



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

**FRANCISCO SILVIO GOMES DUARTE JÚNIOR**

**INFLUÊNCIA DA ESTIAGEM PROLONGADA NA QUALIDADE DE ÁGUA  
TRATADA – AVALIAÇÃO COM NÚMERO *FUZZY* TRIANGULAR NA BACIA DO  
BANABUIÚ**

**FORTALEZA**

**2017**

FRANCISCO SILVIO GOMES DUARTE JÚNIOR

INFLUÊNCIA DA ESTIAGEM PROLONGADA NA QUALIDADE DE ÁGUA TRATADA  
– AVALIAÇÃO COM NÚMERO *FUZZY* TRIANGULAR NA BACIA DO BANABUIÚ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte do requisito para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

D872i Duarte Júnior, Francisco Silvio Gomes.

Influência da estiagem prolongada na qualidade de água tratada : Avaliação com número fuzzy triangular na bacia do Banabuiú / Francisco Silvio Gomes Duarte Júnior. – 2017.  
44 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva .

1. Tratamento de Água. 2. Estiagem. 3. Confiabilidade. 4. Garantia. 5. Número Fuzzy Triangular. I. Título.

CDD 628

---

FRANCISCO SILVIO GOMES DUARTE JÚNIOR

INFLUÊNCIA DA ESTIAGEM PROLONGADA NA QUALIDADE DE ÁGUA TRATADA  
– AVALIAÇÃO COM NÚMERO *FUZZY* TRIANGULAR NA BACIA DO BANABUIÚ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como parte do requisito para obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Raimundo Oliveira de Souza  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Allan Clemente de Souza

Aos meus pais e irmãs.  
Aos meus padrinhos.  
A meu avô Vicente (*in memoriam*).  
Aos tios Dumas e Amauri.

*Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil – e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos.*

Albert Einstein (1879 – 1955)

## RESUMO

Fenômenos de estiagem reduzem a disponibilidade de água e afetam a qualidade dos mananciais. Tais consequências trazem grandes dificuldades para as concessionárias em fornecer água dentro dos padrões de qualidade exigidos pela portaria MS Nº 2914 de 2011.

Os períodos de seca acentuam a concentração dos poluentes nos reservatórios acelerando o processo de eutrofização e afetando substancialmente o tratamento da água em virtude da maior necessidade de remoção de cor e turbidez. Diante deste cenário, a análise de confiabilidade do tratamento das estações de água adquire significativa importância. A confiabilidade de um sistema é obtida através de um monitoramento capaz de avaliar a probabilidade de o mesmo obter nenhuma falha em seu funcionamento em determinado período de tempo. Neste contexto, o método do Índice de Concordância *Fuzzy* desponta como um modelo viável capaz de lidar com as incertezas e estudar a garantia de sistemas de abastecimento de água. O presente trabalho analisa os efeitos da sazonalidade e de períodos cíclicos na garantia da qualidade em estações de tratamento de água, verificando a influência do período chuvoso e do período de estiagem sobre quatro parâmetros físicos: pH, cor aparente, turbidez e cloro residual livre. Seis estações fizeram parte do estudo, sendo três de filtração direta ascendente e três de ciclo completo. O estudo foi desenvolvido usando a média de dados no período de 01/01/2007 a 30/06/2017, em análises realizadas diariamente nos laboratórios das ETA. A partir dos resultados obtidos, foi observado uma redução de desempenho nos parâmetros de cor e turbidez nos períodos chuvosos e nos anos de estiagem, obtendo variações consideráveis, sobretudo na turbidez. A metodologia é uma alternativa sólida na avaliação da garantia da qualidade do tratamento de água, provendo melhor controle dos processos operacionais.

**Palavras-chave:** Tratamento de água. Sazonalidade. Estiagem. Confiabilidade. Garantia. Número *Fuzzy* Triangular.

## ABSTRACT

Drought phenomena reduce water availability and affect the quality of water sources. These consequences bring great difficulties for the concessionaires to provide water within the quality standards required by ordinance MS N° 2914 of 2011. Drought periods also accentuate the concentration of pollutants in reservoirs by accelerating the eutrophication process and substantially affecting water treatment due to the increased need for color removal and turbidity. Considering this scenario, the reliability analysis of the treatment of water stations acquires significant importance. The reliability of a system is obtained through a monitoring capable of evaluating the probability of it obtaining no failure in its operation in a certain period of time. In this context, the Fuzzy Agreement Index method emerges as a viable model capable of dealing with uncertainties and studying the assurance of water supply systems. The present work analyzes the effects of seasonality and cyclical periods on quality assurance in water treatment plants, verifying the influence of the rainy season and the dry season on four physical parameters: pH, apparent color, turbidity and free residual chlorine. Six stations were part of the study, three of direct ascending filtration and three of full cycle. The study was carried out using the average data from 01/01/2007 to 06/30/2017, in daily tests carried out in the ETA laboratories. From the obtained results, a performance reduction was observed in the parameters of color and turbidity in the rainy periods and in the drought years, obtaining considerable variations, mainly in turbidity. The methodology is a solid alternative in assessing the quality assurance of water treatment, providing better control of operational processes.

**Keywords:** Water treatment. Seasonality. Drought. Reliability. Warranty. Fuzzy Triangular Number.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Tratamento.....	20
Figura 2 – Componentes de um conjunto <i>fuzzy</i> .....	27
Figura 3 – Número <i>Fuzzy</i> triangular (NFT) .....	28
Figura 4 – Localização das ETA selecionadas no estudo .....	31
Figura 5 – Evolução do volume armazenado dos reservatórios da bacia do Banabuiú.....	32
Figura 6 – Precipitação observada na região da bacia do Banabuiú. ....	32
Figura 7 – Índice de Concordância <i>Fuzzy</i> entre um número difuso (D) e outro não difuso (H) contínuo à esquerda. ....	33
Figura 8 – Índice de Concordância <i>Fuzzy</i> (Icf) entre um número difuso e o VMP como número não difuso. ....	34
Figura 9 – Representação das áreas de interseção entre Números <i>Fuzzy</i> Triangulares e os valores limites mínimo e máximo. ....	35
Figura 10 – Gráfico de correlação entre volume armazenado e turbidez.....	40
Figura 11 – Gráfico de correlação entre precipitação e turbidez.....	40
Figura 12 – Gráfico de correlação entre turbidez e cor aparente.....	41
Figura 13 – Gráfico de correlação entre volume armazenado e cor aparente .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constituintes típicos encontrados na água. ....	16
Tabela 2 – Relação das ETA selecionadas no estudo .....	30
Tabela 3 – Valores recomendados para cada parâmetro .....	36
Tabela 4 – Garantias dos parâmetros analisados para as ETA em estudo, em função do período hidrológico.....	37
Tabela 5 – Garantias médias dos parâmetros analisados, em função do período hidrológico .	37
Tabela 6 – Garantias médias dos parâmetros analisados, em função da tecnologia de tratamento e tipo de captação .....	38
Tabela 7 – Correlação entre parâmetros, precipitação e volume.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ETA	Estação de Tratamento de Água
FD	Filtração direta
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
ICF	Índice de Concordância <i>Fuzzy</i>
NFT	Número <i>Fuzzy</i> Triangular
uT	Unidade de Turbidez
NTU	Nefelometric Turbidity Unit
uH	Unidade Hazen de Cor
CRL	Cloro Residual Livre
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
VMP	Valor Máximo Permitido
OMS	Organização Mundial de Saúde
THM	Trihalometano
MS	Ministério da Saúde

## SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	12
2	MOTIVAÇÕES DE ESTUDO .....	13
3	OBJETIVO .....	14
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
4.1	Qualidade das Fontes de Abastecimento .....	15
4.2	Objetivos do Tratamento de Água .....	15
4.3	Estiagem e Influência Sazonal.....	17
4.4	Produção e Metas de Qualidade .....	18
4.5	Processos Típicos de Tratamento de Água .....	19
4.5.1	Ciclo Completo.....	19
4.5.2	Filtração Direta .....	20
4.6	Padrões de Qualidade .....	21
4.6.1	Turbidez.....	22
4.6.2	pH .....	22
4.6.3	Cor Aparente.....	23
4.6.4	Cloro Residual Livre .....	24
4.7	Monitoramento da qualidade da água tratada.....	25
4.8	Lógica <i>fuzzy</i> .....	25
4.8.1	Conjunto fuzzy .....	26
4.8.2	Número Fuzzy Triangular (NFT) .....	27
4.9	Análise de Garantia e Risco de Falha.....	28
5	METODOLOGIA.....	30
5.1	Sistemas de Tratamento de Água .....	30
5.2	Parâmetros analíticos de monitoramento.....	33
5.3	Enfoque do estudo .....	33
5.3.1	Índice de Concordância Fuzzy (Icf) .....	33
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	36
7	CONCLUSÃO.....	42
8	REFERÊNCIAS .....	43

## 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Garantir e manter um suprimento adequado de água tem sido um dos fatores essenciais no desenvolvimento humano. O aumento da população, no entanto, exerceu forte pressão sobre fontes limitadas e a contaminação da água com resíduos domésticos, agrícolas e industriais levou a uma deterioração da qualidade da água em muitas outras fontes. A medida que a demanda de água cresceu em áreas urbanas, um abastecimento adequado com água de excelente qualidade se tornou cada vez mais difícil. Ao mesmo tempo, a regulamentação dos padrões de potabilidade da água tornou-se mais rigorosa, a capacidade analítica para a detecção de contaminantes tornou-se mais sensível e o público tornou-se mais exigente sobre a qualidade da água. Assim, a qualidade da água tratada e segurança que esta apresenta para o ser humano, não pode ser negligenciada no abastecimento humano. Na verdade, a maioria das fontes requer alguma forma de tratamento para o uso como água potável. O tratamento de água pode ser definido como uma série de operações unitárias na água bruta com a finalidade de alcançar uma qualidade que atenda metas ou padrões especificados por agências reguladoras.

O principal objetivo do tratamento da água é proteger a saúde pública. A água pode conter uma grande variedade de constituintes que podem prejudicar a saúde e tem uma capacidade de transmitir rapidamente doenças a um grande número de pessoas (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

A confiabilidade do processo é um fator muito importante na avaliação de sistemas de tratamento de água, cuja falha pode ter consequências imediatas para a saúde pública. (LETTERMAN, 1999). Primeiro, a confiabilidade do processo do tratamento de água indica a capacidade do processo de atender continuamente o objetivo do tratamento. Alguns processos são muito confiáveis e são capazes de atingir os objetivos do tratamento, apesar das mudanças na qualidade da água bruta ou parâmetros operacionais. Outros processos são mais sensíveis às mudanças.

O tratamento a ser utilizado deve então considerar essas variações a fim de satisfazer os padrões determinados pela Portaria MS Nº 2914 DE 12/12/2011. Os processos confiáveis são sempre preferidos, e são particularmente importantes contra contaminantes, como os agentes patogênicos que podem causar efeitos graves na saúde. Como forma de monitorar o nível de eficiência dos tratamentos utilizados em Estações de Tratamento de Água (ETA), faz-se necessário a utilização de uma abordagem estatística de alguns parâmetros da água tratada com o propósito de avaliar a eficácia da tecnologia utilizada.

## 2 MOTIVAÇÕES DE ESTUDO

O uso de uma medida de desempenho força a busca de gerenciamento e melhoria de um processo. A avaliação de desempenho pode ser vista como uma necessidade derivada de aspectos técnicos inerentes à operação de estações de tratamento de água. O aumento da demanda por água, a escassez, a deterioração da qualidade natural da água em consequência de estiagens, adversidades ambientais e o estabelecimento de alvos progressivos mais restritivos para a qualidade da água potável, geralmente requerem modificações em estações de tratamento de água. A avaliação de desempenho antes e depois dessas mudanças pode indicar o nível de eficácia e sucesso (ou falha) resultante dessas ações. No entanto, devido às inúmeras variáveis envolvidas nos processos, não é fácil avaliar o desempenho (OLIVEIRA *et al.*, 2014). A variação da qualidade da água bruta e a atuação de uma fase do tratamento podem afetar o desempenho tornando o problema mais complexo. A avaliação pode ser feita por processos, considerando cada estágio, ou por sistema, analisando apenas o influente e o efluente. Recomenda-se que a primeira seja realizada pelos prestadores de serviços, especialmente para controle de tratamento, enquanto a análise sistêmica seja usada por agências reguladoras e normativas, autarquias e órgãos ambientais. No Brasil, os padrões de água potável são estabelecidos pela Portaria MS Nº 2914/2011 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2011), com características físico-químicas e organolépticas, resultando em 85 parâmetros de qualidade da água, número que aumentou ao longo dos anos.

Uma ETA deve ser projetada para adaptar-se às variações de propriedade da água bruta e garantir que os objetivos adotados em termos de qualidade e eficiência no tratamento sejam atendidos. O uso de métodos probabilísticos para analisar padrões é uma abordagem viável do ponto de vista operacional. Neste contexto, ferramentas de análise de conformidade assumem uma grande importância, como o Índice de Concordância *Fuzzy* (DIAS, 2016). Este método auxiliará a análise da garantia de seis estações de tratamento de águas do semiárido cearense investigando a influência de aspectos sazonais e cíclicos, tal como avaliar o comportamento da garantia para os padrões fora dos limites recomendado pela regulamentação.

### 3 OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi investigar a influência de variações sazonais e cíclicas na garantia de funcionamento de estações de tratamento de água localizadas no Sertão Central do Ceará utilizando o método de Números *Fuzzy* Triangular (NFT). O propósito principal foi demonstrar a aplicação do método como ferramenta para avaliar a confiabilidade e a robustez de estações de tratamento de água.

## **4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **4.1 Qualidade das Fontes de Abastecimento**

Um tratamento de água eficaz é um processo complexo por causa da grande variedade de constituintes indesejáveis que podem estar na água de origem. Mesmo as águas consideradas como "cristalinas" podem conter alguns constituintes que devem ser removidos. Os componentes específicos na água, as concentrações relativas desses constituintes e outros parâmetros de qualidade da água que afetam o tratamento dependem fortemente das condições locais de geologia, clima e atividade humana. Assim, os processos de tratamento devem ser adaptados à fonte específica. Os desafios específicos de tratamento, no entanto, são fortemente influenciados pelo tipo fonte, que pode incluir águas subterrâneas, reservatórios, rios, oceano e águas residuais. Cada tipo de fonte exigirá processos de tratamento diferentes e apresentará desafios diferentes.

A água subterrânea é aquela que existe nos espaços dos poros entre areia, cascalho e rochas na terra e pode ser levada à superfície por meio de poços ou fontes e nascentes. Cerca de 61% da população do Brasil são abastecidas com águas subterrâneas (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2017). Quase todo o resto é abastecida com água superficial. Os constituintes indesejáveis nas águas subterrâneas podem ser naturais ou antropogênicos (de origem humana). Os constituintes naturais resultam da dissolução causada pelo contato a longo prazo entre a água e as rochas e minerais. O número potencial de contaminantes antropogênicos é vasto. No mundo, cerca de 70 mil produtos químicos são usados comercialmente. As contribuições antropogênicas para os mananciais incluem: vazamento de tanques de armazenamento subterrâneo, vazamento de sistemas sépticos residenciais, contaminação industrial e contaminação agrícola.

### **4.2 Objetivos do Tratamento de Água**

O objetivo principal do tratamento da água é a produção de uma água segura e esteticamente atraente que proteja a saúde pública e esteja em conformidade com os padrões atuais de qualidade da água. O principal objetivo de uma empresa pública ou privada de abastecimento de água é fornecer água tratada sem interrupção e a um custo razoável para o consumidor (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016). O cumprimento dessas metas envolve uma série de atividades separadas, incluindo (1) proteção e gerenciamento da bacia hidrográfica e

do sistema de transporte, (2) tratamento efetivo da água e (3) gerenciamento efetivo do sistema de distribuição de água para garantir a qualidade da água no ponto de uso. Os constituintes típicos encontrados em águas subterrâneas e superficiais que podem precisar ser removidos, inativados ou modificados para atender aos padrões de qualidade da água são identificados na Tabela 1:

Tabela 1 – Constituintes típicos encontrados na água.

Classe	Constituintes Típicos Encontrados na Água	
	Água Subterrânea	Águas Superficiais
<b>Constituintes coloidais</b>	Microrganismos, vestígios de constituintes orgânicos e inorgânicos	Argila, limo, materiais orgânicos, organismos patogênicos, algas, outros microrganismos
<b>Componentes dissolvidos</b>	Ferro e manganês, íons de dureza, sais inorgânicos, traços de compostos orgânicos, radionuclídeos	Compostos orgânicos, ácidos tânico, íons de dureza, sais inorgânicos, radionuclídeos
<b>Gases dissolvidos</b>	Dióxido de carbono, sulfeto de hidrogênio	
<b>Materiais flutuantes e em suspensão</b>	Nenhum	Ramos, folhas, algas, partículas de solo
<b>Líquidos não miscíveis</b>		Óleos e graxas

Fonte: Crittenden *et al.* (2012).

Os níveis específicos aos quais os vários constituintes devem ser removidos ou inativados são definidos por regulamentações federais, estaduais e locais. No entanto, como a capacidade de medir quantidades de vestígios de contaminantes na água continua a melhorar e nosso conhecimento dos efeitos sobre a saúde desses compostos se expande, os regulamentos de qualidade da água estão se tornando cada vez mais complexos. Os padrões atuais são estabelecidos para que os consumidores possam ter certeza de uma água de qualidade aceitável. Entretanto, nem todas estações em operação atualmente foram projetadas prevendo mudanças futuras na exigência de padrões, o que pode causar dificuldades operacionais durante a vigência de novas regulamentações.

Os critérios de qualidade da água são estabelecidos por vários grupos de estudos que definem as concentrações de constituintes que não devem ser excedidas para proteger determinados usos. Uma variedade de métodos foram desenvolvidos e novos métodos estão em desenvolvimento para o tratamento da água. Na maioria das situações, é necessária uma combinação ou sequência de métodos dependendo das propriedades da água bruta e da

qualidade final desejada.

Muitas características da qualidade da água bruta podem afetar a tratabilidade. As características físicas incluem turbidez, sólidos e temperatura. As características orgânicas incluem a matéria orgânica natural, nutrientes e precursores de subprodutos de desinfecção. Os constituintes microbianos incluem coliformes totais, protozoários como *Cryptosporidium* e *Giardia*, vírus, bactérias e helmintos. Os parâmetros químicos que afetam a tratabilidade incluem pH, acidez, alcalinidade, dureza e corrosividade. Os constituintes inorgânicos podem incluir ferro, manganês, arsênico e brometo. As preocupações estéticas incluem cor, sabor e odor. A seleção do processo de tratamento de água começa com pelo menos três informações principais: qualidade e variabilidade da água bruta, qualidade requerida da água tratada, e metas de produção e operacionais necessárias.

Os profissionais que se dedicam a pesquisas relacionadas à qualidade da água para abastecimento público estão sempre aperfeiçoando as técnicas de tratamento. A finalidade primordial é assegurar a potabilidade da água ofertada à população. Contudo, é importante buscar opções de menor custo que atendam a esse objetivo para possibilitar a universalização do acesso à água em quantidade e qualidade necessária para atender a finalidade a que se destina (HELLER; PÁDUA, 2010).

### **4.3 Estiagem e Influência Sazonal**

O Estado do Ceará historicamente sempre foi afetado por fenômenos climáticos adversos, ocorrendo secas periódicas e prolongadas, resultando em prejuízos socioeconômicos, além da falta de água para abastecimento. O Ceará possui 86,8% de seu território inserido no semiárido, com 75% da área total compreendida na isoieta abaixo dos 800 mm de precipitação anual (CAEAE, 2009a).

O semiárido é caracterizado por uma extrema irregularidade de precipitações no espaço e no tempo. Nos períodos de seca acentua-se a irregularidade comprometendo a acumulação de água nos reservatórios. Altas taxas de evaporação, superiores a 2.000 mm anuais, contribuem fortemente para o cenário de escassez. Outra consequência destas características climáticas, traduz-se na intermitência dos cursos d'água.

Como agravante do quadro, o Ceará, em termos geológicos, é formado, principalmente, por rochas do embasamento cristalino, ocasionando sérios obstáculos na oferta de água subterrânea. As mudanças climáticas para os climas semiáridos apontam para o aumento dos eventos extremos, intensificando a ocorrência de secas com a consequente redução do estoque

de água nos reservatórios.

À medida que a estiagem se intensifica, a diminuição na vazão dos rios traz como consequências a redução da disponibilidade de água e o comprometimento da qualidade da água nos mananciais. Uma estiagem prolongada, com baixa recarga de açudes e represas, tende a aumentar a concentração dos poluentes acelerando o processo de eutrofização. A qualidade das águas é afetada pelos resíduos de matéria orgânica nas bacias hidrográficas, provenientes das descargas domésticas, da drenagem urbana e do uso intensivo de herbicidas e pesticidas na agricultura. A eutrofização é atualmente uma dificuldade de escala mundial relevante e tem causado uma enorme e rápida deterioração de águas superficiais. Além disso, é importante considerar os impactos negativos nos mananciais causados pela disposição inadequada de resíduos sólidos. Poluição e contaminação têm produzido custos elevados de tratamento de água, sobretudo de energia, causando também problemas de saúde pública (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2017). A eutrofização afeta substancialmente o tratamento da água captada devido a maior necessidade de remoção de cor e turbidez. O consumo de produtos químicos é maior e as carreiras de filtração mais curtas, ocasionando lavagens de filtros são mais frequentes (VON SPERLING, 2005).

Os conceitos mais recorrentes mensurar a disponibilidade hídrica são o de escassez hídrica e o de estresse hídrico. Quando a quantidade de água disponível de um país não é suficiente para prover as necessidades da sua população, existe uma escassez hídrica (RIBEIRO, 2008). Para o PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) a escassez ocorre quando o total de água não é adequado para satisfazer as demandas do abastecimento humano e dos ecossistemas, resultando em uma crescente competição por água. Pode-se definir o termo estresse hídrico como uma situação em que a demanda por água é maior do que a sua disponibilidade e capacidade de renovação, a diferença entre a pluviosidade e a evaporação, em uma unidade geográfica. Do ponto de vista quantitativo, o PNUMA define a escassez hídrica quando uma determinada região dispõe de menos de 1.000 m<sup>3</sup> per capita ao ano de água nas reservas superficiais e subterrâneas. Para o estresse hídrico, o valor é de menos de 1.700 m<sup>3</sup> per capita ao ano (RIBEIRO, 2008).

#### **4.4 Produção e Metas de Qualidade**

Alcançar metas de qualidade da água geralmente significa que é necessário mais do que um processo para resolver um problema de qualidade. A produção e os objetivos operacionais de uma ETA podem variar, e às vezes podem estar em desacordo um com o outro.

Além da qualidade da água bruta, as várias normas que se aplicam aos sistemas de abastecimento de água influenciam a seleção dos processos de tratamento. Assim, as características dos mananciais, e os requisitos estabelecidos nas normas também afetarão a seleção da tecnologia, o projeto e a operação de instalações de tratamento de água (TCHOBANOGLIOUS et al., 2016). O desafio para o projetista de instalações de tratamento de água é conciliar as regulamentações vigentes com as dificuldades técnicas que acompanham a escassez hídrica, ao mesmo tempo em que tenta antecipar quais mudanças ocorrerão durante a vida útil das instalações.

Na prática, a dificuldade na execução de todas as metas, resulta em uma hierarquização destes objetivos, no qual alguns são priorizados em detrimento de outros. Esta avaliação realiza-se ponderando diversos aspectos, como infraestrutura local disponível, restrições financeiras relativas à implantação, operação e manutenção dos sistemas e propriedades da água a ser tratada (LIBÂNIO, 2010).

#### **4.5 Processos Típicos de Tratamento de Água**

Como já mencionado, as características da água bruta tomam-se o principal fator mais importante na definição da tecnologia de tratamento a ser empregada. Dependendo da qualidade das águas, podem ser utilizadas várias tecnologias de tratamento. Duas tecnologias comuns de tratamento presentes nas ETA estudadas são identificadas abaixo e descritas a seguir:

- Ciclo completo ou tratamento de água convencional;
- Tratamento em filtração direta ou em linha.

##### **4.5.1 Ciclo Completo**

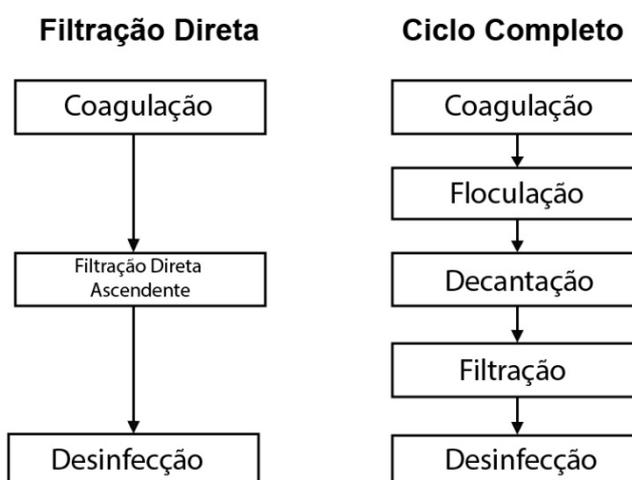
A tecnologia de ciclo completo (ou tratamento convencional), a mais difundida no Brasil, é tipicamente usada para tratar problemas de qualidade da água bruta, como alta turbidez (tipicamente  $\geq 20$  uT) e alta cor ( $\geq 20$  uH). Em função destas características da água bruta, faz-se necessário a inclusão de uma unidade para retenção por decantação ou flotação dos flocos formados na floculação (LIBÂNIO, 2010). Um tratamento de processo convencional consiste em coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração em meio granular e desinfecção, como mostrado na Figura 1.

Em geral, o tratamento convencional possui maior flexibilidade operacional, é

hidraulicamente estável e requer menos atenção do operador do que outros tipos de tecnologias de tratamento de água. Outra consideração ao selecionar um processo convencional é a disponibilidade de área, pois as taxas de aplicação superficiais são geralmente baixas, resultando em grandes requisitos de espaço no processo.

Geralmente, as ETA de ciclo completo podem ser adaptadas sem problemas para tratamento por filtração direta, nas ocasiões em que a água bruta apresentar qualidade compatível com esta tecnologia (HELLER; PÁDUA, 2010).

Figura 1 – Tipos de Tratamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

#### 4.5.2 Filtração Direta

A tecnologia de tratamento de filtração direta ou em linha são tipicamente usadas para tratar águas superficiais de maior qualidade com baixa turbidez (tipicamente  $\leq 15\text{uT}$ ), cor moderada a baixa ( $\leq 20\text{uH}$ ) e baixo COT ( $\leq 4\text{mg/L}$ ). Conforme mostrado na Figura 1, um processo de filtração direta consiste em coagulação ou mistura rápida, floculação, filtração em camada granular e desinfecção. A principal vantagem do emprego da filtração direta consiste na expressiva redução dos custos de construção e operação, uma vez que a tecnologia não necessita das onerosas unidades de decantação, uma vez que essa operação acontece nos próprios interstícios do meio filtrante (LIBÂNIO, 2010).

Na filtração direta ascendente, a água coagulada percorre a camada filtrante de baixo para cima e a água filtrada sai na parte superior do filtro. Esse tipo de filtração se aproxima da

filtração ideal, já que a água escoar no sentido dos grãos mais grossos para os mais finos, utilizando um único material filtrante, a areia (DI BERNARDO, 2003). Na filtração direta descendente, é o inverso, a água coagulada percorre o fluxo a camada filtrante de cima para baixo, e a água filtrada sai na parte inferior do filtro. No caso da dupla filtração, a água coagulada passa por uma unidade de filtração ascendente e em seguida por uma unidade de filtração descendente. Esta possibilita o tratamento de água bruta de pior qualidade, com maior quantidade de material dissolvido e em suspensão (HELLER; PÁDUA, 2010).

Os processos de coagulação e floculação são muito importantes e devem ser capazes de formar um floco pequeno e resistente, uma vez que um floco grande irá facilmente colmatar os filtros, resultando em carreiras de filtração curtas. Um processo de filtração em linha é semelhante ao processo de filtração direta, exceto que a floculação é incidental, o que significa que floculação ocorre em estruturas de transporte entre o processo de coagulação e os filtros (acima dos meios filtrantes) em vez de um tanque de floculação (LIBÂNIO, 2010). Os tratamentos de filtragem em linha são usados para tratar águas superficiais com alta a excelente qualidade, com turbidez muito baixa (tipicamente  $\leq 5\text{uT}$ ), pouca cor ( $\leq 10\text{uH}$ ) e baixo COT ( $\leq 4\text{ mg/L}$ ).

#### 4.6 Padrões de Qualidade

Para um controle efetivo dos processos de tratamento de água, em 2011 o Ministério da Saúde instituiu a Portaria 2914 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Esta portaria descreve os parâmetros permitidos e responsabilidades relativas ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano.

O padrão de aceitação da água para abastecimento humano é definido com base em critérios de ordem organoléptica e estética da água, e pretende evitar a rejeição ao consumo, que levaria à busca de outras fontes, eventualmente menos confiáveis sob o aspecto sanitário (HELLER; PÁDUA, 2010). Contudo, o critério principal que rege o significado de potabilidade é que ela não cause mal à saúde humana. Desta forma, se uma substância prejudicial à saúde em particular estiver presente na água bruta ela precisará ser monitorada durante a distribuição, mesmo que não seja especificado na Portaria. Portanto, pode-se definir como água potável aquela que pode ser consumida sem riscos à saúde, sem causar rejeição ao consumo e que atenda a Portaria.

O tratamento da água, em si, não é uma garantia do padrão de potabilidade, uma vez

que a qualidade pode se deteriorar entre as etapas de tratamento ou distribuição. Desse modo, é entendido na norma brasileira que a obtenção e a manutenção da potabilidade da água depende da dinâmica da água desde o manancial até o consumo (HELLER; PÁDUA, 2010).

#### **4.6.1 Turbidez**

Dependendo da fonte de água, a turbidez pode ser a mais variável dos parâmetros de qualidade no abastecimento de água potável. A turbidez na água é causada pela presença de partículas em suspensão que reduz a limpidez da água. A turbidez expressa, de forma simples, a transparência da água. A turbidez é definida como uma propriedade óptica que faz com que a luz seja espalhada e absorvida em vez de transmitida sem mudança de direção ou fluxo através da amostra.

As medições de turbidez são úteis para comparar diferentes fontes de água ou estações de tratamento e são usadas para monitoramento de processos e conformidade. A turbidez da água bruta tem grande relevância, uma vez que é um dos principais parâmetros de escolha da tecnologia de tratamento e controle operacional (HELLER; PÁDUA, 2010). A turbidez é um possível indicador para doenças de veiculação hídrica. Os aumentos nas medições de turbidez são frequentemente usados como um indicador para concentrações elevadas de componentes na água, como bactérias, cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium*. A turbidez é expressa em unidades de turbidez (uT). Valores altos de turbidez de origem orgânica podem blindar microrganismos dos efeitos da desinfecção e provocar o desenvolvimento bacteriano no sistema de abastecimento.

#### **4.6.2 pH**

A acidez e alcalinidade estão relacionadas à propriedade da água de neutralizar ácidos e bases. A acidez da água é devido à presença de ácidos minerais fortes, ácidos fracos como o ácido carbônico e ácidos húmicos e fúlvicos. Embora de pouco significado sanitário, é de interesse se conhecer a acidez, pois o acondicionamento final da água em uma ETA pode exigir a adição de agente alcalinizante para manter a estabilidade dos carbonatos, evitando incrustações nas redes e problemas relacionados à corrosão no sistema de abastecimento. A alcalinidade é devida, sobretudo, à concentração de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, mas pode incluir contribuições de fosfatos, boratos, silicatos e outros componentes (HELLER; PÁDUA, 2010).

Para a eficiência do tratamento das águas com o emprego de coagulantes, especialmente o sulfato de alumínio, o controle do pH de floculação é condição indispensável. Cada água tem um pH ótimo de floculação. A alcalinidade influi consideravelmente na coagulação química durante o tratamento, posto que os principais coagulantes frequentemente utilizados no Brasil (sulfato de alumínio e cloreto férrico) têm características ácidas. Assim, se a alcalinidade da água for baixa, a coagulação poderá exigir a adição de solução alcalinizante para o ajuste de pH. O sulfato de alumínio funciona melhor em uma faixa de pH de 5,8 a 8,5. Enquanto os sais férricos podem funcionar em uma faixa mais ampla. Ambos consomem alcalinidade quando formam flocos, fazendo com que o pH da água caia. Nas águas pouco alcalinas, com presença forte de cor proveniente de material orgânico e baixa turbidez, geralmente a floculação se processa em pH baixo, entre 5,0 e 6,5, assim, a adição de ácido antes da coagulação pode ser necessária. Nas águas mais alcalinas e turvas o pH de floculação pode atingir até 7,4.

A deficiência de controle do pH poderá comprometer a eficiência do tratamento, resultando em um consumo maior de coagulantes, deficiência de remoção de cor e turbidez, deficiência de decantação, aumento de trabalho para os filtros e aumento de alumínio residual na água tratada (CUNHA, 1975).

#### **4.6.3 Cor Aparente**

A cor da água é uma indicação de conteúdo orgânico, incluindo ácidos húmicos e fúlvicos, de presença natural de íons metálicos, como ferro e manganês, e de turbidez. A cor aparente é medida em amostras não filtradas e a cor verdadeira é medida em amostras filtradas. A turbidez aumenta a cor aparente da água, enquanto a cor verdadeira é causada por espécies dissolvidas e é usada para definir a qualidade estética da água. Segundo Pivelli e Kato (2006), *in verbis*: “Esta coloração é dita **aparente** pois é como o ser humano a vê, mas é, na verdade, em parte, resultado da reflexão e dispersão da luz nas partículas em suspensão”.

A cor das águas potáveis é tipicamente avaliada comparando visualmente uma amostra de água com soluções de cor conhecidas feitas a partir de diluições em série ou concentrações de uma solução padrão de platina-cobalto. A presença de cor é expressa em unidades Hazen de cor (uH).

#### 4.6.4 *Cloro Residual Livre*

Provavelmente, não existe um processo mais difundido do que a desinfecção das águas pelo cloro. A cloração de águas de abastecimento praticamente erradicou dos sistemas públicos as bactérias e vírus causadores das doenças de veiculação hídrica. O cloro e seus compostos ocupam um lugar de destaque na engenharia sanitária, uma vez que a sua aplicação como desinfetante, como oxidante, ou como ambos, traz inúmeros benefícios tanto no que concerne à preservação dos recursos hídricos. Diversas outras aplicações de cloro podem ainda ser citadas, incluindo-se o controle de algas em reservatórios e em unidades de tratamento de água e a remoção de ferro e manganês de água de abastecimento, por oxidação.

A reação de cloro gasoso com a água origina o ácido hipocloroso e este se dissocia em íon hipoclorito. A soma da concentração dos dois compostos é designada de cloro residual livre e a predominância de uma espécie ou outra está sujeita ao pH. O ácido hipocloroso é um desinfetante muito mais oxidante, todavia sua predominância ocorre em pH baixo. Por esta razão, a Portaria 2914 recomenda que a desinfecção com compostos de cloro deva ser realizada com pH inferior a 8,0, garantindo a prevalência do ácido hipocloroso (LIBÂNIO, 2010).

A desinfecção consiste em atender à demanda de cloro, definida como a diferença entre a dosagem aplicada e a concentração residual à saída do sistema. Dado que a capacidade de oxidação do cloro não é seletiva, diversas substâncias poderão impedir a ação desinfetante, como ferro, amônia, sulfatos, manganês e matéria orgânica. Deste modo, a concentração residual assegura que a demanda de cloro foi satisfeita, e o total de cloro aplicado que não foi consumido na reação de inativação dos microrganismos e nem para oxidar os compostos, permanece como o residual livre na água distribuída.

Guias da OMS enfatizam a importância da manutenção do cloro residual nas redes de distribuição para minimizar o recrescimento microbológico (LIBÂNIO, 2010). Por consequência, para facilitar o monitoramento da qualidade da água e inibir o desenvolvimento de biofilme, a Portaria 2914 recomenda que a concentração mínima de cloro residual livre seja de 0,2 mg/L.

Pesquisas têm apontado que a reação do cloro com algumas substâncias pode levar à formação de THM, compostos organoclorados que podem causar danos à saúde humana. Além de THM, podem ser formados outros subprodutos da cloração, tais como haloacetonitrilas, halocetonas, clorofenóis, ácidos haloacéticos dentre outros, potencialmente prejudiciais à saúde. Contudo, os riscos sanitários, eventualmente associados a subprodutos da cloração, podem ser

muito menores do que aqueles decorrentes das doenças de veiculação hídrica, caso a água não seja submetida a qualquer método de desinfecção (HELLER; PÁDUA, 2010).

Por outro lado, os subprodutos do cloro são lesivos para o meio ambiente. Segundo Hespanhol, Netto e Botelho (2009), “No estado atual de conhecimento dos efeitos ambientais da aplicação de cloro, há um consenso de que este elemento e seus compostos, principalmente quando aplicados em excesso, são tóxicos aos organismos integrantes dos ecossistemas aquáticos”.

Na Portaria 29140 é estabelecido que após a desinfecção, a água deve conter o teor máximo de cloro residual livre em qualquer ponto do sistema de abastecimento de 2,0 mg/L. Entretanto, para o padrão de potabilidade, estabelece uma concentração máxima maior de 5,0 mg/L, de acordo com (SAÚDE, 2011) no anexo VII. Valor este que será usado nesse estudo.

#### **4.7 Monitoramento da qualidade da água tratada**

A Portaria 2914 do Ministério da Saúde é responsável em fornecer as diretrizes sobre o monitoramento e vigilância da água por meio de planos de amostragem. O número mínimo de amostras e a frequência é variável de acordo com o parâmetro de qualidade. A amostragem deve possuir distribuição uniforme no tempo, representação no espaço e basear-se em princípio estatístico incorporando uma margem de erro/incerteza (HELLER; PÁDUA, 2010).

O plano de amostragem é definido com o objetivo de assegurar a representatividade e a validade das amostras coletadas, ou melhor, a água recolhida deve representar a qualidade da água amostrada, em termos de concentração de componentes examinados. Portanto, para assegurar a importância das amostras, o ponto da amostragem é cuidadosamente determinado, assim como a periodicidade. A frequência de coleta da água tratada para o período estudado e os quatro parâmetros selecionados (cor aparente, turbidez, cloro residual livre e pH) foi realizada de acordo com o Plano de Amostragem para Monitoramento da Qualidade da Água da concessionária (CAGECE, 2007-2017), que obedece a recomendação da Portaria N° 518/04 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2004), vigente até 2011, e posteriormente a Portaria N° 2914/11.

#### **4.8 Lógica *fuzzy***

Aristóteles foi o fundador da lógica e estabeleceu um conjunto de regras rígidas para que as conclusões possam ser válidas. “Desde então, a lógica ocidental, assim chamada, foi binária, ou seja, uma declaração é falsa ou verdadeira, e não pode ser parcialmente verdadeira

e parcialmente falsa” (SOUZA *et al.*, 2008).

A Lógica *fuzzy* viola essas pressuposições. O conceito de dualidade, afirmando que algo pode e deve coexistir com o seu oposto, torna a lógica difusa natural, inclusive inevitável. No entanto, muitas das experiências humanas não podem ser classificadas simplesmente como verdadeiras ou falsas, sim ou não. Uma resposta binária a estas questões é, na sua maioria, incompleta. De fato, entre a certeza e a incerteza, existem infinitos graus. Esta imperfeição inerente à informação representada na linguagem natural foi abordada matematicamente no passado com o uso da teoria da probabilidade.

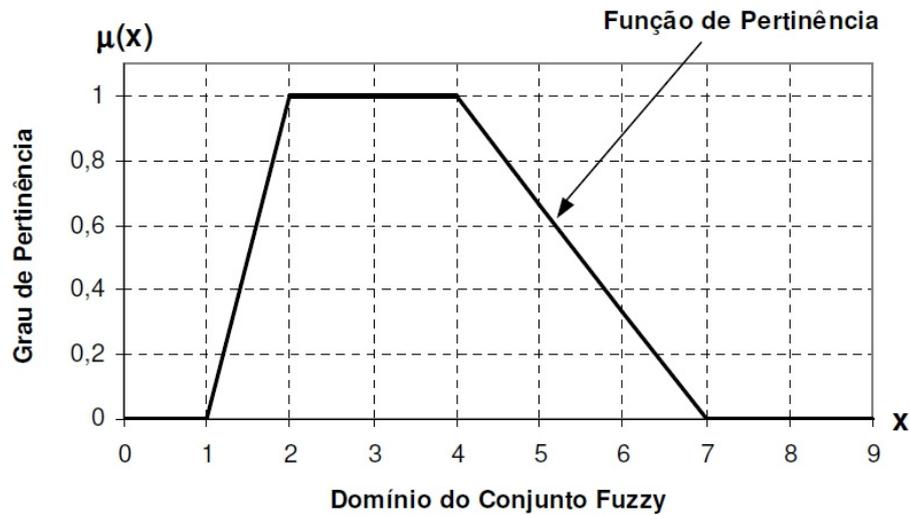
No entanto, a lógica *fuzzy*, baseada na teoria do Conjunto *fuzzy*, mostrou ser mais adequada para ajustar as imperfeições da informação do que a teoria das probabilidades. De forma mais objetiva, a lógica *fuzzy* pode ser vista como uma linguagem que permite traduzir declarações sofisticadas da linguagem natural (como estamos facilmente acostumados a trabalhar) para um formalismo matemático, facilmente manipuladas pelos computadores modernos. Lógica *fuzzy* também pode ser definida como aquela que suporta os modos de raciocínio que são aproximados, em vez de exatos. A lógica *fuzzy* é capaz de lidar com dados ou conhecimentos altamente variáveis, linguísticos, indefinidos e incertos e, portanto, tem a capacidade de permitir uma informação lógica, confiável e transparente (ICAGA, 2007).

#### 4.8.1 Conjunto *fuzzy*

O que define um conjunto *fuzzy* é uma função chamada de função de pertinência. Cada função define um conjunto *fuzzy*  $A$ , do conjunto universal  $U$ , por meio da atribuição de um grau de pertinência  $\mu(x)$ , entre o intervalo  $[0 e 1]$  para cada elemento  $x$  de  $U$ . Este é a condição com o qual  $x$  pertence a  $A$ :

$$\mu_A: U \rightarrow [0,1] \quad (\text{Eq. 1})$$

Um conjunto *fuzzy* é interpretado como a ponte que liga o conceito impreciso à sua modelagem numérica, conferindo a cada indivíduo no universo um valor entre 0 e 1, que representa o grau de pertinência deste indivíduo ao conjunto *fuzzy* (RENTERÍA, 2006).

Figura 2 – Componentes de um conjunto *fuzzy*

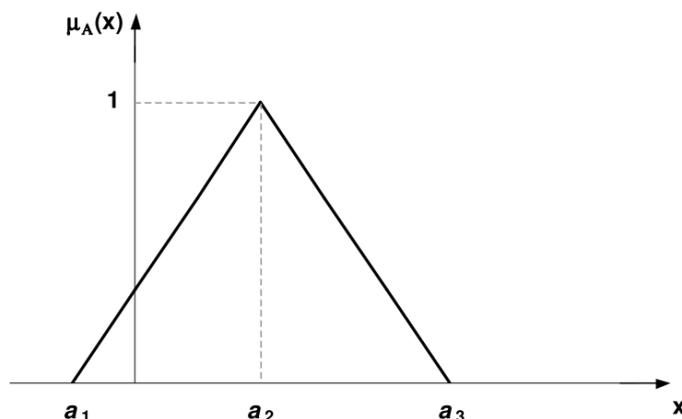
Fonte: Rentería (2006)

#### 4.8.2 Número Fuzzy Triangular (NFT)

O número *fuzzy* triangular é o mais empregado dentre as distintas formas de algoritmos *fuzzy*. É representado por três pontos e expresso por  $A = (a_1, a_2, a_3)$ . Esta representação é interpretada como funções de pertinência:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x < a_1 \\ \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0, & x > a_3 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2})$$

A Figura 3 ilustra um número *fuzzy* triangular: no eixo da abscissa estão os valores da variável,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ . No eixo das ordenadas está representado o grau de pertinência para todo valor de  $x$ . Segundo Rentería (2006) “O número *fuzzy* triangular é utilizado quando o parâmetro em análise possui uma faixa de variação e um número dentro desta faixa possui uma possibilidade de ocorrência num único pico maior do que os outros”.

Figura 3 – Número *Fuzzy* triangular (NFT)

Fonte: Rentería (2006)

#### 4.9 Análise de Garantia e Risco de Falha

A construção de uma ETA não é garantia de produção de água potável. A técnica de tratamento deve ser apropriada à água do manancial; além disso, a estação precisa ser projetada, construída e operada corretamente (HELLER; PÁDUA, 2010). Se a técnica de tratamento de água escolhida não for a correta, o investimento pode ser em vão. A incerteza de fatores climáticos e ambientais também podem produzir alterações nas características dos mananciais, gerando riscos de falhas na operação.

Existe um crescente consenso entre os profissionais de saneamento de que o desempenho das estações e o grau de incerteza é um componente crítico do projeto e de operação. No entanto, modelos e simuladores utilizados por engenheiros e operadores não incorporam métodos para avaliar a incerteza associada a cada projeto. Assim, os engenheiros combinam frequentemente fatores de segurança com resultados de simulação de forma arbitrária baseada na experiência de projeto.

Os sistemas de abastecimento de água (SAA) são complexos e dinâmicos. São compostos por inúmeras variáveis, como qualidade da água bruta, clima, operação. Tais interações complexas e interdependências transcendem várias fontes de incerteza durante o processo. Como resultado, há um risco de não atender ao nível esperado de desempenho do sistema. É enganoso entender que design, projeto, implementação, operação e manutenção são suficientemente adequados para que um SAA seja livre de riscos e falhas. Obviamente, essas etapas são essenciais, mas não suficientes, para garantir a proteção da saúde necessária.

Análise de confiabilidade de uma ETA pode ser avaliada a partir de três aspectos

principais: confiabilidade, robustez e resiliência. A garantia é a probabilidade de uma ETA atender aos padrões de água potável ou metas de limite durante um período específico de tempo. A robustez pode ser definida como a capacidade da planta de produzir água de alta qualidade, atendendo aos padrões de água potável, apesar da qualidade da água bruta e condições operacionais. Por fim, a resiliência é a velocidade em que a ETA retorna ao seu desempenho anterior (produzindo água de alta qualidade) após uma falha geralmente devido a uma piora súbita na qualidade da água bruta ou a um problema operacional, por exemplo.

De uma forma geral, quando uma falha ocorre compromete tanto a confiabilidade como a robustez. Um sistema possui garantia total quando ele é capaz de desempenhar a função para o qual ele foi projetado sem nenhuma falha.

$$\textit{Garantia} = 1 - \textit{Probabilidade de falha} \times 100 \quad (\text{Eq. 3})$$

## 5 METODOLOGIA

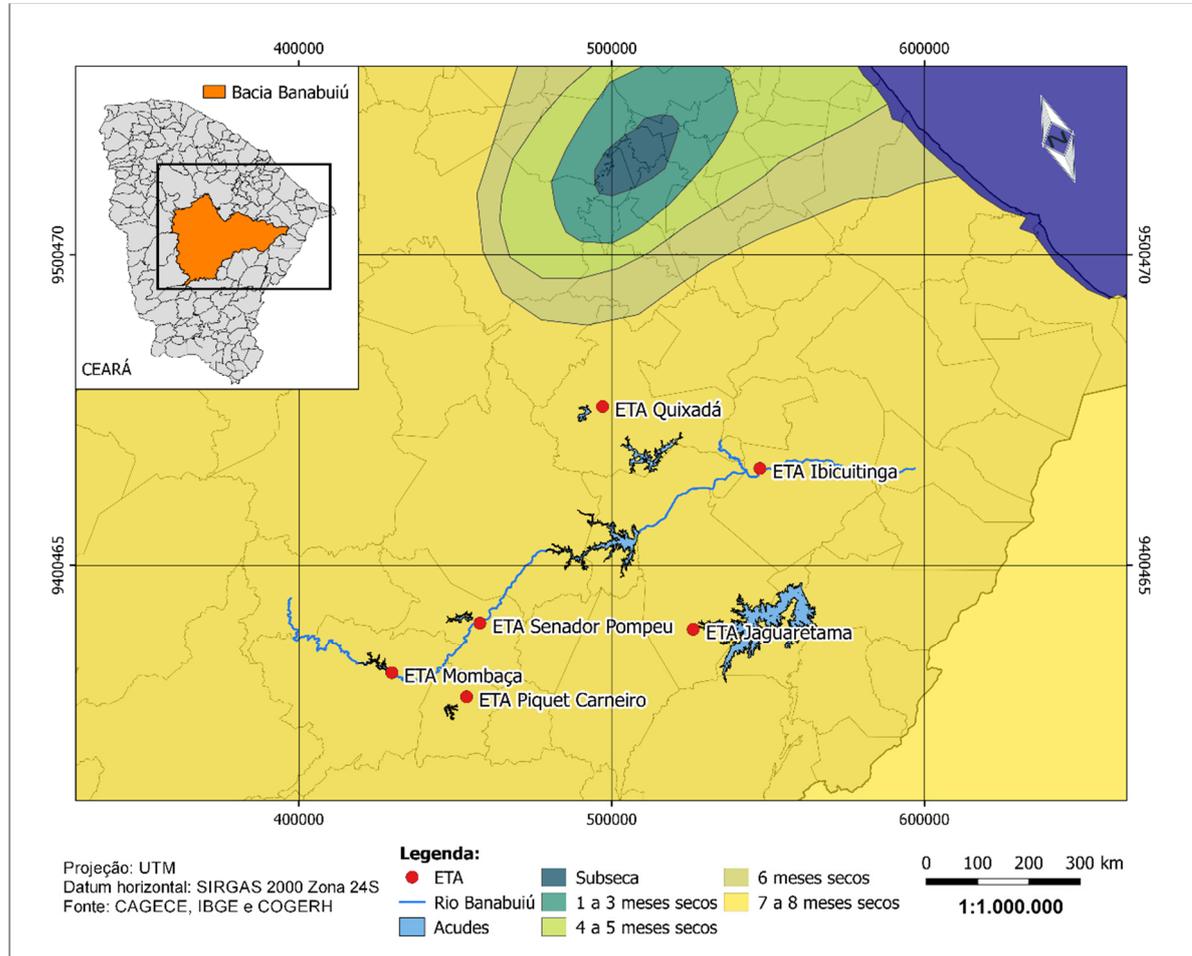
### 5.1 Sistemas de Tratamento de Água

Para efeitos de comparação e análise, foram escolhidos para este estudo dois tipos de tecnologia de tratamentos de água – Filtração Direta Ascendente e Ciclo Completo. Cada tecnologia está representada por três Estações de Tratamento de Água, totalizando 6 (seis) sistemas (Tabela 2). As estações selecionadas estão localizadas no sertão central do Ceará, na região do semiárido com distribuição de umidade de 7 a 8 meses secos (Figura 4). A maior parte da área está inserida na Região Hidrográfica da Bacia do Banabuiú, fortemente submetida aos rigores da semiaridez (CAEAE, 2009b). A bacia apresenta ainda rios e riachos intermitentes com sazonalidade média à elevada e baixo potencial de águas subterrâneas.

Tabela 2 – Relação das ETA selecionadas no estudo

	<b>ESTAÇÃO</b>	<b>LIGAÇÕES</b>	<b>VAZÃO (M3/H)</b>	<b>TECNOLOGIA</b>
<b>1</b>	ETA Quixadá	17359	600	FD Ascendente
<b>2</b>	ETA Mombaça	6498	150	Ciclo Completo
<b>3</b>	ETA Senador Pompeu	5060	120	FD Ascendente
<b>4</b>	ETA Jaguaretama	3468	120	Ciclo Completo
<b>5</b>	ETA Ibicuitinga	3238	120	Ciclo Completo
<b>6</b>	ETA Piquet Carneiro	2677	120	FD Ascendente

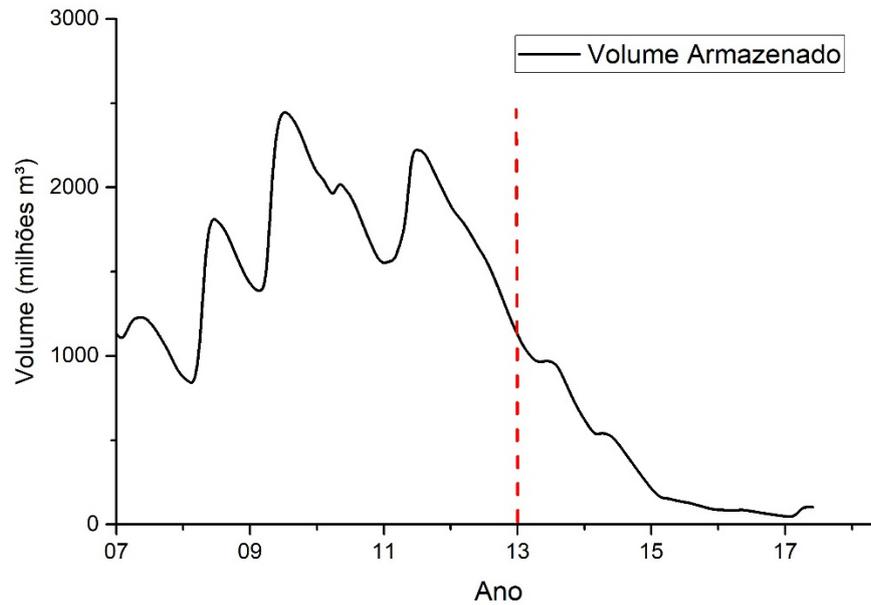
Figura 4 – Localização das ETA selecionadas no estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

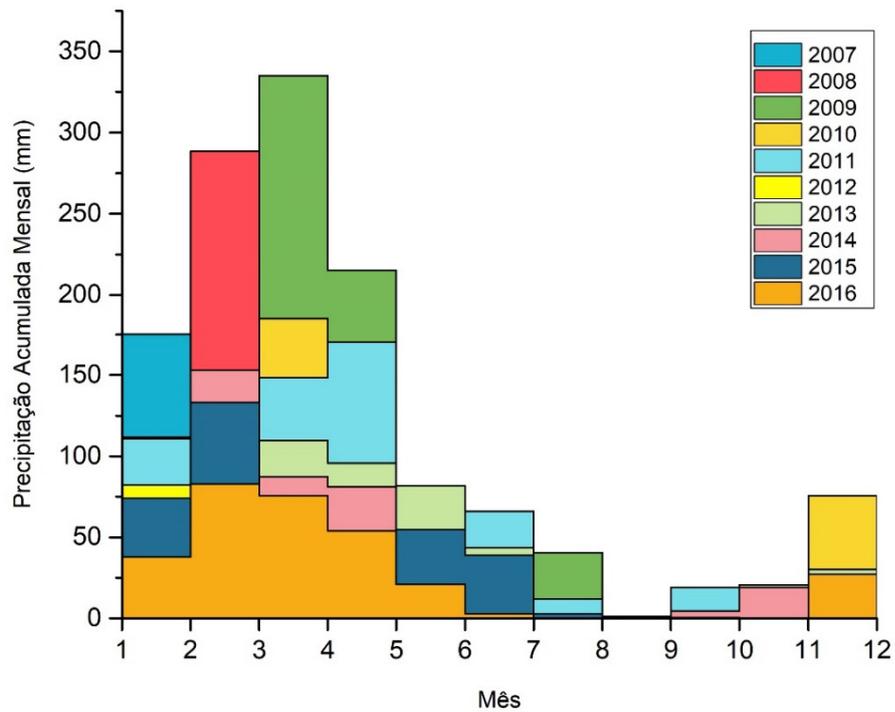
Cada ETA teve avaliada sua qualidade de tratamento para um intervalo semestral e cíclico, do período de janeiro de 2007 a junho de 2017. O período cíclico foi determinado com base na precipitação observada e na evolução do volume armazenado dos reservatórios da região hidrográfica da Bacia do Banabuiú (Figuras 5 e 6). O primeiro período cíclico abrangeu os anos com chuvas regulares, definido de 2007 a 2012 e o segundo, o período de seca, de 2013 a 2017 (até o momento).

Figura 5 – Evolução do volume armazenado dos reservatórios da bacia do Banabuiú



Fonte: COGERH (2017)

Figura 6 – Precipitação observada na região da bacia do Banabuiú.



Fonte: FUNCEME (2017).

A qualidade avaliada refere-se à garantia em conformidade com a norma vigente para o efluente final ou água tratada/potável. Como a filtração direta ascendente e ciclo completo possuem eficiências distintas, seus sistemas também serão examinados isoladamente.

## 5.2 Parâmetros analíticos de monitoramento

Para os dois tipos de tratamentos abordados, foram considerados os seguintes parâmetros de monitoramento: potencial hidrogeniônico (pH), cor aparente, turbidez e cloro residual livre. As coletas foram realizadas de acordo com o Plano de Amostragem para Monitoramento da Qualidade da Água da CAGECE – Companhia de Água e Esgoto do Ceará, conforme Portarias MS 518/04 e MS 2914/2011 no período de entre janeiro de 2007 a junho de 2017. Foram utilizadas um total de 709.833 análises para este intervalo.

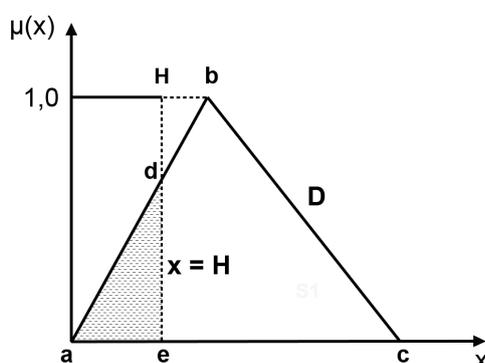
## 5.3 Enfoque do estudo

As garantias dos sistemas de tratamento de água foram analisadas de acordo com o método do Índice de Concordância *Fuzzy* (ICF) através de números difusos *fuzzy*.

### 5.3.1 Índice de Concordância *Fuzzy* (Icf)

A concordância entre números *fuzzy* é uma relação entre as áreas de interseção entre dois números difusos, ou entre um difuso e um não difuso (SILVA, 2010 *apud* KAUFERNANN; GUPTA, 1991). No último caso, o número não difuso ( $x$ ) pode ser contínuo em um intervalo definido à esquerda, quando  $x \leq H$  ou à direita em que  $x \geq H$ .

Figura 7 – Índice de Concordância *Fuzzy* entre um número difuso (D) e outro não difuso (H) contínuo à esquerda.



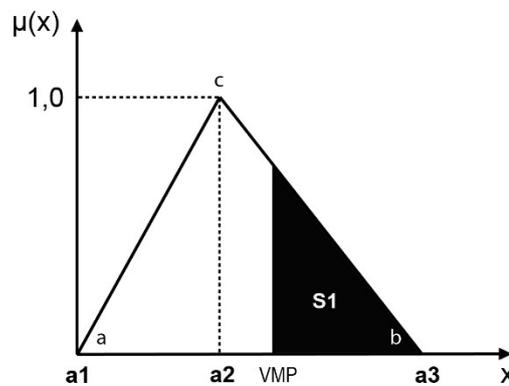
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A definição do Índice de Concordância *Fuzzy* ( $I_{CF}$ ) é dada pela expressão da Equação 4, com base na Figura 7:

$$I_{CF} = \frac{\text{Área do } \Delta ade}{\text{Área do } \Delta adc} \quad (\text{Eq. 4})$$

Para os parâmetros de cor aparente e turbidez, que apresentam pela norma somente limites máximos, os Números *Fuzzy* Triangulares (Figura 8) foram formados pelos valores mínimos ( $a_1$ ), médios ( $a_2$ ) e máximos ( $a_3$ ), e delimitaram uma área triangular de altura  $\mu=[0,1]$  no eixo das ordenadas e o valor limite definido pela Portaria 2914 (VMP – Valor Máximo Permitido) que fez a função do número não difuso. O Índice de Concordância *Fuzzy* foi calculado pela razão entre a área  $S_1$  e a área do triângulo  $\Delta acb$  ( $S_t$ ) segundo a Equação 5.

Figura 8 – Índice de Concordância *Fuzzy* ( $I_{CF}$ ) entre um número difuso e o VMP como número não difuso.

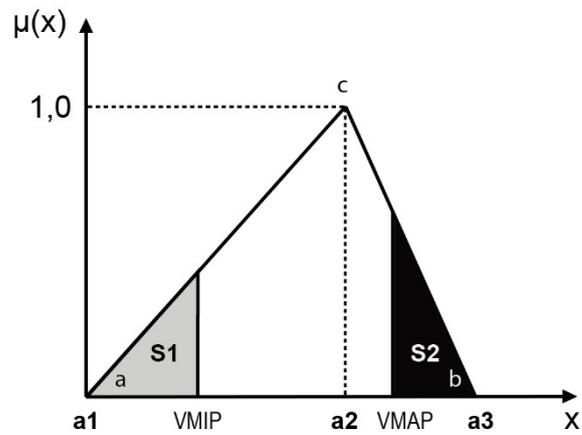


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

$$I_{CF} = 1 - \left( \frac{S_1}{S_t} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Os parâmetros de pH e cloro residual livre de acordo com a norma têm limites mínimos e máximos. Por conseguinte, os Números *Fuzzy* Triangulares foram compostos pelo valor mínimo permitido (VMIP) e o valor máximo permitido (VMAP), conforme a Figura 9:

Figura 9 – Representação das áreas de interseção entre Números *Fuzzy* Triangulares e os valores limites mínimo e máximo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

O  $I_{CF}$  foi calculado dividindo-se a área da soma de  $S_1$  e  $S_2$  pela área total do triângulo  $\Delta acb$  ( $S_t$ ) conforme a Equação 6:

$$I_{CF} = 1 - \left( \frac{S_1 + S_2}{S_t} \right) \quad (\text{Eq. 6})$$

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o cálculo da garantia dos sistemas em estudo foram utilizados os valores limites estipulados pela Portaria MS 2914/11. Para o pH, o intervalo de 6,0 a 9,5. Em termos de cor aparente, a Portaria cita somente que o VMP para é de 15,0 uH. Já o VMP de turbidez para a água é de 0,5 uT na saída da ETA. Referente a desinfecção da água por cloração, foi considerado o limite máximo de cloro residual livre na saída do tanque de contato, o VMP para potabilidade de 5mg/L, de acordo com o ANEXO VII da Portaria. A Tabela 3 apresenta uma síntese dos valores recomendados na saída do tratamento que foram adotados no cálculo.

Tabela 3 – Valores recomendados para cada parâmetro

PARÂMETRO	VALOR MÍNIMO	VALOR MÁXIMO
PH	6,0	9,5
COR APARENTE (UH)	-	15
TURBIDEZ (UT)	-	1,0 <sup>1</sup> e 0,5
CLORO RESIDUAL LIVRE (MG/L)	0,25 e 0,5 <sup>1</sup>	5

Fonte: <sup>1</sup>Portaria 518 (2004) e Portaria 2914 (2011)

Após a elaboração dos cálculos para o Índice de Concordância *Fuzzy* descritos no item 5.3.1. Para a visualização do comportamento dos parâmetros na estação chuvosa, seca e nos períodos cíclicos, foi calculada a média dentro de cada estação e obtidos os resultados de garantia são apresentados na Tabela 4 a 6.

Para uma avaliação comparativa dos resultados do Icf, foi realizado uma análise de correlação de Pearson entre os dados de precipitação acumulada mensal, volume armazenado nos reservatórios da bacia do Banabuiú (obtidos na Funceme e Cogerh, respectivamente), cor aparente e turbidez. Os resultados foram incluídos na Tabela 7 (Gráficos no Apêndice).

Tabela 4 – Garantias dos parâmetros analisados para as ETA em estudo, em função do período hidrológico

N	Estação	Índice de Concordância <i>fuzzy</i> (Icf)				Período	Média	Média GERAL
		pH	Cor	Turbidez	CRL			
E1	ETA Senador Pompeu	99,70	61,95	5,07	71,35	Chuvoso	59,52	64,76
		99,67	86,54	10,28	85,59	Seco	70,52	
		99,66	71,09	6,08	67,54	07-12	61,09	
		99,71	77,09	9,51	92,25	13-17	69,64	
E2	ETA Jaguaretama	79,52	28,08	2,52	93,89	Chuvoso	51,00	56,73
		94,55	60,58	11,90	85,13	Seco	63,04	
		76,68	53,03	10,75	82,04	07-12	55,63	
		100,00	30,92	1,96	99,95	13-17	58,21	
E3	ETA Quixadá	100,00	56,76	4,23	46,35	Chuvoso	51,84	50,23
		95,17	61,67	3,31	33,73	Seco	48,47	
		95,98	50,22	4,25	21,91	07-12	43,09	
		100,00	70,94	3,20	64,91	13-17	59,76	
E4	ETA Mombaça	88,90	15,36	0,53	48,01	Chuvoso	38,20	37,44
		95,12	17,63	0,48	33,20	Seco	36,61	
		95,93	23,08	0,89	19,16	07-12	34,76	
		86,44	7,59	0,00	70,02	13-17	41,01	
E5	ETA Ibicuitinga	100,00	55,73	13,21	80,71	Chuvoso	62,41	67,86
		100,00	82,44	33,61	79,32	Seco	73,84	
		100,00	84,16	33,57	78,43	07-12	74,04	
		100,00	47,50	8,74	82,21	13-17	59,61	
E6	ETA Piquet Carneiro	98,59	49,05	24,85	78,80	Chuvoso	62,82	67,18
		97,17	65,97	38,93	85,82	Seco	71,97	
		97,74	76,94	53,63	98,06	07-12	81,59	
		98,15	30,67	2,12	60,92	13-17	47,96	

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Tabela 5 – Garantias médias dos parâmetros analisados, em função do período hidrológico

Período	MÉDIA DAS ESTAÇÕES (ICF %)				Média (%)
	pH	Cor	Turbidez	CRL	
Sazonal Chuvoso	94,45	44,49	8,40	69,85	<b>54,30</b>
Sazonal Seco	96,94	62,47	16,42	67,13	<b>60,74</b>
Chuvas Regulares (07-12)	94,33	59,75	18,19	61,19	<b>58,37</b>
Estiagem (13-17)	97,85	48,83	4,38	78,01	<b>57,27</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Tabela 6 – Garantias médias dos parâmetros analisados, em função da tecnologia de tratamento e tipo de captação

Período	MÉDIA DAS ESTAÇÕES CICLO COMPLETO (ICF)				Média (%)
	pH	Cor	Turbidez	CRL	
<i>Sazonal Chuvoso</i>	89,47	33,06	5,42	74,20	<b>50,54</b>
<i>Sazonal Seco</i>	96,55	53,55	15,33	65,89	<b>57,83</b>
<i>Chuvas Regulares (07-12)</i>	90,87	53,42	15,07	59,88	<b>54,81</b>
<i>Estiagem (13-17)</i>	95,48	28,67	3,57	84,06	<b>52,94</b>
	MÉDIA DAS ESTAÇÕES FD ASCENDENTE (ICF)				
	pH	Cor	Turbidez	CRL	
<i>Sazonal Chuvoso</i>	99,43	55,92	11,39	65,50	<b>58,06</b>
<i>Sazonal Seco</i>	97,34	71,39	17,51	68,38	<b>63,65</b>
<i>Chuvas Regulares (07-12)</i>	97,79	66,08	21,32	62,50	<b>61,92</b>
<i>Estiagem (13-17)</i>	99,29	59,56	4,94	72,70	<b>59,12</b>
	MÉDIA DAS ESTAÇÕES CAPTAÇÃO SUPERFICIAL (ICF)				
	pH	Cor	Turbidez	CRL	
<i>Sazonal Chuvoso</i>	93,07	48,93	3,94	70,53	<b>54,12</b>
<i>Sazonal Seco</i>	96,46	69,60	8,50	68,15	<b>60,68</b>
<i>Chuvas Regulares (07-12)</i>	90,77	58,11	7,03	57,17	<b>53,27</b>
<i>Estiagem (13-17)</i>	99,90	59,65	4,89	85,70	<b>62,54</b>
	MÉDIA DAS ESTAÇÕES CAPTAÇÃO MISTA <sup>1</sup> (ICF)				
	pH	Cor	Turbidez	CRL	
<i>Sazonal Chuvoso</i>	95,83	40,04	12,86	69,17	<b>54,48</b>
<i>Sazonal Seco</i>	97,43	55,35	24,34	66,11	<b>60,81</b>
<i>Chuvas Regulares (07-12)</i>	97,89	61,39	29,36	65,22	<b>63,46</b>
<i>Estiagem (13-17)</i>	94,86	28,59	3,62	71,05	<b>49,53</b>

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Constata-se com essas informações que o sistema E5 possui água em melhores condições de tratabilidade, quando comparado aos demais. Ainda analisando a Tabela 4 pode-se afirmar que o pH é o parâmetro com melhor desempenho e maior regularidade, obtendo garantias elevadas acima de 94%. A precipitação e pH mostraram uma relação inversa. Isto se deu em razão de nos períodos chuvosos, a precipitação tende a causar uma discreta diminuição do pH, devido à chuva ácida que transporta poluentes gasosos presentes no vapor d'água da atmosfera (LIBÂNIO, 2010).

Observa-se que o índice de garantia da cor aparente foi superior no período sazonal seco, período em que a qualidade água bruta apresenta baixa variabilidade e, geralmente, melhor qualidade. Como seria de esperar, para as ETA abastecidas por mananciais de superfície,

<sup>1</sup> Superficial e Subterrânea

o período chuvoso aumenta o carreamento de substâncias passíveis de cor e turbidez às águas brutas. Analisando os gráficos de dispersão, também se observou uma expressiva correlação entre cor aparente e turbidez da água ( $R \approx 85\%$  Figura 12), um indicativo de que a cor verdadeira é baixa nos sistemas estudados (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

Tabela 7 – Correlação entre parâmetros, precipitação e volume

	Correlação		
	Volume	Precipitação	Turbidez
Turbidez	-0,499	0,211	-
Cor Aparente	-0,706	-	0,849

Fonte: Elaborado pelo autor (2017).

A turbidez foi o parâmetro que apresentou o pior desempenho dos quatro parâmetros, sobretudo na estação chuvosa e no ciclo de estiagem, apresentando um índice de garantia de 8,40% e 4,38%, respectivamente. Segundo Richter e Netto (1991) a clarificação da água torna-se mais complexa com o aumento da turbidez ocasionada por chuvas. A influência da precipitação na qualidade da água também foi confirmada por Libânio (2010).

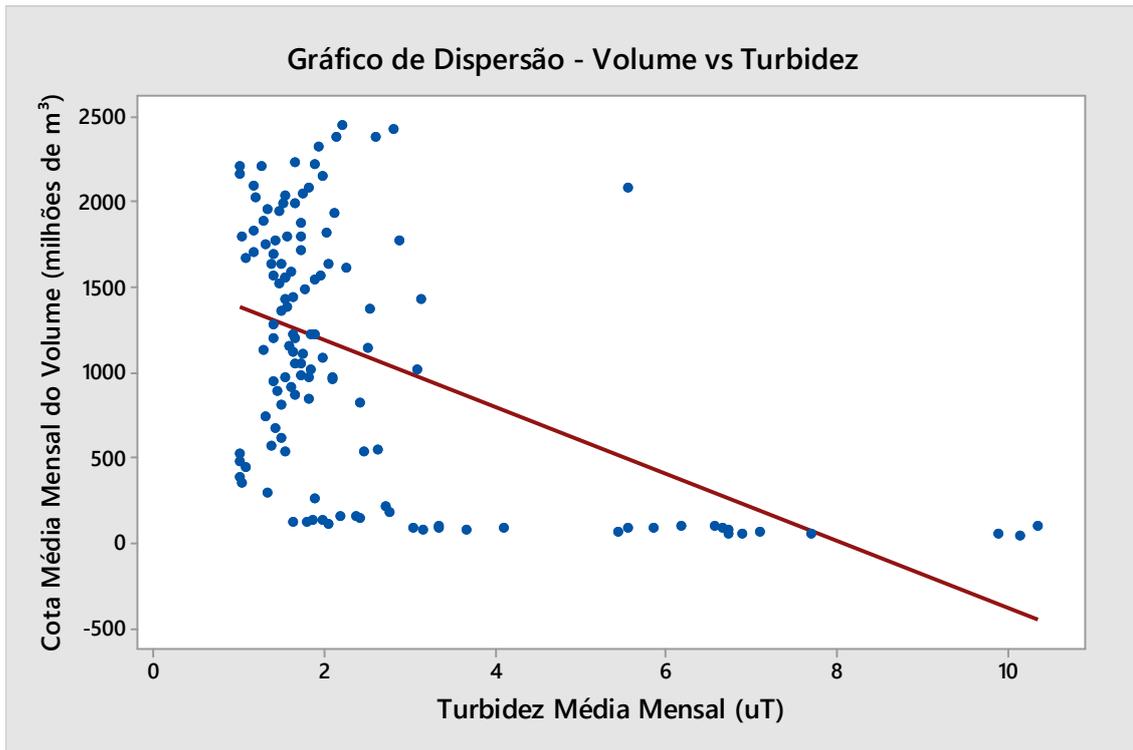
Segundo Jeppesen *et al.* (2015), os reservatórios artificiais no semiárido do nordeste apresentam variações sazonais no volume de água e concentrações crescentes de nutrientes com diminuição do nível de água. Além disso, os altos níveis de turbidez ocorrem devido a ressuspensão do sedimento por vento e peixes. Essa relação pôde ser corroborada através do coeficiente de correlação linear inversa do volume armazenado de  $R \approx 50\%$  e  $R \approx 70\%$  entre a turbidez e a cor aparente, respectivamente.

Frequentemente, a turbidez da água bruta de mananciais superficiais não represados indica variações significativas entre períodos de chuva e estiagem, o que exige atenção na operação da ETA (HELLER; PÁDUA, 2010).

Para o parâmetro cloro residual livre, os Índices de Concordância *Fuzzy* apresentaram valores satisfatórios para todos os períodos. Porém, os resultados divergiram em relação aos outros parâmetros no período de estiagem, apresentando um aumento de desempenho significativo. O aumento na garantia pode ter acontecido devido uma maior demanda de cloro na oxidação/desinfecção da água de alta turbidez, limitando a concentração residual na saída, evitando ultrapassar o valor máximo permitido.

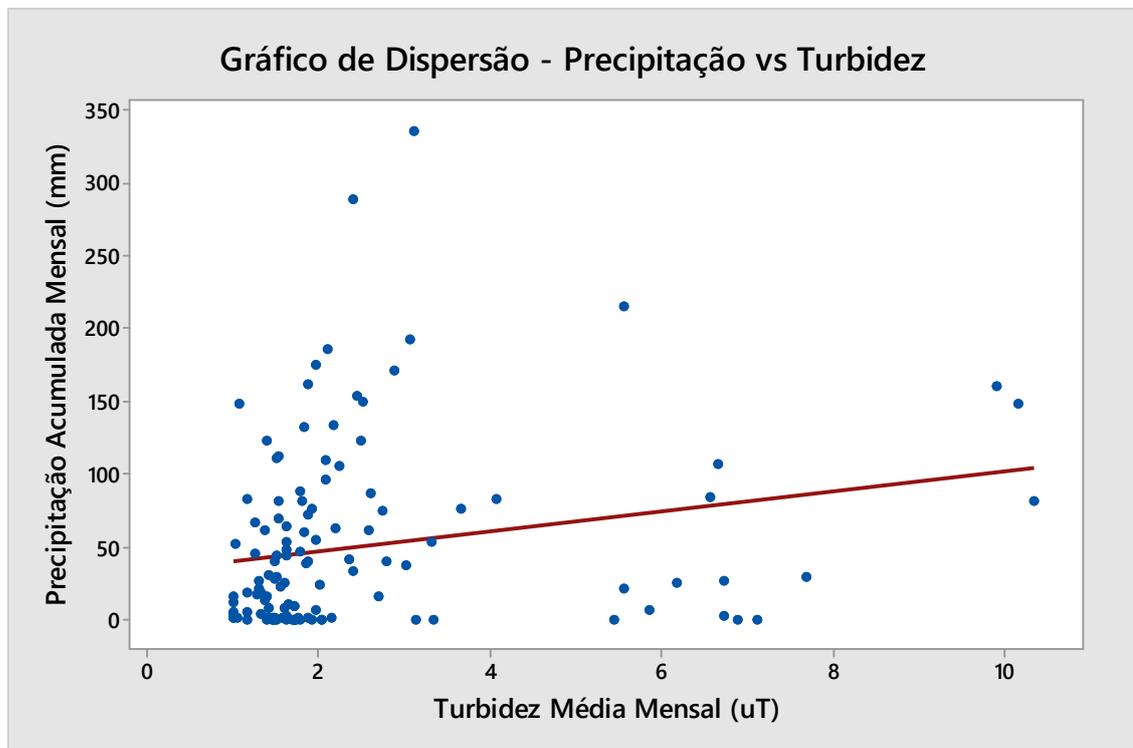
Por fim, as estações com filtração direta ascendente apresentaram melhor desempenho que as de ciclo completo em todos os períodos examinados, demonstrando ser uma escolha de tecnologia mais robusta para as condições climáticas e mananciais da região.

Figura 10 – Gráfico de correlação entre volume armazenado e turbidez



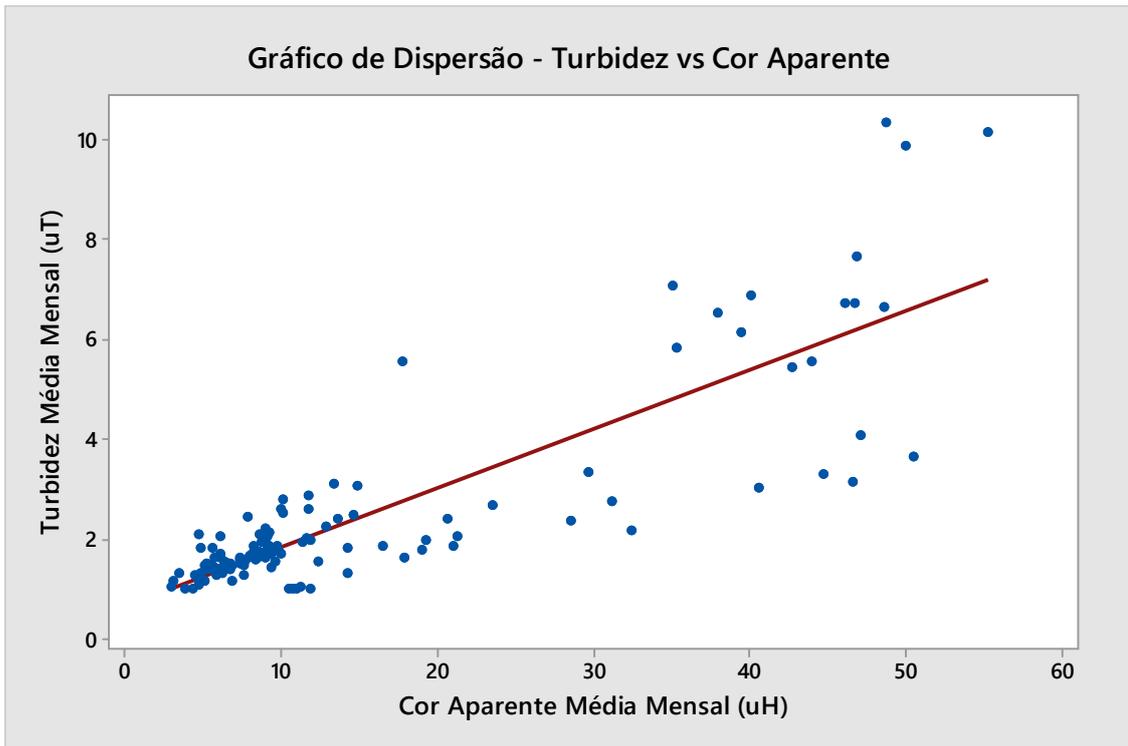
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 11 – Gráfico de correlação entre precipitação e turbidez



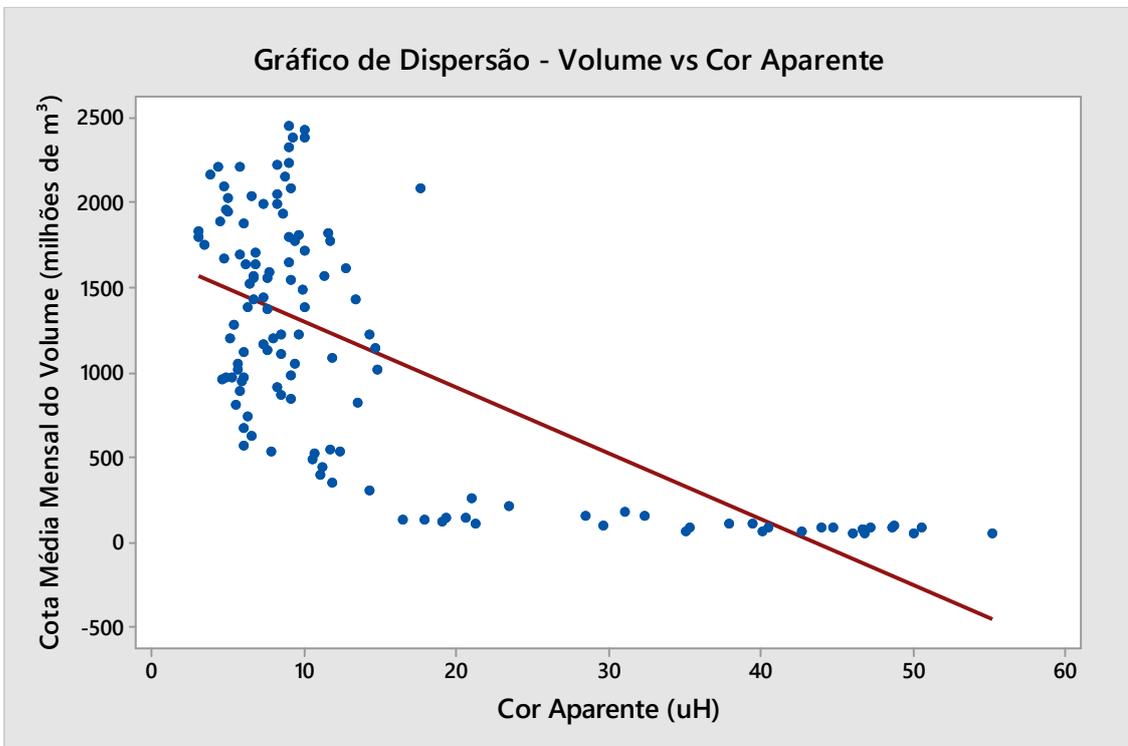
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 12 – Gráfico de correlação entre turbidez e cor aparente



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 13 – Gráfico de correlação entre volume armazenado e cor aparente



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

## 7 CONCLUSÃO

A metodologia proposta comportou-se de forma adequada, revelando-se viável, versátil e de fácil utilização, capaz de avaliar a garantia das ETA. O presente trabalho permitiu concluir que a qualidade da água distribuída à população apresentou resultados indesejáveis. Os períodos de seca e chuva influenciam a garantia da qualidade dos parâmetros analisados, sobretudo em termos de turbidez e cor aparente, que se mostraram mais sensíveis à estiagem. Isso indica que a garantia da qualidade da água tratada foi influenciada pelos períodos sazonais e cíclico para os parâmetros estudados não atendendo as exigências normativas.

Apesar da limitação do tamanho da amostra de 6 estações de tratamento, a aplicação do Icf apontou uma suscetibilidade aos efeitos sazonais da qualidade da água, recomendando-se este método como instrumento de avaliação da tratabilidade da água nas estações de tratamento. A redução do nível da água do reservatório pode ter deteriorado a qualidade de água bruta comprometendo a eficiência do tratamento. A crise hídrica que afeta o semiárido cearense parece refletir não somente no aspecto quantitativo da disponibilidade de água como também no seu aspecto qualitativo. A qualidade da água tende a ficar mais comprometida a medida que a quantidade nos reservatórios se aproxima do volume morto. No que diz respeito a tecnologia de tratamento, a filtração direta ascendente mostrou-se mais eficiente do que o tratamento de ciclo completo frente às variações climáticas.

Pode-se dizer, portanto, que os modelos de NFT é uma alternativa sólida na avaliação da garantia da qualidade da água nas estações de tratamento, já que se pode obter melhor controle dos processos operacionais, bem como o fornecimento de informações para uma melhor gestão. Da mesma maneira que o Índice de Concordância *Fuzzy* confere maior flexibilidade com relação às futuras adaptações em função das normas, favorecendo sua aplicação pelos supervisores dos sistemas de tratamento de água.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Uso adicional de dados de um número maior de ETA, em bacias diferentes por um período mais longo;
- Uso de ferramenta SIG para cruzamento e sobreposição de dados espaciais e climáticos;
- Avaliação de uma quantidade maior de parâmetros, principalmente microbiológicos.

## 8 REFERÊNCIAS

- CAEAE. **Plano Estratégico dos Recursos Hídricos do Ceará**. Fortaleza: Inesp - Instituto de Estudos e Pesquisas para o Desenvolvimento do Estado do Ceará, 2009a.
- CAEAE. **Caderno Regional da Sub-bacia do Banabuiú Vol. 2**. Fortaleza: Inesp - Instituto de Estudos e Pesquisas para o Desenvolvimento do Estado do Ceará, 2009b.
- CAGECE. **Plano de Amostragem para Monitoramento da Qualidade da Água**. Fortaleza: [s.n.].
- CRITTENDEN, J. C. et al. **MWH's Water Treatment: Principles and Design: Third Edition**. [s.l: s.n.].
- CUNHA, A. Determinação do pH ótimo de floculação e dosagem mínima de coagulantes. **Revista DAE**, p. 10, 1975.
- DI BERNARDO, L. **Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta**. Rio de Janeiro: Projeto PROSAB, 2003.
- DIAS, B. F. **Garantia da qualidade de efluentes de tanques sépticos/filtros anaeróbios e de reatores uasb – avaliação com número fuzzy triangular e índice de concordância**. Fortaleza: Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2016.
- HELLER, L.; PÁDUA, V. L. DE. **Abastecimento de Água para Consumo Humano**. 2ª ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.
- HESPAHOL, I.; NETTO, J. M. D. A.; BOTELHO, M. H. C. Usos do Cloro na Engenharia Sanitária e Ambiental - Novas Tecnologias de Aplicação e Quantificação dos Impactos Associados. **Revista DAE**, p. 11, 2009.
- ICAGA, Y. Fuzzy evaluation of water quality classification. **Ecological Indicators**, v. 7, n. 3, p. 710–718, 2007.
- JEPPESEN, E. et al. Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. **Hydrobiologia**, v. 750, n. 1, p. 201–227, 2015.
- KAUFRNANN, A.; GUPTA, M. M. **Introduction to fuzzy arithmetic: Theory and applications**. Nova Iorque: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- LETTERMAN, R. D. **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. Michigan: McGraw-Hill, 1999.
- LIBÂNIO, M. **Fundamento de Qualidade e Tratamento de Água**. 3ª Edição ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria MS Nº 518/2004**. [s.l: s.n.].
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria MS Nº 2914/2011**. [s.l: s.n.].

- OLIVEIRA, M. D. DE et al. Nova abordagem do Índice de Qualidade de Água Bruta utilizando a Lógica Fuzzy. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 361–372, dez. 2014.
- PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. [s.l.] ABES, 2006.
- REBOUÇAS, A. DA C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, uso e conservação**. 3ª ed. São Paulo: Escrituras Editora, 2017.
- RENTERÍA, A. R. **Estimación de probabilidade fuzzy a partir dos dados imprecisos**. Rio de Janeiro: MAXWELL, 2006.
- RIBEIRO, W. C. **Geografia Política da Água**. 1ª ed. São Paulo: Annablume, 2008.
- RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. DE A. **Tratamento de Água: Tecnologia atualizada**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 1991.
- SILVA, F. J. A. DA. Índice de concordância e risco fuzzy na avaliação do desempenho de sistemas de lagoas de estabilização. 18 out. 2010.
- SOUZA, A. P. DE et al. **Lógica Difusa**. Florianópolis: [s.n.].
- TCHOBANOGLIOUS, G. et al. **Princípios de Tratamento de Água**. São Paulo: Cengage do Brasil, 2016.
- VON SPERLING, M. **Introdução à Aualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3ª ed. Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, 2005. v. I