostras em um mesmo gráfico (FRERY; CRIBARI-NETO, 2011).

A normalidade dos dados foi verificada graficamente, por meio do gráfico QQ-plot, e pelo teste de Shapiro-Wilks. Considerou-se normal, o conjunto de dados que apresentam todos os pontos dentro dos limites do gráfico e também p-valor maior do que a significância adotada de 5%. Utilizou-se o teste T para identificar diferenças significativas entre as variáveis ambientais, caso os dados atendam aos requisitos de normalidade. O teste T é um teste de hipótese que usa conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese nula quando a estatística de teste (t) segue uma distribuição T de Student. Este teste se aplica a

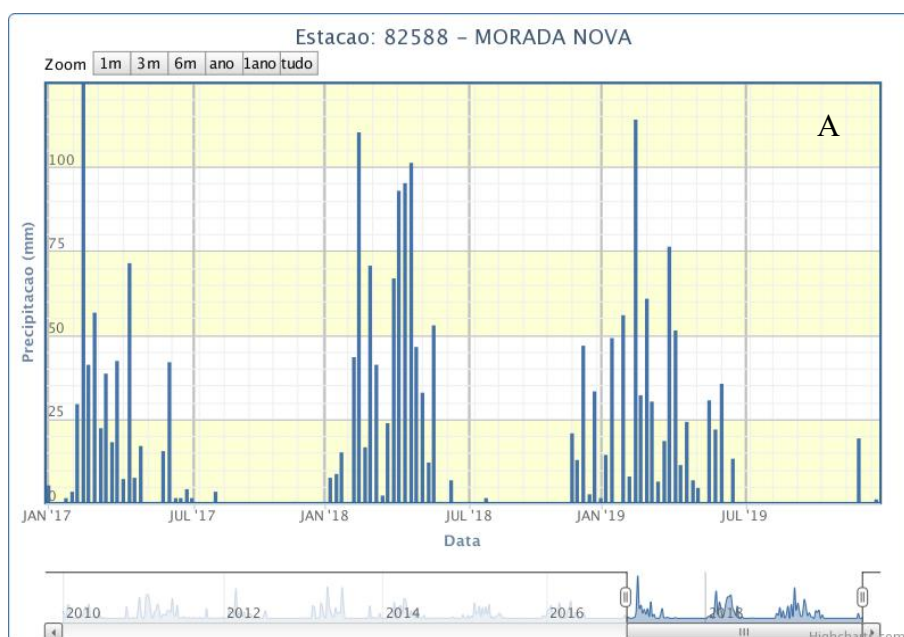
planos amostrais onde se deseja comparar dois grupos independentes (FRERY; CRIBARINETO, 2011).

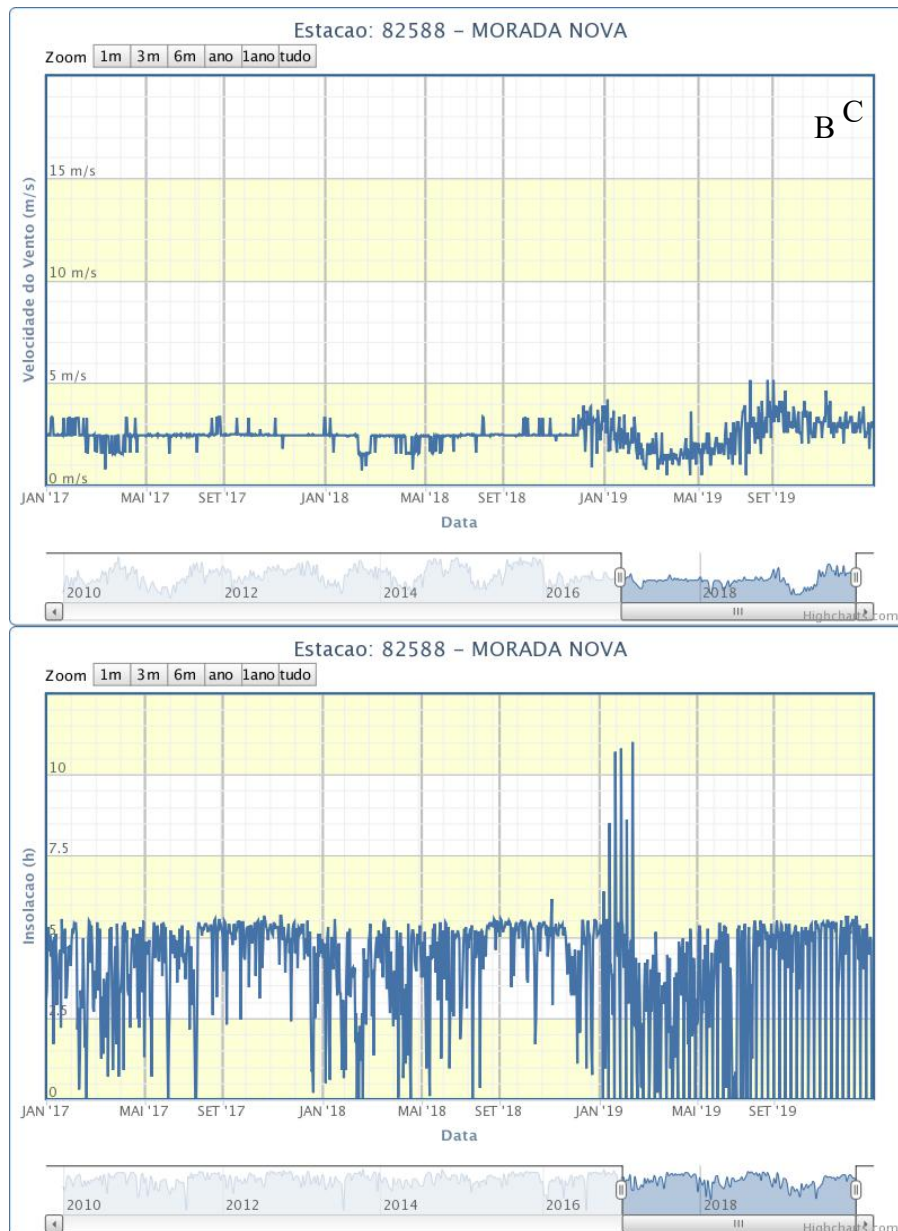
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.3.1 Dados climatológicos

Com relação aos dados climatológicos (Figura 13A), observa-se que as precipitações concentraram-se principalmente no primeiro semestre dos três anos (2017, 2018 e 2019) em análise, com valores médios de 698, 802 e 676 milímetros, respectivamente. Nos anos de 2017 a 2019, as precipitações ficaram abaixo da média (800 mm) para o estado do Ceará (INMET, 2019). O valor médio da velocidade dos ventos (Figura 13B) foi aproximadamente de $2,50 \text{ m.s}^{-1}$. Pode-se visualizar que ocorreram valores atípicos, com aumentos nos meses de janeiro a março de 2019, com conseqüente redução até o mês de julho, quando retornaram às vizinhanças do valor médio. Observaram-se também maiores períodos de insolação no primeiro semestre dos anos de 2017 e 2018, atingindo valores de 6h diárias, enquanto no segundo semestre esses valores foram menores. Em 2019, ocorreram picos de insolação de até 11 h nos meses de janeiro e fevereiro. Nos meses subsequentes, a frequência reduziu-se a um valor médio abaixo de 6 h diárias e com variabilidades mais intensas até final do período chuvoso (Julho). Após isso, a insolação reduziu a variabilidade e estabilizou novamente em tornos das 6h diárias (Figura 13C).

Figura 13 – Dados climatológicos da área de estudo: precipitação (A), velocidade do vento (B) e insolação (C)





Fonte: INMET, 2019.

5.3.2 Dinâmica de estratificação do reservatório Castanhão

O perfil vertical da temperatura de água do reservatório Castanhão apresentou estratificação sazonal no primeiro semestre dos anos avaliados (Figura 14). Nestes períodos a água mais fria concentrou-se na camada mais profunda, ou hipolímnio, enquanto as temperaturas mais elevadas foram registradas na camada superior, epilímnio. No segundo semestre dos anos avaliados, houve uma menor tendência de estratificação térmica além de menores temperaturas médias comparadas ao primeiro semestre. Nestes períodos de estratificação sazonal, observaram-se (Tabela 12) os maiores gradientes térmicos médios nos meses de março/2017 (1,39 °C), abril/2018 (1,60 °C) e março/2019 (1,26 °C).

Esses pequenos gradientes térmicos verticais da água podem induzir elevada estabilidade à estratificação uma vez que, por exemplo, a diferença de densidade da água entre 29° e 30°C é 3,7 vezes maior que a variação entre 6 e 7 °C, ou seja, em regiões tropicais não há necessidade de grandes diferenças de temperatura entre as sucessivas camadas para que se estabeleça uma estratificação térmica estável (NOGUEIRA, 1991). Pesquisas realizadas em 54 dos maiores reservatórios localizados em baixa latitude avaliaram que, apesar de existir ambiguidade na literatura em relação ao comportamento da estratificação dos corpos d'água nos trópicos, a maioria dos reservatórios em baixa latitude apresentou estratificação sazonal (WINTER *et al.*, 2019).

A estratificação química do oxigênio dissolvido (OD) e do pH apresentaram comportamentos similares, exibindo um padrão semelhante ao da estratificação térmica. A desestratificação térmica do segundo semestre de 2017, entretanto, não foi suficiente para elevar os níveis de OD nem do pH do hipolímnio. Pode-se visualizar, também na Figura 14, que o OD na camada de fundo atingiu valores próximos a zero nos períodos que ocorreram a estratificação térmica. Já no segundo semestre dos anos 2018 e 2019, a desestratificação térmica foi suficiente para levar mais oxigênio e elevar o pH das camadas inferiores no ponto avaliado e o fator que pode ter contribuído para a desestratificação em 2019 desses dois parâmetros, é menor insolação na área de estudo e maior intensidade do vento.

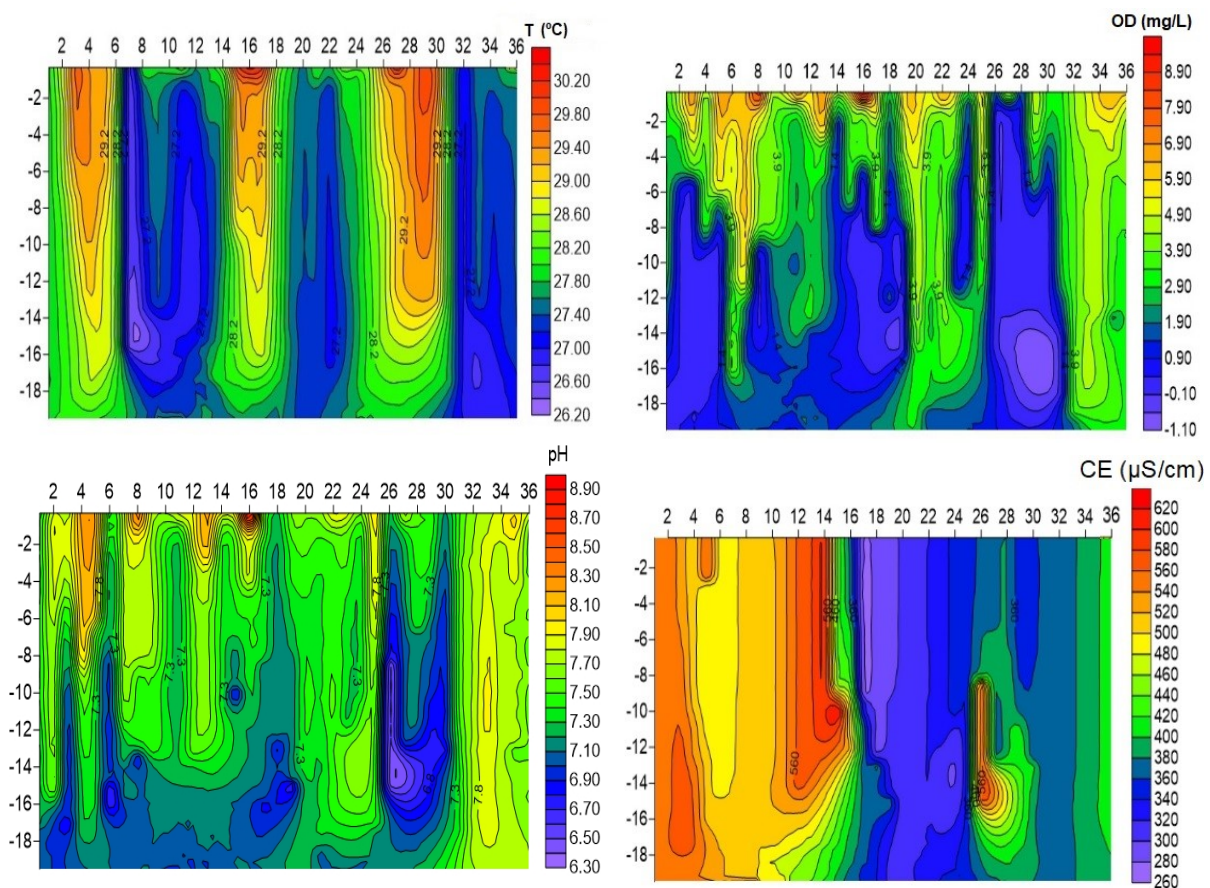
No ano de 2018 a precipitação pluviométrica foi próximo à média histórica e maior que nos outros dois anos estudados e, em 2019, foram registradas as maiores velocidades do vento no segundo semestre. No reservatório Bakum na Malásia, na profundidade entre 3 e 6 metros, o conteúdo de oxigênio caiu abaixo de 5 mg.L⁻¹ e a hipóxia foi registrada; sendo que, o fluxo de saída para o rio ocasionou a diminuição da temperatura, OD e pH e aumentou a turbidez e TSS do rio para jusante no período sem chuvas (LING *et al.*, 2017).

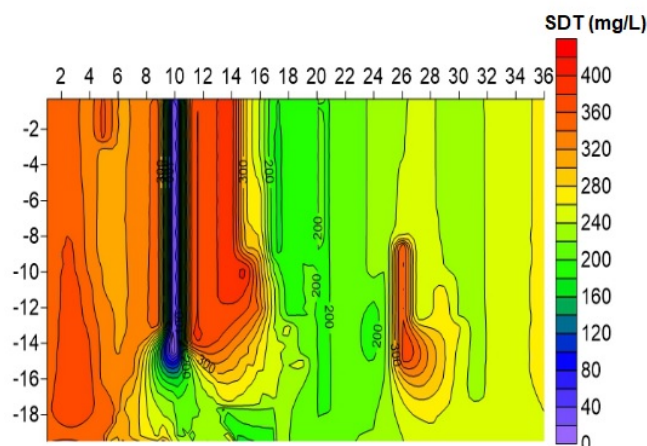
Yu e Wang (2011) usaram simulação numérica para examinar os efeitos da radiação solar, velocidade do vento e fluxos de entrada e concluíram que o vento era o fator mais importante no estabelecimento da estratificação térmica dos fluxos de entrada no reservatório das Três Gargantas, na China. Winter *et al.* (2019), constatou que as barragens em baixa latitude tem o potencial de descarregar águas profundas mais frias e anaeróbias, podendo contribuir para a eutrofização dos ecossistemas aquáticos a jusante por causa da recarga interna de fósforo.

Não foram observados processos bem definidos de estratificação química com relação à condutividade elétrica (CE) e sólidos dissolvidos totais (SDT), conforme ocorrido

com a estratificação térmica, mostrando que estes parâmetros são menos sensíveis aos efeitos das diferenças de temperatura entre camadas. Um ponto importante a se observar é que a variabilidade sazonal destes parâmetros foi observada após a ocorrência das precipitações pluviométricas (802 mm) da primeira metade de 2018, momento quando houve uma diminuição expressiva de ambos os parâmetros quando comparados ao ano de 2017. A tendência de redução SDT e CE, após o períodos de chuvas, ocorreu em 12 pontos da bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns, onde SDT variou de 5,9 a 80,6 mg.L⁻¹ (chuva) e 5,8 a 68,0 mg.L⁻¹ (seca) e a condutividade elétrica (CE) apresentou variação de 13,33 a 168,80 ms.cm⁻¹ (chuva) e 13,3 a 142,7 ms.cm⁻¹ (seca) (RIBEIRO *et al.*, 2016).

Figura 14 – Perfil da coluna da água das variáveis ambientais: temperatura da água, oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais para o período de 2017 a 2019. O eixo Y representa a profundidade e o X o mês de monitoramento





Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 12 – Valores das variáveis limnológicas nos períodos de estratificação no reservatório Castanhão

Periodo (mês/ano)	Valores	Temperatura (°C)	OD (mg/L)	pH	CE (mS/cm)	SDT (mg/L)
Março/2017	Máximo	29,71	6,89	7,71	533	346
	Mínimo	28,32	0,35	6,76	568	369
	Diferença	1,39	6,54	0,95	-35	-23
Abril/2018	Máximo	30,23	9,86	8,95	368	240
	Mínimo	28,72	0,19	7,17	521	340
	Diferença	1,60	9,67	1,78	-153	-100
Março/2019	Máximo	30,33	5,08	7,74	374	243
	Mínimo	29,07	0,21	7,04	384	250
	Diferença	1,26	4,87	0,7	-10	-7

Fonte: elaborado pelo autor.

5.3.3 Análise da qualidade de água do sistema de transferência de água

A análise estatística dos dados de fósforo (P) e nitrogênio (N) nos pontos Castanhão superficial x Castanhão fundo (Tabela 13) não identificou diferença significativa no período em análise. Nos anos de 2017 a 2019, a capacidade do volume de armazenamento do Castanhão era muito baixo, próximo a 6% para o período de chuvas e volume ainda menores no período de estiagem (Figura 15). Assim, para o período em análise, constatou-se que o abastecimento do sistema com água da camada superficial liberaria quantidades similares de nutrientes que a água retirada pela descarga de fundo atualmente em funcionamento.

No lago Baikal, Rússia siberiana, a extensão do esgotamento dos nutrientes das águas superficiais e a magnitude da biomassa e da produtividade do fitoplâncton foram fortemente correlacionados com o grau de estratificação térmica (Goldman *et. al.*, 1996). Su *et al.* (2019), relataram que a estratificação de oxigênio dissolvido influenciou notavelmente

na quantidade e na especiação de N durante os verões no Lago Longjing, China. No hipolímnio, NH^{+4} foi a principal espécie de nitrogênio, contribuindo com quase 85% desta espécie no lago. Além disso, aproximadamente 70% do N_2O foram acumulados no hipolímnio. Nestes dois casos, há de se observar que a estratificação em lagos temperados ocorrem por longos períodos de tempo, propiciando tempo suficiente para que os nutrientes sejam diminuídos ou extintos nas camadas superiores o que não acontece em mananciais localizados no semiárido brasileiro, onde o período de estratificação/desestratificação é diário.

Salienta-se, entretanto que, esse resultado pode estar restrito à situação atual de baixa disponibilidade hídrica, e não representa o comportamento de períodos com maior capacidade volumétrica. Conforme monitoramento da COGERH (2019), desde a construção no ano de 2003, o reservatório Castanhão atingiu a cota máxima (106 m) apenas no ano de 2004. Nos três anos em análise (2017 a 2019), ocorreu a maior recarga de 582,99 hm^3 , que representa 8,60 % da capacidade total no primeiro semestre de 2018. Em dezembro de 2019, final do período em análise, a capacidade de armazenamento permaneceu baixa 187,37 hm^3 (2,8%).

Figura 15 - Evolução volumétrica do reservatório Castanhão



Fonte: Cogerh, 2020.

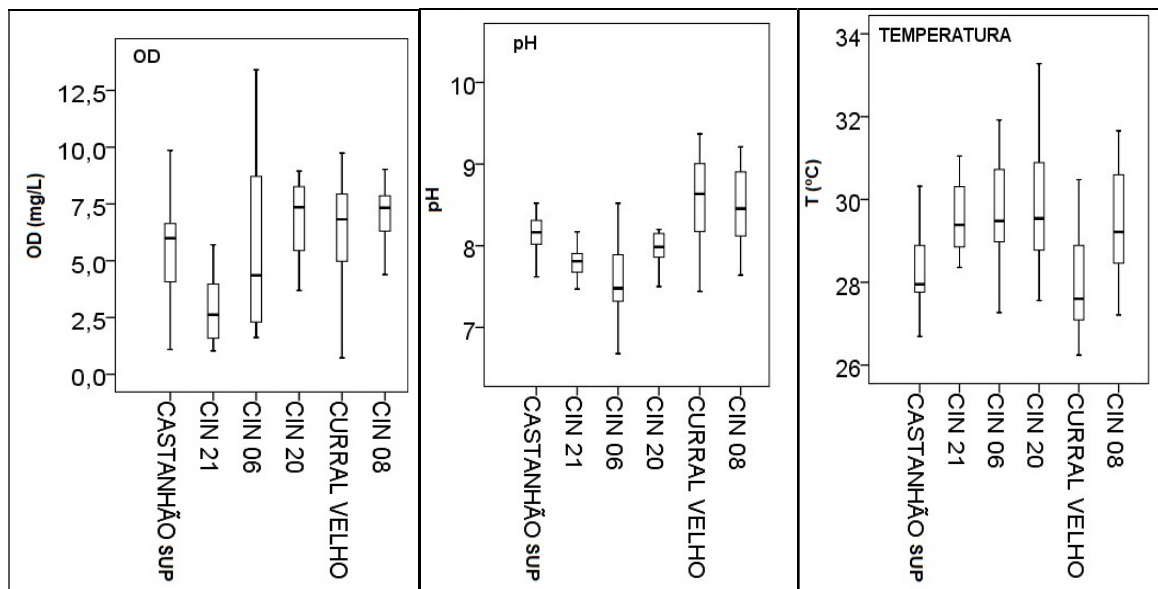
Os pontos Castanhão Superfície x CIN21 (jusante da barragem do Castanhão) tampouco apresentaram diferença significativa para P e N, nem do número de cianobactérias. Por outro lado, as variáveis OD, pH e temperatura apresentaram diferenças significativas (Tabela 13), corroborando com o comportamento dos perfis da coluna de água onde se constatou processo de estratificação para essas variáveis na maioria do período estudado.

Com base nos resultados do teste T (Figura 16), pode-se visualizar que a liberação de água pela camada hipolimnética forçou uma baixa concentração de oxigênio dissolvido nos pontos CIN21 e CIN06, que atingiu valores mínimos de 1,03 e 1,62 mg.L^{-1} e médios: 2,62 e

4,35 mg.L⁻¹, respectivamente. Esses resultados são considerados abaixo do recomendado (5,00 mg.L⁻¹) para corpos lóticos de acordo com BRASIL (2011). Um processo de reoxigenação natural foi identificado no ponto CIN20 (mínimo: 3,69 mg.L⁻¹ e médio: 6,91 mg.L⁻¹), localizado a aproximadamente 43,50 km a jusante do reservatório Castanhão (Figura 16).

O pH apresentou comportamento similar ao identificado com o OD. Com relação à temperatura, a estrutura de concreto e a reduzida liberação de vazão no período em análise, assim como, as elevadas insolações na área em estudo ocasionaram o aumento da temperatura da água ao longo do canal da Integração, cujas diferenças entre máximo e mínimos para os pontos foram: CIN 21 (33,10 - 28,36: 4,74°C), CIN 06 (33,64 - 27,27: 6,37 °C), CIN 06 (33,28 - 27,56: 5,72 °C) (Figura 16).

Figura 16 – OD, pH e temperatura médios nos pontos analisados para os anos de 2017 – 2019



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme estudos realizados por Langbein e Durum (1967), a velocidade da recuperação do oxigênio dissolvido depende da profundidade do rio, das áreas de superfície, da turbulência e fatores climáticos. Pesquisas realizadas em dois reservatórios, Blue Ridge e Chatuge, no vale do Tennessee (EUA), com vazões médias de 17 e 13 m³.s⁻¹, constatou valores mínimos de oxigênio de 3,4 e 1,3 mg.L⁻¹, com impactos identificados até uma distancia de 24 e 11 km a jusante dos reservatórios, respectivamente, atingindo neste pontos uma reoxigenação de 6,0 mg.L⁻¹ (HIGGINS; BROCK, 1999). Resultados de outro estudo

realizado no rio Pelagus, a mais de 150 km a jusante da barragem, mostrou baixa concentração de oxigênio dissolvido quando o vertedouro do reservatório a montante foi fechado (LING *et al.*, 2017).

Dados de campo de região subtropical da Austrália e tropical da Malásia sugerem que, na prática, a hipóxia pode se estender a dezenas ou centenas de quilômetros a jusante da barragem (WALKER *et al.*, 1978; WERA *et al.*, 2019). Pesquisas realizadas em 20 barragens no vale do Tennessee (EUA), com mais de 500 km extensão de canais e rios, mostraram que esses corpos lóticos eram adversamente impactados pela liberação da água da camada profunda dos reservatórios a montante com baixo teor de oxigênio dissolvido, impactando adversamente a qualidade da água liberada, o habitat aquático da biota e a recreação (HIGGINS; BROCK, 1999). Nestes reservatórios, a baixa concentração de OD das águas foram mitigadas com a utilização, injeção de ar e oxigênio por meio de difusores (HIGGINS; BROCK, 1999).

Uma prática adotada para reduzir a captação de cianobactérias em reservatórios destinados ao abastecimento humano é a retirada multiníveis (CHÍCHARO *et al.*, 2006). Descargas multiníveis, foi aplicada para prevenir floração de cianobactérias que outrora atormentaram um estuário em Portugal (CHÍCHARO *et al.*, 2006). Processo semelhante também foi observado em reservatórios tropicais, como é o caso do lago Paranoá em Brasília (STARLING *et al.*, 2002; CORRÊA, 2011). Mesmo após a instalação e funcionamento das Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) na sua bacia hidrográfica, que diminuíram significativamente a entrada de fósforo, o reservatório continuou apresentando altos valores de clorofila-a, que só foram plenamente reduzidos com a adoção da técnica de eco-hidrologia denominada “flushing”, com a abertura frequente das comportas com objetivo de descartar a camada superficial da água e conseqüentemente a biomassa algal que se perpetuava devido ao processo de alimentação interna de fósforo advinda dos sedimentos (STARLING *et al.*, 2002; CORRÊA, 2011).

A comparação dos pontos Curral Velho x CIN08 (jusante do Curral Velho), apresentou diferença significativa em relação à temperatura, o que indica que o reservatório apresenta estratificação térmica. E os pontos Castanhão Superficial x Curral Velho não apresentaram diferença significativa para a maioria das variáveis, exceção da temperatura (Tabela 13), indicando que as variáveis analisadas não mudam significativamente e que o corpo hídrico controlador da qualidade da água é o açude Castanhão, o corpo hídrico de maior porte.

Tabela 13 - Resultado do Teste U para as variáveis ambientais.

Pontos: Castanhão superfície x Castanhão fundo		
Variável	p-valor	Diferença
PT	0,426	Não significativa
NT	0,843	Não significativa
Pontos: Castanhão superfície x CIN21		
Variável	p-valor	Diferença
Cianobactérias	0,931	Não significativa
NT	0,225	Não significativa
OD	0,006	Significativa
PT	0,603	Não significativa
pH	0,023	Significativa
Temperatura	0,004	Significativa
Pontos: Curral velho x CIN08		
Variável	p-valor	Diferença
Cianobactérias	0,885	Não significativa
NT	0,751	Não significativa
OD	0,665	Não significativa
PT	0,665	Não significativa
pH	0,795	Não significativa
Temperatura	0,019	Significativa
Pontos: Castanhão superfície x Curral Velho		
Variável	p-valor	Diferença
Cianobactérias	0,403	Não significativa
NT	0,061	Não significativa
OD	0,403	Não significativa
PT	0,402	Não significativa
pH	0,057	Não significativa
Temperatura	0,285	Não significativa

Fonte: elaborado pelo autor.

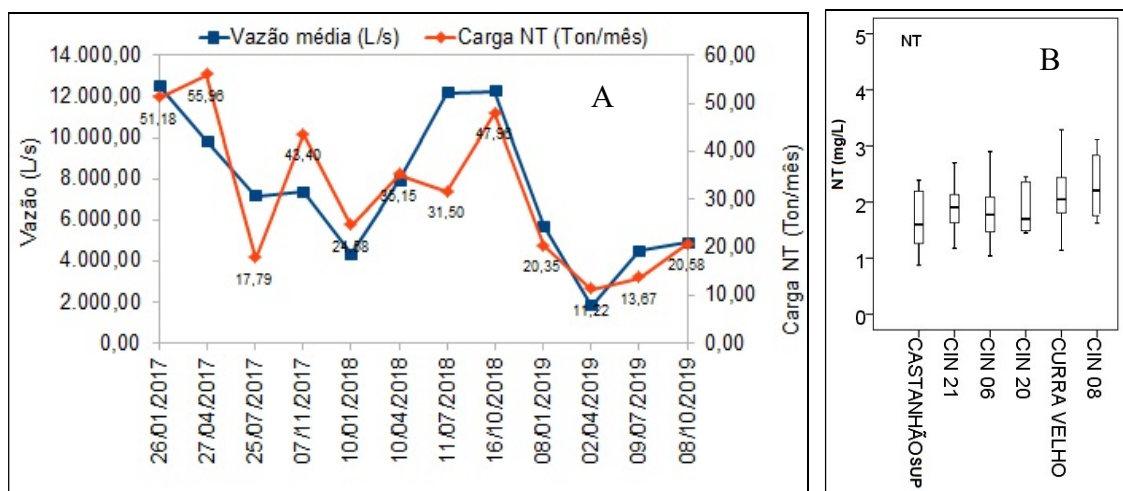
5.3.4 Estimativa das cargas de nutrientes provenientes do reservatório Castanhão

A vazão média da operação realizada nos três anos em análise foi de 7.350 L.s^{-1} (COGERH, 2019). Conforme se pode visualizar na Figura 17A, a contribuição de nitrogênio total (NT) aportada para o canal da Integração registrada nos três anos foi controlada pela variação da vazão. O maior valor registrado de carga de nitrogênio ($55,96 \text{ Ton.mês}^{-1}$) foi em abril de 2017, quando a vazão era de 9.819 L.s^{-1} . Em outubro de 2018 ocorreu o segundo maior aporte (47 Ton.mês^{-1}), cuja vazão registrada foi de 12.230 L.s^{-1} . Em abril de 2019, registrou-se a menor carga de NT ($11,92 \text{ Ton.mês}^{-1}$), com aporte de vazão de 1.814 L.s^{-1} .

Ressalta-se que não possível identificar ligação entre o período de chuvas e o aumento da carga de nutrientes provenientes das bacias hidrográficas de contribuição.

Ressalta-se que neste período ocorreram pequenas recargas volumétricas para o reservatório Castanhão. Adverte-se que todos os resultados médios de NT (Figura 17B) atenderam aos valores recomendados para os ambientes lóticos (2,18 mg. L⁻¹) mas não para os lênticos (1,27 mg.L⁻¹), conforme a legislação em vigor para a classe 2 (BRASIL, 2009). Adicionalmente, pode-se observar na Tabela 14, que o nitrogênio total não apresentou diferença significativa ao longo do trecho monitorado.

Figura 17 – Carga de NT do Castanhão para o canal da Integração no período de 2017 a 2019 (A) e boxplot dos valores de NT para o período em análise (B)



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Resultados do Teste T para o nitrogênio nos pontos monitorados

Teste T para o nitrogênio total					
Pontos N	Castanhão_Sup	CIN 21	CIN 06	CIN 20	Curral Velho
CIN 21	1	-	-	-	-
CIN 06	1	1	-	-	-
CIN 20	1	1	1	-	-
Curral Velho	0,62	1	1	1	-
CIN 08	0,11	1	0,64	0,3	1

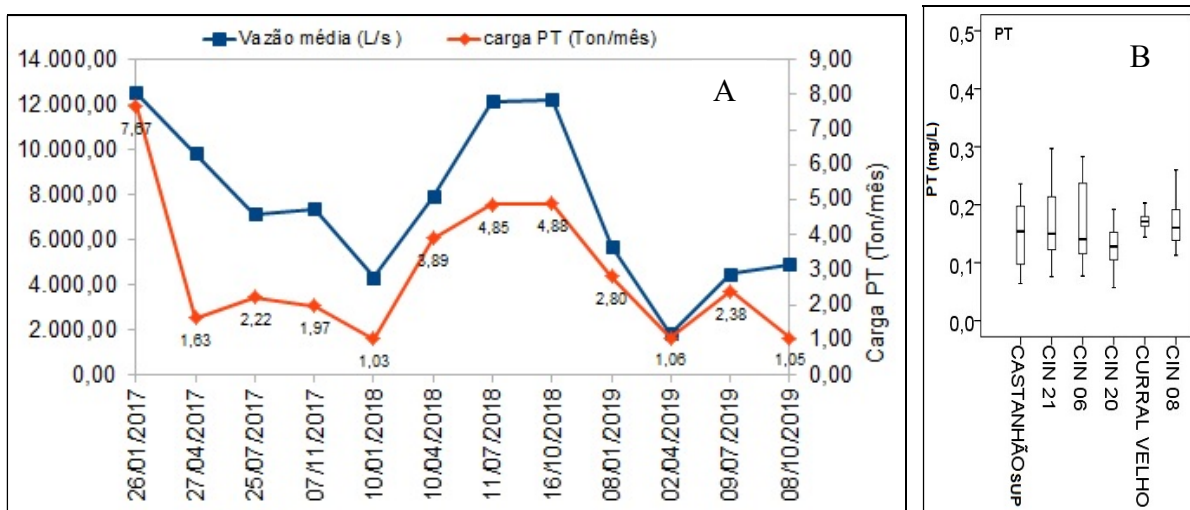
Fonte: elaborado pelo autor.

Com relação ao aporte de fósforo para o macrossistema (Figura 18A), identificou-se também que as cargas tendem a oscilar conforme a variação da vazão liberada pelo açude Castanhão. Os maiores valores registrados de carga de fósforo foi em janeiro de 2017 (7,67 Ton.mês⁻¹) e outubro de 2018 (4,88 Ton.mês⁻¹) e os menores, em janeiro de 2018 (1,03 Ton.mês⁻¹) e em abril de 2019 (1,06 Ton.mês⁻¹). Enfatiza-se que todos os resultados de fósforo total (Figura 18B) estão muito acima dos valores recomendados para ambiente lóticos (0,03

m.L⁻¹) e lânticos (0,05 m.L⁻¹), conforme a legislação em vigor para a classe 2 (BRASIL, 2009). Assim como aconteceu com o nitrogênio, não foram observadas diferenças significativas para as concentrações de fósforo ao longo do trecho estudado, conforme dados apresentados na Tabela 15.

Campos *et al.* (2000), avaliou as transformações hidrológicas na Bacia do Rio Jaguaribe, após a construção dos reservatórios e observou que o sistema de reservatórios implantados até hoje, regulam até 85% das descargas naturais médias e menos de 1% fluido para o oceano. Assim, a regulação na vazão de água do reservatório Castanhão induziu altas taxas de retenção nitrogênio, fósforo total e sólidos suspensos. Estas cargas, que antes iam para o oceano atlântico, permanecem no continente (MOLISANI *et al.*, 2013).

Figura 18 – Carga de PT do Castanhão para o canal da Integração no período de 2017 a 2019 (A) e boxplot dos valores de PT para o período em análise (B)



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 15 – Resultados do Teste T para o fósforo nos pontos monitorados

Teste T para o fósforo					
Pontos	Castanhão Sup	CIN-21	CIN-06	CIN-20	Curral Velho
CIN-21	1	-	-	-	-
CIN-06	1	1	-	-	-
CIN-20	1	1	1	-	-
Curral Velho	1	1	1	1	-
CIN-08	1	1	1	1	1

Fonte: elaborado pelo autor.

Vidal e Capelo (2014) identificaram que no açude Gavião, localizado mais a jusante de toda infraestrutura da transposição aqui estudada, ocorreu um elevado aporte elevado de nitrogênio e fosforo vindo deste sistema e culminando com uma retenção de nitrogênio (121,42 t) e de fósforo (28,06 t) de janeiro a maio de 2011, e contribuindo para o processo de eutrofização deste importante manancial.

5.4 CONCLUSÕES

Dentre os perfis analisados, a temperatura da água foi o único parâmetro que manteve um padrão termal sazonal de estratificação (primeiro semestre) para os três anos em análise. O OD e o pH apresentaram estratificação irregular e às demais variáveis, CE e SDT, não apresentaram estratificação no período.

Constatou-se que a estratificação ocasionou a desoxigenação nos pontos CIN21 e CIN06. A oxigenação natural no ambiente lótico foi identificada a 43,50 Km à jusante do reservatório Castanhão, no ponto CIN20 (6,91 mg.L⁻¹), cujo resultado apresentou diferença significativa entre o ponto Castanhão Sup e CIN21 (jusante do castanhão).

Em relação aos nutrientes, constatou-se que, não existe diferença significativa entre a camada superficial e de fundo do reservatório Castanhão. Neste período, o manejo operacional da vazão liberaria quantidades similares de nutrientes, caso operação das vazões fosse multiníveis. Também não se identificou diferença significativa entre as variáveis: NT, PT, Temperatura, OD, pH e Cianobactérias dos reservatórios Castanhão e Curral Velho, o que indica similaridade no processo de eutrofização entre ambos os reservatórios.

Apesar de ocorrer processos de estratificação da coluna de água com resfriamento da camada hipolimnética, a temperatura no canal da Integração apresentou valores superiores aos registrados na camada superficial do reservatório Castanhão. Este fato relaciona-se com os fluxos reduzidos e ao material da estrutura do canal artificial de concreto e processos de insolação.

Em relação às cargas de nitrogênio e fósforo foi possível verificar que estas apresentaram tendência a variar conforme a vazão operada pelo sistema de gerenciamento, ou seja, na maioria das vezes, as cargas aumentaram em consequência do aumento da vazão operada.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, F. A. R.; TUNDISI, J. G. Primary production of phytoplankton and environmental characteristics of a shallow quaternary lake at eastern Brazil. **Arch. Hydrobiol.**, Stuttgart, v. 90, n. 2, p. 139-161. 1980.
- BECKER, V. *et al.* Phytoplankton equilibrium phases during thermal stratification in a deep subtropical reservoir. **Freshwater Biology**, Oxford, v. 53, n. 5, p. 952-963. 2008.
- BENETTI, A. D.; TUCCI, C. E. M. Uso de indicadores para avaliação de usinas hidrelétricas em bacias hidrográficas com múltiplos aproveitamentos, *Revista de gestão de água da América Latina*. 3 (1) (2006) 73-83.
- BOEHRER, B., SCHULTZE, M.: Stratification of lakes, **Rev. Geophys.**, 46, RG2005, <https://doi.org/10.1029/2006RG000210>, 2008.
- BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional de 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.** Publicada no dou nº 053, de 18/03/2005. Alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011.
- CAMPOS, J. N. B., STUDART, T. M. C., LUNA, R., FRANCO, S. Hydrological Transformations in Jaguaribe River Basin during the 20th Century In: 20th Hydrological Days, 2000, Fort Collins, CO. Proceed-ings of the 20th Annual American Geophysical Union. Fort Collins, Co: **Hydrology Days Publications**, 2000. v.1. p.221 -227
- CHÍCHARO, L.; CHÍCHARO, M. A.; BEN-HAMADOU, R. Use of a hydrotechnical infrastructure (Alqueva Dam) to regulate planktonic assemblages in the Guadiana estuary: Basis for sustainable water and ecosystem services management, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 70, 3–18, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.05.039>, 2006.
- COGERH - Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará. **Resenha diária do monitoramento.** Disponível em: <http://www.hidro.ce.gov.br/uploads/documentos/28-10-2019-resenha-diaria-do-monitoramento-2017.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- CORRÊA, A. C. G. **Modelos qualitativos de simulação sobre a dinâmica do plâncton em diferentes estados de trofia no lago Paranoá, DF.** Universidade de Brasília (Dissertação) Instituto de Ciências Biológicas Departamento de Ecologia Programa de Pós-Graduação em Ecologia. Brasília – DF, Julho, 2011. 140 p.
- DYNESIUS, M.; NILSSON, C. 1994 Fragmentation and flow regulation of river systems in the Northern third of the world. **Science**, 266753–62
- FREIRE, R. H. F.; CALIJURI, M. C.; SANTAELLA, S. T. Longitudinal patterns and variations in water quality in a reservoir in the semiarid region of NE Brazil: responses to hydrological and climatic changes. **Chemical Limnology**, Fortaleza, v. 21, n. 2, p. 251-262, 2009.

FRERY, A. C.; CRIBARI-NETO, F. **Elementos de Estatística Computacional Usando Plataformas de Software Livre/Gratuito**. 2ª impressão. 2011.

FRIEDL, G.; WÜEST, A. Disrupting biogeochemical cycles – Consequences of damming, **Aquat. Sci.**, 64, 55–65, 2002.

Goldman, C.R., Elser, J.J., Richards, R.C. et al. Thermal stratification, nutrient dynamics, and phytoplankton productivity during the onset of spring phytoplankton growth in Lake Baikal, Russia. *Hydrobiologia* 331, 9 – 24 (1996). <https://doi.org/10.1007/BF00025403>

GRANZOTTI, R. V., MIRANDA, L. E., AGOSTINHO, A. A., GOMES, L. C.: Downstream impacts of dams: shifts in benthic invertivorous fish assemblages, **Aquat. Sci.**, 80, 1–14, <https://doi.org/10.1007/s00027-018-0579-y>, 2018.

HIGGINS, J. M.; BROCK, W. G.: Overview of Reservoir Release Improvements at 20 TVA Dams, **J. Energ. Eng.**, 125, 1–17, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9402\(1999\)125:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(1999)125:1(1)), 1999.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações convencionais**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>. Acesso em: 15 nov. 2019.

KUNZ, M. J., WÜEST, A., WEHRLI, B., LANDERT, J., AND SENN, D. B. Impact of a large tropical reservoir on riverine transport of sediment, carbon, and nutrients to downstream wetlands, **Water Resour. Res.**, 47, 1–16, <https://doi.org/10.1029/2011WR010996>, 2011.

LANGBEIN, W.; DURUM, W.: The aeration capacity of streams, U.S. Dept. of the Interior. **Geological Survey**, <https://doi.org/10.3133/cir542>, 1967.

LEWIS, W. M. J.: Tropical lakes: how latitude makes a difference, in: *Perspectives in Tropical Limnology*, edited by: Schiemer, F. and Boland, K. T., 43–64, SPB **Academic Publishing**, Amsterdam, 1996.

LOPES, S. M.; ARRUDA, N. M. B.; PAGIORO, T. A. Study of the stratification process at the reservoir of the hydroelectric power plant Gov. Pedro Viriato Parigot de Souza (Capivari-Cachoeira), Paraná, Brazil. **Eclética Química Journal**, vol. 43, n. 2, 2018, 23-31.

LING, T. Y.; GERUNSIN, N. SOO, C. L.; NYANTI, L.; SIM, S. F.; GRINANG, J. Seasonal Changes and Spatial Variation in Water Quality of a Large Young Tropical Reservoir and Its Downstream River. **Journal of Chemistry**, Volume 2017.

LOPES, S. M.; ARRUDA, N. M. B.; PAGIORO, T. A. Study of the stratification process at the reservoir of the hydroelectric power plant Gov. Pedro Viriato Parigot de Souza (Capivari-Cachoeira), Paraná, Brazil. **Eclética Química Journal**, vol. 43, n. 2, 2018, 23-31.

MAGADZA, C. H. D. Environmental state of Lake Kariba and Zambezi River Valley: Lessons learned and not learned, *Lake Reserv. Manage.*, 15, 167–192, <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2010.00438.x>, 2010.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. (2002). “Qualidade de água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura”. *Agroecologia e Desenvolvimento Rural*

Sustentável. Porto Alegre (RS), v. 3, n. 4.

MOLISANI, M.; BECKER, H.; BARROSO, HS.; HIJO, Cag.; MONTE, Tm.; VASCONCELLOS, GH.; LACERDA, LD. The influence of castanhão reservoir on nutrient and suspended matter transport during rainy season in the ephemeral Jaguaribe river (CE, Brazil). **Brazilian Journal of Biology**, [s.l.], v. 73, n. 1, p. 115-123, fev. 2013.

NOGUEIRA, V. P. Q. A Qualidade da água em lagos e reservatórios. In: PORTO, R.L.L(org) Hidrologia Ambiental. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo: **Associação Brasileira dos Recursos Hídricos**. (coleção ABRH de Recursos Hídricos; v 3), 1991.

RIBEIRO, T. G.; BOAVENTURA, G. R.; CUNHA, L. S.; PIMENTA, S. M. Estudo da qualidade das águas por meio da correlação de parâmetros físico-químicos, Bacia Hidrográfica do Ribeirão Anicuns. **Geochimica Brasiliensis** 84 30(1): 84 - 94, 2016.

REIS, L. G. M.; PAZ, A. R.; LIMA, H. V. C. Metodologia simplificada para estimar o aporte de cargas e simular a qualidade de Água em pequenas bacias rurais. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 2005 -João Pessoa/PB.

SRH – Secretaria de Recursos Hídricos do Ceará. **Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará**. Disponível em: <http://atlas.cogerh.com.br/>. Acesso em: 10 jun. 2019.

SU, X.; HE, Q.; MAO, Y. Dissolved oxygen stratification changes nitrogen speciation and transformation in a stratified lake. *Environ Sci Pollut Res* 26, 2898 – 2907 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3716-1>

STARLING, F. L. R. M.; PEREIRA, C. E.; ANGELINI, R. **Modelagem Ecológica do Fósforo e Avaliação da Capacidade Suporte do Lago Paranoá frente à Ocupação da sua Bacia de Drenagem**. Relatório Técnico Final de Projeto de Pesquisa financiado pela Companhia Energética de Brasília (CEB), 2002. 162 p.

WALKER, K. F., HILLMAN, T. J., AND WILLIAMS, W. D.: **Effects of impoundments on rivers: an Australian case study**, *SIL Proceedings*, 1922–2010, 20, 1695–1701, <https://doi.org/10.1080/03680770.1977.11896755>, 1978.

WERA, F.; LING, T.; NYANTI, L.; SIM, S.; GRINANG, J.: Effects of opened and closed spillway operations of a large tropical hydroelectric dam on the water quality of the downstream river, **Hindawi J. Chem.**, 2019.

VIDAL, T. F.; NETO, J. C. Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.18, n.4, p.402–407, 2014.

YU, Z. Z.; WANG, L. L., 2011. Factors influencing thermal structure in a tributary bay of three gorges reservoir. **Journal of Hydrodynamics**, Ser. B, 23, 407–415. doi:10.1016/S1001-6058 (10)60130-8.

6. CONCLUSÕES GERAIS

A escassez hídrica comum em regiões semiáridas, além de afetar negativamente a quantidade de água disponível para atender as demandas, também ocasiona alteração na qualidade da água, pela concentração de nutrientes e demais substâncias presente no corpo hídrico.

A água subterrânea é o maior reservatório de água doce do mundo, após as geleiras, e desempenha um papel significativo no apoio a ecossistemas aquáticos superficiais, possibilitando a vida e as atividades humanas. A conectividade entre águas subterrâneas e superficiais deve ser considerada para a gestão eficaz dos recursos hídricos. Faz-se necessário o constante monitoramento das reservas hídricas, e em relação aos poços, o crescimento desordenado da exploração e da diminuição da recarga, pode ocasionar diversos fatores negativos como: a intrusão salina e a subsidência do solo. Em consequência disto, é necessário a contínua implementação e execução de políticas e planos de recursos hídricos que priorizem a participação da sociedade e o uso mais racional e sustentável da água subterrânea e superficial, por conseguinte, a outorga, é um dos instrumentos essencial para manter o uso sustentável.

No caso do Ceará, foram construídos diversos tipos de infraestrutura para mitigar os efeitos adversos da falta de água. E apesar do aumento significativo de solicitações de outorga para captações de fontes subterrâneas em 2017, que representaram 69% dos pedidos dos processos de outorgas. As maiores vazões outorgadas no período de 2009 a 2017, estavam relacionadas a captações de fontes de superficiais, que representaram 73% das vazões outorgas em 2017.

Dentre os instrumentos da gestão, salienta-se que é necessário avançar na outorga para lançamento de efluentes, cujas solicitações ainda são pouco requeridas, que corrobora com a disposição inadequada dos efluentes no Estado, ou seja, 60,24% dos efluentes são dispostos de maneira inadequada, e que pode ocasionar a poluição/contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Uma alternativa para amenizar esta disposição inadequada é incentivar o reuso da água. Atualmente, o usuário não é tarifado por utilizar o efluente tratado na mesma atividade que originou a solicitação da outorga.

Tendo em vista, que a outorga para irrigação é o maior consumidor de águas ao longo dos anos de 2009 a 2017, sendo que, esta demanda é subsidiada pelas demais categorias

de uso. É necessário avançar em mecanismos que reduzam o uso indiscriminado de fertilizantes e agrotóxicos que podem ocasionar a poluição/contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Assim como, evoluir para sistemas mais modernos (ex.:microaspersão), e com isso, reduzir o consumo e o desperdício das águas.

Recomendam-se estudos em relação à tarifa de água bruta, e que seja incorporado aspectos relacionados à qualidade da água, ou seja, as águas subterrâneas e alguns reservatórios dispõem de melhor qualidade de água, no entanto, atualmente é cobrado a mesma tarifa. Neste caso, a adoção de tarifa diferenciada, conforme a qualidade da água, também incentivaria a realização do enquadramento dos corpos hídricos no Estado.

Com relação aos processos de estratificação/desestratificação, foi possível identificar estratificação sazonal de temperatura em todos os perfis analisados dos reservatórios Castanhão e Gavião. O oxigênio dissolvido apresentou comportamento sazonal no Gavião e irregular no Castanhão. As demais variáveis (SDT, CE) não apresentaram padrão e permaneceram desestratificadas.

Dentre os reservatórios que integram o macro sistema, composto pelos reservatórios: Castanhão (B. H. Médio Jaguaribe); Curral Velho (B. H. do Banabuiú); Pacajus, Pacoti, Riachão e Gavião (B. H. Metropolitanas). O Gavião tem a menor capacidade de armazenamento (32,9 hm³), dentre os reservatórios localizados na região Metropolitana. O que o torna mais susceptível a sofrer a maior magnificação do processo de eutrofização identificada no SCRMF, com predominância dos gêneros de cianobactérias potencialmente tóxicas: *Pseudanabaena* sp. (coluna d'água estratificada) e *Planktothrix* sp., (coluna d'água desestratificada) no ano 2016, e *Oscillatoria* sp. em 2017. E os fatores que contribuíram com as alterações na qualidade da água estão relacionados ao fluxo da transferência e também por está localizado em áreas urbanas, o que pode ocasionar um maior lançamento de efluentes provenientes dos núcleos urbanos. Neste reservatório, ocorreu uma maior quantificação de cianobactérias com coluna de água estratificada.

Constatou-se que o processo de eutrofização tende a aumentar ao longo do sistema (montante para jusante). E a água hipolimnética proveniente do reservatório Castanhão mantêm a fertilização do canal da Integração e as altas temperaturas, contribuem para o acelerado processo de eutrofização, onde se constatou que as cianobactérias se proliferam dentro do canal, com dominância dos gêneros no SCRMF: *Oscillatoria* sp. e *Microcystis* sp., e as demais identificadas como abundantes: *Merismopedia* sp., *Cylindrospermopsis* sp., *Pseudanabaena* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Aphanocapsa* sp., *Dolichospermum* sp., *Planktothrix* sp., *Raphidiopsis* sp.

Também se constatou processo de desoxigenação no sistema à jusante do reservatório Castanhão, que pode ocasionar a degradação da qualidade da água para os ecossistemas a jusante. Cujos processos de oxigenação natural ocorreram a 43,50 Km à jusante do reservatório Castanhão, no ponto CIN20.

Em consequência do exposto, recomendam-se estudos posteriores, com objetivo de analisar a retirada multiníveis, ou aderi equipamentos para manter a coluna de água oxigenada, com objetivo de mitigar os efeitos adversos da retirada da camada de fundo e reduzir os processos de eutrofização.

Recomenda-se desenvolver metodologias para o tratamento da água, conforme identificação das espécies predominantes e seus respectivos metabólitos secundários tóxicos, cuja densidade celular, seja superior a 50.000 células.mL⁻¹, conforme recomendações prevista na resolução 430/2011, para atender a demanda da região metropolitana de Fortaleza e demais sistemas de abastecimento humano.

Uma alternativa para controlar o processo de eutrofização é o enquadramento dos corpos hídricos em suas respectivas classes de usos preponderantes, ou seja, é necessário avançar na gestão dos corpos hídricos, e com isso reduzir custos com tratamento da água para abastecimento público.