

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

MARIA CAROLINE SILVA MENDONÇA

**PROPOSTA DE UM NOVO ÍNDICE DE QUALIDADE  
DE ÁGUA PARA LAGOA SALOMÉ ATRAVÉS DA  
ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS**

São Cristóvão, SE

2017

MARIA CAROLINE SILVA MENDONÇA

**PROPOSTA DE UM NOVO ÍNDICE DE QUALIDADE  
DE ÁGUA PARA LAGOA SALOMÉ ATRAVÉS DA  
ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS**

Dissertação apresentada ao Núcleo de Pós-Graduação em Recursos Hídricos como um dos requisitos de obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Borges Garcia

São Cristóvão, SE

2017

Ficha Catalográfica Elaborada pelo  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Sergipe

M539p Mendonça, Maria Caroline Silva  
Proposta de um novo índice de qualidade de água para Lagoa Salomé através da análise de componentes principais / Maria Caroline Silva Mendonça ; orientador Carlos Alexandre Borges Garcia. -- São Cristóvão, 2017.  
61 f. : il.

Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Sergipe, 2017.

1. Recursos hídricos. 2. Água - Qualidade. 3. Análise de componentes principais. 4. Água - Análise. 5. Sergipe. I. Garcia, Carlos Alexandre Borges, orient. II. Título.

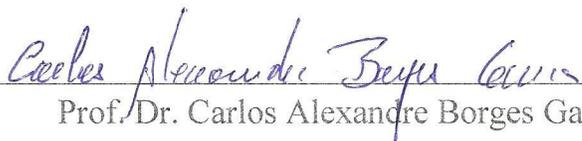
CDU: 556.18(813.7)

MARIA CAROLINE SILVA MENDONÇA

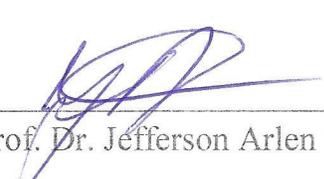
**PROPOSTA DE UM ÍNDICE DE QUALIDADE DE  
ÁGUA PARA A LAGOA SALOMÉ ATRAVÉS DA  
ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos como um dos requisitos de obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

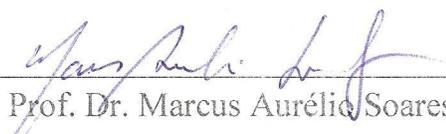
Aprovada: 22 de fevereiro de 2017.

  
Prof. Dr. Carlos Alexandre Borges Garcia

(Orientador)

  
Prof. Dr. Jefferson Arlen Freitas

(Departamento de Engenharia Ambiental)

  
Prof. Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz

(Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos)

São Cristóvão, SE

2017

## AGRADECIMENTOS

A Deus, o grande e verdadeiro responsável pela realização desse projeto. MUITO OBRIGADA!!!

A meus pais, Marcos e Creusivan, e irmão, Mateus e Milena, meu infinito agradecimento. Obrigada, mainha, pelo seu apoio incondicional ao longo deste processo de dissertação e de muitos outros. Obrigada por sempre acreditar em mim. Você é minha fortaleza. Obrigada, painho, por tudo que você me deu e me ensinou. Obrigada pela sua generosidade e simplicidade. Pelo amor incondicional, pelo carinho e afeto. Não encontro palavras que consigam te agradecer, simplesmente fico completamente envolvida por um enorme sentimento: gratidão. Muito obrigada. Obrigada, Mateus e Milena, pelo amor e cumplicidade. Obrigada por sempre estarem ao meu lado. Mateus, meu muito obrigada em especial para você, que nunca mediu esforços para investir em mim.

A meu noivo, Francis, por ser tão importante na minha vida e por ter sido tão importante para a conclusão da minha dissertação, literalmente. Sempre a meu lado e me fazendo acreditar que posso mais do que imagino. Devido ao seu companheirismo, amizade, paciência e amor, este trabalho pôde ser concretizado. Obrigada por ter me ensinado a gerar os gráficos das componentes principais. E muito obrigada por ter feito do meu sonho o seu.

A minha amiga de sempre, Fernanda Faro, por só querer o meu bem e ser como um raio de sol na minha vida. Obrigada pela amizade!

Aos Professores Dr. Carlos Alexandre Borges Garcia e Dr. Helenice Leite Garcia, por acreditaram em meu potencial de uma forma a que eu não acreditava ser capaz de corresponder. Sempre disponíveis e dispostos a ajudar, querendo que eu aproveitasse cada segundo dentro do mestrado para absorver algum tipo de conhecimento. Fizeram-me enxergar que existe mais que pesquisadores e resultados por trás de uma dissertação, mas vidas humanas... Vocês não foram somente orientador e co-orientadora (sim, por que não?), mas em alguns momentos, conselheiros, confidentes, pais e amigos. Vocês foram e são referência. profissionais e pessoais para meu crescimento. Obrigada por estarem a meu lado e acreditarem tanto em mim!

A meus amigos do mestrado, pelos momentos divididos juntos, especialmente a Ivane, Myla, Lucas e Anamália, que se tornaram verdadeiras amigos e tornaram mais leve meu trabalho. Obrigada por dividir comigo as angústias e alegrias. Foi muito bom poder contar com vocês!

A todos os alunos, professores e funcionários do Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos, especialmente ao professor Dr. Marcus Aurélio Soares Cruz, que, com ensinamentos e orientações, me ajudou bastante neste projeto. Vocês também é uma referência para mim!

Agradeço, também, a FAPITEC pela concessão dos recursos financeiros utilizados no desenvolvimento deste trabalho e pela divulgação; ao Laboratório de Química Analítica da Universidade Federal de Sergipe, em especial a Silvânio Silvério Lopes da Costa por ter me ensinado tanto; e ao Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe.

Enfim, ninguém vence sozinho, então quero demonstrar o meu agradecimento, a todos aqueles que, de um modo ou de outro, tornaram possível a realização da presente dissertação.

A todos o meu sincero Muito Obrigada!

## RESUMO

O conhecimento da qualidade da água e seu conteúdo são essenciais para rastrear qualquer influxo de poluentes na água que são prejudiciais à saúde humana e dos ecossistemas. O presente estudo tem, então, como objetivo propor um novo índice de qualidade da água para o reservatório Lagoa Salomé, empregando a análise de componentes principais. A partir desta, foram extraídas as variáveis consideradas críticas de acordo com as suas contribuições para a determinação de cada componente principal para a modificação do índice de qualidade da água para reservatórios. Os parâmetros de qualidade da água desse reservatório foram comparados com os limites estabelecidos pela Resolução nº. 357/2005 do CONAMA e a qualidade de suas águas foi determinada de acordo com três índices mais comumente utilizados – IAQR (IAP), O-IQA e CPCB-IQA – e com o novo índice proposto, a fim de minimizar a subjetividade e melhorar a credibilidade da avaliação final. Os resultados obtidos para o IQAR, O-IQA, CPCB-IQA e IQAR-m permitiram classificar o reservatório, respectivamente, como extremamente poluído, muito ruim, muito ruim e muito poluído. A análise de componentes principais mostrou que foi possível reduzir o número de variáveis de 15 para 7 variáveis, em comum nos quatro locais de estudo (OD, DBO, N-NO<sub>3</sub>, N- total, P- total, profundidade e disco de Secchi), sendo as atividades antrópicas, resultado do despejo de efluentes domésticos e resíduos sólidos no entorno da Lagoa, possivelmente, as principais e as mais significativas fontes de poluição. Deste modo, é importante concluir e enfatizar que as águas desse reservatório não estão em conformidade com os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº. 357/2005 para a classe 2 de qualidade, de forma que um programa de monitoramento e gestão ambiental faz parte das exigências do desenvolvimento sustentável da região.

**Palavras-chave:** *Qualidade da água; Análise de Componentes Principais; Lagoa Salomé.*

## ABSTRACT

The knowledge of water quality and its contents are essential to track any influx of water pollutants that are harmful to human health and ecosystems. This study has, then, as objective to propose a new water quality the reservoir Lagoa Salomé, using the principal component analysis. From the principal component analysis, the variables considered critical according to their contributions to the determination of each major component will be extracted for the modification of the reservoir water quality index. The parameters of water quality of these reservoirs will be compared with the limits established by CONAMA's Resolution n°. 357/2005 and the quality of its water will be determined according to four indexes, commonly used - IAQR (IAP), O-WQI, PW-WQI and CPCB-WQI – and the new proposed index, in order to minimize subjectivity and improve the credibility of the final evaluation. The results for the IQAR, O-IQA, CPCB-IQA and IQAR-m allowed classify the reservoir, respectively, as *extremely polluted*, *very bad*, *very bad* and *very polluted*. The principal component analysis showed that was possible to reduce the number of variables from 15 to 7 (DO, BOD, N-NO<sub>3</sub>, Total-N, Total-P, depth and Secchi disk, like the anthropogenic activities, resulting from dumping of domestic and solid residues in the surroundings of Lagoa Salomé, possibly, the main and most significant sources of pollution. Thus, it is important to complete and emphasize that the reservoir water is not in accordance with standards established by CONAMA's Resolution n°. 357/2005 for Class 2 quality, so, a program of environmental monitoring and management is part of the requirements of sustainable development of the region.

**Keywords:** *Water quality; Principal Component Analysis; Lagoa Salomé.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas médias de variação de qualidade da água do IQA.....	22
Figura 2- Reservatório Lagoa Salomé localizado em Cedro de São João, SE. ....	36
Figura 3 - Projeções dos parâmetros físico-químicos e biológicos da Lagoa Salomé no plano dos dois primeiros eixos da PCA.....	50
Figura 4 - Projeções dos parâmetros físico-químicos e biológicos da Lagoa Salomé no plano dos eixos F2 e F3 da PCA. ....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas de qualidade de água para o IQA.....	21
Tabela 2 - Matriz de Qualidade de Água.....	24
Tabela 3 - Variáveis selecionadas e seus respectivos pesos.....	24
Tabela 4 - Classificação de Qualidade da Água.....	25
Tabela 5 - Formulações dos IQAs utilizados frequentemente.....	26
Tabela 6- Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos e biológicos do reservatório Lagoa Salomé e limites estabelecidos pelo CONAMA 357/2005 para corpos de água doce Classe 4.....	41
Tabela 7- Matriz de correlação de Pearson das variáveis físico-químicas e biológicas.....	47
Tabela 8 - Proporção de variância das componentes principais.....	48
Tabela 9 - Cargas das componentes principais para a Lagoa Salomé.....	49
Tabela 10 - Pesos obtidos através da contribuição (%) de cada parâmetro para PCs.....	52
Tabela 11 – Índices de Qualidade da Água para a Lagoa Salomé.....	53

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>13</b>
2.1	<i>Objetivo geral</i>	13
2.2	<i>Objetivos específicos</i>	13
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>14</b>
3.1	<i>Parâmetros físicos</i>	14
3.1.1	Turbidez	14
3.1.2	Temperatura	14
3.1.3	Condutividade	15
3.2	<i>Parâmetros químicos</i>	15
3.2.1	pH	15
3.2.2	Nitrogênio	16
3.2.3	Fósforo	16
3.2.4	Oxigênio Dissolvido	17
3.2.5	Matéria Orgânica	17
3.2.6	Micropoluentes Orgânicos	18
3.2.7	Micropoluentes Inorgânicos	18
3.3	<i>Parâmetros biológicos</i>	19
3.3.1	Coliformes e Coliformes Termotolerantes	19
3.3.2	Cianobactérias	19
3.4	<i>Índice de Qualidade da Água (IQA)</i>	20
3.5	<i>Índice de Qualidade da Água para Reservatórios (IQAR)</i>	23
3.6	CONAMA	26
3.7	<i>Análise de Componentes Principais</i>	27
3.8	<i>Aplicações</i>	28
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
4.1	<i>Área de Estudo</i>	35
4.2	<i>Procedimentos Metodológicos</i>	37
4.3	<i>Tratamento dos dados e Aplicação da PCA (Principal Component Analysis)</i>	38
4.4	<i>Modificação do Índice de Qualidade de Água para a Lagoa Salomé</i>	39
4.5	<i>Aplicação dos Índices de Qualidade da Água para Reservatórios comumente utilizados</i>	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>41</b>
5.1	<i>Análise dos parâmetros de qualidade da água</i>	41
5.2	<i>Análise Estatística</i>	44
5.3	<i>Aplicação da PCA (Principal Component Analysis)</i>	48
5.4	<i>Avaliação dos índices de qualidade da água</i>	52
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>55</b>
6.1	<i>Sugestões</i>	56
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>58</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A água é uma fonte essencial para a vida e os recursos disponíveis de água doce estão a emergir como um fator limitante não somente em relação a quantidade, como também em qualidade para o desenvolvimento humano e estabilidade ecológica. Proteger a qualidade de água doce para adequado abastecimento tanto das necessidades humanas quanto ecológicas é, portanto, um aspecto importante da gestão ambiental integrada e desenvolvimento sustentável a fim de que seja estabelecido um equilíbrio entre a demanda e a disponibilidade. Além disso, este recurso desempenha um papel muito importante em vários setores da economia, tais como a agricultura, atividades industriais, geração de energia hidrelétrica, além de atividades recreativas.

Nas últimas décadas, o exacerbado crescimento da população e da industrialização, além do inadequado uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas, têm contribuído com a diminuição da qualidade do meio hídrico e, conseqüentemente, com a sua disponibilidade, devido, principalmente, ao aumento da carga de poluentes em nossos corpos hídricos. Esse fato é ainda mais preocupante em regiões nas quais a diminuição da disponibilidade hídrica é um processo natural (MENDONÇA, 2014).

No semiárido brasileiro, a aridez característica e a distribuição irregular da precipitação de chuvas têm acarretado a prática da construção de reservatórios, que estão sujeitos à deterioração de sua qualidade devido à alta taxa evapotranspirativa e ao aporte de nutrientes oriundo da agricultura e esgotos domésticos. De acordo com a literatura, dentre os principais contaminantes, destacam-se os materiais suspensos, que provocam a acumulação de sedimentos no fundo do corpo hídrico; materiais orgânicos, que conduzem à depleção de oxigênio dissolvido devido à degradação microbiana; e nutrientes (nitrogênio-N e fósforo-P), que podem ocasionar a eutrofização.

Para Chin (2013), vários compostos ou combinações de produtos químicos são considerados tóxicos para a vida humana e aquática e tem o potencial de ocorrer no ambiente hídrico a níveis perigosos. Em alguns casos, o desequilíbrio do ecossistema é provocado pela falta de uma substância que é essencial para o bem-estar do meio e não pela presença de uma substância tóxica. Assim, a taxa de oxigênio dissolvido e a demanda bioquímica de oxigênio são os parâmetros mais importantes para avaliar a saúde do ecossistema.

Neste sentido, a qualidade da água de qualquer área ou fonte específica pode ser avaliada através de parâmetros físicos, químicos e biológicos. Quando esses parâmetros ocorrem no meio hídrico acima dos limites estabelecidos por alguma norma ou resolução

vigente, os valores destas variáveis são considerados prejudiciais para a saúde humana e, então, faz-se necessário o monitoramento a fim de avaliar os impactos a que os ecossistemas estão submetidos. Por isso, a adequação de fontes de água para consumo humano tem sido descrita em termos de Índice de Qualidade da Água (IQA), que é uma das formas mais eficazes para descrever a qualidade da água.

No entanto, o IQA, muitas vezes, é específico para determinado tipo de poluição ou área geográfica, mas não para aplicações universais, além de não fornecer evidências sobre as fontes poluentes. Além disso, pelo fato de o IQA ser resultado da junção de vários parâmetros para a obtenção de um único valor, esse processo pode acarretar a minimização do impacto negativo de uma variável frente ao comportamento estável das demais. Por esse motivo, várias entidades têm feito adaptações quanto à forma de cálculo e atribuição de pesos aos parâmetros, buscando reduzir o efeito eclipse e comunicar a qualidade de um determinado corpo hídrico de acordo com as variáveis que estão, de fato, influenciando esse ecossistema.

Pelo fato de o indicador ter a função de simplificar, outras técnicas têm sido aplicadas a fim de identificar algum teor informativo que pode não ter sido corretamente analisado e que influencia a gestão segura dos recursos hídricos, bem como para solução rápida dos problemas de poluição, sendo a Principal Component Analysis (PCA) o método mais eficaz de análise estatística multivariada (JOLLIFE, 2002).

Para Jollife (2002), a ideia central da análise de componentes principais (PCA) é reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados que consistem de um grande número de variáveis inter-relacionadas. Essa redução é definida de tal maneira que o primeiro componente principal tem a maior variância possível (isto é, representa o máximo da variabilidade nos dados quanto possível), e cada componente seguinte, por sua vez, tem a maior variação possível de acordo com a restrição (isto é, não são correlacionados com os componentes anteriores). Dessa forma, a análise de componentes principais (PCA) tem o objetivo de definir combinações para determinadas variáveis a fim de determinar índices que descrevam a variação nos dados.

Neste contexto, o principal problema em programas regulares de monitoramento da qualidade da água é a geração de uma grande matriz de dados físico-químicos e biológicos em um período relativamente curto de tempo que necessita de um mecanismo de manipulação de dados eficaz para a interpretação dos resultados, associação de variáveis e conclusão significativa para avaliar a qualidade de recursos hídricos. Sendo assim, o objetivo do presente estudo é avaliar a qualidade do reservatório de água Lagoa do Salomé através da proposição de um novo índice, com base nos parâmetros físico-químicos e biológicos da

água, empregando-se a análise de componentes principais para que se obtenha uma classificação adequada desse recurso hídrico.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Avaliar a qualidade da água do reservatório Lagoa Salomé através da proposição de um novo índice de qualidade aplicando análise de componentes principais, a fim de transmitir uma informação clara à população e ao poder público.

### **2.2 Objetivos específicos**

Analisar os parâmetros físico-químicos e biológicos essenciais à qualidade da água de um reservatório.

Determinar a qualidade da água através de índices propostos na literatura.

Propor um índice de qualidade da água para a Lagoa Salomé através da análise de componentes principais.

Classificar o reservatório de água de acordo com os dados obtidos através dos principais Índices de Qualidade da Água para reservatórios.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A qualidade aceitável da água depende do uso ao qual a mesma será destinada, como, por exemplo, para abastecimento público de água, abastecimento de água industrial, vida aquática e navegação. Para cada um destes fins, um conjunto de critérios de qualidade da água, que inclui as suas condições físico-químicas e biológicas, levam em consideração tanto a saúde humana quanto os impactos à vida aquática. Quando esses critérios são incluídos como requisitos regulamentares, passam a ser referidos como padrões de qualidade da água. Portanto, a qualidade das águas naturais deve ser avaliada de acordo com os critérios de qualidade ou com os padrões de qualidade associados ao seu uso final.

Os principais parâmetros físico-químicos de qualidade das águas são: turbidez, temperatura, condutividade, pH, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido, matéria orgânica e micro poluentes orgânicos e inorgânicos. Já os biológicos estão relacionados à presença de microrganismos, como coliformes totais, termotolerantes e algas.

#### 3.1 Parâmetros físicos

##### 3.1.1 Turbidez

Segundo Mihelcic *et al* (2012), a turbidez indica o grau de claridade óptica de um certo corpo de água. Essa interferência é causada pelo espalhamento e pela absorbância da luz por partículas suspensas na água e é agravada devido aos esgotos sanitários, efluentes industriais e à erosão causada pela chuva.

O aumento do grau de turbidez influencia diretamente as comunidades biológicas aquáticas uma vez que, ao impedir a transmissão da luz no corpo de água, reduz a taxa de fotossíntese, além de provocar o aumento da temperatura da camada superficial da água à medida que as partículas em suspensão, localizadas próximo à superfície, absorvem o calor da luz solar. A concentração desse parâmetro pode variar sazonalmente em conformidade com a atividade biológica na coluna de água, com o escoamento superficial e com a intensidade das chuvas (WHO, 1996).

##### 3.1.2 Temperatura

No ponto de vista de Chin (2013), a poluição térmica é tipicamente associada com a elevada descarga de volumes de água aquecida em águas receptoras mais frias. Os impactos da poluição térmica incluem níveis de oxigênio reduzidos e alteração da ecologia natural em

águas receptoras. Dessa forma, o aumento da temperatura provoca uma elevação das taxas das reações químicas e biológicas, diminuindo a solubilidade dos gases, o que pode gerar mau cheiro, devido à liberação de gases com odores desagradáveis.

A poluição térmica está relacionada à transferência de calor (origem natural) e, também, por exemplo, aos despejos industriais e às torres de resfriamento que liberam calor para a atmosfera (origem antropogênica).

### 3.1.3 Condutividade

De acordo com Eaton *et al* (2005), a condutividade é uma medida indireta da presença de sólidos inorgânicos dissolvidos, tais como: cloreto, nitrato, sulfato, fosfato, sódio, magnésio, cálcio, ferro e alumínio, que podem aumentar a condutividade de uma massa de água. As substâncias orgânicas, como o petróleo, álcool e açúcar não conduzem eletricidade muito bem, e, portanto, têm uma baixa condutividade na água.

Sólidos inorgânicos dissolvidos são ingredientes essenciais para a vida aquática, pois regulam o fluxo de água para dentro e para fora das células dos organismos. Uma alta concentração de sólidos dissolvidos, no entanto, pode causar desequilíbrio no ecossistema aquático devido à diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido. A condutividade pode ser medida para estabelecer uma zona de poluição, por exemplo, em torno de uma descarga de efluentes em um rio ou reservatório (WHO, 1996).

## 3.2 Parâmetros químicos

### 3.2.1 pH

O potencial hidrogeniônico representa a concentração de íons hidrogênio ( $H^+$ ), indicando condições de acidez, neutralidade e basicidade da água. A faixa de pH é de 0 a 14. O  $pH < 7,0$  representa condições ácidas,  $pH = 7,0$  neutralidade e  $pH > 7,0$  condições básicas. Valores de pH que não indicam condições de neutralidade, tendem a afetar as taxas de crescimento microbiano, além de possibilitar a precipitação de metais pesados. Segundo Lenzi *et al* (2009), valores baixos de pH causam corrosividade nas águas de abastecimento e valores elevados possibilitam a formação de incrustações devido à precipitação de sais.

A alteração do valor do pH de um determinado reservatório de água pode ser, conforme comentam Eaton *et al* (2005), oriunda da dissolução de rochas, absorção de gases

da atmosfera, oxidação da matéria orgânica e fotossíntese (origem natural) e dos despejos domésticos e industriais (origem antrópica).

### 3.2.2 Nitrogênio

O nitrogênio estimula o crescimento de algas e, quando em elevadas concentrações no meio hídrico, a oxidação das suas espécies pode consumir uma grande quantidade de oxigênio, promovendo um crescimento exagerado desses organismos, ocasionando, assim, o processo de eutrofização (CHIN, 2013). O nitrogênio pode ser encontrado, em um corpo de água, nas formas de nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. O nitrogênio orgânico é comumente encontrado em águas residuais municipais, em virtude dos despejos domésticos, industriais e de criatórios de animais, enquanto que o nitrato é originado do escoamento de áreas agrícolas devido ao uso de fertilizantes (FUNASA, 2014).

Altas concentrações de nitrato nas águas doces são preocupantes se o corpo hídrico é usado como uma fonte de água potável, uma vez que o nitrato pode representar uma ameaça à saúde de crianças, por dificultar a transferência de oxigênio na corrente sanguínea; nitrogênio na forma de amônia livre é tóxico aos peixes, enquanto que a amônia ionizada é um nutriente para as algas e plantas aquáticas e também influencia a demanda de oxigênio dissolvido (CHIN, 2013).

### 3.2.3 Fósforo

De acordo com Oram (2014), o fósforo estimula o crescimento de plâncton e plantas aquáticas que servem de alimento para organismos, como: peixes e seres humanos. Pelo fato de o plâncton ser a base da cadeia alimentar, o aumento da produtividade deste acarretará em um aumento na população de peixes e diversidade biológica global do sistema. Como a carga de fósforo tende a se acumular no ecossistema, essa superprodução pode levar a um desequilíbrio, ocasionando a eutrofização do meio. Elevadas concentrações de nutrientes, geralmente nitrogênio e fósforo, têm sido associadas como a principal causa do processo de eutrofização ao longo dos últimos 30 anos, além de influenciarem a proliferação de cianobactérias.

Conforme Manual de Controle da Qualidade da Água para técnicos que trabalham em Estações de Tratamento de Água (ETA) publicado pela FUNASA (2014), a fração mais significativa no estudo do fósforo é a inorgânica solúvel, que, geralmente, é relacionada com o crescimento de algas e macrófitas. A presença dessa variável na água pode estar relacionada

a processos naturais (decomposição da matéria orgânica, carreamento do solo) ou antropogênicos (despejos de esgotos domésticos e agrícolas).

#### 3.2.4 Oxigênio Dissolvido

No ponto de vista de Chin (2013), oxigênio dissolvido (OD) é um dos parâmetros mais importantes de qualidade da água e está diretamente relacionado com a saúde dos ecossistemas aquáticos. As descargas de substâncias orgânicas oxidáveis em corpos d'água resultam no consumo de oxigênio e na depressão dos níveis de OD. Se os níveis caem muito, os efeitos sobre os peixes podem variar desde uma redução da capacidade reprodutiva até a morte, além de criar condições redutoras em que o ferro e o manganês podem ser solubilizados, e problemas de sabor e odor também podem aumentar por causa da liberação de produtos, como o sulfeto de hidrogênio. O enriquecimento de nutrientes nas águas superficiais, muitas vezes, é sinalizado por uma produção excessiva de oxigênio, que conduz a supersaturação do mesmo.

Para Mihelcic *et al* (2012), devido à elevada concentração de amônia-nitrogênio ou de carbono orgânico degradável, os resíduos domésticos e industriais frequentemente contêm altos níveis de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que, quando lançados sem tratamento, consomem as reservas de oxigênio, reduzindo a diversidade da vida aquática. Dessa forma, o oxigênio dissolvido é uma exigência crítica da população de organismos associados a um ecossistema aquático diverso e balanceado e um aspecto importante das licenças de operação das estações de tratamento.

É importante destacar que águas naturalmente mais quentes, como as do nordeste brasileiro, e ricas em matéria orgânica podem apresentar valores de OD mais baixos independentemente da ação antrópica. No entanto, baixos valores de OD podem ser encontrados em corpos d'água que passam em grandes centros urbanos e recebem aporte de matéria orgânica na forma de esgotos não tratados ou tratados com baixa eficiência.

#### 3.2.5 Matéria Orgânica

A matéria orgânica presente na água é necessária tanto aos seres heterótrofos, para compor a sua nutrição, como aos autótrofos, como fonte de sais, nutrientes e gás carbônico. No entanto, quando em grandes quantidades pode causar alguns problemas, como cor, odor, turbidez e consumo do oxigênio dissolvido pelos organismos decompositores (FUNASA, 2014).

De acordo com Lenzi *et al* (2009), o esgoto urbano de origem doméstica, comercial e industrial é a principal fonte de poluentes orgânicos em um corpo de água e apresenta uma composição complexa de constituintes, como materiais orgânicos refratários, sabões, graxas e óleos, sais e outras substâncias. A biota aeróbica que vive na água respira e precisa de oxigênio dissolvido. Esta atividade leva à oxidação bioquímica da matéria orgânica pelos microrganismos aeróbios presentes no corpo de água.

Quanto maior for a população de seres aeróbios e mais intensa for a sua atividade, o oxigênio dissolvido será consumido rapidamente pelos microrganismos nos seus processos metabólicos, reduzindo o nível de oxigênio necessário à sobrevivência do restante da biota.

Ainda segundo Lenzi *et al* (2009), a quantidade de oxigênio consumido pela atividade bioquímica dos microrganismos presentes no meio é medida em laboratório e denomina-se Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Para esta, a amostra de água que contém a matéria orgânica é inoculada com o microrganismo de interesse e incubada a 25°C por um período de 5 dias, que é o tempo necessário para a matéria orgânica estabilizar-se ou alcançar um ponto físico em que esta atividade não teria mais efeito significativo sobre o oxigênio disponível. Já para a medição do consumo de oxigênio pelos organismos aquáticos para degradar a matéria orgânica à forma estável, utiliza-se, também, a oxidação total da matéria presente na água, mediante um oxidante forte em meio ácido. A massa de oxigênio equivalente ao agente oxidante consumido na reação com a matéria orgânica denomina-se Demanda Química de Oxigênio (DQO).

### 3.2.6 Micropoluentes Orgânicos

De acordo com Lenzi *et al* (2009), corpos de água que contêm micropoluentes orgânicos, como fenóis e detergentes, estão contaminados com resíduos industriais. Os detergentes, principalmente os de formulação mais antiga, possuem sulfonatos de alquilbenzeno que não são ou são muito pouco biodegradáveis, além de formarem espumas, quebrando a tensão superficial da água e, em concentrações maiores, prejudicam a vida de seres humanos e animais.

### 3.2.7 Micropoluentes Inorgânicos

Segundo Manual de Controle da Qualidade da Água para técnicos que trabalham em ETAS publicado pela FUNASA (2014), a maioria dos micropoluentes inorgânicos é considerada tóxica, embora alguns metais sejam considerados nutrientes essenciais para o crescimento dos seres vivos. Quando encontrados em elevadas concentrações, esses metais

provocam o desequilíbrio do meio, além de serem prejudiciais à saúde. Além dos metais, há outros micropoluentes inorgânicos de importância em termos de saúde pública, como os cianetos, o flúor e outros. Entre os compostos orgânicos tóxicos que apresentam relação com esses micropoluentes destacam-se os defensivos agrícolas, alguns detergentes e uma ampla gama de novos produtos químicos elaborados artificialmente para uso industrial (compostos organossintéticos).

### 3.3 Parâmetros biológicos

#### 3.3.1 Coliformes e Coliformes Termotolerantes

De acordo com Chin (2013), o grupo coliforme de organismos é definido como todos os organismos anaeróbios e anaeróbios facultativos que fermentam a lactose com formação de gás dentro de 48 horas a 35°C. As bactérias coliformes produzem colônias com um brilho verde metálico característico e englobam uma variedade de organismos, principalmente de origem intestinal. O grupo de bactérias coliformes atende a todos os critérios para um indicador ideal, uma vez que estas, geralmente, não são patogênicas, mas estão presentes em patógenos e, muitas vezes, permanecem vivas no ambiente aquático por longos períodos de tempo.

Para Mihelcic *et al* (2012), os coliformes termotolerantes (CTes) fornecem evidência mais forte da possível presença de patógenos termotolerantes do que os coliformes totais (CTs). Para quantificação desses organismos indicadores, amostras de água são recolhidas em recipientes esterilizados. As amostras são compelidas através de um filtro e incubadas a uma temperatura específica durante um determinado período de tempo. As colônias resultantes que se formam durante a incubação são contadas e registradas como o número de unidades produtoras de colônia por 100 mL de água.

#### 3.3.2 Cianobactérias

Segundo Oram (2014), as algas verdes azuis (cianobactérias) são micro-organismos procariontes unicelulares, geralmente, encontrados em água doce e são mais comuns em áreas com altos níveis de nutrientes e elevadas temperaturas. Algumas espécies crescem anexadas à superfície de rochas e pedras (formulários epilíticas), em plantas submersas (formas epífitas) ou nos sedimentos de fundo de lagos. Estas produzem substâncias químicas (endo ou exotoxinas) que são prejudiciais aos animais e seres humanos e, por isso, têm sido associadas a problemas de saúde que vão desde a irritação da pele até a morte, dependendo do tipo e

duração da exposição, além de estarem diretamente ligadas ao processo de eutrofização. Por causa disso, seu controle em mananciais tornou-se medida fundamental.

Para a Portaria MS 2914/2011, relativa às normas de qualidade para água de consumo humano, estabelece que os responsáveis por estações de tratamento de água para abastecimento público devem realizar o monitoramento de cianobactérias e o controle das cianotoxinas nos mananciais (FUNASA, 2014).

### 3.4 Índice de Qualidade da Água (IQA)

De acordo com Oram (2014), o Índice de Qualidade da Água (IQA) foi criado pela National Sanitation Foundation (NSF) em 1970 e desenvolvido para fornecer um método padronizado a fim de comparar a qualidade da água de vários corpos de água, baseando-se em uma pesquisa de opinião (técnica Delphi) com o auxílio de 142 especialistas em qualidade de águas. A critério de cada profissional, das 35 variáveis de qualidade de água propostas inicialmente, somente 9 foram selecionadas e avaliadas de acordo com o seu peso relativo (fator de ponderação), que é baseado na sua importância para avaliação da qualidade da água. Para estas, foram estabelecidas curvas de variação da qualidade de acordo com o estado ou a condição de cada parâmetro.

Segundo Tyagi *et al* (2013), o IQA é composto por nove parâmetros – coliformes termotolerantes (CTes), potencial hidrogeniônico (pH), demanda bioquímica de oxigênio ( $DBO_5$ ), nitrogênio total, fósforo total, temperatura (T), sólidos totais dissolvidos (STD), oxigênio dissolvido (OD), turbidez (Tu) e resíduo total – e o peso atribuído a cada parâmetro tem um impacto considerável no índice. Além disso, este índice é credenciado para demonstrar os ciclos anuais e variações temporais da qualidade da água, mesmo em baixas concentrações, de forma eficiente e oportuna.

As curvas de variação, sintetizadas em um conjunto de curvas médias para cada parâmetro, bem como seu peso relativo correspondente, são apresentados na Figura 1 (CETESB, 2014).

O IQA é calculado, então, pelo produtório ponderado da qualidade de água correspondente às variáveis que integram o índice, utilizando a Equação 1.

$$IQA = \prod q_i^{w_i} \quad (1)$$

Em que:  $IQA$  - Índice de Qualidade da Água (entre 0 e 100);  $qi$  - qualidade do  $i$ -ésimo parâmetro (entre 0 e 100), que é obtido da respectiva curva média de variação de qualidade da água, em função de sua concentração ou medida (Figura 1);  $wi$  - peso correspondente ao  $i$ -ésimo parâmetro (entre 0 e 1), atribuído em função da sua importância.

Uma das principais questões quanto ao uso do IQA descrito pela Equação 1, é que caso não se disponha do valor de alguma das nove variáveis, o cálculo desse índice é inviabilizado. A partir do cálculo efetuado, pode-se determinar a qualidade das águas brutas, que é indicada pelo IQA, variando em uma escala de 0 a 100, representado na Tabela 1.

Tabela 1 - Faixas de qualidade de água para o IQA

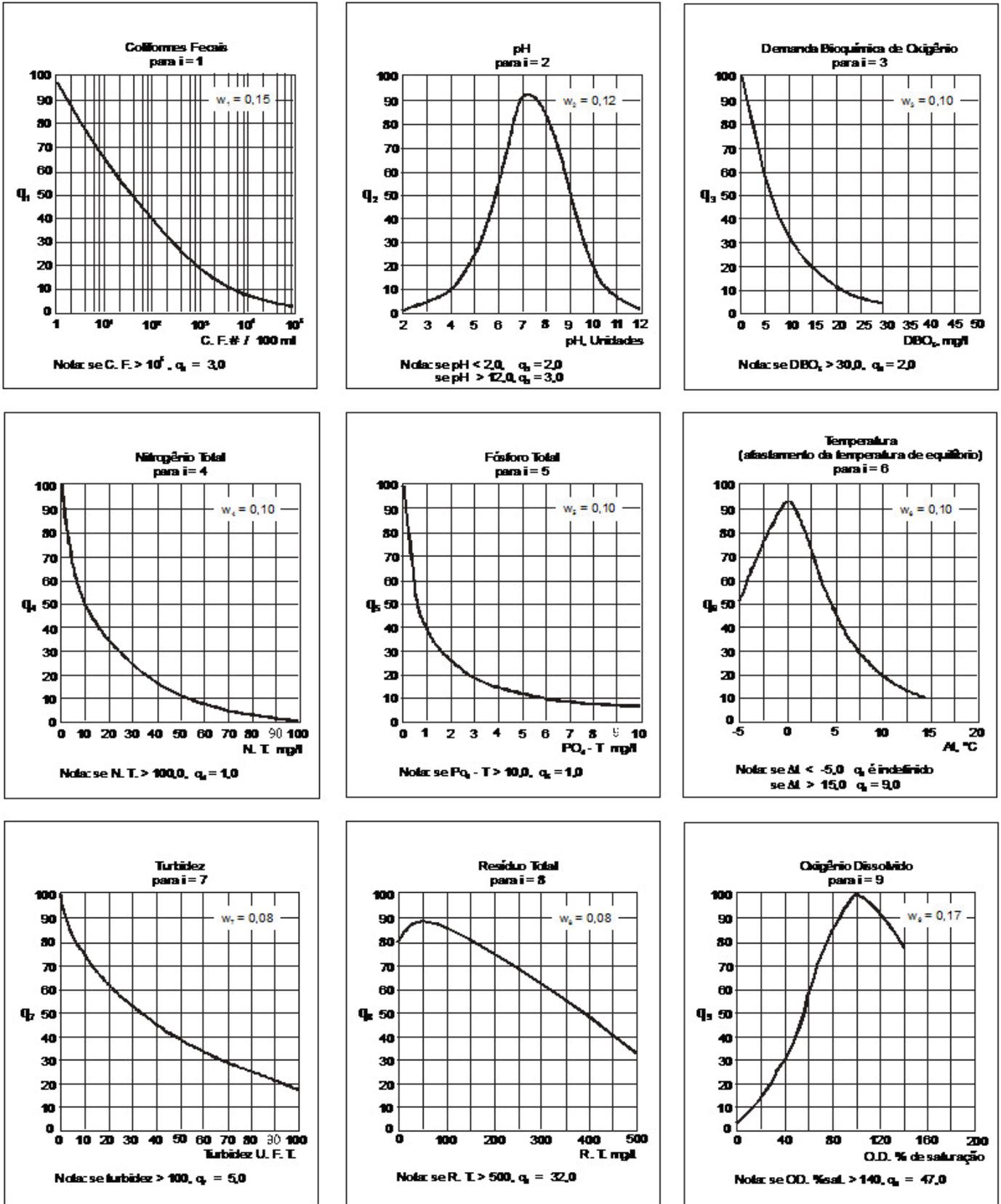
<b>Faixas de IQA</b>	<b>Classificação da qualidade da água</b>
<b><math>IQA \leq 19</math></b>	Péssima
<b><math>19 &lt; IQA \leq 36</math></b>	Ruim
<b><math>36 &lt; IQA \leq 51</math></b>	Regular
<b><math>51 &lt; IQA \leq 79</math></b>	Boa
<b><math>79 &lt; IQA \leq 100</math></b>	Ótima

Fonte: CETESB, 2014.

De acordo com a literatura, os índices disponíveis têm muitas variações e limitações com base no número de variáveis de qualidade da água utilizada e não são aceitos em todo o mundo.

Para Bollmann *et al* (2000), o problema mais significativo apresentado na utilização e, até mesmo, na criação de um indicador é que o destino final da água é diversificado, prevendo usos múltiplos. Em geral, para cada uso, podem ser elencados padrões individuais de qualidade provocando o surgimento de escalas de valores diferenciadas para uma mesma variável ambiental. Por isso, várias entidades têm feito adaptações no IQA com relação aos parâmetros e à fórmula de cálculo do IQA.

Figura 1 - Curvas médias de variação de qualidade da água do IQA



Fonte: CETESB, 2014.

### 3.5 Índice de Qualidade da Água para Reservatórios (IQAR)

A eutrofização é um dos principais problemas associados à gestão de reservatórios (ANDREOLI *et al*, 2005). Reservatórios moderadamente degradados apresentam um déficit considerável de oxigênio dissolvido na coluna d'água, médio aporte de nutrientes e matéria orgânica, grande variedade e densidade de algumas espécies de algas e tempo de residência considerável (IAP, 2014).

As perturbações ocasionadas por atividades antrópicas exercem influência direta sobre o corpo hídrico, aumentando, assim, a vulnerabilidade do reservatório formado pela represa. Como consequência, pode ocorrer a redução da qualidade da água, devido, principalmente, à elevação da carga de nutrientes, que pode resultar em um processo de eutrofização. Por causa disso, o índice de qualidade de água em reservatórios (IQAR) foi criado pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP) para verificar a degradação da qualidade da água dos mesmos (ANA, 2014).

No estudo conduzido pelos pesquisadores do IAP, foi desenvolvida uma matriz contendo os intervalos de classe dos parâmetros mais relevantes para estabelecer diferentes classes de reservatórios em relação ao grau de degradação da qualidade de suas águas. Todas as variáveis foram submetidas à análise estatística multivariada para selecionar aquelas mais relevantes para uma correta caracterização da qualidade das águas dos reservatórios. As variáveis selecionadas foram: déficit de oxigênio dissolvido (%), fósforo total ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), nitrogênio inorgânico total ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), demanda química de oxigênio ( $\text{mg.L}^{-1}$ ), disco de Secchi (m), clorofila *a* ( $\mu\text{g.L}^{-1}$ ), tempo de residência (dias), profundidade média (m) e a comunidade fitoplanctônica ( $\text{n}^\circ$  de células/mL) devido a sua importância ecológica em ecossistemas lênticos (IAP, 2014).

A matriz desenvolvida apresenta, então, seis classes de qualidade de água, que foram estabelecidas a partir do cálculo dos percentis de 10, 25, 50, 75 e 90% de cada uma das variáveis mais relevantes selecionadas, representadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Matriz de Qualidade de Água

Variáveis "i"	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V	Classe VI
Déficit de oxigênio (%)	≤5	6-20	21-35	36-50	51-70	>70
Fósforo Total (mg.L <sup>-1</sup> )	≤0,010	0,011-0,025	0,026-0,040	0,041-0,085	0,086-0,210	>0,210
Nitorg. Inorg. Total (mg.L <sup>-1</sup> )	≤0,15	0,16-0,25	0,26-0,60	0,61-2,00	2,00-5,00	>5,00
Clorofila a (mg.m <sup>-3</sup> )	≤1,5	1,5-3,0	3,1-5,0	5,1-10,0	11,0-32,0	>32
Disco de Secchi (m)	≥3	3-2,3	2,2-1,2	1,1-0,6	0,5-0,3	<0,3
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	≤3	3-5	6-8	9-14	15-30	>30
Tempo de residência (dias)	≤10	11-40	41-120	121-365	366-550	>550
Profundidade média (m)	≥35	34-15	14-7	6-3,1	3-1,1	<1
Fitoplancton (florações)	sem	rara	eventual	frequente	frequente/ permanente	permanente

Fonte: IAP, 2014.

Para o cálculo do Índice da Qualidade de Água de Reservatórios, as variáveis selecionadas receberam pesos distintos, em função de seus diferentes níveis de importância na avaliação da qualidade da água, e estão representadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Variáveis selecionadas e seus respectivos pesos

Variáveis "i"	Pesos w <sub>i</sub>
Déficit de oxigênio dissolvido (%)*	17
Fósforo Total (mg.L <sup>-1</sup> )**	12
Nitrogênio Inorgânico total (mg.L <sup>-1</sup> )**	08
Clorofila a (µg/L)***	15
Profundidade Secchi (m)	12
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )**	12
Cianobactérias (nº de células.mL <sup>-1</sup> )**	08
Tempo de residência - (dias)	10
Profundidade média - (m)	06

Fonte: IAP, 2014.

(\*) média da coluna d'água; (\*\*) média das profundidades I e II; (\*\*\*) profundidade I

A classe de qualidade de água a que cada reservatório pertence é calculada através do Índice de Qualidade de Água de Reservatórios (IQAR), de acordo com a Equação 2.

$$IQAR = \frac{\sum (q_i w_i)}{\sum w_i} \quad (2)$$

Em que: *IQAR* - Índice de Qualidade da Água de Reservatórios; *q<sub>i</sub>* - classe de qualidade de água em relação a variável "i", que pode variar de 1 a 6; *w<sub>i</sub>* - pesos calculados para as variáveis "i".

O IQAR parcial é calculado a partir dos dados coletados a cada campanha de monitoramento. Em seguida, faz-se a média aritmética de dois ou mais índices parciais para,

então, obter o IQAR final e definir a classificação de qualidade a que pertence cada reservatório, sendo esta representada na Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação de Qualidade da Água

<b>Valor do IQAR</b>	<b>Qualificação</b>
$0 \leq \text{IQAR} \leq 1,50$	não impactado a muito pouco degradado
$1,51 \leq \text{IQAR} \leq 2,50$	pouco degradado
$2,51 \leq \text{IQAR} \leq 3,50$	moderadamente degradado
$3,51 \leq \text{IQAR} \leq 4,50$	criticamente degradado a poluído
$4,15 \leq \text{IQAR} \leq 5,50$	muito poluído
$\text{IQAR} > 5,51$	extremamente poluído

Fonte: IAP, 2014.

De acordo com Abbasi *et al* (2012), o IQAR tornar-se-ia inviável se todos e cada parâmetro possível fossem incluídos no cálculo do índice. Por isso, é preciso escolher um número de parâmetros que, em conjunto, reflita a qualidade total da água para um determinado uso final. Para reduzir o número de parâmetros a serem incorporados no índice, mas, ainda assim, mantê-lo representativo, essas variáveis devem ser analisadas de acordo com a sua importância em face da sua utilização final.

Índices de qualidade da água têm por objetivo, então, analisar os parâmetros e as suas concentrações presentes em um corpo d'água de modo que essa combinação conduza a um número que facilite a compreensão e interpretação dos fatores mais importantes que contribuíram para a classificação final dessa água. Vários especialistas podem ter diferentes percepções sobre a importância de um determinado parâmetro e, por causa disso, índices de qualidade da água têm sido formulados para melhor representar a qualidade do meio hídrico.

Na Tabela 5 constam os índices desenvolvidos pelo Departamento de Qualidade Ambiental de Oregon (O-IQA) para comparação da qualidade da água de diversos reservatórios localizados em Oregon e pelo Conselho de Controle de Poluição Central da Índia (Central Pollution Control Board – CPCB-IQA). Estes índices avaliam a qualidade da água de seus reservatórios em função dos fatores que os influenciam e, por isso, os parâmetros adotados para cada um assumem pesos e níveis de importância diferentes na avaliação da qualidade da água.

Tabela 5 - Formulações dos IQAs utilizados frequentemente

Índice	Parâmetros ( $q_i$ )	$w_i$	Equação	Classificação
<b>O-IQA (Dunnette, 1979; Cude, 2001)</b>	Temperatura		$\sqrt{\frac{N}{\sum_{i=2}^n \frac{1}{q_i^2}}}$	0-25 = muito ruim 26-50 = ruim 51-70 = razoável 71-90 = bom 91-100 = excelente
	OD			
	pH			
	Amônia + nitrato de nitrogênio			
	Fósforo total			
	Sólidos totais		N = número de parâmetros	
	Clorofila a			
<b>CPCB-IQA (Sarkar &amp; Abbasi, 2006)</b>	OD	0,31	$\sum_{i=1}^N q_i w_i$	0-38 = muito ruim 38-50 = ruim 50-63 = razoável a bom 63-100 = bom a excelente
	pH	0,22		
	Clorofila a	0,28		

Fonte: Tabela adaptada de Abbasi *et al* (2012).

### 3.6 CONAMA

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão responsável por definir limites para classificação de águas quanto ao uso e destino final. Através da Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, que *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*, as águas, de uma forma geral, podem ser divididas em três tipos:

- I - águas doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰;
- II - águas salobras: águas com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰;
- III - águas salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰ (Resolução CONAMA nº 357/2005).

Além disso, as águas doces em cinco classes: Classe especial, Classe I, Classe II, Classe III, Classe IV.

I - classe especial: águas destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, com desinfecção; b) à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; e, c) à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.

II - classe 1: águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película; e e) à proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.

III - classe 2: águas que podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; b) à proteção das comunidades aquáticas; c) à recreação

de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000; d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e e) à aquicultura e à atividade de pesca.

IV - classe 3: águas que podem ser destinadas:

a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; b) à irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; c) à pesca amadora; d) à recreação de contato secundário; e e) à dessedentação de animais.

V - classe 4: águas que podem ser destinadas:

a) à navegação; e b) à harmonia paisagística. (Resolução CONAMA nº 357/2005).

Neste trabalho, para a determinação dos índices de qualidade de água para reservatórios, foram observados os limites dos parâmetros ambientais que classificam a água como recurso hídrico de classe I, II, III e IV, a fim de que seja determinada a classificação desse corpo d'água de acordo com a análise dos resultados obtidos.

### 3.7 Análise de Componentes Principais

Segundo Sanguansat (2012), a análise de componentes principais tem sido utilizada desde a década de 70 para elaborar índices de qualidade ambiental e é aplicada para reduzir a dimensão de um conjunto de dados, que consiste de um grande número de variáveis inter-relacionadas, mantendo tanto quanto possível a variabilidade presente neste conjunto.

De acordo com Manly (2005), os objetivos da análise são tomar  $p$  variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_p$ , encontrar combinações destas para produzir índices  $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ , que sejam não correlacionados na ordem de sua importância, e que descrevam a variação nos dados. A falta de correlação significa que os índices estão medindo diferentes "dimensões" dos dados, e a ordem é tal que  $\text{Var}(Z_1) \geq \text{Var}(Z_2) \geq \dots \geq \text{Var}(Z_p)$ , em que  $\text{Var}(Z_1)$  denota a variância de  $(Z_1)$ . Os índices  $Z$  são, então, os componentes principais. Esta análise fornece uma maneira objetiva de encontrar índices de modo que a variação nos dados possa ser levada em consideração tão concisamente quanto possível. Nesse tipo de análise, dois ou mais componentes principais podem fornecer um bom resumo de todas as variáveis originais.

As combinações lineares produzidas, nessa análise, são particulares de  $n$  variáveis aleatórias. Sendo assim, a primeira componente principal, sintetiza a máxima variabilidade possível no conjunto de dados originais. A segunda sintetiza a máxima variabilidade residual, ou seja, não contabilizada na primeira componente. As principais componentes adicionais podem ser obtidas na sequência até que a maior parte da variação original dos dados seja capturada. Além disso, são gerados valores com cargas que representam correlações entre as

principais componentes e as variáveis originais. Essas combinações lineares representam a seleção de um novo sistema de coordenadas obtido pela rotação do sistema original de eixos representados pelos vetores, no qual é realizada a extração dos autovalores e autovetores da matriz simétrica (CARLE *et al*, 2005).

Para Bicudo e Bicudo (2004), os autovetores correspondem às componentes principais e é o resultado do carregamento das variáveis originais em cada um deles. Tais carregamentos podem ser considerados como uma medida da relativa importância de cada variável em relação às componentes principais e os respectivos sinais, se positivos ou negativos, indicando relações diretamente e inversamente proporcionais.

No ponto de vista de Sanguansat (2012), a PCA tenta, então, transformar um grande conjunto de indicadores inter-correlacionados em um conjunto menor de indicadores compostos de variáveis não-correlacionadas (ortogonais) denominados componentes principais (PCs) e simplifica a estrutura do sistema de análise estatística. Desta forma, as medidas da matriz de coeficientes de correlação, como também a variação de cada componente, podem ser explicadas pela relação com cada um dos outros e o PC fornece informação sobre os parâmetros mais significativos, os quais descrevem o conjunto completo de dados, proporcionando redução de dados com o mínimo de perda de informação original.

O objetivo inicial da PCA é, então, verificar se é possível representar os fatores subjacentes de forma mais simples e significativa, diminuindo a contribuição dos componentes principais de variáveis com menor importância e aumentando as mais significativas, ou seja, analisar se uns poucos componentes explicam a maior parte da variância dos dados.

Sob o ponto de vista de Bollmann *et al* (2000), a PCA é vantajosa somente quando existem variáveis altamente correlacionadas dentro do conjunto, de modo que a dimensionalidade possa ser reduzida. E, para evitar problemas que podem ocorrer na aplicação desta técnica, deve-se tomar muito cuidado na interpretação dos resultados, uma vez que nem sempre os novos componentes apresentam uma explicação prática clara, bem como não existe nenhum modelo estatístico sob os dados, indicando que o comportamento amostral dos autovalores e autovetores é desconhecido.

### 3.8 Aplicações

Este item do trabalho apresenta resultados de alguns estudos recentes realizados por pesquisadores que avaliaram a qualidade da água de alguns corpos hídricos, utilizando índices

de qualidade da água e análise estatística, principalmente a ferramenta análise de componentes principais.

Olsen *et al* (2012) avaliaram a qualidade da bacia hidrográfica do rio Illinois, localizado em Arkansas e Oklahoma, Estados Unidos da América. Levando em consideração a hipótese de que contaminantes de origem antrópica estavam diminuindo a qualidade do rio, foram analisados os seguintes parâmetros: alcalinidade, alumínio, arsênio, bário, cálcio, cloro, *Escherichia coli*, coliformes totais, coliformes termotolerantes, cobre, *Enterococcus ENTERO*, ferro, magnésio, manganês, níquel, nitrito, nitrato, fósforo (solúvel reativo), fósforo total, fósforo (total dissolvido), potássio, sódio, sulfato, sólidos totais dissolvidos, carbono orgânico total, zinco e, então, foi aplicada a análise de componentes principais para auxiliar na identificação das fontes de contaminação.

Ainda conforme os resultados obtidos por Olsen *et al* (2012), as avaliações de PCA foram consistentes com duas fontes dominantes de contaminação de água superficial no rio Illinois: 1) descarga para as correntes de tratamento de águas residuais municipais e 2) escoamento e infiltração de campos com resíduos de aves aplicados em terra, porém, essa conclusão só foi possível, segundo os autores, através da revisão de 49 artigos publicados que tratam de técnicas multivariadas (PCA), uma vez que não há um procedimento padrão para avaliar a sensibilidade dos resultados à métodos alternativos.

Viana *et al* (2013) caracterizaram a qualidade das águas da Lagoa do Taí - RJ, localizada nas proximidades da instalação do Complexo Logístico e Industrial Portuário do Açú (CLIPA) e expressaram os resultados através do Índice de Qualidade de Água (IQA). Saídas de campo, revisão de literatura, coleta e análise de amostras de água, cálculo do IQA e sistematizações dos resultados obtidos foram realizadas e os seguintes parâmetros foram analisados: fósforo total, nitrogênio total, sólidos totais, pH, *E. coli*, turbidez, DBO e OD.

Ainda de acordo com os resultados obtidos no trabalho de Viana *et al* (2013), o índice de qualidade da água apresentou-se entre *razoável* e *bom*, com média mais próxima da classificação razoável. A análise de variação temporal no período estudado entre os meses de julho a dezembro de 2012 evidenciou uma correlação entre o IQA nos períodos seco e chuvoso e os resultados foram correlacionados com as elevadas concentrações de *E. coli* nas águas (possíveis contaminantes de origem antrópica) carregadas para a lagoa pelos canais que, direta ou indiretamente, estão associados à Lagoa do Taí.

Silva *et al* (2014) avaliaram o índice de qualidade da água para um corpo hídrico, localizado na parte baixa da bacia hidrográfica Piranhas-Açú, nas proximidades do município de Açú/RN, que recebe de forma direta descargas de efluentes oriundos de áreas irrigadas. Os

parâmetros analisados para o cálculo do IQA foram: turbidez, fósforo total, nitrogênio total, resíduo sólido total, pH, oxigênio dissolvido, temperatura de afastamento (Ta), coliformes termotolerantes e demanda bioquímica de oxigênio.

Ainda segundo Silva *et al* (2014), os resultados obtidos, tanto para o leito natural do rio como para o canal de drenagem, mostraram que o fósforo total e o nitrogênio total são os dois nutrientes que mais contribuem para o processo de eutrofização de corpos hídricos, evidenciando o impacto que as áreas irrigadas das margens do rio Açu podem ter na contribuição da ocorrência de eutrofização. Apesar disso, a água do rio Açu apresentou *boa* qualidade para o uso no abastecimento humano, desde que passe por um processo de tratamento convencional e monitoramento constante.

Franco *et al* (2014) avaliaram a qualidade das águas do Rio Claro, do Córrego do Queixada e do Ribeirão Jataí, utilizando o método de verificação do Índice de Qualidade da Água (IQA). Os parâmetros considerados foram: coliformes fecais, DBO, pH, oxigênio dissolvido, N e P totais, turbidez e sólidos totais. Em quatro períodos de coleta, a qualidade da água foi classificada, segundo o IQA da CETESB, como boa, regular e média.

Apesar de os valores dos IQA apresentados no trabalho de Franco *et al* (2014) não terem refletido um cenário muito ruim, com exceção do ponto 9 que apresentou o IQA igual a 46 no mês de março de 2012 – a turbidez encontrada nesse período contribuiu para a redução do IQA devido à ocorrência de chuvas – foi recomendado que, além de corrigir os problemas detectados, trabalhos preventivos sejam intensificados para diminuir custos e danos irreversíveis às populações.

Arruda *et al* (2014) avaliaram a qualidade do reservatório de Taiacubeba, Mogi das Cruzes/SP, entre 2009 e 2013, através do Índice de Qualidade da Água (IQA), verificando a presença cianobactérias e coliformes termotolerantes/*Escherichia coli*, considerados indicadores biológicos da qualidade da água importantes para a saúde pública.

Ainda de acordo com Arruda *et al* (2014), a qualidade da água do reservatório foi classificada como regular, evidenciando que as atividades humanas podem comprometer a garantia de qualidade das águas, principalmente as destinadas ao abastecimento público. Apesar de ter havido uma melhora na qualidade nos anos de 2009 a 2011, o número de cianobactérias tem apresentado tendência de crescimento, sendo que o ano de 2013 apresentou valores acima do limite de 20.000 cel/mL, fato relacionado à eutrofização do reservatório. Outro aspecto abordado nesse trabalho é que não se pode quantificar a qualidade de um reservatório sem analisar a qualidade da água dos seus contribuintes e, no caso do Reservatório Taiacubeba, envolve parte da Bacia do Alto Tietê Cabeceiras.

Sahoo *et al* (2015) analisaram a qualidade do rio Brahmani, localizado na Índia, que apresentava suas águas impróprias para o consumo humano devido, principalmente, à presença de material pesado e radioativo. Para tanto, propuseram uma metodologia adaptativa de inferência neural fuzzy (ANFIS) para a previsão da qualidade da água utilizando a análise de componentes principais. As variáveis físico-químicas e biológicas analisadas foram: pH, oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, condutividade elétrica, nitrogênio amoniacal, nitrito, cloro livre, sólidos dissolvidos totais, condutividade, turbidez, carbono orgânico total, carbono inorgânico total no período de 2003 a 2011.

Ainda segundo Sahoo *et al* (2015), a qualidade da água foi prevista com quatro principais (65.159%) como insumos e IQA como saída para o rio Brahmani. Os valores de qualidade da água preditos pelo modelo ANFIS situaram-se entre 21-52, podendo concluir que a água do rio Brahmani pode ser usada tanto como água potável como para fins domésticos até certo ponto. O grau do coeficiente de correlação entre os dados ( $R^2$ ) é 0,970 e 0,792 para as parcelas de regressão entre o IQAreal e o IQAprevisto através do modelo ANFIS para dados de treinamento e teste, respectivamente, concluindo assim que o modelo prevê o índice de qualidade da água com razoável precisão.

Ferreira *et al* (2015) adaptaram e compararam o Índice de Qualidade de Água desenvolvido pela *National Sanitation Foundation* às condições físicas, químicas e biológicas das águas do reservatório Presidente Juscelino Kubitschek de Oliveira (conhecido como açude Orós), da cidade de Orós, Quixelô e Iguatu/Ce. Os parâmetros físicos, químicos e biológicos analisados, foram: oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, pH, demanda bioquímica de oxigênio, nitrato, fósforo total, temperatura, turbidez e sólidos totais. A partir destes, foi empregada a Análise de Componente Principal para determinação dos pesos a serem associados aos parâmetros presentes no IQA e adaptá-lo a reservatórios de regiões de clima semiárido.

Como resultado do trabalho, Ferreira *et al* (2015) verificaram que a qualidade da água do reservatório foi classificada como regular durante a maior parte do período de estudo. A variável que mais influenciou esse trabalho foi o pH, fato atribuído à composição das rochas da região. Foi observado também que o índice adaptado para regiões de clima semiárido é estatisticamente diferente dos índices de outras regiões. No entanto, os indicadores seguem a mesma tendência, demonstrando diferenças apenas na sensibilidade e nos pesos dos atributos determinantes da qualidade de água.

Lobato *et al* (2015), em seu estudo, criaram um novo indicador de qualidade (QI) e um novo Índice de Qualidade de Água (IQA) para a avaliação da qualidade da água de um reservatório localizado na Usina Hidroelétrica de Tucuruí - Amazônia, Brasil, levando em consideração as características específicas da área. Para a elaboração do indicador e do índice de qualidade, foram aplicadas análises fatoriais, como análise de componentes principais sem a rotação *Varimax*, a fim de selecionar os parâmetros relevantes a serem incluídos na construção de ambos os índices. O teste de Bartlett foi aplicado para verificar a comunalidade dos fatores e descartar os parâmetros que não fossem capazes de explicar a qualidade da água desse corpo hídrico. A partir disso, curvas de qualidade para cada parâmetro selecionado foram criadas e, então, o IQA foi aplicado para investigar a qualidade da água no reservatório.

Ainda segundo o trabalho de Lobato *et al* (2015), o ciclo hidrológico apresentou-se como o parâmetro que afeta diretamente a qualidade da água do reservatório e o IQA mostrou-se útil na identificação de impactos antropogênicos a que o reservatório está submetido; destacando-se que, os pontos de coleta que estavam inseridos em áreas preservadas, apresentaram qualidade da água classificada como *boa* e, os que estavam em pontos próximos ao aporte de efluentes, apresentaram classificações que variaram de *ruim* a *regular*. Os índices construídos foram avaliados, então, como mais uma ferramenta útil no controle e monitoramento da qualidade da água de regiões que apresentam ciclos hidrológicos bem definidos, além de auxiliar na detecção de impactos antropogênicos.

Hou *et al* (2016) avaliaram a qualidade da água dos reservatórios mais baixos localizados no Rio Yellow, na China, usando o índice de qualidade da água (IQA) e compararam a qualidade da água com as principais fontes de contaminações, coletando amostras ao longo de 6 anos. Foram selecionadas nove variáveis de água para participar do cálculo do IQA por Análise de Componentes Principais (PCA).

Ainda de acordo com Hou *et al* (2016), os valores de IQA variaram de 17,8 a 77,8 em cinco reservatórios, o que indicou qualidade de água boa para muito ruim dos reservatórios, porém não foram encontradas diferenças significativas entre os reservatórios. Uma importante descoberta desse estudo é que o mercúrio foi a principal contaminação em 5 reservatórios, enquanto fósforo total e sulfato foram outras principais contaminações nos reservatórios localizados próximos à montanha e ao Rio Yellow, respectivamente.

Sun *et al* (2016) avaliaram a variabilidade espacial e temporal e identificaram a classificação da qualidade do rio Dongjiang, localizado na China, por ser utilizado como fonte de água potável de Hong Kong, além de ser utilizado para irrigação. A fim de simplificar o procedimento e reduzir os custos analíticos da avaliação da qualidade da água, foi introduzido

um IQA modificado com base na Análise de Componentes Principais (PCA). Os parâmetros analisados foram: pH, temperatura, oxigênio dissolvido, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito, fósforo total, sólidos dissolvidos totais, condutividade, turbidez, carbono orgânico total, carbono inorgânico total no período de 2011-2012.

Como resultado do trabalho, Sun *et al* (2016) verificaram que ao comparar o índice modificado com o anterior, observaram que a tendência de mudança espacial e a classificação da qualidade da água foram obtidas pelo IQA modificado, que foi composto por pH, temperatura, sólidos totais suspensos,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  e  $\text{NO}_3\text{-N}$ . Os resultados mostraram uma excelente qualidade da água no local tributário próximo ao reservatório, boa qualidade da água no rio à montante e qualidade média da água no rio à jusante, sugerindo que as águas residuais urbanas originadas pelo aumento do tamanho da população e o desenvolvimento da indústria à jusante, levaram principalmente à deterioração da qualidade da água ao longo do rio. Além disso, o IQA modificado poderia refletir mais adequadamente as mudanças sazonais na qualidade da água, que foi ligeiramente pior na estação seca do que na estação chuvosa. Esses resultados também sugeriram que o monitoramento contínuo deve ser conduzido para evitar o impacto antropogênico.

Gunawardhana *et al* (2016) analisaram a qualidade da bacia hidrográfica do rio Uma Oya, localizado no Sri Lanka, com o objetivo de avaliar o impacto das práticas agrícolas na qualidade do habitat físico, qualidade da água e índices de macroinvertebrados em diferentes escalas espaciais. As variáveis consideradas foram: condutividade elétrica, pH, temperatura, demanda bioquímica de oxigênio, sólidos totais dissolvidos, sólidos suspensos totais, nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal, fosfato, sulfato, ferro, fluor, magnésio e sódio e, então, aplicada a análise de componentes principais.

Os resultados de Gunawardhana *et al* (2016) indicaram que a qualidade do habitat físico, os parâmetros de qualidade da água e os índices de macroinvertebrados são significativamente ( $p < 0,05$ ) afetados pela escala de captação % da cobertura da terra agrícola. Entre as variáveis de qualidade da água que foram testadas, o nitrito, nitrogênio amoniacal, fosfato e a demanda bioquímica de oxigênio em locais com maior porcentagem de cobertura de terra agrícola excederam os padrões de qualidade da água potável durante a estação seca. Os níveis de fosfato e da demanda bioquímica de oxigênio nesses locais excederam os padrões de qualidade de água ambiente propostos para águas interiores no Sri Lanka para vida aquática e para fins de irrigação, sugerindo que as intervenções de escala de captação são cruciais para o manejo da bacia hidrográfica de Uma Oya e para a melhoria da qualidade da água e da produção agrícola sustentável.



## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Área de Estudo

O município de Cedro de São João possui uma área de aproximadamente 73 km<sup>2</sup> e está localizado na região nordeste do Estado de Sergipe, limitando-se a norte com o município de Telha, a oeste com Malhada dos Bois e Aquidabã, ao sul com o rio São Francisco e a leste com Propriá. A cidade é povoada por 5.376 habitantes, sendo que 4.648 residem na zona urbana e 728 na zona rural, com uma densidade demográfica de 73,64hab/km<sup>2</sup>. A economia do município depende, principalmente, da agricultura, destacando-se a produção de arroz, mandioca e milho, e da pecuária, destacando-se a criação de bovinos e suínos. No setor mineral, é explorada argila para produção de cerâmica. A região possui clima semiárido, apresentando estação seca no verão, com evapotranspiração potencial média anual superior à precipitação média anual, e temperaturas superiores à 26°C. O comportamento pluviométrico das chuvas apresenta máximas nos meses de março a agosto, com uma média pluviométrica anual de 800mm (SERGIPE, 2000; IBGE, 2014).

A Lagoa Salomé foi escolhida como área do presente estudo pelo fato de ser cenário de referência turística e de lazer, além de ter as suas águas utilizadas para abastecimento humano, porém não é constantemente monitorada. Esse reservatório possui um espelho d'água de aproximadamente 13 (treze) mil metros quadrados e um perímetro de 4 (quatro) mil metros com uma capacidade de armazenamento de aproximadamente 52 (cinquenta e dois) milhões de metros cúbicos, estando circundada por propriedades rurais e residências do centro urbano, adotando-se, para fins de referência desse trabalho, as coordenadas geográficas UTM zona 24 L 8866270.52m E / 731650.22m S. O reservatório é formado por águas do rio São Francisco, que é de fundamental importância para o Brasil devido ao volume de água transportada em uma região semiárida, o que tem contribuído para o desenvolvimento econômico da região. A bacia hidrográfica do rio São Francisco abrange 639.219km<sup>2</sup> de área de drenagem (7,5% do país) e vazão média de 2.850m<sup>3</sup>/s (2% do total do país) (CODEVASF, 2015).

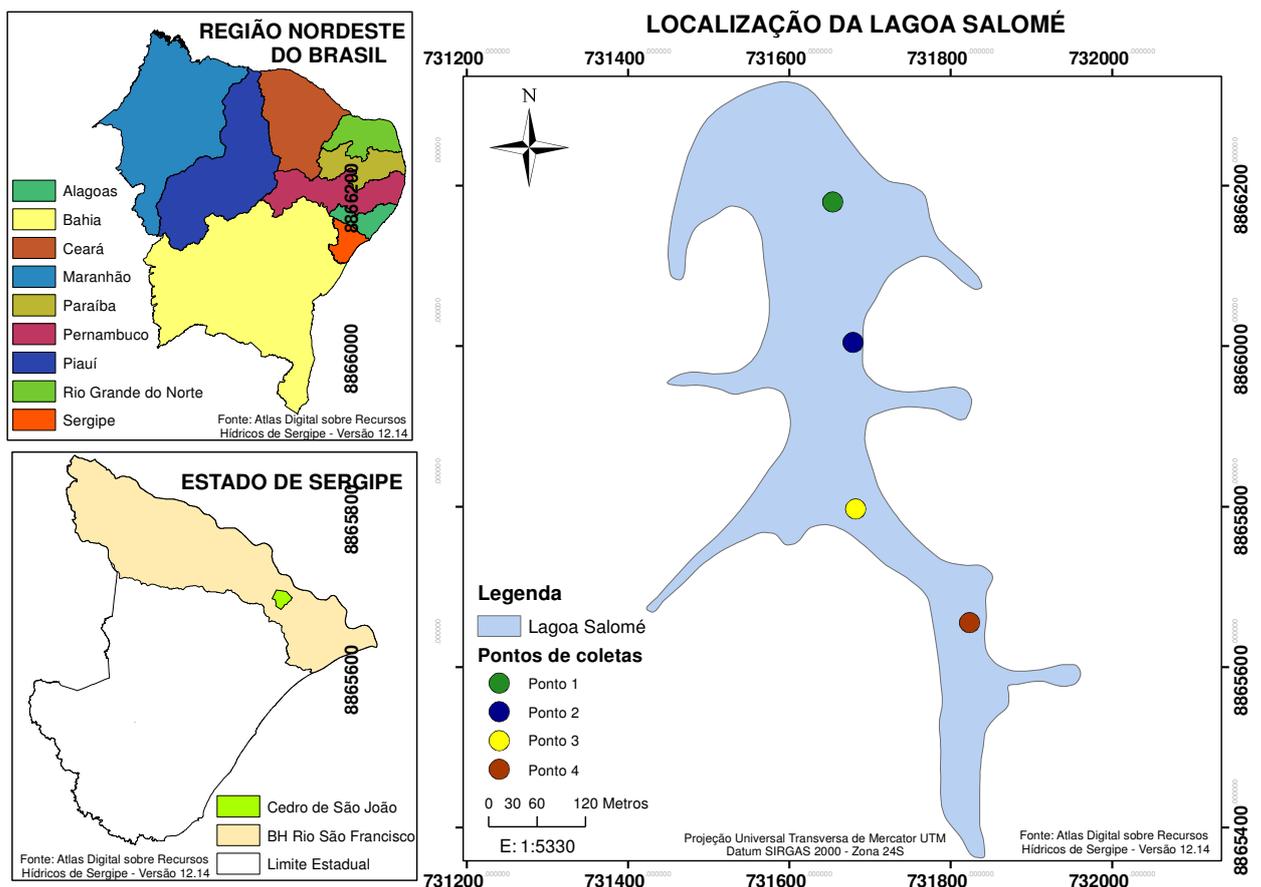
Segundo França *et al* (2007), o rio São Francisco possui 2.700km de extensão e nasce na Serra da Canastra em Minas Gerais, escoando no sentido sul-norte pela Bahia e Pernambuco, quando altera seu curso para o leste, chegando ao Oceano Atlântico através da divisa entre Alagoas e Sergipe (BRASIL, 2012). Seu curso pode ser dividido em quatro trechos de fisiografia distinta: o alto São Francisco, que se estende das nascentes, na Serra da

Canastra, à cidade de Pirapora, em Minas Gerais; o médio São Francisco, que vai de Pirapora à cidade de Remanso, às margens do lago de Sobradinho, na Bahia; o sub-médio São Francisco, entre Remanso e Paulo Afonso, ainda na Bahia; e o Baixo São Francisco, onde está localizada a Lagoa Salomé, que vai de Paulo Afonso à foz, na divisa entre Sergipe e Alagoas (FRANÇA *et al*, 2007).

Entretanto, devido à regularização da vazão do São Francisco para a geração de energia, a contribuição das águas da lagoa ficou limitada apenas as águas das chuvas. Então, por conta dessa transformação, a Lagoa tem se tornado um ambiente frágil e, em virtude da lentidão da renovação das suas águas, faz-se necessário a revitalização deste reservatório.

O Reservatório da Lagoa Salomé localizado em Cedro de São João, SE está representado na Figura 2.

Figura 2- Reservatório Lagoa Salomé localizado em Cedro de São João, SE.



A população do município de Cedro de São João vem, ao longo dos anos, expandindo sua ocupação no entorno da Lagoa Salomé, que era um importante recurso natural para manutenção e integridade da biodiversidade regional. Essa ocupação desordenada tem impactado a integridade do sistema hídrico e, por conta disso, a Lagoa Salomé apresenta qualidade imprópria para usos múltiplos devido, principalmente, à diluição de esgotos

sanitários *in natura*, cujo aporte de matéria orgânica favorece a proliferação de macrófitas, provocando a eutrofização do corpo hídrico; remoção de cobertura vegetal de Área de Preservação Permanente (APP) e disposição de resíduos sólidos em seu entorno, dentre outros. Outra consequência desse aporte inadequado é a produção de odores e deterioração do aspecto estético do reservatório, que além de impossibilitar o uso das suas águas para abastecimento humano, tem inutilizado a Lagoa para uso recreativo.

Em agosto de 2015, a CODEVASF elaborou uma proposta de intervenção na Lagoa Salomé e seu entorno a fim de revitalizar, urbanizar e promover a preservação ambiental nessa área com ênfase no reflorestamento da Área de Preservação Permanente (APP), com o intuito de proteger a diversidade biológica, disciplinar o processo de ocupação e assegurar a sustentabilidade do uso desse recurso natural. Em paralelo, seriam incrementadas atividades de cunho cultural, ambiental e recreativo aos visitantes, sobretudo aos moradores da região em prol do uso sustentável do ambiente, porém esse projeto nunca foi oficializado e a Lagoa Salomé segue submetida aos impactos provocados pela expansão da população.

## 4.2 Procedimentos Metodológicos

Os pontos de coleta foram definidos com base em características importantes, como facilidade de acesso e segurança da amostragem da Lagoa Salomé. Após análise preliminar, quatro pontos estratégicos na Lagoa Salomé foram selecionados e georreferenciados, utilizando os seguintes critérios: um ponto à montante, para determinar a qualidade da água antes de sofrer a influência antropogênica, dois distribuídos na área da lagoa, a fim de caracterizar a área do corpo hídrico atingida diretamente, e um à jusante, caracterizando o impacto.

Para a realização das coletas de água, ocorridas em maio e outubro de 2016, foi utilizado um barco e essas foram realizadas diretamente nos frascos removendo-se as tampas dos mesmos; lavando os recipientes com a mesma água a ser coletada e, com uma das mãos, mergulhando-os de modo que a boca do mesmo fique de 5 da 10 cm abaixo da superfície da água, evitando uma eventual contaminação superficial. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em frascos de polietileno de um litro e mantidas em caixa de isopor com gelo para conservação em baixa temperatura e proteção contra a luz até chegarem ao Laboratório de Química Analítica da Universidade Federal de Sergipe e ao Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS).

No momento da coleta, foram determinados os seguintes parâmetros: disco de Secchi e profundidade do reservatório; e com o auxílio da Sonda Multiparamétrica HANNA (modelo HI 9829), devidamente calibrada para cada parâmetro, foram determinados: temperatura da água, oxigênio dissolvido, pH, condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais.

Os parâmetros DQO, nutrientes (nitrogênio amoniacal, nitrito, nitrato, fósforo total) e clorofila *a* foram analisados no ITPS segundo metodologia descrita pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). O parâmetro DBO foi analisado no Laboratório de Química Analítica da Universidade Federal de Sergipe também em conformidade com o APHA (2012).

Para garantia da qualidade analítica foram usados a calibração com padrões, a análise de reagentes em branco e as determinações em replicatas. Para comparação entre o conjunto de dados de cada campanha será utilizado o teste de hipótese de Kruskal – Wallis, utilizando o programa PAST – Paleontological Statistics, versão 3.04 (<http://folk.uio.no/ohammer/past>). Um valor de 0,05 será adotado como nível crítico para todos os testes estatísticos, dando um nível de confiança de 95 %.

As variáveis de qualidade da água foram analisadas de acordo com os padrões estabelecidos na Resolução n°. 357/2005 do CONAMA.

#### 4.3 Tratamento dos dados e Aplicação da PCA (Principal Component Analysis)

Antes dos dados serem analisados, foi realizada a padronização destes devido às diferentes escalas de cada variável ambiental, uma vez que as dimensões usadas para computar distância entre os objetos devem ser de magnitudes semelhantes. Para reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados e minimizar a perda de informações, foi realizada a ordenação do conjunto de dados. Os dados brutos foram convertidos em valores adimensionais, escala *Z*, representados por média igual a zero e desvio padrão a um, subtraindo cada variável pela média de conjunto de dados e dividindo pelo desvio padrão, (média 0 e desvio padrão 1:  $Z = ((X - \mu)/\sigma)$ ).

Em seguida, foi analisada a intensidade da associação linear existente entre as variáveis através da correlação linear de Pearson, que mede o grau da correlação e a direção dessa correlação (positiva ou negativa). Os dados padronizados em forma de matriz foram expressos por  $X = (x_{ij})$ , em que  $i = 1...n$  amostragens e  $j = 1...p$  variáveis. A partir da matriz de dados, foi determinada a matriz de correlação [R] ( $p \times p$ ), para  $p$  igual às variáveis de

qualidade de água, analisadas neste estudo. A matriz de correlação é comumente utilizada uma vez que é necessário eliminar o problema de escalas e unidades diferenciadas em que as variáveis são medidas.

Para explicar a distribuição dos pontos e a influência significativa de cada um dos parâmetros na variação do índice, foi aplicada a análise de componentes principais. Essa técnica consiste em projetar o máximo de informação no menor número possível de eixos não correlacionados, que são combinações lineares das variáveis originais, com pesos escolhidos de forma a maximizar a variância. Dessa forma, a primeira componente principal (PC1) representa a direção de máxima variância e, portanto, de máxima informação no espaço multidimensional em que o conjunto de dados está representado. A segunda componente (PC2) é ortogonal à primeira e descreve o máximo da informação ainda não descrita por PC1, e assim por diante, até que o número de componentes principais seja no máximo igual ao número de variáveis. A eficiência da descrição dos dados por meio das componentes vai depender da porcentagem de variação total que cada componente contém, a qual é representada pelos autovalores (HAIR *et al*, 2005).

A análise dos dados e as componentes principais foram determinadas com o auxílio do software R Project.

#### 4.4 Proposição do Índice de Qualidade de Água para a Lagoa Salomé

Partindo-se do entendimento de que a poluição é um processo dinâmico, alguma variável ambiental pode ser considerada crítica a partir de determinado momento e, por conta disso, o IQAR pode ser modificado, ou seja, novas variáveis ambientais podem ser incorporadas ao índice ou pode ocorrer a substituição das suas variáveis.

Dessa forma, a partir da análise de componentes principais, foram observadas as contribuições em porcentagem de cada autovetor. Em seguida, foi realizada uma média aritmética dessas e o resultado obtido teve o seu valor aproximado para atribuição dos novos pesos utilizados no cálculo do novo índice de qualidade para a Lagoa Salomé. As variáveis consideradas críticas foram extraídas para o cálculo, que foi determinado seguindo o mesmo método de cálculo proposto pelo Instituto Ambiental do Paraná, bem como sua classificação.

Para desenvolvimento do índice de qualidade das águas para a Lagoa Salomé, de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos classe 2, serão consideradas que as seguintes características deverão ser atendidas por esse índice:

- 1) representar a qualidade da água em relação aos critérios para o abastecimento humano;
- 2) identificar o estado atual de degradação da Lagoa Salomé;
- 3) evitar o efeito eclipse através da análise de componentes principais;
- 4) estar consubstanciado nas variáveis ambientais críticas que comprometem a qualidade da água;
- 5) permitir a troca/incorporação das variáveis ambientais críticas de acordo com a sazonalidade;
- 6) facilitar a monitoramento deste reservatório;
- 7) dar a mesma importância ambiental às variáveis críticas que o compõem e incorporar as formas tóxicas dos compostos.

#### 4.5 Aplicação dos Índices de Qualidade da Água para Reservatórios comumente utilizados

A partir dos parâmetros físicos, químicos e biológicos obtidos, foram calculados os índices de qualidade da água para reservatório, descritos no item 3.5, para a Lagoa Salomé.

É importante comentar que, para o cálculo dos índices IQAR(IAP), O-IQA e CPCB-IQA, não é necessário analisar os nove parâmetros exigidos pelo cálculo do IQA. Algumas variáveis podem ser excluídas, assim como outras podem ser inseridas, como a clorofila a que é indicativo da presença de algas e, por isso, pode ser incluída no cálculo dos índices. Os parâmetros de qualidade da água, utilizados nos cálculos dos índices, foram analisados de acordo com as suas médias aritméticas obtidas a partir de uma planilha do software R Project. O resultado destes cálculos foi comparado com o do índice modificado através da análise de componentes principais a fim de minimizar a subjetividade e melhorar a credibilidade da avaliação final.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Análise dos parâmetros de qualidade da água

A estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos e biológicos de qualidade da água do reservatório Lagoa Salomé, bem como os limites estabelecidos pelo CONAMA 357/2005 para corpos de água doce Classe 4, estão representadas na Tabela 6.

Tabela 6– Estatística descritiva dos parâmetros físico-químicos e biológicos do reservatório Lagoa Salomé e limites estabelecidos pelo CONAMA 357/2005 para corpos de água doce Classe 4.

Parâmetro	média	desvio padrão	CONAMA 357/2005 Classe 4
Temperatura (°C)	30,4125	0,9234	Jusante $\leq 3^{\circ}\text{C}$ de montante
pH	7,0325	0,4313	6 a 9
Condutividade ( $\text{mS cm}^{-1}$ )	37,5037	1,4204	-
Disco de Secchi (cm)	27,5000	5,1961	-
Profundidade(m)	1,0300	0,1160	-
STD ( $\text{mg L}^{-1}$ )	188,1875	5,5786	$\geq 500$
DBO ( $\text{mg L}^{-1}$ )	8,7052	3,7040	10
Oxigênio Dissolvido ( $\text{mg L}^{-1}$ )	2,8083	1,7834	$\geq 2$
DQO ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	133,1783	60,7264	-
N-NH <sub>4</sub> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,0124	0,0014	$\geq 13,3$ para $\text{pH} \leq 7,5$
N-NO <sub>2</sub> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,1417	0,0090	$\geq 1,0$
N-NO <sub>3</sub> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1,5600	0,2149	$\geq 10,0$
N-total ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	3,1051	0,1227	$\geq 1,27$
P-total ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,7089	0,1817	$\geq 0,030$
Clorofila a ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	96,2763	20,0876	$\geq 60$

A temperatura é um importante parâmetro de qualidade da água, devido à sua influência sobre os demais. A temperatura afeta a solubilidade e, conseqüentemente, a disponibilidade dos gases, como o oxigênio na água. Afeta, também, a toxicidade de alguns produtos químicos em sistemas de água, bem como a sensibilidade de organismos vivos para as substâncias tóxicas. Neste estudo, a temperatura não apresentou uma variabilidade espacial ou sazonal, possivelmente, devido à estabilidade da condição do clima durante o tempo de campanha, apresentando um valor médio de  $30,41^{\circ}\text{C}$ .

O pH é um parâmetro importante que determina a aptidão da água para diferentes fins. Os resultados de pH não mostraram diferenças sazonais e espaciais. Os pontos estão dentro da faixa aceitável de 6 a 9, de acordo com o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 para todas as classes de corpos de água doce.

A condutividade elétrica (CE) estima a quantidade de sólidos totais ou quantidade de íons dissolvidos totais na água e, geralmente, aumenta à medida que os níveis de poluentes dissolvidos e salinidade (como  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ ) aumentam.

Neste estudo, a CE não apresentou diferenças sazonais e espaciais, mas apresentou valores relativamente elevados, vários fatores, possivelmente, podem ter contribuído para esta situação. Entradas de água doce em locais à montante da Lagoa Salomé tendem a diminuir durante o período seco, especialmente durante o verão, devido à diminuição da vazão do rio São Francisco para geração de energia elétrica. Por conta disso, o riacho Jacaré, que era uma fonte significativa de água fresca que entrava na Lagoa Salomé, reduziu a sua capacidade de contribuição na renovação das águas da Lagoa. Além disso, as elevadas condições climáticas durante o período seco aumentam as taxas de evaporação e aumentam a salinidade da água. É importante ressaltar, também, que o volume e o impacto das descargas provenientes de atividades antrópicas na região, em virtude da expansão da população no entorno da Lagoa, contribuem com os valores encontrados nesse estudo que variam de 36,30 a 38,80  $\text{mS.cm}^{-1}$ .

Moyel *et al* (2015) observaram valores de CE que variaram de 3,95 a 18,45 em estudo realizado de julho de 2009 a junho de 2010 para avaliar a qualidade da água do rio Shatt alArab, Iraque. Os autores atribuíram a elevada concentração de CE às elevadas temperaturas, além da combinação da diminuição da contribuição dos rios Tigris e Euphrates associados com a intrusão salina.

A transparência da água afeta diretamente a quantidade de penetração de luz em um lago; quanto menor for a profundidade de Secchi, maior a concentração de algas ou de sedimentos. Nesse estudo, no ponto 1, à montante, foi observada uma profundidade de 0,88m da Lagoa Salomé e uma profundidade de Secchi 0,35m e, no ponto 4, foi observada uma profundidade de 1,14m da Lagoa e uma profundidade de Secchi de 0,24m, indicando que no ponto 1 a luz está chegando até 0,70m e no ponto 4 até 0,48m, ou seja, maior a concentração de sedimentos no ponto 4.

O parâmetro sólidos totais dissolvidos corresponde a toda matéria que permanece como resíduo, podendo somente ser removidos através dos processos de coagulação, floculação e decantação. Os sólidos podem reter bactérias e resíduos orgânicos no fundo dos rios, promovendo decomposição anaeróbia, sendo a diminuição da transparência da água, ao impedir a penetração da luz, a sua principal influência. Os valores obtidos para a Lagoa Salomé encontram-se dentro dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doce classe 3, que é de até 500  $\text{mg.L}^{-1}$ , apresentando valores máximos e mínimos de 194,20 e 180,00  $\text{mg.L}^{-1}$ , respectivamente.

O oxigênio dissolvido (OD) é essencial para a vida aquática e necessário para manter os organismos vivos. Os resultados mostraram concentrações decrescentes em pontos à montante. Este é, possivelmente, um resultado de alto consumo de OD por micro-organismos para degradar a matéria orgânica dissolvida, que é provinda do escoamento urbano e agrícola, altas temperaturas, especialmente durante o verão ou aeração na água. Nesse estudo, as concentrações de OD estiveram abaixo de  $5 \text{ mg.L}^{-1}$ , que é o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005, para todas os pontos durante o período de campanha, chegando a um valor mínimo de  $1,00289 \text{ mg.L}^{-1}$ , indicando uma péssima circulação de água e OD em níveis abaixo do recomendável.

A Resolução CONAMA 357/2005 estabelece que os limites de  $\text{DBO}_5$  para as águas doces de classes 2 e 3, poderão ser elevados, caso o estudo da capacidade de autodepuração do corpo receptor demonstre que as concentrações mínimas de oxigênio dissolvido (OD) previstas não sejam desobedecidas. Porém, apenas no ponto 4, a DBO apresentou concentrações dentro da gama estabelecida pela Resolução CONAMA 357/2005. A Lagoa Salomé apresentou valores de DBO acima de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  nos pontos 1 e 2, chegando ao valor máximo de  $14,15 \text{ mg.L}^{-1}$  no ponto 2 e de DQO acima de  $100 \text{ mg.L}^{-1}$  nos pontos 1, 2 e 3, chegando ao valor máximo de  $266,88 \text{ mg.L}^{-1}$  no ponto 2. Os pontos 1, 2 e 3 são afetados por áreas densamente povoadas da cidade de Cedro de São João e é provável que altos valores de  $\text{DBO}_5$  e DQO nestes pontos indicam a poluição da água e esgoto, possivelmente resultado do despejo de efluentes da cidade de Cedro, além de atividades agrícolas e dessedentação e banho de animais nesses locais. Na comunidade europeia, os limites para as demandas bioquímica e química de oxigênio (DBO e DQO) não devem exceder a 25 e 125 mg/L, respectivamente. Tal recomendação ainda não é considerada no Brasil.

O teor de nutrientes da água é uma indicação do grau de sustentabilidade do sistema de produção primária. O excesso de nutrientes no ecossistema pode levar a diversos problemas, tais como aumento na ocorrência e proliferação de algas, problemas por diminuição de oxigênio, sabor e odor, mortandade de peixes e perda de biodiversidade.

As concentrações de ambos os compostos fósforo total e nitrogênio total apresentaram-se elevados em todos os pontos, de montante à jusante. Os valores mais elevados foram observados nos pontos os quais foram impactados pela área mais populosa da cidade de Cedro, indicando que o nível de contaminação de nutrientes nessas locais foi relativamente significativo devido, possivelmente, aos despejos domésticos. A Resolução CONAMA 357/2005 estabelece que quando o nitrogênio for fator limitante para eutrofização, o valor de nitrogênio total (após oxidação) não deverá ultrapassar  $1,27 \text{ mg.L}^{-1}$  para ambientes

lênticos. Nesse estudo, (N/P = 4,38), o menor valor observado para nitrogênio total localizado no ponto 4, à jusante, e o máximo, localizado no ponto 1, à montante, foram, aproximadamente, 2,3 e 2,6 vezes maiores que o limite estabelecido, respectivamente.

A clorofila *a* é utilizada como indicadora da biomassa fitoplanctônica em ambientes aquáticos por se tratar de um pigmento encontrado em todos os grupos de vegetais e outros organismos autótrofos. A sua concentração ajuda na interpretação de resultados de análises físico-químicas, além de ser indicadora do estado fisiológico do fitoplâncton e do grau de eutrofização de um ambiente aquático. De acordo com a resolução CONAMA nº 357/05, é permitida concentração de até 60  $\mu\text{g.L}^{-1}$  para classe 3 e, em virtude disso, a Lagoa Salomé está acima do limite recomendado, apresentando valores mínimos e máximos de 72,1995 no ponto 2 e 121.21 $\mu\text{g.L}^{-1}$  no ponto 3, respectivamente.

Segundo Tundisi *et al* (2002), a extensão da eutrofização de lagos, rios e represas baseia-se nas concentrações de nitrogênio, fósforo e clorofila *a*, sendo esta um indicativo do grau de eutrofização de um ambiente aquático. De acordo com os parâmetros analisados neste trabalho, observa-se que as concentrações dessas variáveis estão acima dos limites estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357/05 para a Lagoa Salomé. Dessa forma, a Lagoa Salomé pode estar submetida a um processo de eutrofização, possivelmente, devido aos impactos antrópicos a que se encontra sujeito.

## 5.2 Análise Estatística

De acordo com o Teste de Kruskal-Wallis, não foi observada diferença de sazonalidade para um nível de confiança de 95% ( $p > 0,05$ ), ou seja, todas as coletas apresentaram uma distribuição idêntica, indicando homogeneidade do sistema quanto à influência dos parâmetros ambientais.

A matriz de correlação de Pearson foi preparada de acordo com os parâmetros estudados durante o período de campanha e pode ser observado na Tabela 7.

Através de uma análise da matriz de correlação mostrada na Tabela 7, é possível verificar a associação entre as variáveis ambientais - podendo obter, assim, uma visão geral do conjunto de dados. De acordo com Triola (1999), adotando-se um nível de confiança de 95%, apenas as variáveis com correlações em módulo igual ou superior a  $r = 0,50$  são significativas. Porém, para esse estudo, adotando-se um nível de significância de 5%, de acordo com o coeficiente de Pearson, foi estabelecido que de 15 pares entre o conjunto de

dados, apenas as variáveis com correlações em módulo igual ou superior a  $r = 0,60$  são significativas, a fim de aumentar a sensibilidade da interpretação dos resultados.

A correlação positiva demonstra que os parâmetros possuem comportamento semelhante, ou seja, à medida que a concentração de um se eleva a do outro também aumenta, como observado com a forte correlação entre condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos (0,8918) e sólidos totais dissolvidos e temperatura (0,8561). Apesar de ser uma medida indireta para indicar a presença de sólidos inorgânicos dissolvidos, tais como nitrato, sulfato, fosfato, ferro e alumínio, a condutividade representa a capacidade que a água possui de conduzir corrente elétrica e está relacionada com a alta concentração desses nutrientes devido à diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido, principalmente, quando observadas elevadas temperaturas. Já DBO e OD apresentaram uma alta correlação negativa (-0,9380), fato esperado uma vez que a DBO representa a unidade de oxigênio consumido por microrganismos para degradar a matéria orgânica.

O nitrogênio é um dos elementos mais importantes para manutenção da vida de ecossistemas aquáticos, podendo ser encontrado nas formas amoniacal, nitrito e nitrato. Quando em elevadas concentrações, a oxidação de suas espécies pode consumir uma grande quantidade de oxigênio, estimulando o crescimento de algas. O nitrogênio amoniacal é oriundo do processo de decomposição de matéria orgânica e, em grandes quantidades, pode causar a mortandade dos peixes. As substâncias nitrogenadas orgânicas sofrem decomposição até o nitrato, passando pela amônia e, por este motivo, a sua presença indica poluição recente. Nesse estudo, o nitrato ( $N-NO_3$ ), que é a principal forma de nitrogênio encontrada nas águas por ser uma das principais fontes para os produtores primários, apresentou uma boa correlação com N-total (0,7804), que é o parâmetro utilizado pela Resolução CONAMA 357/2005 para avaliar a qualidade dos corpos de água doce classes 1, 2, 3 e 4 quando o nitrogênio for o agente limitante do processo de eutrofização.

É importante comentar também que o fósforo sofre transformações contínuas no ambiente de água doce. Fitoplâncton e bactérias consomem o fósforo disponível no meio hídrico e transformam-no em sua forma orgânica. Estes organismos podem, então, ser ingeridos por detritívoros ou herbívoros que, por sua vez, podem excretar o fósforo orgânico na água, facilitando a assimilação das plantas e micróbios. Dessa forma, quando encontrado em altas concentrações, o fósforo pode ocasionar a eutrofização do meio hídrico, além de, juntamente com o nitrogênio, influenciar a proliferação de algas, conforme comentam Lobato *et al* (2015). Fato evidenciado neste trabalho pela elevada concentração de clorofila *a* na

Lagoa Salomé, de acordo com o limite estabelecido pelo CONAMA nº 357/05, além da forte correlação entre P-total e N-total (0,7338).

Outro parâmetro importante a ser observado é o disco de Secchi que apresentou uma elevada correlação positiva com N-NO<sub>3</sub> (0,9408) e N-total (0,9095) e negativa com a profundidade (-0,9618), fato já esperado uma vez que a luz é considerada um fator limitante para a produtividade fitoplanctônica.

Tabela 7- Matriz de correlação de Pearson das variáveis físico-químicas e biológicas.

	CL-a	CE	DBO	Secchi	DQO	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>2</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-total	OD	pH	Prof.	P-total	STD	T
CL-a	1.0000														
CE	0.2198	1.0000													
DBO	-0.5586	0.1471	1.0000												
Secchi	-0.1711	0.3751	0.5289	1.0000											
DQO	-0.4763	-0.5901	0.6452	0.2185	1.0000										
N-NH <sub>4</sub>	0.0699	0.5681	0.5577	0.1076	-0.0561	1.0000									
N-NO <sub>2</sub>	-0.1287	-0.1376	-0.0564	0.6922	0.0993	-0.5249	1.0000								
N-NO <sub>3</sub>	-0.0987	0.5800	0.3847	0.9408	-0.0635	0.0954	0.6263	1.0000							
N-total	-0.2612	0.1086	0.4858	0.9095	0.3465	0.0316	0.7695	0.7804	1.0000						
OD	0.5611	-0.1439	-0.9380	-0.6559	-0.6760	-0.4228	-0.1302	-0.4829	-0.6514	1.0000					
pH	-0.5371	-0.1718	-0.1916	0.1776	-0.1116	-0.4898	0.6105	0.2037	0.3857	0.0258	1.0000				
Prof.	0.2764	-0.2884	-0.7276	-0.9618	-0.4151	-0.2427	-0.5552	-0.8524	-0.8946	0.8074	-0.0591	1.0000			
P-total	-0.11641	-0.4581	0.2504	0.5871	0.6348	-0.3682	0.7338	0.3737	0.7689	-0.4102	0.2419	-0.6067	1.0000		
STD	-0.0938	0.8918	0.3927	0.4442	-0.2782	0.5011	-0.1545	0.6087	0.2111	-0.4349	-0.0858	-0.4140	-0.3124	1.0000	
T	-0.0773	0.7367	0.2041	0.1913	-0.3601	0.2614	-0.2610	0.4498	-0.0633	-0.1471	-0.1119	-0.1598	-0.4117	0.8561	1.0000

Os valores em vermelho são diferentes de 0 com um nível de significância  $\alpha=0,05$ .

### 5.3 Aplicação da PCA (Principal Component Analysis)

De acordo com Meireles *et al* (2010), em estudos que utilizam a PCA na avaliação da qualidade da água, as duas ou três primeiras componentes principais geradas explicam boa parte da variação dos dados originais (60 a 90%), pois na maioria dos casos essas componentes são suficientes para descrever a matriz de dados sem perda significativa de informação. Na Tabela 8 observa-se que o modelo com três componentes principais foi adequado para representar a estrutura inicial das variáveis retendo, respectivamente, 84,20% da variância total para as variáveis físico-químicas e biológicas, concentrando em sete dimensões (OD, DBO, N-NO<sub>3</sub>, N- total, P-total, profundidade e disco de Secchi) as informações anteriormente diluídas em quinze variáveis.

Pela PCA foi possível determinar as variáveis como ativas e suplementares. Primeiramente foi rodada a PCA, sem a rotação *varimax*, com todas as variáveis e após a interpretação das cargas das variáveis estabeleceu-se determinar como suplementares as variáveis com cargas inferiores a 0,6. O valor da matriz de fatores é representado pela carga de cada variável sobre a componente principal (CP) correspondente, ou seja, cargas acima de  $\pm 0,60$  indicam que as variáveis contribuem apropriadamente para a variação dos dados, podendo esta contribuição ser positiva ou negativa, conforme comenta Hair (2005). A Tabela 9 apresenta as cargas das três primeiras componentes principais para a Lagoa Salomé.

Tabela 8 - Proporção de variância das componentes principais.

	Desvio padrão	Var.	Var. acumulada
<b>Comp 1</b>	2,4681174	0,4061069	0,4061069
<b>Comp 2</b>	2,0046732	0,2679143	0,6740212
<b>Comp 3</b>	1,5873358	0,1679757	<b>0,8419969</b>
<b>Comp 4</b>	1,20154798	0,09624784	0,93824469
<b>Comp 5</b>	0,78237432	0,04080731	0,97905200
<b>Comp 6</b>	0,44355254	0,01311592	0,99216792
<b>Comp 7</b>	0,342755293	0,007832079	1,00000000
<b>Comp 8</b>	3,327418e <sup>-08</sup>	7,381138e <sup>-17</sup>	1,00000000
<b>Comp 9</b>	1,898659e <sup>-08</sup>	2,403272e <sup>-17</sup>	1,00000000
<b>Comp 10</b>	1,887739e <sup>-08</sup>	2,375705e <sup>-17</sup>	1,00000000
<b>Comp 11</b>	1,648705e <sup>-08</sup>	1,812151e <sup>-17</sup>	1,00000000
<b>Comp 12</b>	0	0	1
<b>Comp 13</b>	0	0	1
<b>Comp 14</b>	0	0	1
<b>Comp 15</b>	0	0	1

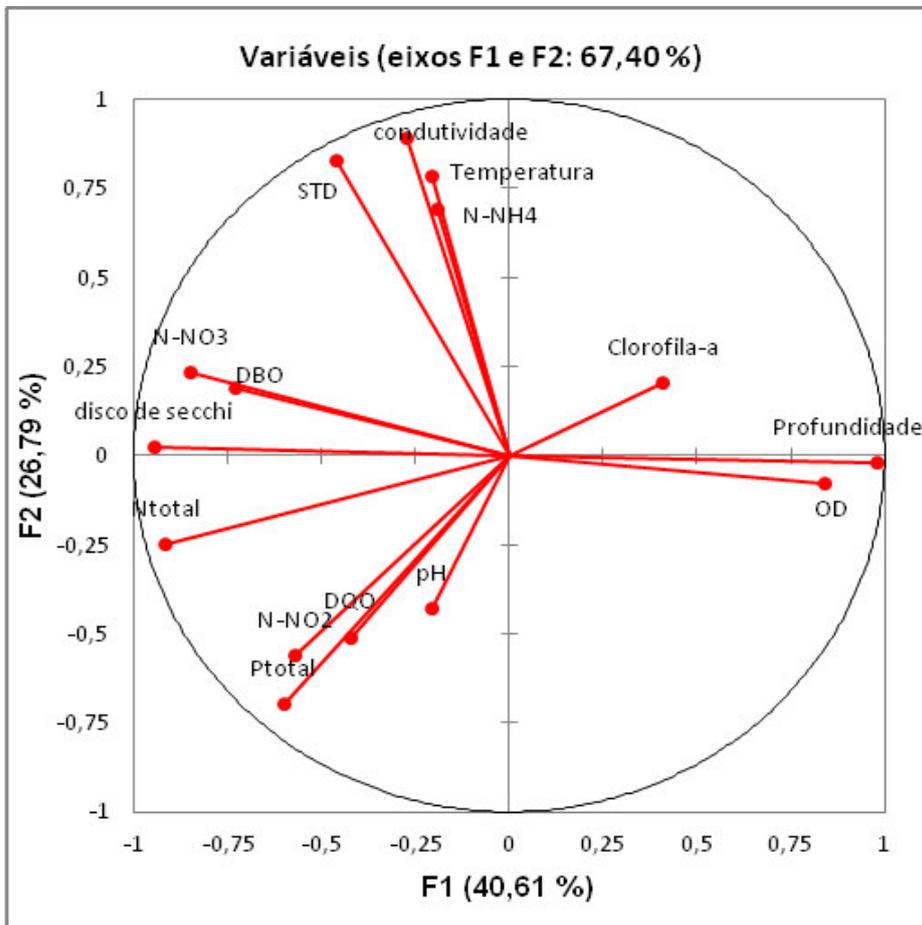
Tabela 9 - Cargas das componentes principais para a Lagoa Salomé.

	F1	F2	F3
Temperatura	-0,204	<b>0,786</b>	-0,180
OD	<b>0,841</b>	-0,080	-0,501
DBO	<b>-0,731</b>	0,188	0,537
condutividade	-0,274	<b>0,890</b>	-0,332
STD	-0,458	<b>0,826</b>	-0,128
*pH	-0,207	-0,430	-0,487
N-NH <sub>4</sub>	-0,192	<b>0,692</b>	0,454
N-NO <sub>3</sub>	<b>-0,847</b>	0,233	-0,447
*N-NO <sub>2</sub>	-0,570	-0,561	-0,587
N-total	<b>-0,914</b>	-0,251	-0,191
P-total	<b>-0,601</b>	<b>-0,699</b>	-0,030
*DQO	-0,423	-0,510	0,507
*Clorofila <i>a</i>	0,408	0,204	-0,340
Profundidade	<b>0,980</b>	-0,020	-0,016
disco de Secchi	<b>-0,947</b>	0,022	-0,249

\*variáveis suplementares

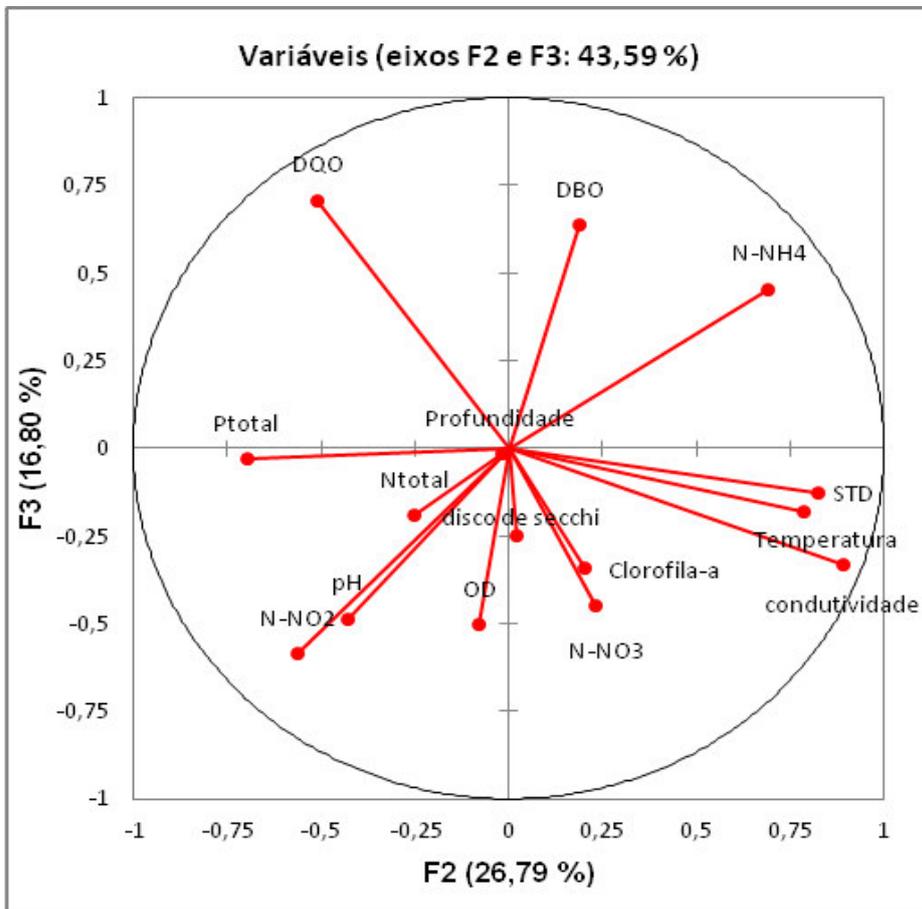
As variáveis ativas com as cargas mais elevadas na primeira componente (CP1) na Lagoa Salomé foram: OD, DBO, N-NO<sub>3</sub>, N-total, P-total, profundidade e disco de Secchi. Conforme mostrado na Figura 4, a projeção das variáveis para a Lagoa Salomé nas duas primeiras componentes ordenou as mais representativas nos quadrantes 2 e 3 com o grupo de variáveis DBO, N-NO<sub>3</sub>, N-total, P-total e disco de Secchi e no quadrante 4 com o grupo OD e profundidade. As variáveis que estão sobrepostas (DBO e N-NO<sub>3</sub>) possuem a mesma representatividade no gráfico, demonstrando forte correlação entre si. O disco de Secchi foi ordenado no segundo quadrante com forte correlação negativa às variáveis profundidade e OD. Através da PCA, é possível constatar que as variáveis temperatura, condutividade, STD, pH, N-NH<sub>4</sub>, N-NO<sub>2</sub>, DQO e clorofila *a* tiveram pouca representatividade na projeção (variáveis suplementares), ou seja, não contribuem para os pesos das duas primeiras componentes principais.

Figura 3 - Projeções dos parâmetros físico-químicos e biológicos da Lagoa Salomé no plano dos dois primeiros eixos da PCA.



As variáveis ativas com as cargas mais elevadas na segunda componente (CP2) na Lagoa Salomé foram: temperatura, condutividade, STD, N-NH<sub>4</sub> e P-total. Já para a terceira componente foram DBO e DQO. Conforme mostrado na Figura 5, a projeção das variáveis para a Lagoa Salomé nos eixos F2 e F3 ordenou as mais representativas no quarto quadrante com o grupo condutividade, STD e temperatura, e no primeiro e terceiro quadrantes o N-NH<sub>4</sub> e o P-total, respectivamente, apresentando forte correlação negativa. Através dessa análise, é possível constatar que as demais variáveis tiveram pouca representatividade na projeção (variáveis suplementares), ou seja, não contribuem para os pesos dessas componentes principais.

Figura 4 - Projeções dos parâmetros físico-químicos e biológicos da Lagoa Salomé no plano dos eixos F2 e F3 da PCA.



A técnica de PCA tem sido amplamente utilizada por facilitar o monitoramento da qualidade da água por ser capaz de determinar quais variáveis são capazes de explicar o comportamento de determinado corpo hídrico, sendo que nesse estudo foram identificadas: OD, DBO, N-NO<sub>3</sub>, N-total, P-total, profundidade e disco de Secchi. Dessa forma, o recurso financeiro utilizado para analisar todos os parâmetros de qualidade da água pode ser utilizado para uma análise mais eficaz de uma variável considerada crítica ou, até mesmo, para o desenvolvimento de outras atividades no que tange ao monitoramento e gestão desse recurso.

A análise de componentes principais é ainda utilizada para a proposição de novos índices de qualidade da água pelo fato de aumentar a importância das variáveis mais significativas e diminuir as das demais, a fim de evitar o efeito eclipse, que é resultado da atenuação do comportamento negativo de uma variável frente ao comportamento estável das demais.

Assim, como pode ser visto na Tabela 10, a partir da análise de componentes principais, foram atribuídos novos pesos às variáveis consideradas críticas de acordo com suas contribuições para a determinação de cada componente principal.

Tabela 10 - Pesos obtidos através da contribuição (%) de cada parâmetro para PCs.

Variáveis	wi
Temperatura	6,0
OD	6,0
DBO	7,0
Condutividade elétrica	7,0
STD	5,0
Ph	11,0
N-NH4	6,0
N-NO3	5,0
N-NO2	6,0
N-total	5,0
P-total	6,0
DQO	7,0
Clorofila <i>a</i>	15,0
Profundidade	4,0
Disco de Secchi	4,0

O IQAR-m foi determinado seguindo o mesmo método de cálculo proposto pelo Instituto Ambiental do Paraná, bem como sua classificação. O resultado deste cálculo foi comparado com os demais índices para minimizar a subjetividade e melhorar a confiabilidade da avaliação final.

#### 5.4 Avaliação dos índices de qualidade da água

Foi exposto no item 3.5 que, além de ser uma tarefa muito desafiadora, faz-se necessário atingir o equilíbrio entre o valor determinado, legitimidade da qualidade do corpo hídrico e a eficácia do índice através da análise de alguns, dentre centenas, parâmetros de qualidade da água. Mesmo quando todas as variáveis pré-selecionadas são consideradas importantes como indicadores de qualidade, algumas assumem pesos diferentes devido ao destino final da água e, por isso, a Lagoa Salomé foi avaliada de acordo com os índices descritos no item 3.5 e com o índice modificado de qualidade da água para reservatórios (IQAR-m).

Por meio dos resultados obtidos através da análise dos parâmetros físicos, químicos e biológicos, foram determinados os índices de qualidade da água para a Lagoa Salomé, cujos resultados encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11 – Índices de Qualidade da Água para a Lagoa Salomé.

<b>Índices</b>	<b>Lagoa Salomé</b>	<b>Classificação</b>
<b>IQAR (IAP)</b>	5,53	Extremamente poluído
<b>O-IQA</b>	1,65	Muito ruim
<b>CPCB-IQA</b>	29,37	Muito ruim
<b>IQAR-m</b>	4,51	Muito poluído

Observando a Tabela 11 e relacionando os resultados com a estatística descritiva observada na Tabela 6, é possível verificar que a qualidade das águas da Lagoa Salomé é classificada como extremamente poluída, muito ruim, muito ruim e muito poluída - com relação aos parâmetros e fórmula de cálculo do IQAR (IAP), O-IQA, CPCB-IQA e IQAR-m, respectivamente.

Ao comparar o resultado do cálculo obtido pelo IQAR (IAP) e pelo IQAR-m, é possível observar que houve uma mudança na classificação. O reservatório deixou de ser classificado como extremamente poluído passando para muito poluído, o que pode ser atribuído aos novos pesos que foram obtidos para as variáveis ambientais através da análise da componente principal, ou seja, o efeito eclipse, que é o resultado da diminuição do comportamento negativo de uma variável ambiental em relação ao comportamento estável de outros, pode ter sido reduzido ou eliminado.

A utilidade da PCA para identificar fatores ambientais importantes em um dado estudo é obviamente afetada pelo projeto de amostragem, os constituintes analisados, a qualidade dos dados, o tratamento dos dados antes da análise dos componentes principais, os métodos de interpretação dos resultados da PCA e outros fatores. Infelizmente, não foram realizadas avaliações abrangentes e não existem procedimentos padrão para lidar com estas questões, mas, nesse estudo, pode-se inferir que a análise de componentes principais permitiu avaliar esse corpo hídrico com um maior grau de sensibilidade.

Também pode ser observado que todos os índices foram calculados com base em diferentes parâmetros e pesos e o IQAR-m teve o seu cálculo baseado apenas nas variáveis ambientais que mais representam a Lagoa Salomé (OD, DBO, N-NO<sub>3</sub>, N-total, P-total, profundidade e disco de Secchi), apresentando, assim, um resultado consistente com a análise de componentes principais e com o que foi observado nos pontos de coleta, uma vez que essas variáveis são indicativas de processo de eutrofização, possivelmente, devido ao inadequado aporte de esgoto doméstico e disposição de resíduos sólidos em seu entorno.

Neste contexto, no que diz respeito à gestão ambiental, é essencial o monitoramento dos parâmetros físicos, químicos e biológicos para avaliar o impacto da ação humana sobre os recursos hídricos. O uso de boas práticas de manejo e a redução da carga de nutrientes através do tratamento de efluentes domésticos contribuem para a melhoria da qualidade da água como base para o desenvolvimento sustentável da região.

## 6 CONCLUSÃO

Após o estudo de diferentes índices de qualidade da água, pode-se inferir que o objetivo do IQA é facilitar a interpretação dos dados de monitoramento de qualidade da água através de um número, que é resultado da redução de um número de parâmetros em uma expressão simples. Estes índices utilizam vários parâmetros biológicos e físico-químicos, que avaliam a vulnerabilidade da qualidade da água, e foram resultados de pesquisas realizadas por diferentes órgãos do governo e especialistas. Apesar de todos os esforços, nenhum índice foi, até agora, universalmente aceito, de modo que as agências de água, usuários e gestores de recursos hídricos em diferentes países tem feito adaptações em índices com relação aos parâmetros e à fórmula de cálculo do IQA, além da inclusão de análise estatística multivariada, a fim de identificar algum teor informativo que não fora corretamente analisado.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade da água do reservatório Lagoa Salomé por meio da análise de componentes principais e comparação de características físico-químicas e biológicas com os padrões exigidos pela Resolução CONAMA nº 357/05, além de obter um valor para os três índices estudados (IQAR, O-IQA e CPCB-IQA) e para o IQAR-m, a fim de que auxiliassem na interpretação dos fatores mais importantes que contribuíram para a classificação final desse reservatório.

Verificou-se, por meio da comparação dos resultados dos parâmetros analisados com os atribuídos pela Resolução nº. 357/2005 do CONAMA, que o reservatório Lagoa Salomé encontra-se fora dos limites estabelecidos para corpos de água doce classe 2 de qualidade. Os valores obtidos das variáveis analisadas permitem classificá-lo como corpo de água doce de classe 4, que são águas que podem ser destinadas apenas à navegação e à harmonia paisagística. No entanto, sabe-se que este reservatório é utilizado para abastecimento humano, dessedentação animal e recreação de contato primário.

No tocante à qualidade da água de acordo com os índices, verificou-se que a Lagoa Salomé encontra-se classificado como extremamente poluída, muito ruim, muito ruim e muito poluída de acordo com os índices IQAR, O-IQA, CPCB-IQA e IQAR-m, respectivamente. É importante salientar que estes resultados estão em conformidade com os das análises físico-químicas e biológicas da água, que apresentaram, em algumas variáveis, tais como OD, N-total, P-total e clorofila *a*, valores fora da gama estabelecida pela Resolução CONAMA 357/2005 para corpos hídricos classes 1, 2, 3 e 4. Estes elevados teores de nitrogênio total, fósforo e clorofila *a* são indicativos de processo de eutrofização, e podem estar relacionados,

possivelmente, aos despejos de efluentes domésticos e resíduos sólidos no entorno do reservatório.

A técnica estatística multivariada, por meio da aplicação da análise das componentes principais (PCA), mostrou que foi possível reduzir o número de variáveis de 15 para 7 variáveis consideradas principais, em comum nos quatro locais de estudo (OD, DBO, N-NO<sub>3</sub>, N- total, P-total, profundidade e disco de Secchi). Os resultados obtidos na PCA poderão subsidiar a escolha de parâmetros de maior interesse, considerados mais representativos no monitoramento da qualidade da água e composição de índices de qualidade da água para, por exemplo, fins de irrigação, na região.

A análise de componentes principais foi apresentada como uma ferramenta importante para explicar a variância do conjunto de dados de variáveis inter-relacionadas através de um conjunto menor de variáveis independentes, componentes principais, e tem sido instrumental na minimização do efeito eclipse, dando uma resposta sensível à avaliação de qualidade do reservatório Lagoa Salomé.

Este trabalho evidencia que é preciso adotar medidas visando o controle e à redução de nutrientes e cargas orgânicas na água para a contenção do processo de eutrofização desse reservatório. Neste contexto, é imprescindível o monitoramento dos parâmetros físico-químicos e biológicos para a avaliação dos impactos da ação humana sobre esse recurso hídrico.

É importante mencionar também que, embora as autoridades possam intervir na Lagoa Salomé através de projetos de revitalização e preservação ambiental com ênfase no reflorestamento da Área de Preservação Permanente (APP), é necessário que a comunidade seja parceira na estratégia de gerenciamento ambiental. A Lagoa Salomé, de acordo com os resultados obtidos e analisados no presente trabalho, requer esse tipo de controle e parceria, visto que a água desse reservatório foi classificada como imprópria para o consumo humano, para proteção das comunidades aquáticas e para recreação de contato primário, conforme Resolução CONAMA nº. 357/2005.

## 6.1 Sugestões

Sugere-se para trabalhos futuros que:

- Seja efetuado um monitoramento constante dos parâmetros físico-químicos e biológicos para a avaliação dos impactos a que esses ecossistemas estão submetidos.

- Seja avaliada a qualidade da água quanto ao enriquecimento por nutrientes e o seu efeito relacionado à proliferação das algas para que se possa ter um histórico do processo de eutrofização.
- Seja aplicada a lógica fuzzy para descrever o comportamento ambiental e avaliar os índices e parâmetros do reservatório Lagoa Salomé.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, T.; et al. **Water Quality Indices**. 1ª edição. Elsevier, 384p. 2012.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 20 ed. Washington, 2012.
- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais no Brasil** / Agência Nacional de Águas, Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos. – Brasília: ANA, SPR, 2014.
- ANDREOLI, C. V.; CARNEIRO, C. **Gestão Integrada de Mananciais de Abastecimento Eutrofizados**. SANEPAR/FINEP, Curitiba-PR, 500 p, 2005.
- ARRUBA, R. de O. M.; SANTOS, M. A. dos; VIPPER, H. P. A. F. Avaliação da Qualidade do Reservatório de Taiacubeba, Mogi Das Cruzes- SP, sob o Aspecto da Saúde, entre 2009 e 2013. **Revista UnG - Geociências**, V.13, N.1, 2014.
- BICUDO, C. E. M.; BICUDO, D. C. **Amostragem em Limnologia**. São Carlos: Editora RIMA Artes e Textos, p 371, 2004.
- BOLLMANN, H. A.; MARQUES, D. da M. Bases para a Estruturação de Indicadores de Qualidade de Águas. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 1, p. 37-60. 2000.
- Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS**. Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa, 112 p, 2014.
- CARLE, M. V.; HALPIN, P. N.; STOW, C. A. Patterns of watershed urbanization and impacts on water quality. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 41, n.3, p.693-708, 2005.
- CETESB. COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Índice de Qualidade das Águas**. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/agua/aguas-superficiais/aguas-interiores/documentos/indices/02.pdf>>. Acesso em: jun. 2014.
- CHIN, D. A. **Water-Quality Engineering in Natural Systems: Fate and Transport Processes in the Water Environment**. New Jersey: WILEY, 471p, 2013.
- CODEVASF. **Proposta de intervenção na Lagoa Salomé e entorno, município de Cedro de São João – SE**. Sergipe, 2015.
- CONAMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, Resolução nº 357, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em 12 jun. 2014.
- EATON, A. D. **Standard methods for the examination of water and wastewater: Centennial edition**. Washington DC: American Public Health Association. 1368 p. 2005.
- FERREIRA, K. C. D.; LOPES, F.B.; ANDRADE, E. M. de; MEIRELES, A. C. M.; SILVA, G. S. da. Adaptação Do Índice De Qualidade De Água Da National Sanitation Foundation Ao Semiárido Brasileiro. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 2, p. 277-286, abr-jun, 2015.

FRANÇA, V. L. A.; CRUZ, M. T. S.; FONTES, A. L. **Atlas Escolar de Sergipe histórico e cultural**. João Pessoa: GRAFSET, 207p. 2007.

FRANCO, M.C.; SCOPEL, I., ASSUNÇÃO, H. F. Índice de Qualidade da Água no Rio Claro, no Córrego do Queixada e no Ribeirão Jataí, junto à área urbanizada na cidade de Jataí – GO. **OBSERVATORIUM: Revista Eletrônica de Geografia**, v.6, n.16, p. 26-45, mai. 2014.

GUNAWARDHANA, W.D.T.M.; JAYAWARDHANA, J.M.C.K.; UDAYAKUMARA, E.P.N. Impacts of Agricultural Practices on Water Quality in Uma Oya Catchment Area in Sri Lanka **Procedia Food Science**, Volume 6, Pages 339-343, 2016.

HAIR, J. J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. 5.ed. Porto Alegre: Bookman. 593p, 2005.

HOU, W.; Sun., S; Wang., M.; Li., X.; Zhang., N.; Xin., X.; Sun., L.; Li., W.; Jia, W. Assessing water quality of five typical reservoirs in lower reaches of Yellow River, China: Using a water quality index method. **Ecological Indicators**, Volume 61, Part 2, February, Pages 309-316, 2016.

IAP. INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Monitoramento da Qualidade da Água dos Reservatórios**. Curitiba: IAP, 2014.

IBGE. **Censo Demográfico 2014 - Resultados do universo**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 out. 2015.

JOLLIFFE, I. T. **Principal Component Analysis**. Springer, 2º edição, 2002.

LENZI, E.; FAVERO, L. O. B.; LUCHESE, E. B. **Introdução à Química da Água: Ciência, Vida e Sobrevivência**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

LOBATO, T.C.; HAUSER-DAVIS, R.A.; OLIVEIRA, T.F.; SILVEIRA, A.M.; SILVA, H.A.N.; TAVARES, M.R.M.; SARAIVA, A.C.F. Construction Of A Novel Water Quality Index And Quality Indicator For Reservoir Water Quality Evaluation: A Case Study In The Amazon Region. **Journal of Hydrology**. 522, p. 674–683, 2015.

OLSEN, K. R. **Manual de Toxicologia Clínica**. 6ed. Rio de Janeiro: Grupo A, 2013, 832p.

OLSEN, R. L; CHAPPELL, R.W; LOFTIS, J.C. Water quality sample collection, data treatment and results presentation for principal components analysis – literature review and Illinois River watershed case study. **Water Research**, Volume 46, Issue 9, 1 June, Pages 3110-3122, 2012.

ORAM, B. **Water Research Center**. Monitoring the Quality of Surfacewaters. Disponível em: <<http://www.water-research.net/index.php/water-treatment/water-monitoring/monitoring-the-quality-of-surfacewaters>> Acesso em: jun. 2014.

MANLY, B. J. F. **Métodos Estatísticos Multivariados: Uma Introdução**. 3.ed. Porto Alegre:Bookman, 2005.

MEIRELES, A.C.M., ANDRADE, E.M., CHAVES, L.C.G., FRISCHKORN, H., CRISOSTOMO, L.A. A new proposal of the classification of irrigation water. **Revista Ciência Agronômica**, 41, 349-357, 2010.

- MENDONÇA, M.C.S. Avaliação do Processo de Eutrofização dos Reservatórios Açude da Marcela e Rio Jacarecica através do Índice de Qualidade da Água para Reservatórios. 49p. **TCC do Departamento de Engenharia Química**, da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão. 2014.
- MIHELIC, J. R.; ZIMMERMAN, J. B. **Engenharia Ambiental: Fundamentos, Sustentabilidade e Projeto**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- MOYEL, M. S.; HUSSAIN, N. A. Water quality assessment of the Shatt al-Arab River, Southern Iraq. **Journal of Coastal Life Medicine**, 3(6): 459-465, 2015.
- NUNES, S. G. Contribuição da Análise de Clusters para a Identificação de Diferentes Fenótipos na Retinopatia Diabética. 2006. **Dissertação (Mestrado em Ciências da Visão)**. UNIVERSIDADE DE COIMBRA, Portugal, 2006.
- SAHOO, M. M.; PATRA, K.C.; KHATUA, K. K. Inference of Water Quality Index using ANFIA and PCA. **Aquatic Procedia**, Volume 4 Pages 1099-1106, 2015.
- SANGUANSAT, P. **Principal Component Analysis: Engineering Applications**. New York: InTech, 230 p. 2012.
- SERGIPE. SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO E DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA - SEPLANTEC. SUPERINTENDÊNCIA DE ESTUDOS E PESQUISAS-SUPES. **Informes Municipais: 75p**. Aracaju, 2000.
- SILVA, da K. B.; FILHO, L. C de A. BATISTA, R. O.; COELHO, D. da C. L. Avaliação do Índice de Qualidade de Água (IQA) em corpo hídrico no município de Açú/RN. **II INOVAGRI International Meeting**, 2014.
- SUN, W.; XIA, C.; XU, M.; GUO, J.; SUN, G. Application of modified water quality indices as indicators to assess the spatial and temporal trends of water quality in the Dongjiang River. **Ecological Indicators**, Volume 66, July, Pages 306-312, 2016.
- TIAGY, S., BHAVTOSH S., PRASHANT S., RAJENDRA D. Water Quality Assessment in Terms of Water Quality Index. **American Journal of Water Resources**, p 34-38, 2013.
- TRIOLA, Mário F. **Introdução à Estatística**. 7a. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 1999.
- TUNDISI, J. G.; TUNDISI-MATSAMURA, T., 2002. **Lagos e Reservatórios. Qualidade de Água: O Impacto de Eutrofização**. V.3 Disponível em: <<http://www.rimaeditora.com.br/lagos.pdf>>. Acesso em: 06 set. 2014.
- UNESP. **Análise de Agrupamentos (Cluster Analysis)**. 8p. 2014. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/DIDATICOS/LANDIM/MULTIVARIADA/3.Agrupamentos.pdf>>. Acesso em: 22/11/2015.
- VIANA, L.G.; DIAS, D. F. S.; OLIVEIRA, V. P. S.; MOREIRA, M. A. C. Índice de Qualidade da Água (IQA) da Lagoa do Taí, São João da Barra, RJ. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamago**, Campos dos Goytacazes/RJ, v. 7 n. 2, p. 199-219, jul./dez. 2013.
- WHO – WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Water Quality Assessments: A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring**. 2th Edition. London: F & FN Spon, 651p, 1996.