



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS DE PALMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO
PROFISSIONAL EM ENGENHARIA EMBIENTAL

ADALCINO FERNANDES REIS NETO

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO CARVÃO
ATIVADO PULVERIZADO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE
MATERIA ORGÂNICA NO TRATAMENTO DE ÁGUA EM CICLO
COMPLETO**

Palmas/TO
2020

ADALCINO FERNANDES REIS NETO

**INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO CARVÃO
ATIVADO PULVERIZADO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE
MATERIA ORGÂNICA NO TRATAMENTO DE ÁGUA EM CICLO
COMPLETO**

Dissertação apresentada ao Programa Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Foi avaliada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental e aprovada em sua forma final pelo orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr Emerson Adriano Guarda

Palmas/TO
2020

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistemas de Biblioteca da Universidade Federal do Tocantins**

R377i Reis Neto, Adalcino Fernandes

Influência das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado na eficiência de remoção de matéria orgânica no tratamento de água em ciclo completo. / Adalcino Fernandes Reis Neto. – Palmas - TO, 2020.

106 f.

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) Profissional em Engenharia Ambiental, 2020.

Orientador: Emerson Adriano Guarda

1. Tratamento de água em ciclo completo. 2. Matéria Orgânica. 3. Carvão Ativado. 4. Dosagem. 5. Tempo de Contato

CDD 628

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (**Lei nº 9.610/98**) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

FOLHA DE APROVAÇÃO

ADALCINO FERNANDES REIS NETO

INFLUÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DO CARVÃO ATIVADO
PULVERIZADO NA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE MATERIA ORGÂNICA NO
TRATAMENTO DE ÁGUA EM CICLO COMPLETO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Nível Mestrado Profissional, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental. A presente dissertação foi aprovada pela Banca Examinadora composta pelos membros abaixo relacionados:

BANCA EXAMINADORA

Dr. Emerson Adriano Guarda
Universidade Federal do Tocantins
(Presidente)

Dr. Marcelo Mendes Pedroza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
(Membro titular interno)

Dra. Alice Rocha de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins
(Membro titular externo)

Aprovada em: 21 de agosto de 2020

O evento foi realizado por meio de vídeo conferência, conforme Art. 56-A da Resolução nº 13, de 22 de março de 2017, pela necessidade cautelar de distanciamento social em virtude da pandemia causada pelo coronavírus (SARS-CoV-2).

*“Dedico esta dissertação à minha mãe, Marise
Ferreira Reis, meu pai, Adalberto Fernandes
Reis, e minha esposa, Juliana Fernandes, e
filhos Sofia Fernandes e Artur Fernandes por
me ensinarem a sempre fazer meu melhor.”*

AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar a dádiva da vida e sempre olhar por mim em todos os momentos.

A meus pais Adalberto Fernandes e Marise Ferreira, que pelo seu amor e sabedoria, despertaram em mim a vontade de fazer o bem e de sempre aprender mais, e à minha Vanessa Ferreira.

À minha esposa Juliana Fernandes, e filhos Sofia Fernandes e Artur Fernandes pela compreensão e amor dedicados a mim.

À minha família, sobretudo aos meus avós, pelo carinho.

Aos meus grandes e verdadeiros amigos, todos sabem a importância que cada um tem na minha vida como pessoa.

Aos meus colegas de trabalho pela convivência e companheirismo.

A meu orientador, Prof. DSc. Emerson Adriano Guarda e aos professores DSc Giuliano Guimarães, DSc Sergio Carlos e DSc Angela Dibernado, pelo apoio e orientação a realização deste trabalho e pelo exemplo de profissionalismo.

A todos os professores do curso do Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental.

Aos profissionais Rodrigo Folha, Roberto Duarte, Averlange, Nathalia e Mikaely pelo apoio na realização dos ensaios e análises laboratoriais.

Aos amigos do LAPEQ - Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e de Bicombustíveis.

Ao corpo técnico do Laboratório de Controle de Águas de Palmas da BRK Ambiental e do Sistema de Abastecimento de Água de Xinguara/PA.

À BRK Ambiental pelo apoio financeiro e logístico necessário ao desenvolvimento da pesquisa.

RESUMO

NETO, A.F.R.; **Influência das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado na eficiência de remoção de matéria orgânica no tratamento de água em ciclo completo**. 2020. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Tocantins, Palmas.

Atualmente há evidente concentração de matéria orgânica em cursos de água e/ou reservatórios de água que recebem aportes de esgotos domésticos e efluentes industriais não tratados, que sofrem impactos de períodos prolongados de estiagem, e que tenham condições naturais adequadas para ocorrências matéria orgânica natural. As consequências podem ser a eutrofização de corpos d'água, com ocorrência de florações, que levam a problemas, como sabor e odor, aumento da formação de subprodutos indesejados da cloração, interferências no processo de tratamento da água, aumento do consumo de produtos químicos, além de corrosão de unidades do sistema de abastecimento. Grande parte dos sistemas de tratamento de água, incluindo aqueles com tecnologia de ciclo completo, não conseguem remover matéria orgânica natural. Uma das alternativas empregada nas ETAs para remoção de material orgânico é a adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP), prática de fácil implementação em ETAs existentes. A implantação de uma unidade de adsorção antecedendo a mistura rápida e o emprego ou não da pré oxidação, devem ser estudadas antes da instalação de processos de adsorção em ETAs, visto que tempos de contato maiores e condições de pré oxidação, podem potencializar a adsorção com redução tanto do consumo de carvão, quanto da geração de lodo, além de garantir maior segurança operacional do sistema com remoção de compostos orgânicos e fornecimento de água tratada com qualidade. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar a influência das variáveis tempo de contato, dosagem e tipo de carvão ativado pulverizado, na eficiência da adsorção de matéria orgânica em água bruta submetida ao processo de tratamento de água em ciclo completo em condições com e sem a pré-oxidação da água. Foi realizada a avaliação com uso de 5 tipos de CAPs de origens mineral, vegetal e animal. Os CAPs de origem vegetal tiveram influência do tempo de contato e dosagem na remoção de matéria orgânica, medida em carbono orgânico total, ou seja, maiores dosagem e tempos de contato trouxeram melhores resultados. Dosagens de 30 mg/L e tempo de contato de 25 minutos obtiveram os melhores resultados, atingindo eficiências de remoção na ordem de 90% e concentração de COT inferior a 3,0 mg/L. A pré-oxidação com cloro não se mostrou vantajosa na remoção de matéria orgânica, além de que ficou evidenciado que a garantia do melhor custo benefício na remoção de matéria orgânica com uso de carvão ativado e pré-oxidação com cloro, carece de realização de testes preliminares.

Palavras-chave: Tratamento de água em ciclo completo; matéria orgânica; carvão ativado; dosagem; tempo de contato.

ABSTRACT

NETO, A.F.R.; **Influence of sprayed activated carbon application conditions on the efficiency of removing organic matter in water treatment in full cycle**. 2020. 106 f. Dissertation (master's in environmental engineering). Postgraduate Program in Environmental Engineering. Federal University of Tocantins, Palmas.

Currently, there is a significant concentration of organic materials in watercourses and / or water reservoirs that receive domestic hazards and non-permitted industrial effluents, which suffer prolonged drought damage and what are the natural conditions caused by natural chemicals. The consequences can be the eutrophication of water bodies, with the occurrence of blooms, which lead to problems such as taste and odor, increased formation of unwanted decoration by-products, interferences in the water treatment process, increased consumption of chemicals, in addition to corrosion of the supply system units. Most water treatment systems, including those with full cycle technology, without removing organic materials. One of the alternatives used in ETAs to remove organic material is adsorption on pulverized activated carbon (CAP), a practice that is easy to install in existing ETAs. The implantation of an adsorption unit prior to the rapid mixing and the use or not of the pre-oxidation, should be studied before the installation of adsorption processes in WTPs, since longer contact times and pre-oxidation conditions, can enhance the adsorption with reduction in both coal consumption and sludge generation, in addition to ensuring greater operational safety of the system by removing organics compounds and providing quality treated water. In this context, the present work aimed to investigate the influence of the contact time, dosage and type of pulverized activated carbon on the efficiency of the adsorption of organic matter in raw water submitted to the water treatment process in full cycle under conditions with and without the pre-oxidation of water. The evaluation was carried out using 5 types of CAPs of mineral, vegetable and animal origin. CAPs of plant origin had an influence on contact time and dosage in the removal of organic matter, measured in total organic carbon, that is, greater dosage and contact times brought better results. Dosages of 30 mg/L and contact time of 25 minutes obtained the best results, reaching removal efficiencies in the order of 90% and TOC concentration below 3,0 mg/L. Pre-oxidation with chlorine did not prove to be advantageous in removing organic matter, and it was evident that the guarantee of the best cost-benefit in removing organic matter with the use of activated carbon and pre-oxidation with chlorine, requires testing preliminary.

Keywords: Full cycle water treatment; organic matter; activated charcoal; dosage; contact time.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais tecnologias de tratamento de água para abastecimento público.	20
Figura 2 - Distribuição da porosidade inteira do material carbonáceo.....	24
Figura 3 - Estrutura porosa do grão de carvão.....	24
Figura 4 - Fluxograma do desenvolvimento do presente trabalho.....	41
Figura 5 - Equipamentos utilizados na pesquisa.....	42
Figura 6 – Mapa de Localização do reservatório de acumulação do Córrego Caracol	45
Figura 7 - Córrego Caracol e ponto de amostragem da água de estudo.....	46
Figura 8 – Armazenamento e homegeinação da amostra de estudo.....	46
Figura 9 - Representação do planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de pré oxidação.....	48
Figura 10 - Equipamento jartest utilizado na realização dos ensaios.....	49
Figura 11 - Representação do planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de aplicação do carvão sem pré oxidação.....	50
Figura 12 - Representação do planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de aplicação do carvão com pré oxidação.....	51
Figura 13 - Filtros de laboratório de areia (FLAs) utilizados pesquisa.....	53
Figura 14 – Amostra dos carvões selecionados para realização do estudo.....	57
Figura 15 – Amostragem simples no reservatório de acumulação.....	57
Figura 16 – Vista geral do reservatório de acumulação do Córrego Caracol e ponto de amostragem da água da água de estudo.....	58
Figura 17 – Ensaio de verificação da demanda de cloro na pré-oxidação.....	60
Figura 18 - Ensaio de verificação da demanda de cloro na pré-oxidação com a água de estudo - jarteste em operação.....	63
Figura 19 – Resultados de turbidez da água decantada (esferas) com Vs 1,0 cm/min em função da dosagem de PAC e do pH de coagulação.....	66
Figura 20 – Resultados de turbidez da água decantada (esferas) com Vs 0,5 cm/min em função da dosagem de PAC e do pH de coagulação.....	66
Figura 21 – Resultados de cor aparente da água decantada (esferas) com Vs 1,0 cm/min em função da dosagem de PAC e do pH de coagulação.....	67

Figura 22 – Resultados de cor aparente da água decantada (esferas) com Vs 0,5 cm/min em função da dosagem de PAC e do pH de coagulação	67
Figura 23 – Realização dos ensaios de tratabilidade em equipamento jarteste	69
Figura 24 – Realização dos ensaios de tratabilidade seguido de filtração e análise de COT	69
Figura 25 – Superfície de resposta da concentração de COT (mg/L) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP B sem pré-oxidação.....	76
Figura 26 – Superfície de resposta do resultado de cor aparente (uC) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP C sem pré-oxidação.....	80
Figura 27 - Superfície de resposta da concentração de COT (mg/L) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP C com pré-oxidação.....	81
Figura 28 – Superfície de resposta da concentração de COT (mg/L) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP D sem pré-oxidação.....	86
Figura 29 – Comparativo CAPs sem pré-oxidação - Resultados COT (mg/L).....	91
Figura 30 – Comparativo CAPs sem pré-oxidação - Eficiência Remoção COT (%)..	92
Figura 31 – Comparativo CAPs com pré-oxidação - Resultados COT (mg/L).....	94
Figura 32 – Comparativo CAPs com pré-oxidação - Eficiência Remoção COT (%)..	95
Figura 33 – Comparativo de custo entre os CAPs com melhores eficiências – relação de custo e benefício.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tecnologias acessíveis para tratamento de água devido à presença de compostos orgânicos persistentes	23
Quadro 2 - Estudos de eficiência do uso carvão ativado na remoção de compostos orgânicos em tratamento de água.....	30
Quadro 3 - Avaliação das vantagens e desvantagens em relação aos pontos de aplicação da ETA.	37
Quadro 4 - Evolução do crescimento de compostos orgânicos presentes em águas para abastecimento público conforme a atualização das portarias	39
Quadro 5 – Tipos de carvão ativado pulverizado selecionados.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divisão dos poros do carvão ativado.....	25
Tabela 2 - Percentual de remoção de COT da água bruta.....	40
Tabela 3 – Especificações e funções de cada um dos equipamentos usados na pesquisa.....	42
Tabela 4 - Parâmetros físico-químicos, unidades, métodos de medição, unidades, e limites de quantificação dos equipamentos utilizados no estudo	43
Tabela 5 – Concentrações dos produtos e condições do preparo das soluções.....	43
Tabela 6 - Condições dos ensaios de demanda de cloro para a etapa de pré oxidação	48
Tabela 7 - Variáveis do DCF para o estudo das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado	51
Tabela 8 - Condições dos ensaios tratabilidade com CAPs estudados para água bruta com e sem pré-oxidação	52
Tabela 9: Características dos carvões selecionados para realização do estudo	56
Tabela 10 - Resultados do monitoramento de COT no reservatório de acumulação do Córrego Caracol.....	58
Tabela 11 - Características físico-químicas da amostra da água de estudo - Córrego Caracol.....	59
Tabela 12 Delineamento de face centrada e respostas observadas nos ensaios de demanda de cloro na pré oxidação	61
Tabela 13 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o ensaio de demanda de cloro	62
Tabela 14 - Análise da variância (ANOVA) do COT e Cor Aparente no ensaio de demanda de cloro.....	63
Tabela 15 - Condições de coagulação com PAC e Cal Hidratada	64
Tabela 16 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP A sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor).....	70
Tabela 17 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP A sem e com pré oxidação (COT e Cor)	71
Tabela 18 - Análise da variância (ANOVA) do COT com CAP A sem pré oxidação ..	72
Tabela 19 - Análise da variância (ANOVA) do COT e Cor Aparente com CAP A com pré oxidação.....	72

Tabela 20 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP B sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor).....	73
Tabela 21 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP B sem e com pré oxidação (COT e Cor)	74
Tabela 22 - Análise da variância (ANOVA) do COT e Cor Aparente com CAP B sem pré oxidação.....	75
Tabela 23 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP B com pré oxidação.....	76
Tabela 24 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP C sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor).....	77
Tabela 25 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP C sem e com pré oxidação (COT e Cor).....	78
Tabela 26 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP C sem pré oxidação.....	79
Tabela 27 - Análise da variância (ANOVA) do COT com CAP C com pré oxidação.....	80
Tabela 28 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP D sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor).....	82
Tabela 29 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP D sem e com pré oxidação (COT e Cor).....	83
Tabela 30 - Análise da variância (ANOVA) do COT e Cor Aparente com CAP D sem pré oxidação.....	84
Tabela 31 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP D com pré oxidação.....	85
Tabela 32 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP E sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor).....	87
Tabela 33 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP E sem e com pré oxidação (COT e Cor)	88
Tabela 34 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP E com pré oxidação.....	89
Tabela 35 - Resultados de concentração e eficiência de remoção de COT para cada tipo de CAP avaliado, com ensaios na condição sem pré-oxidação.	90
Tabela 36 - Resultados de concentração e eficiência de remoção de COT para cada tipo de CAP avaliado, com ensaios na condição com pré-oxidação.	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AZM – Azul de Metileno
CA – Carvão Ativado
CAG - Carvão Ativado Granular
CAP – Carvão Ativado Pulverizado
COD - Carbono Orgânico Dissolvido
COT – Carbono Orgânico Total
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCCR – Delineamento Composto Central Rotacional
DQO – Demanda Química de Oxigênio
ETA – Estação de Tratamento de Água
FLAs – Filtros de Laboratório de Areia
IAM – Índice de Azul de Metileno
IF – Índice de Fenol
IFTO – Instituto Técnico Federal do Tocantins
LAPEQ - Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e de B combustíveis
MIB – Metil-isoborneol
MO – Matéria Orgânica
MOD – Matéria Orgânica Dissolvida
MON – Matéria Orgânica Natural
NDMA – nitrosodimetilamina
NI – Número de Iodo
PAC – Policloreto de Alumínio
POAs – Processos Oxidativos Avançados
UFT – Universidade Federal do Tocantins

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVO	19
2.1 Objetivo geral.....	19
2.2 Objetivos específicos	19
3 REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 Contaminação da água.....	14
3.2 Matéria orgânica em mananciais	15
3.2.1 Matéria orgânica.....	15
3.2.2 Matéria orgânica em reservatórios	17
3.3 Consequências da matéria orgânica na água tratada.....	18
3.4 Remoção de matéria orgânica no tratamento de água	19
3.4.1 Tratamento de Água em Ciclo Completo.....	19
3.4.2 Mecanismos de remoção de matéria orgânica	21
3.5 Carvão ativado no tratamento de água	23
3.6 Adsorção em carvão ativado.....	33
3.7 Características adsorptivas do carvão ativado.....	34
3.7.1 Índice de fenol	34
3.7.2 Índice de azul de metileno.....	34
3.7.3 Número de iodo	35
3.7.4 pH.....	35
3.7.5 Teor de cinzas	35
3.7.6 Umidade	36
3.8 Fatores que influenciam na adsorção	36
3.9 Padrão de potabilidade	38
4 METODOLOGIA	41
4.1 Considerações Iniciais	41
4.2 Equipamentos, parâmetros de qualidade da água, métodos analíticos e produtos químicos	41
4.3 Etapa 01 – Definição dos tipos de carvão ativado pulverizado	43
4.4 Etapa 02 – Coleta e caracterização da água submetida aos ensaios de tratabilidade.....	44

4.5	Etapa 03 – Definição das condições da água submetida aos ensaios de tratabilidade.....	47
4.5.1	Demanda de Cloro	47
4.5.2	Diagrama de Coagulação.....	49
4.6	Etapa 04 – Planejamento experimental	50
4.6.1	Planejamento Experimental dos Ensaios de Tratabilidade com CAPs.....	50
4.6.2	Ensaios de Tratabilidade	52
4.6.3	Investigação da eficiência dos CAPs estudados	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	Carvões de estudo.....	56
5.2	Água buta.....	57
5.3	Demanda de Cloro e Diagrama de Coagulação	60
5.3.1	Demanda de cloro	60
5.3.2	Diagrama de Coagulação.....	64
5.4	Ensaios de tratabilidade e avaliação de eficiência dos CAPs	68
5.4.1	Ensaios de tratabilidade com adsorção usando CAP A	70
5.4.2	Ensaios de tratabilidade com adsorção usando CAP B	73
5.4.3	Ensaios de tratabilidade com adsorção usando CAP C	77
5.4.4	Ensaios de tratabilidade com adsorção usando CAP D	82
5.4.5	Ensaios de tratabilidade com adsorção usando CAP E	87
5.5	Avaliação comparativa de eficiência dos CAPs estudados.....	90
5.5.1	Eficiência dos CAPs estudados na condição sem pré-oxidação	90
5.5.2	Eficiência dos CAPs estudados na condição com pré-oxidação	93
5.5.3	Comparativo CAPs com melhor eficiência – custo e benefício	95
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
7	REFERÊNCIAS	99

1 INTRODUÇÃO

A vital dependência do ser humano com relação à água pressupõe que esta deve apresentar características físicas, químicas, biológicas e radioativas que não causem efeitos adversos à saúde (ALVARENGA, 2010). No entanto, a poluição das águas naturais por contaminantes químicos e biológicos é um problema de âmbito Mundial e no Estado do Tocantins a realidade não é diferente.

A presença de contaminantes orgânicos na água pode servir como nutriente para o crescimento indesejável de microrganismos, contribuir para a formação de compostos orgânicos halogenados ou até mesmo inviabilizar o processo de tratamento. Cursos de água que recebem aportes de esgotos domésticos e efluentes industriais não tratados, e que sofrem impactos de períodos prolongados de estiagem, podem ter aumento considerável da concentração de matéria orgânica e de outros contaminantes inorgânicos e microbiológicos na água bruta. As consequências podem ser a eutrofização de corpos d'água, com ocorrência de florações, e incremento de matéria orgânica que podem acarretar diversos problemas, como sabor e odor, aumento da formação de subprodutos indesejados da cloração, interferências no processo de tratamento da água, aumento do consumo de químicos, além de corrosão de unidades do sistema de abastecimento (DI BERNARDO et al. 2017).

Grande parte dos sistemas de tratamento de água, incluindo aqueles com tecnologia de ciclo completo, não conseguem remover matéria orgânica natural. A formação de subprodutos nas etapas de pré e interoxidação também é um problema existente nas estações de tratamento de água (ETAs) em ciclo completo, podendo ou não apresentar elevada toxicidade, levando a necessidade de implantar novas tecnologias ou complementar os sistemas já existentes (CHEN et al., 2008; LIMA et al., 2014).

Uma das alternativas empregada nas ETAs na remoção de material orgânico é a adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP). Essa prática tem sido adotada como complementação ao tratamento em ciclo completo, sendo de fácil implementação em ETAs existentes, cujo principal objetivo é remover compostos odoríferos, toxinas liberadas por cianobactérias, subprodutos organo-halogenados, microcontaminantes orgânicos (fármacos, hormônios, agrotóxicos, etc.), sendo que boa parte não possui regulamentação no padrão de potabilidade (PASCHOALATO et al., 2008; KHAH e ANSARI, 2009; MARMO et al, 2010; FERNANDES et al., 2011).

O carvão ativado é um excelente adsorvente constituído por carbono e envolvido por micro, meso e macroporos que são capazes de adsorver moléculas contaminantes de variados tamanhos. A sua aplicação nas ETAs é geralmente feita sem a realização de estudos técnicos, em sistemas improvisados, prejudicando o sucesso da adsorção, a qual depende de variáveis como o tipo de carvão, características adsorptivas, tempo de contato, dosagem, ponto de aplicação, pH, molécula do adsorvato e a presença da pré-oxidação antecedendo à adsorção (ZAGO, 2010).

Em sistemas de tratamento de água que possuem processos de adsorção em algumas das etapas do tratamento, é comum a aquisição de carvão ativado de menor custo, e sua aplicação se dá geralmente no canal de chegada da água bruta ou na unidade de mistura rápida, sem garantia de tempo de contato prévio à coagulação e até mesmo de etapas de pré-oxidação com cloro. Esta prática pode acarretar a necessidade de aplicação de elevadas dosagens para alcançar a eficiência desejada, com aumento significativo do custo operacional, e o aumento da geração de lodo.

A implantação de uma unidade de adsorção antecedendo a mistura rápida e o emprego ou não da pré oxidação, devem ser estudadas antes da instalação de processos de adsorção em ETAs, visto que tempos de contato maiores de adsorção e condições de pré oxidação, podem potencializar a adsorção com redução tanto do consumo de carvão, quanto da geração de lodo, além de garantir maior segurança operacional do sistema, ou seja, eficiência de remoção de orgânicos e fornecimento de água tratada com qualidade.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar algumas das variáveis que podem influenciar na eficiência da adsorção de matéria orgânica em água bruta submetida ao processo de tratamento de água em ciclo completo com aplicação de carvão ativado pulverizado. Foram investigadas eficiências de remoção com ou sem uso da pré oxidação, além de tempo de contato, dosagem e tipo de carvão ativado pulverizado.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar as condições de uso do carvão ativado pulverizado (CAP), na eficiência de remoção de matéria orgânica em água bruta submetida ao processo de tratamento em ciclo completo com e sem uso da pré-oxidação com cloro.

2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a água bruta através da análise de parâmetros físico-químicos;
- Definir a condição de coagulação utilizando o coagulante Policloreto de Alumínio (PAC);
- Definir a demanda de cloro da água em estudo;
- Avaliar eficiência dos tipos de carvões ativados pulverizados (CAPs) no tratamento de água em ciclo completo;
- Avaliar a influência da pré oxidação com cloro, tempo de contato, dosagem, e tipo de carvão ativado pulverizado (CAP) na remoção de matéria orgânica no tratamento de água em ciclo completo;
- Avaliar relação custo benefício entre os carvões ativados pulverizados (CAPs) que obtiverem resultados satisfatórios;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Contaminação da água

Segundo Prosab (2009) a crescente e rápida industrialização contribuiu para o aumento populacional dos centros urbanos permitindo o aprimoramento na variedade de compostos químicos utilizados em nosso dia-a-dia, de forma com que facilitasse a vida das pessoas. Em contrapartida, após o seu uso são descartados de forma incorreta nos ambientes aquáticos, prejudicando a qualidade das águas, tornando indispensável o tratamento da mesma para consumo da população.

Quando um corpo hídrico é contaminado e dependendo do contaminante, este, dificilmente será detectado, pois a maioria dos elementos contaminantes não são perceptíveis, isto é, não apresentam cor, impossibilitando a sua identificação (DOMINGUINI et al., 2015).

Os efeitos das ações antrópicas têm comprometido a qualidade dos corpos d'água superficiais como alternativas de abastecimento. A tal constatação soma-se a desigual distribuição dos recursos hídricos superficiais no Brasil — 92% da população, aproximadamente, vivem onde se concentram 27% da disponibilidade hídrica superficial do País —, favorecendo a recorrente opção pela construção de reservatórios de acumulação visando a conferir maior robustez aos sistemas de abastecimento nos períodos de estiagem mais severa. Tal situação ocorre principalmente nas regiões Sudeste e Nordeste onde residem aproximadamente 70% da população brasileira (ANA, 2012).

A contaminação da água dos rios é capaz de modificar suas propriedades físico-químicas e bacteriológicas tais como turbidez, cor, tamanho de partículas, temperatura, condutividade, viscosidade, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pH, toxicidade, espécies do fitoplâncton e do zooplâncton (DI BERNARDO et al., 2017). A carga biológica contaminante presente no ambiente aquático ameaça à saúde pública transmitindo doenças como cólera, febre tifoide, salmoneloses, disenteria bacilar, giardíase, criptosporidíase, esquistossomíase, viroses, entre outras (DI BERNARDO et al., 2017).

Existe um grande desafio em proporcionar o acesso à água potável. Mais de 1 bilhão de pessoas são negadas ao direito de ter uma água potável e 2,6 bilhões de

peças não têm acesso a saneamento adequado. Anualmente, cerca de 1,8 milhões de crianças morrem por doenças causadas pela ausência de saneamento. Sistemas de distribuição ineficientes em países carentes economicamente impactam no atendimento à população, assim como a poluição dos corpos hídricos, dificultando o tratamento para adquirir os padrões de potabilidade (UNDP, 2006).

De acordo com o Instituto Trata Brasil (2020) um pouco mais da metade da população brasileira têm acesso à coleta de esgoto, ao mesmo tempo em que quase 100 milhões de brasileiros não tem acesso a este serviço. Milhões de pessoas nas maiores cidades despejam esgoto de forma indiscriminada, mesmo sendo disponíveis redes coletoras e cerca de 13 milhões de pessoas entre crianças e adolescentes não têm acesso ao saneamento básico. Todavia, são quase 35 milhões de brasileiros que não têm acesso ao abastecimento de água tratada e cerca de 15% das crianças e adolescentes.

Como a água é um dos principais meios de propagação de doenças, pode-se considerar indispensável seu tratamento avançado, em contínuo monitoramento protegendo a qualidade da mesma (SANCHES et al., 2012).

3.2 Matéria orgânica em mananciais

3.2.1 Matéria orgânica

A matéria orgânica natural existente nas águas naturais, solos, sedimentos e turfas consistem em uma mistura de compostos químicos de diferentes estágios de decomposição, que derivam da degradação química de resíduos de animais, plantas e da atividade biosintética de microrganismos. Estes compostos podem ser classificados em substâncias húmicas e não húmicas (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

A matéria orgânica natural (MON) compreende complexa matriz de compostos orgânicos oriundos de fontes naturais e que estão presentes em corpos de água (CRITTENDEN et al., 2012).

A quantificação de MON na água tem sido estimada sobretudo por parâmetros substitutos, como carbono orgânico total (COT) e carbono orgânico dissolvido (COD), absorção de luz ultravioleta em 254 nm e absorbância específica de luz ultravioleta (APHA, 2017).

De acordo com Marmo (2005), carbono orgânico total é um indicativo da concentração de substâncias húmicas nas águas. As substâncias húmicas são formadas por ácidos húmicos e fúlvicos que provêm da degradação biológica e química dos resíduos de animais e plantas, e da atividade de síntese microbiana, e representam uma parte importante da matéria orgânica natural dissolvida presente em ambientes aquáticos.

A matéria orgânica em água é composta por uma variedade de compostos orgânicos em vários estados de oxidação, sendo que alguns deles podem ser ainda oxidados por processos biológicos ou químicos. O carbono orgânico total (COT) é considerado o parâmetro mais conveniente para quantificar o carbono orgânico presente nas águas, pois independe do estado de oxidação da matéria orgânica e não mede outros elementos ligados à cadeia dos compostos orgânicos tais como nitrogênio e hidrogênio, além de compostos inorgânicos que contribuem para a medida pela DBO, DQO e oxigênio consumido (DANTAS, 2017).

Segundo Di Bernardo et al. (2005), a matéria orgânica natural é formada por 10% de ácidos húmicos, 40% de ácidos fúlvicos e 50% de produtos indefinidos dos quais 40% são ácidos hidrofílicos. Ainda segundo Di Bernardo et al. (2005) a composição da matéria orgânica das águas naturais pode variar durante o ano, dados da literatura indicam que a fração hidrofóbica seja de 30 a 70% do carbono orgânico total.

Os compostos orgânicos contaminantes tais como corantes, pesticidas e fármacos são resistentes e persistentes no ambiente aquático, sendo de difícil remoção, que necessita de inovação tecnológica (YU et al., 2014). Um recurso muito aplicado para monitorar a presença de matéria orgânica (MO) e investigar a degradação de compostos orgânicos, é a análise de carbono orgânico total (COT), que determina a quantidade total de substâncias orgânicas presentes na água principalmente das cianotoxinas, fármacos e dos agrotóxicos, entre outros. A medição de tais indicadores garante identificar as causas da poluição e a necessidade de análises específicas (BORGES, 2003; DI BERNARDO et al., 2011). Além do método de COT existem vários outros que determinam a presença de matéria orgânica como é o caso do carbono orgânico dissolvido (COD), demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e oxigênio consumido (DI BERNARDO et al., 2017).

Segundo a Environmental Protection Agency (USEPA, 2012) a matéria orgânica, medida em Carbono Orgânico Total em contém milhares de partes, incluindo colóides, compostos, partículas macroscópicas e macromoléculas dissolvidas, sendo que sua redução ou eliminação é um desafio para gestores de tratamento de água, mas é essencial para garantia de uma água potável segura.

A matéria orgânica dissolvida (MOD) é um microcontaminante que é dividido em natural e sintético e que pode ser ofensivo para a saúde pública a curto ou em longo prazo. Os microcontaminantes de origem natural incluem metabólitos tóxicos, como as microcistinas, microrganismos odoríferos que causam gosto e odor (MIB e geosmina), já os microcontaminantes ocasionados pela ação do homem, são identificados de compostos orgânicos sintéticos, que podem ser compreendidos como fármacos, produtos de uso pessoal, agrotóxicos, desreguladores endócrinos, dentre outros (TEIXEIRA, 2014).

3.2.2 Matéria orgânica em reservatórios

A captação de água para abastecimento público a partir de reservatórios de acumulação apresenta algumas particularidades no que tange às características da água bruta. Os elevados tempos de detenção concorrem para deposição de partículas, resultando em água bruta de baixa turbidez consequentemente minimizando o uso de químicos no processo de tratamento. De outro lado, como consequência do aporte de nutrientes, de forma pontual e/ou difusa, das altas temperaturas e do período diário de insolação, a eutrofização destes corpos d'água frequentemente manifesta-se em distintos períodos do ano. Os reservatórios tendem a reter as substâncias carregadas pelas chuvas, entre estas, os nutrientes essenciais ao crescimento do fitoplâncton. O aporte deste material pode interferir nas características físicas (transparência, material em suspensão) e químicas (íons, substâncias orgânicas e inorgânicas) das águas do reservatório, influenciando ainda a produção de matéria orgânica pela comunidade fitoplanctônica (LIBÂNIO, 2017).

A matéria orgânica é o principal precursor com o qual os halogênios reagem para formar subprodutos. A natureza e a concentração dos precursores da formação de subprodutos da cloração nos corpos d'água utilizados como mananciais para o abastecimento podem variar sazonalmente, e dependem do tipo de manancial (rios,

lagos ou reservatórios), tipo de solo, vegetação predominante, mata ciliar, ocupação urbana, industrial e agrícola (PARDO, 1996; PASCHOALATO et al., 2008).

3.3 Consequências da matéria orgânica na água tratada

A matéria orgânica natural (MON) pode ou não ser prejudicial à vida humana, pois, uma vez que, os agentes oxidantes como o cloro, promover a oxidação da mesma, formam subprodutos que são ofensivos para a saúde pública. A ação do homem provoca a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, por meio do lançamento descontrolado de efluentes industriais ou domésticos (DI BERNARDO et al., 2017).

No Brasil e em muitos países do mundo, as estações de tratamento de água (ETA) utilizam o cloro, em suas diversas formas, como pré-oxidante e desinfetante, tendo em vista a eficiência do processo de cloração na destruição de vírus e bactérias nocivas que elimina o risco sanitário e apresenta baixo custo, além de produzir residual estável. Contudo, a prática da cloração tem sido questionada do ponto de vista do risco químico, devido à possibilidade de formação de compostos organo-halogenados na água potável. A formação de subprodutos da desinfecção está associada, principalmente, à reação do cloro residual livre com a matéria orgânica natural (MON) presente nos mananciais, que é considerada o principal percussor. A reação de formação inicia-se quando há o contato entre os percussores e o reagente (cloro) e pode continuar ocorrendo enquanto houver cloro livre disponível. (ROSALÉM et al., 2013).

A presença de subprodutos da desinfecção em águas de abastecimento submetidas à etapa de cloração é uma questão importante, uma vez que, além de esses compostos serem considerados potencialmente cancerígenos, também foram associados a problemas mutagênicos. No Brasil, diante da necessidade de controle dos subprodutos, a Portaria de Consolidação Ministério da Saúde nº 5/2017 em seu anexo XX define a frequência mínima trimestral para análise das concentrações de subprodutos como trihalometanos (THM) nos sistemas de abastecimento que utilizam águas captadas de mananciais superficiais, tendo como valor máximo permitido (VMP) a concentração de $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$ para THM (BRASIL, 2017).

Além dos problemas operacionais ao processo de tratamento, em especial a precoce colmatação do meio filtrante, a presença de compostos orgânicos pode

conferir odor e sabor à água de consumo humano. Contudo, o principal inconveniente relativo aos compostos orgânicos é que podem estar relacionados a presença de cianobactérias nos corpos d'água originando à produção de cianotoxinas nocivas à saúde humana, resultantes do próprio metabolismo, lise celular ou senescência das cianobactérias, em especial os gêneros *Microcystis*, *Anabaena* e *Cylindrospermopsis* (DRIKAS et al., 2009).

3.4 Remoção de matéria orgânica no tratamento de água

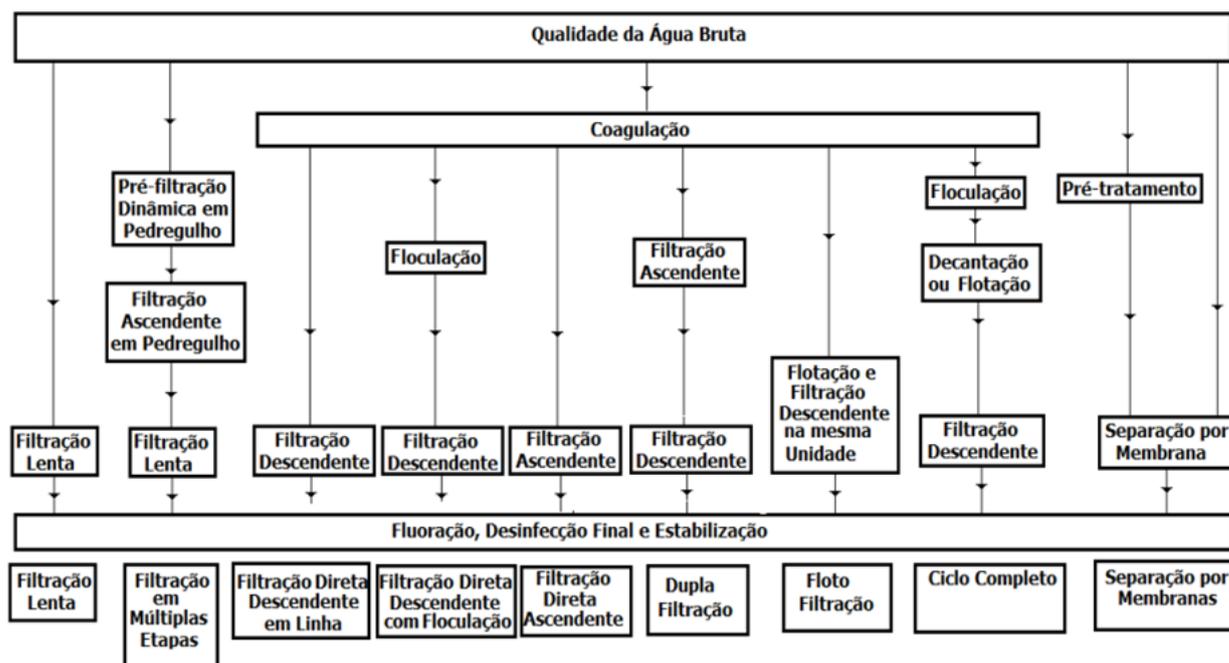
3.4.1 Tratamento de Água em Ciclo Completo

De acordo com Di Bernardo et al (2017) e Oliveira et al (2014) é fundamental averiguar e definir a qualidade da água bruta para que seja possível determinar uma tecnologia de tratamento que seja eficaz para o exercício da ETA.

O tratamento de água ocorre pela remoção de partículas suspensas, matéria orgânica, microrganismos e demais substâncias indesejáveis que em pequenas concentrações conferem cor, odor e sabor, sendo que o objetivo desse processo é distribuir para a população uma água potável e segura do ponto de vista sanitário (BOTERO, 2008; MOREIRA, 2010).

O método de tratamento de água é eficaz se fizer necessário o uso de ferramentas como produtos químicos, tais como oxidantes (cloro, ozônio, permanganato de potássio, dentre outros) para oxidação de compostos orgânicos e desinfecção de contaminantes, alcalinizantes (cal ou hidróxido de sódio) para correção de pH, coagulantes (sais de ferro e de alumínio) para a desestabilização de partículas impuras, entre outros (PÁDUA, 2010). De acordo com Di Bernardo et al (2017) a Figura 1 mostra as tecnologias de tratamento de água mais relevantes para consumo humano.

Figura 1 - Principais tecnologias de tratamento de água para abastecimento público.



Fonte: Di Bernardo et al, 2017.

Dentre as diversas tecnologias utilizadas para o tratamento de água, a mais comumente utilizada pelas ETAs é o tratamento em ciclo completo.

A Resolução CONAMA n° 357 de março de 2005, profere que os corpos d'água que possuem classificação 2 e 3 podem ser destinados ao abastecimento para consumo humano, desde que submetidos a etapas de tratamento em ciclo completo e ciclo completo ou avançado respectivamente.

De acordo com Lima (2014) e Voltan (2014) as estações de tratamento de água utilizam normalmente a tecnologia em ciclo completo, para o abastecimento público, no qual se baseia nos processos que incluem etapas de coagulação, a floculação, sedimentação ou flotação, filtração, fluoretação, cloração e correção de pH se for o caso.

Sistemas de tratamento em ciclo completo ainda podem incluir anteriormente a coagulação, uma etapa de pré oxidação da água bruta que chega à estação. A presença de matéria orgânica na água bruta pode ser uma das condições que levam a pré oxidação geralmente realizada com aplicação de cloro. Posteriormente o coagulante a base de ferro ou alumínio é adicionado no momento da mistura rápida, podendo ser hidráulica ou mecanizada (DI BERNARDO et al.; 2017).

Existem vários fatores que podem interferir na etapa da coagulação sendo a prioridade para pH, alcalinidade, o tamanho das partículas, a espécie e dosagem de produtos químicos, que são os mais importantes. Em menor categoria a concentração e a validade da solução de coagulante, a temperatura, o mecanismo de coagulação predominante, o gradiente de velocidade e o tempo de mistura rápida (ALMEIDA et al.; 2007).

Existem dois tipos de mecanismos de remoção de partículas a qual a água está sujeita na etapa de coagulação, que são adsorção e desestabilização de cargas, isso quando existe somente a filtração direta, permitindo a desestabilização de partículas impuras e aumentando seu tamanho (PÁDUA, 2010), ou no mecanismo de varredura, que é o mais utilizado pelas estações de tratamento de água (ETAs), devido a uma maior dosagem de coagulante, no qual resulta a formação de flocos na etapa de floculação (LIBÂNIO, 2010; DI BERNARDO et al., 2017).

Em seguida, a água coagulada é agitada de forma lenta por um tempo controlado até que os flocos alcancem dimensão e massa específica suficientes para que sejam removidos por sedimentação ou por flotação. Esta etapa é denominada floculação podendo ser efetuada em unidades mecanizadas ou hidráulicas. Nos sedimentadores ou flotadores a água é clarificada através da filtração em unidades onde o escoamento é descendente, contendo geralmente areia ou antracito (PÁDUA, 2010; DI BERNARDO et al., 2017).

Após segue a desinfecção da água através de oxidantes para a eliminação de microrganismos patogênicos, ou seja, a adição de tais produtos é a última barreira sanitária para a distribuição de uma água com qualidade para a população. Por fim, a fluoretação exige a adição de flúor para combater a cárie infantil (PÁDUA, 2010).

3.4.2 Mecanismos de remoção de matéria orgânica

Para a remoção de compostos orgânicos e/ou contaminantes que podem estar presentes em água potável, é necessário estabelecer possíveis combinações de tecnologias, quando as técnicas em ciclo completo não são aplicáveis ou o sistema de tratamento não elimina totalmente (RODRIGUEZ-MOZAZ et al, 2004; LOPES et al, 2008).

Nenhum estudo tem sido mencionado sobre a eficiência de remoção de compostos contaminantes, utilizando o tratamento de água em ciclo completo

(MARCHETTO e FILHO, 2006; PASCHOALATO et al, 2008; LIMA et al, 2014; VOLTAN, 2014).

Conforme Crittenden et al (2012) vários processos são empregados para a remoção de matéria orgânica no tratamento de água, incluindo a coagulação, a coagulação aprimorada e/ou otimizada, a adsorção em carvão ativado e em resinas de troca iônica magnética, a filtração em membranas, os processos oxidativos avançados, o biotratamento e a ozonização. Os processos mais comuns e economicamente viáveis para a remoção de MON são a coagulação e a floculação, seguidas de sedimentação/flotação e de filtração por areia. Os dois primeiros processos são eficazes para a remoção de matérias orgânicas hidrofóbicas de alto peso molecular, tais como os ácidos húmicos. Contudo, os processos são limitados com relação à remoção de compostos hidrofílicos de tamanhos menores.

De acordo com Pereira (2010), Pádua (2010) e Di Bernardo et al (2017) em geral, os adsorventes mais empregados no processo de tratamento de água são alumina, zeólitas sintéticas, resinas de troca iônica, óxidos de metais e o carvão ativado.

Segundo Lima et al (2017) o tratamento em ciclo completo seguido da adsorção em carvão ativado pulverizado apresenta resultados satisfatórios na remoção de microcontaminantes em águas contaminadas.

Há vários trabalhos desenvolvidos por pesquisadores que utilizaram diferentes tipos de carvão ativado para remoção de diversos orgânicos presentes em soluções aquosas e que obtiveram grande sucesso como é o caso dos trabalhos de Paschoalato et al (2008), Marmo et al (2010), Fernandes et al (2011), Silva et al (2012), Leal (2013), Voltan (2014), Guerra (2014), Valença et al (2017) entre outros.

Existem várias tecnologias alternativas de tratamento de água para consumo humano que são capazes de remover altas concentrações de micropoluentes como é o caso da adsorção em carvão ativado, processos oxidativos avançados (POAs) e membranas. O Quadro 1 mostra as possíveis tecnologias de remoção de microcontaminantes.

Quadro 1 - Tecnologias acessíveis para tratamento de água devido à presença de compostos orgânicos persistentes

Processo	Vantagens	Desvantagens
Coagulação química	Utilizado no tratamento de água na remoção de turbidez e cor	Produção de lodo; os coagulantes removem apenas um grupo de contaminantes orgânicos
Adsorção em carvão ativado	Remoção de compostos orgânicos e fácil alteração na aplicação das dosagens	Árdua regeneração e alto custo de disposição para os resíduos potencialmente perigosos
Osmose reversa	Remoção de compostos orgânicos por repulsão eletrostática e exclusão por tamanho de partícula	Produção de lodo; adsorção dos compostos na superfície da membrana; difusão de compostos hidrofóbicos através da membrana

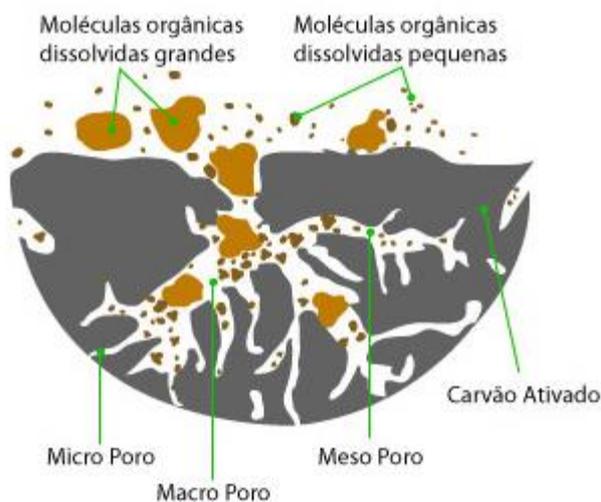
Fonte: Adaptado de Hai et al., 2012.

3.5 Carvão ativado no tratamento de água

Muito utilizado na antiguidade, o uso do carvão ativado (CA) obteve um grande avanço após a Primeira Guerra Mundial, onde foi usado contra gases tóxicos. Até o final da guerra, pesquisadores desenvolveram importantes aplicações para o mesmo, tais como extração de benzeno de fabricação de gases e eliminação de odor, mas seu principal foco é a remoção de substâncias que resultam em cor, odor e sabor (MUCCIACITO, 2009; KHAH e ANSARI, 2009).

O carvão ativado (CA) é um material carbonáceo poroso no qual é designado aos processos de pirólise e ativação, podendo ser química ou física sofrendo o aumento da porosidade interna. Uma vez ativado os poros internos podem ser comparados com uma rede de túneis que se bifurcam em canais menores e assim sucessivamente. O surgimento da porosidade após ativação pode ser classificado de acordo com a sua dimensão em macro, meso e microporos (VALÊNCIA, 2007; DI BERNARDO et al., 2017) conforme mostra a Figura 2.

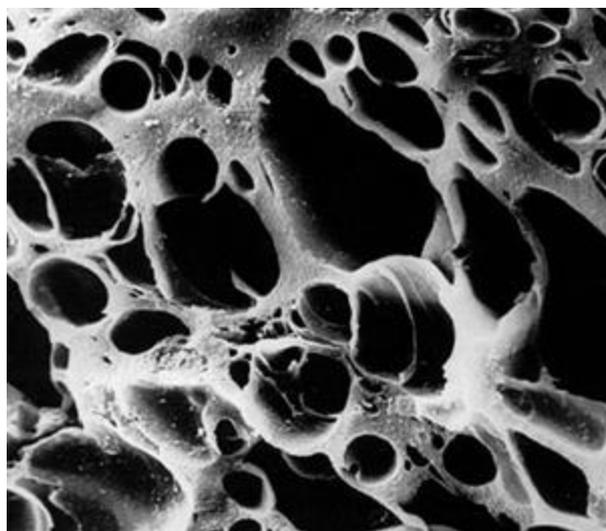
Figura 2 - Distribuição da porosidade inteira do material carbonáceo



Fonte: MACROVENDA (2018).

O que define a distribuição dos poros no produto final é o tipo de matéria-prima, tipo de ativação, dentre outros parâmetros operacionais utilizados em sua fabricação (VALÊNCIA, 2007). A Figura 3 mostra a distribuição de poros existentes em um grão de carvão.

Figura 3 - Estrutura porosa do grão de carvão



Fonte: MACROVENDA (2018).

Os poros são classificados de acordo com seu diâmetro médio. A classificação dos poros é mostrada conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Divisão dos poros do carvão ativado

Classificação	Diâmetro (nm)
Microporos primários	< 1,2
Microporos secundários	1,2 a 2
Mesoporos	2 a 50
Macroporos	> 50

Fonte: IUPAC.

Há uma variedade de materiais que são utilizados na produção de carvão ativado incluindo madeira, casca de coco, arroz e de nozes, carvões minerais (antracito, betuminoso, linhito), madeiras, turfa, osso e polímeros sintéticos como o PVC (ANSARI, 2009; ZAGO, 2010).

No Brasil, os carvões ativados mais empregados no tratamento de água são madeira, carvão betuminoso e sub-betuminoso, osso e casca de coco. A produção é realizada pela carbonização e ativação para a expansão dos vazios internos. Os carvões ativados apresentam elevada capacidade adsortiva, pois apresentam grande área específica superficial e existência de grupos funcionais de superfície (YU et al, 2016; DI BERNARDO et al., 2017).

A carbonização é feita na ausência de ar, em temperaturas usualmente compreendidas entre 500 e 800°C, enquanto que, a ativação é realizada com gases oxidantes em temperaturas de 800 a 900°C (DI BERNARDO et al, 2017). Segundo Tramontin (2011) o aumento intenso da temperatura resulta na expansão dos gases no interior do sólido aumentando o teor de carbono no material e reduzindo o teor de compostos voláteis. A ativação resulta no aumento da superfície do carvão elevando a remoção de hidrocarbonetos e alcatrões.

Segundo Di Bernardo et al (2017) o carvão ativado pode ser obtido em pó (pulverizado) ou granulado. O carvão ativado pulverizado (CAP) utilizado no processo de tratamento de água é preparado por meio de uma suspensão, podendo ser adicionado tanto na captação de água bruta, na chegada da ETA ou até mesmo na etapa de mistura rápida. A instalação para aplicação de carvão ativado pulverizado nas ETAs é menos onerosa em relação ao carvão ativado granular (CAG) e não há despesa com a regeneração do mesmo. Todavia, o CAG apresenta maior eficiência de adsorção e o CAP gera aumento de massa seca (lodo).

O carvão ativado granular (CAG) praticamente não é utilizado nas estações de tratamento de água para abastecimento no País. O raro emprego restringe-se ao uso

industrial para diversos fins, e em alguns casos unidades domiciliares de potabilização. A opção para o emprego do CAP deve-se a praticidade operacional, nas estações dotadas de tecnologia convencional de potabilização, onde a aplicação habitualmente efetua-se na unidade de mistura rápida e, muito raramente, na primeira câmara de floculação ou no efluente dos decantadores. Dependendo da magnitude da dose de CAP, do tipo do carvão e do ponto de aplicação na estação de tratamento, partículas de carvão podem atravessar o meio filtrante e fazerem-se presentes na água tratada (BYRNE et al., 2014).

De acordo com Voltan (2014) o CAP possui 100% dos sólidos suspensos totais e o lodo tratado possui apenas 25%, então para cada 1 kg de CAP é gerado 4 kg de lodo tratado. Por isso é necessário entender a influência do tempo de contato, para cessar o consumo excessivo de carvão, devido ao seu alto custo, não ser regenerado e ser necessário tratamento de lodo e disposição em aterro sanitário.

A massa molecular de substâncias orgânicas contaminantes presentes nas águas é relativa ao tamanho dos poros do carvão ativado, por conta disto o carvão pode apresentar ou não efetividade de adsorção. É de extrema importância e necessidade entender as propriedades físicas e de adsorção de um determinado tipo de carvão e efetuar testes com o intuito de promover a remoção concreta de substâncias contaminantes (DI BERNARDO et al., 2017).

No Brasil o mercado interno demanda grande quantidade de carvão ativado fazendo com que a produção nacional não seja suficiente tendo que efetuar a importação do produto para atender diversas empresas que fazem a aplicação do mesmo para fins de abastecimento de água potável, tratamento de águas residuárias, transporte de gases, na área alimentícia e farmacêutica, dentre outras (LEGNER, 2012; MACHADO et al., 2015).

Ocorrências ocasionais de compostos orgânicos nos mananciais submetidos ao abastecimento público, como por exemplo algas que resultam em gosto e odor na água, faz com que indústria de tratamento de água usufrua demasiadamente do emprego de adsorvente na forma pulverizada, devido sua simples instalação, principalmente para os casos em que a ETA já se encontra implantada e em operação (SILVA, 2005; BRANDÃO E SILVA, 2006; LEGNER, 2012; MACHADO et al., 2015; LIMA et al, 2017).

Apesar da relevância do carvão ativado nos processos de adsorção para remover microcontaminantes orgânicos e metais pesados (YU et al., 2014) presentes

em soluções aquosas, existe a questão da quantidade limite para seu aproveitamento, devido a sua escassez como matéria prima e do alto custo de produção (PEREIRA, 2010).

Há várias pesquisas que mostram a eficiência do carvão ativado na remoção de compostos orgânicos presentes em soluções aquosas (microcistinas, saxitoxinas, agrotóxicos, fármacos, trihalometanos, matéria orgânica natural entre outros).

A remoção do carbono orgânico dissolvido em águas de abastecimento filtradas, sem e com pré-ozonização, com emprego carvão ativado granular utilizando o método de Ensaio Rápido em Colunas de Escala Reduzida foi avaliada por MAVAIEIE JÚNIOR (2019). O impacto da aplicação do ozônio, previamente a adsorção em carvão ativado granular (CAG) usando o método de ensaios rápidos em coluna de escala reduzida, não produziu efeitos significativos na remoção da matéria orgânica medida como carbono orgânico dissolvido (COD) quando comparados a adsorção sem adição de ozônio. A aplicação de ozônio nas amostras iniciais provocou alterações nas frações que compõem a matéria orgânica dissolvida, já que a aplicação de ozônio na água pode trazer vantagens, como a oxidação parcial da fração de ácidos húmicos e fúlvicos e aumento da quantidade da matéria orgânica natural de caráter hidrofílico e de baixo peso molecular, favorecendo a biodegradação. A ozonização ocasiona uma redução na concentração de COD na fração hidrofóbica (AMH), diminuindo o potencial de formação dos subprodutos MAVAIEIE JÚNIOR (2019).

Marchetto e Filho (2005) obtiveram resultados satisfatórios na remoção de MIB utilizando carvão ativado em pó. A pesquisa utilizou a água bruta do rio Grande, em São Bernardo do Campo e foram utilizados dois tipos de carvões, um de origem vegetal e outro de origem mineral. As dosagens de coagulante foram variadas para que fosse possível analisar a interferência do precipitado metálico no processo de coagulação. O carvão de origem vegetal se mostrou mais eficiente que o mineral e não foi identificada influência do pH no processo de adsorção. Os pesquisadores analisaram também diferentes pontos de aplicação do CAP antes e depois da etapa de coagulação, no entanto obtiveram a conclusão de que não há interferência alguma nos resultados de adsorção com relação ao local de aplicação. Os autores provaram que a partir da dosagem de 20 mg/L com aumento gradativo e maior tempo de contato observou-se maior eficiência de remoção.

A remoção de MIB utilizando carvão ativado pulverizado de origem vegetal foi estudada por Marchetto et al (2006). De acordo com os pesquisadores, com a dosagem fixa de CAP de 30 mg/L e tempo de adsorção de 16 minutos, foi possível obter uma eficiência de remoção de 50 a 60%. Não houve interferência do coagulante e do pH de coagulação no processo de adsorção e quanto ao processo de coagulação, a maior remoção de carbono orgânico dissolvido (COD) se deu na faixa de pH entre 5,8 a 6,5 com percentuais entre 30 e 50%.

Müller et al (2009) caracterizou três tipos de carvões tais como: madeira, coco e osso. Os autores concluíram que o CAP de madeira para a remoção de microcistina mostrou-se ser mais eficiente que os demais através da isoterma de adsorção conforme modelo de Freundlich, onde apresentou maior capacidade de adsorção da microcistina e maior interação entre adsorvente e adsorvato. O intervalo das concentrações de CAP com tempo de contato de 2 h não foi o suficiente para atingir a concentração residual de microcistina de 1µg/L, portanto, foi possível calcular a dosagem necessária de CAP para atingir o valor máximo encontrado na legislação brasileira. O modelo matemático da isoterma referente à Freundlich se ajustou melhor obtendo resultados satisfatórios.

Paschoalato et al (2008) estudaram a remoção de diuron e hexazinona da água bruta proveniente do rio Pardo, utilizando o sistema de tratamento convencional combinado com adsorção em carvão ativado pulverizado. Concluíram que com a adição de 250 mg/L de CAP e tempo de contato de 30 min pode-se chegar a uma concentração de 0,04 mg/L e 0,10 mg/L de diuron e hexazinona, respectivamente, estando de acordo com as legislações investigadas.

Melo et al (2009) investigaram a adsorção em carvão ativado pulverizado na remoção de saxitoxinas em águas de abastecimento submetidas ao tratamento em ciclo completo, produzindo uma água sintética com concentração inicial de toxinas da ordem de 15 a 75 µg/L. Os autores avaliaram três tipos de carvão, sendo o de madeira, osso e mineral. Foi variada a dosagem de CAP entre 5 e 50 mg/L e concluíram que para a remoção de saxitoxinas o carvão de madeira apresentou melhores resultados, sendo necessário uma dosagem de 50 mg/L com tempo de contato de 2 horas. Ainda que o residual obtido de saxitoxinas tenha ficado acima do limite máximo exigido pela legislação, foi possível remover uma concentração elevada.

Marmo et al (2010) averiguaram a remoção de trihalometanos em águas de abastecimento público, em adsorção em carvão ativado seguido do tratamento

convencional. Na água de estudo foram adicionados ácidos húmicos como precursor na etapa de oxidação. Os autores puderam investigar os valores obtidos dos residuais de trihalometanos através de duas técnicas: espectrofotometria e cromatografia, no entanto comprovaram que a segunda técnica apresentava valores de residuais menores que a primeira. Também relataram que quanto maior a dosagem de carvão, menor a concentração de contaminante. Em todas as dosagens de CAP o aumento do tempo de contato de 60 para 120 min para análise de espectrofotometria apresentou influência dos resultados de remoção dos trihalometanos, enquanto que, para a análise de cromatografia o aumento do tempo não influenciou nos resultados finais, mostrando semelhanças.

Fernandes (2011) concluiu que a adsorção em CAP foi eficiente na remoção de hormônio sintético 17α -Ethinilestradiol de águas de abastecimento empregando o uso de 50 mg/L de carvão com tempo de contato de 60 minutos. Quando o autor dobrou o tempo para 120 minutos foi necessário apenas a dosagem de 10 mg/L para a redução do contaminante.

Já Silva et al (2012) estudou a remoção de antibióticos por meio de adsorção em carvão ativado a partir da casca de coco da baía através de ensaios feitos em batelada e relataram uma eficiência superior a 90% com tempo de contato de 240 minutos.

Leal (2013) estudou dois tipos de carvões ativados, ambos de origem vegetal, sendo um obtido a partir da casca de coco e o outro a partir da madeira de pinus. O pesquisador investigou influências das dosagens e tempo de contato na remoção do herbicida 2,4-D. As dosagens tiveram variações entre 10 e 150 mg/L em diferentes tempos de contato iguais a 15 e 30 minutos. Nos ensaios foram analisadas a capacidade adsortiva de cada carvão, sendo que os dois carvões selecionados foram satisfatórios na remoção do herbicida, porém o carvão de coco foi o mais eficiente, pois apresentava número de iodo igual a 617,67 mg/g, umidade de 14,89%, pH de 8,46 e cinzas igual a 26,6%. Apesar do valor de umidade ter excedido o limite conforme a norma NBR 12.077 de até 8%, apresentando característica hidrofílica e maior quantidade de cinzas foi o que apresentou maiores índices de remoção do contaminante, cor aparente e turbidez em relação ao carvão pinus.

A remoção do herbicida 2,4-D utilizando carvão ativado em pó no tratamento em ciclo completo em escala piloto, também foi avaliada por Guerra (2014). A pesquisadora contaminou a água de estudo proveniente do rio Santa Maria – ES com

o herbicida 2,4-D a um valor igual a 100 µg/L. O CAP selecionado foi o a base de coco. No experimento em escala piloto foi investigada a capacidade de remoção do herbicida no tratamento convencional e no tratamento convencional associado à adsorção em CAP. No tratamento convencional obteve uma remoção de 36%. A dosagem de CAP foi variada no tratamento convencional associado à adsorção em carvão ativado com a adição de 42 mg/L e 100 mg/L com tempo de contato inferior a 30 minutos, no entanto a primeira dosagem alcançou uma porcentagem de remoção de 53%, que não atingiu o valor máximo permitido de acordo com legislação (portaria de consolidação nº5), enquanto que a segunda adquiriu 71% estando de acordo com a legislação.

O Quadro 2 a seguir mostra um resumo dos resultados obtidos por diversos autores, com a realização de estudos que investigavam a eficiência do uso carvão ativado na remoção de compostos orgânicos em água de abastecimento público.

Quadro 2 - Estudos de eficiência do uso carvão ativado na remoção de compostos orgânicos em tratamento de água

Autor	Tipo de carvão	Adsorvato	Variáveis estudadas	Conclusão
Kuroda (2005)	Madeira	Microcistina	NI/IAM	Baixa capacidade adsorptiva por apresentar IAM relativamente baixo e volume de mesoporos baixo.
Marchetto e Filho (2005)	Vegetal	MIB	Dosagem de CAP e coagulante, tempo de contato e ponto de aplicação	O ponto de aplicação não apresentou influência no processo de adsorção. O aumento da dosagem e tempo de contato aumentava a eficiência no processo de adsorção.
Marchetto e Filho (2006)	Vegetal	MIB	Dosagem de coagulante	Melhores faixas de dosagem de coagulante entre 30 e 50 mg/L. O carvão foi excelente na remoção de MIB com percentuais de 50 a 60% e dosagem fixa de CAP de 30 mg/L e tempo de contato de 16 min.

Müller et al (2009)	Madeira/ casca de coco/ osso/ antracito	Microcistina	NI e isoterma de adsorção	O carvão de coco apresentou maior NI, mas a isoterma de adsorção revelou que o CAP de madeira apresentava maior capacidade em adsorver a microcistina.
Paschoalato et al (2008)	Babaçu	Diuron e hexazinona	Dosagem de CAP e tempo de contato	Foi necessária uma dosagem de 250 mg/L e tempo de contato de 30 min para a remoção eficiente de diuron e hexazinona.
Melo et al (2009)	Madeira/osso/ mineral	Saxitoxina	Dosagem de CAP	O CAP de madeira mostrou-se ser mais eficiente na remoção de saxitoxinas em relação aos demais com dosagem de 50 mg/L e tempo de contato de 2 h.
Marmo et al (2010)	-	Trihalometanos	Dosagem de CAP, tempo de contato e técnicas de análise	O aumento da dosagem de CAP propiciou em maiores percentuais de remoção do contaminante. Houve influência do tempo de contato de 60 para 120 min apenas na análise de espectrofotometria, enquanto que para cromatografia não.
Júlio et al (2010)	Vegetal	Cianobactérias	Dosagem de CAP	A dosagem de 10 mg/L de CAP e tempo de contato de 15 min antes da coagulação mostrou ser eficiente na remoção de cianobactérias.
Fernandes et al (2011)	Vegetal	17- α Etililestradiol	Dosagem de CAP e tempo de contato	Para o tempo de 60 min e dosagem de 50 mg/L, a adsorção foi satisfatória com valor de residual de contaminante menor que o limite de quantificação, ao passo que ocorre o aumento do tempo de contato, a dosagem de CAP cai para 10 mg/L, onde o valor de residual permanece inferior ao limite de quantificação.

Silva (2012)	Casca de coco	Fármacos	pH, temperatura, tempo de contato e isoterma de adsorção	Não apontou influência do pH, mas sim da temperatura, mostrando ser um processo de adsorção exotérmico. A remoção dos compostos orgânicos analisados foi superior a 90% em um tempo de 240 min e massa de carvão de 0,1 g.
Leal (2013)	Casca de coco	2,4-D	Dosagem de CAP, tempo de contato e ponto de aplicação	A dosagem de CAP na remoção do agrotóxico 2,4-D foi de 25 mg/L e tempo de contato de 15 min. A adsorção mostrou-se eficiente independentemente dos pontos de aplicação.
Lopes et al (2013)	Espiga de milho e CAP comercial	-	Cinzas e NI	Os carvões de espiga de milho ativados a temperaturas diferentes mostraram-se ser mais eficientes, apresentando teor de cinzas menores, elevado NI e área superficial que quando comparado com o carvão comercial.
Guerra (2014)	Casca de coco	2,4-D	Dosagem de CAP e tempo de contato	A dosagem de CAP e tempo de contato empregados no estudo foram excelentes na remoção de 2,4-D e não ocorreu a formação de subprodutos.
Voltan (2014)	Babaçu	Diuron e hexazinona	Dosagem de CAP e tempo de contato	Obteve remoção satisfatória dos herbicidas com dosagem de CAP de 12 mg/L e tempo de contato de 30 min.
Rheinheimer (2016)	-	Paracetamol	Massa de CAP, tempo de contato, pH	Não houve influência na variação de pH, a massa empregada de CAP para os ensaios de adsorção foi de 1 g e o tempo de equilíbrio atingido foi de 180 min.

Fonte: Adaptado de Biscola, 2019.

3.6 Adsorção em carvão ativado

A adsorção é um processo pela qual ocorre a transferência de massa de um soluto de uma fase fluida para uma superfície sólida (WARTCHOW et al., 1984).

A eficiência de adsorção se encontra quando as moléculas que serão adsorvidas na interface sólido/líquido ficam retidas na superfície estável do adsorvente, isso significa que, a eficiência aumenta com o aumento da superfície (BORBA, 2006). De acordo com Khah e Ansari (2009) a estrutura porosa e a superfície do material sólido restringem a quantidade e a dimensão das moléculas a serem adsorvidas.

A técnica de adsorção em carvão ativado é aplicada para remover poluentes orgânicos, inorgânicos e biológicos, principalmente substâncias orgânicas dissolvidas em soluções aquosas que são causadores de cor, gosto e odor (KHAH e ANSARI, 2009). O adsorvente deve apresentar ótimo desempenho na adsorção dessas substâncias, pois há outros microcontaminantes orgânicos em solução competindo pelos sítios ativos do adsorvente para que também sejam adsorvidos (ZAGO, 2010).

Conforme Pádua (2010) e Di Bernardo et al (2017) a adsorção ocorre por meio de forças atrativas e repulsivas tais como forças de Van der Waals, ligações de hidrogênio, interações dipolo-dipolo que podem ser de caráter químico ou físico fazendo com que haja interação do adsorvato com o adsorvente. O processo químico envolve o compartilhamento de elétrons do adsorvente com o adsorvato a partir de ligações químicas associadas à superfície do material adsorvente, enquanto que o processo físico ocorre através de interações como é o caso das forças de Van der Waals.

Ainda de acordo com Brady (1990) a adsorção de contaminantes por carvão ativado é um processo complexo, podendo ser classificado como físico ou químico. A adsorção física é reversível e ocorre quando forças de atração molecular entre o soluto e o adsorvente são maiores do que as forças de atração entre soluto e solvente. Assim, o soluto será adsorvido pela superfície do carvão através das forças de atração de van der Waals. Na adsorção química, a reação ocorre entre a superfície do carvão e o soluto adsorvido, sendo a reação geralmente irreversível.

A adsorção em carvão ativado passou a ser uma ferramenta tanto quanto eficiente na purificação de águas de abastecimento por se tratar de uma tecnologia que acresce o tratamento de água em ciclo completo, sobretudo na remoção de

compostos orgânicos geradores de cor, odor e sabor, como metil-isoborneol (MIB), geosmina, agrotóxicos e cianotoxinas (MACHADO et al., 2015; DI BERNARDO et al., 2017).

O carvão ativado, em pó ou granular, constitui um adsorvente de compostos orgânicos, passíveis de conferir sabor e odor; cor; mutagenicidade e toxicidade, incluindo agroquímicos, geosmina, metilisoborneol (MIB) e cianotoxinas em geral. Entretanto, não se pode generalizar que qualquer tipo de carvão irá adsorver qualquer substância orgânica indesejável, pois a massa molecular desta deve estar diretamente relacionada ao tamanho dos poros dos grãos do carvão (SNOEYINK, 1990).

3.7 Características adsorptivas do carvão ativado

De acordo com Lima (2014) primeiro é necessário conhecer as características do carvão para que sua aplicação seja eficaz em determinado processo. A capacidade adsorptiva do CA pode ser determinada através de diferentes aspectos, como índice de fenol (IF), índice de azul de metileno (IAM) e número de iodo (NI), teor de umidade, teor de cinzas e pH.

3.7.1 Índice de fenol

O Índice de Fenol (IF) indica a quantidade necessária de carvão para a diminuição do fenol de 100 para 10 mg em solução aquosa (DI BERNARDO et al., 2017). O fenol é um composto orgânico que pode ser encontrado na água potável conferindo gosto e odor além de ser um poluente tóxico e extremamente volátil. Adsorve preferencialmente moléculas microporosas e o mecanismo de adsorção ocorre através de interações dispersivas entre elétrons π do anel aromático do fenol e os elétrons π que estão presentes nas camadas gráficas do carvão (HU e SRINIVASAN, 2001).

3.7.2 Índice de azul de metileno

O índice de azul de metileno (IAM) revela a capacidade do carvão em adsorver moléculas que sejam equivalentes à do azul de metileno (AZM), ou seja, significa que adsorverá moléculas de tamanho maiores, com área superficial dos poros superiores

a 1,5 nm (DI BERNARDO et al., 2017). Desse modo, a avaliação do AZM prediz a adsorção de compostos orgânicos e permite um método simples para seleção de um contaminante na aplicação de água (BAÇAOUÍ et al., 2001).

De acordo com Borges et al (2016) o IAM é um meio que determina a área superficial do carvão ativado. A molécula do corante é empregada como adsorbato, em testes de adsorção em fase líquida e indica a quantidade de mesoporos que existem no carvão (ZAGO, 2010; BORGES et al., 2016). Conforme a norma japonesa JIS K 1474/1991 o parâmetro é estabelecido como a razão entre a quantidade de azul de metileno adsorvido em miligrama por grama de carvão pela concentração inicial de azul de metileno.

3.7.3 Número de iodo

O número de iodo (NI) determina a quantidade adsorvida de iodo pelo carvão. Está relacionado com a adsorção em microporos, ou seja, moléculas com diâmetro de poros menores que 1 nm (BAÇAOUÍ et al, 2001; BRANDÃO E SILVA, 2006; DI BERNARDO et al, 2017). De acordo com a norma NBR 12.073 o índice mínimo de iodo deve ser igual a 600 mg I₂/g. O padrão para a American Water Works Association (AWWA) é de 500 mg I₂/g.

3.7.4 pH

O pH (potencial hidrogeniônico) do carvão ativado está vinculado com a matéria-prima e do processo de fabricação. Este parâmetro revela o grau ácido, básico ou neutro de uma determinada (ROZÁRIO, 2012; LEAL, 2013).

3.7.5 Teor de cinzas

O conteúdo de cinzas reflete a pureza do carvão. O teor de cinzas significa a quantidade de matéria inorgânica presente no carvão ativado e que em elevado teor afeta no processo de adsorção, pois seu caráter passa a ser hidrofílico, ou seja, o carvão passa a ter mais afinidade com a água, desta forma as moléculas da mesma passam a ser adsorvidas pelos poros de carbono do carvão impedindo a adsorção do composto orgânico. O aumento do teor de cinzas pode ocorrer devido a duas razões,

ou pelo mecanismo de ativação ou simplesmente pela fixação de compostos inorgânicos no material após a etapa de pirólise (ALVES et al., 2015).

3.7.6 Umidade

A fabricação de carvão com teores de umidade elevados pode diminuir substancialmente sua capacidade adsortiva (ZAGO, 2010). O carvão ativado que é íntegro de água apresenta combinação entre umidade superficial e a inerente ao produto (LEAL, 2013).

3.8 Fatores que influenciam na adsorção

Existem diferentes fatores que afetam o processo de adsorção tais como o tipo e características do carvão, dose aplicada, as características da água e do sistema experimental como o pH, temperatura e concentração de adsorvato pré oxidação ou não (ZAGO, 2010). A área superficial do adsorvente e a presença de grupos funcionais em sua superfície (grupos carboxílicos, fenólicos e lactonas), assim como o tamanho médio dos poros, a polaridade dos compostos em soluções aquosas e também o tamanho da molécula do adsorvato (MACHADO et al., 2015).

Relacionado as características do carvão, Brady (1990) destaca os principais fatores que afetam o processo de adsorção, sendo o pH, a área superficial, a distribuição de tamanho dos poros e as características químicas da superfície do carvão ativado. O pH manifesta-se ao determinar a carga de superfície do carvão ativado e da molécula a ser adsorvida, governando assim as interações eletrostáticas entre o adsorvato e o adsorvente. A área superficial específica do carvão constitui um dos parâmetros mais importantes na determinação de sua capacidade adsortiva. Geralmente, quanto maior seu valor, maior a capacidade de adsorção. Carvões ativados utilizados como adsorventes apresentam área superficial da ordem de 800 a 1500 m².g⁻¹. Ainda relativo as características do carvão que influenciam na adsorção, a de se destacar a distribuição dos tamanhos dos poros que podem ser classificados microporosos primário e secundários, como mesoporosos e macroporosos.

De acordo com Moreno-Castilla (2004) o pH da solução é o responsável pelo controle das forças iônicas da superfície do adsorvente e da molécula do adsorvato. A adsorção ocorre por meio de interações eletrostáticas e não eletrostáticas, sendo

que, as interações eletrostáticas podem ser atrativas ou repulsivas, enquanto que, as não eletrostáticas são somente forças atrativas como, por exemplo, as forças de Van der Waals e interações hidrofóbicas.

Pode-se considerar que o local de aplicação do adsorvente nas ETAs também influencia na capacidade adsorviva do carvão ativado. Para obter uma melhor eficiência é necessário identificar o melhor ponto de aplicação. Nas ETAs, o CAP é adicionado em forma de suspensão, com o auxílio de uma bomba dosadora em qualquer unidade antes da filtração. Para almejar sua eficiência é necessário que garanta o contato entre a mistura de carvão com a água, o tempo de contato (de 10 a 120 min) necessário para a adsorção dos compostos orgânicos contaminantes e a influência com os demais produtos químicos. É de suma importância que sejam realizados testes de bancada para assegurar a eficiência de adsorção em termos de dosagem de CAP e tempo de contato na remoção dos contaminantes (DI BERNARDO et al., 2017).

O

Quadro 3 descreve as vantagens e desvantagens de acordo com os locais de aplicação da suspensão de carvão ativado pulverizado (CAP).

Quadro 3 - Avaliação das vantagens e desvantagens em relação aos pontos de aplicação da ETA.

Local de aplicação	Vantagens	Desvantagens
Tomada de água	Maior tempo de contato. Boa mistura.	Algumas substâncias que seriam removidas por coagulação, sedimentação (ou flotação) e filtração podem ser adsorvidas, elevando o consumo de CAP.
Chegada de água bruta na ETA	Melhor controle da dosagem em relação ao anterior	Mesmas desvantagens. Às vezes tem um pré decantador antecedendo a coagulação.
Unidade de mistura rápida na ETA	Mistura eficiente e tempo de contato razoável.	Possível redução na taxa de adsorção, pela interferência de coagulantes. Tempo de contato às vezes insuficiente para remoção de certas substâncias. Adsorção de substâncias que seriam coaguladas.
Entrada dos filtros	Uso eficiente de CAP	Possível passagem de CAP pelo meio filtrante (sólidos retidos nos filtros) e redução do tempo de contato.

Fonte: DI BERNARDO et al (2017)

3.9 Padrão de potabilidade

Os primeiros padrões de potabilidade de água no Brasil foram publicados pelo Estado de São Paulo por meio do Decreto Estadual nº 15.642 de 9 de fevereiro de 1946. Na década de 1970, a partir do Decreto Federal nº 79.367 de 9 março de 1977, foi estabelecido os padrões de potabilidade de água e a responsabilidade do Ministério da Saúde no âmbito nacional, que foi formalizada através da Portaria nº 56 de 14 de março de 1977, primeira legislação nacional que estabeleceu o padrão de potabilidade da água brasileira.

Desde então, a norma que estabelece os padrões de potabilidade da água para consumo humano vem sendo atualizada, tendo em vista que a qualidade das águas vem sendo comprometida pela contaminação excessiva, ocasionada principalmente pelas atividades antrópicas (agrícolas e industriais). Há notório aumento de substâncias químicas que conferem riscos à saúde humana, por isso se faz necessário dispor do monitoramento rígido dos parâmetros de controle para que tais valores não ultrapassem seus limites (DI BERNARDO et al., 2017).

As atualizações das legislações buscam acrescentar novos compostos orgânicos contaminantes (agrotóxicos e subprodutos originados da oxidação) que estão presentes nas águas de mananciais, sendo resistentes e persistentes. A cada atualização há aumento da frequência de monitoramento e parâmetros monitorados, além de que os valores máximos permissíveis pela legislação ficam cada vez mais restritivos.

Em 2017 foi publicado um documento denominado “Portaria de Consolidação nº 5” de 28.09.2017 do Ministério da Saúde, que traz a “consolidação” das normas existentes sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Em seu Anexo XX são estabelecidos os padrões de potabilidade da água para consumo humano vigente atualmente. O Quadro 4 mostra a crescente evolução dos compostos orgânicos presentes em águas para abastecimento público conforme a atualização da legislação ao longo do tempo.

Quadro 4 - Evolução do crescimento de compostos orgânicos presentes em águas para abastecimento público conforme a atualização das portarias

Portaria	Substâncias orgânicas	Agrotóxicos	Desinfetantes e produtos secundários da desinfecção
nº 56, de 14 de março de 1977	-	12	-
nº 36, de 19 de janeiro de 1990	7	13	2
nº 1.469, de 29 de dezembro de 2000	12	22	6
nº 518, de 25 de março de 2004	12	23	6
nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011	15	27	7
consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017	15	27	7

Fonte: Adaptado de Biscola, 2019.

De acordo com Padua 2010, microcontaminantes orgânicos emergentes como fármacos, agrotóxicos e demais presentes na água tratada, como carbono orgânico, não possuem limites detectáveis na legislação, causando grande preocupação com a qualidade da mesma, conseqüentemente de quem possa a ingeri-la.

A legislação atual vigente, ou seja, o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 do Ministério da Saúde, não faz menção ao parâmetro carbono orgânico total, que é considerado um indicativo de monitoramento para o desempenho das ETAs, visando compreender o grau de poluição em termos de moléculas orgânicas persistentes em um corpo hídrico, mas, recomenda-se que o valor seja igual a 3 mg/L (DI BERNARDO et al., 2017).

A Environmental Protection Agency (USEPA, 2012) recomenda que a concentração de COT na água tratada seja de máximo de 2,0 mg/L quando a desinfecção é efetuada com cloro, e o Canadá recomenda o valor máximo de 4 mg/L na água tratada (BRITISH COLUMBIA, 2001). De acordo com o Tabela 2, a USEPA

estabelece os limites para remoção de COT no tratamento de água em função da alcalinidade da água.

Tabela 2 - Percentual de remoção de COT da água bruta

COT da fonte de abastecimento (mg/L)	Remoção de COT (%)		
	Alcalinidade da fonte de abastecimento (mg CaCO ₃ /L)		
	0 a 60	> 60 a 120	> 120
2,0 a 4,0	35	25	15
4,1 a 8,0	45	35	25
> 8,0	50	40	30

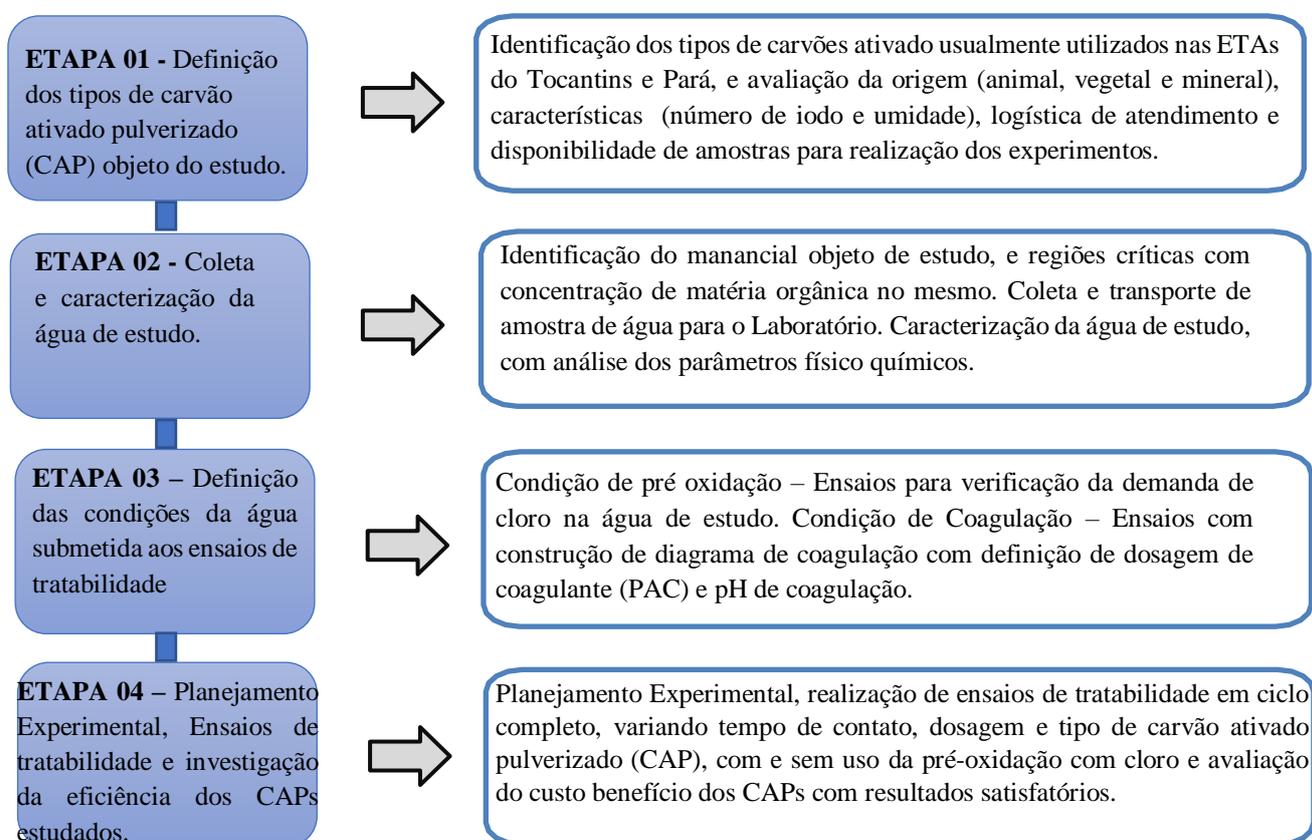
Fonte: Adaptado de USEPA, 2012.

4 METODOLOGIA

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados os detalhes do trabalho experimental conforme ilustrado no fluxograma da Figura 4. Os experimentos foram divididos em quatro etapas.

Figura 4 - Fluxograma do desenvolvimento do presente trabalho



Fonte: Autor, 2020.

4.2 Equipamentos, parâmetros de qualidade da água, métodos analíticos e produtos químicos

Relativo aos equipamentos que foram utilizados na realização dos ensaios (Figura 5), são apresentadas na Tabela 3 as especificações juntamente com a função de cada um dos equipamentos que foram utilizados na pesquisa.

Tabela 3 – Especificações e funções de cada um dos equipamentos usados na pesquisa.

EQUIPAMENTOS	FUNÇÃO NA PESQUISA
Jarteste, Nova Ética – Modelo LDB 6	Ensaio de tratabilidade – Ciclo Completo
Analizador de Carbono Orgânico Total TOC-L – marca SHIMADZU	Análise de carbono orgânico total
Balança eletrônica BL 210 S – marca Sartorius	Pesagem de produtos químicos
Cronômetro Mondaine Stop Watch	Medição do tempo
Espectrofotômetro de leitura direta, modelo DR 3900 / DR 900 - marca Hach	Leitura de cor aparente / cloro
pHmetro (potenciômetro), modelo 230 – marca Orion	Leitura de pH
Turbidímetro nefelométrico, modelo 2100P – marca Hach	Leitura da turbidez

Fonte: Autor, 2020.

Figura 5 - Equipamentos utilizados na pesquisa



Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros físico-químico, unidades, métodos de medição e limites de quantificação para cada um dos parâmetros avaliados. Os ensaios de bancada seguiram os métodos indicados na APHA (2012), e foram realizados parte no laboratório da concessionária responsável pelo abastecimento público de Palmas-TO (Laboratório de Controle de Águas) e no laboratório do Instituto Técnico Federal do Tocantins – IFTO (Laboratório de Saneamento).

Tabela 4 - Parâmetros físico-químicos, unidades, métodos de medição, unidades, e limites de quantificação dos equipamentos utilizados no estudo

Parâmetro	Unidades	Metodologia	Referências	Limite Quantificação
Carbono orgânico total	mg/L (NPOC)	Oxidação por combustão catalítica a 680 °C	5310-B. Standard Methods, 2017	0,001 mg/L (NPOC)
Turbidez	uT	Nefelometria	180.1, EPA, 1993	0,14 uT
Cloro	mg/L (OCI- + OHCl)	Colorimetria	4500-Cl G. Standard Methods, 2017	0,02 mg/L (OCI- + OHCl)
Cor aparente	uC	Espectrofotometria	2120 C. Standard Methods, 2017	5 uC
pH	-	Eletrometria	4500-H+ B, Standard Methods, 2017	-

Fonte: Autor, 2020.

Para efetivação dos ensaios de tratabilidade, foram utilizados os produtos químicos que estão apresentados na Tabela 5. Também são apresentadas as concentrações de cada um dos produtos com as condições de preparo das soluções. Além dos produtos abaixo destacados, também foram utilizados os cinco tipos de carvão ativado pulverizado.

Tabela 5 – Concentrações dos produtos e condições do preparo das soluções.

PRODUTO QUÍMICO	CONCENTRAÇÃO	SOLUÇÃO - PREPARO
Policloreto de Alumínio - PAC	Produto comercial líquido 16 a 18% Al ₂ O ₃	Solução preparada com 1 grama do produto comercial em 1 L de água destilada
Hidróxido de Cálcio - Cal Hidratada	Produto comercial em pó – 93% de Hidróxido de Cálcio	Solução preparada com 5 gramas do produto comercial em 1 L de água destilada. Solução com concentração de 5%.
Hipoclorito de Cálcio - Cloro	Produto comercial granulado 65%	Solução preparada com 1 grama do produto comercial em 1 L de água destilada. Solução com concentração de 1%.

Fonte: Autor, 2020.

4.3 Etapa 01 – Definição dos tipos de carvão ativado pulverizado

Nessa etapa foram definidos os carvões cuja eficiência na remoção de matéria orgânica foi avaliada. A definição teve como base os principais tipos de carvão utilizados nos sistemas de tratamento de água em operação nos Estados do Tocantins e Pará.

Foram contactados fornecedores de carvão ativado e solicitado amostras de carvão juntamente com laudo de caracterização química das amostras fornecidas. De posse das amostras, laudos de caracterização química, mapeamento de uso de carvão nos sistemas em operação e avaliação das condições de logística de atendimento do carvão num eventual uso em escala real, foram selecionados 05 tipos de carvão ativado de origem animal, vegetal e mineral, conforme Quadro 5.

Quadro 5 – Tipos de carvão ativado pulverizado selecionados.

Carvão Ativado Pulverizado	Origem	Matéria prima
CAP A	Mineral	Betume
CAP B	Vegetal	Pinus
CAP C	Vegetal	Madeira
CAP D	Vegetal	Coco Babaçu
CAP E	Animal	Escama de peixe

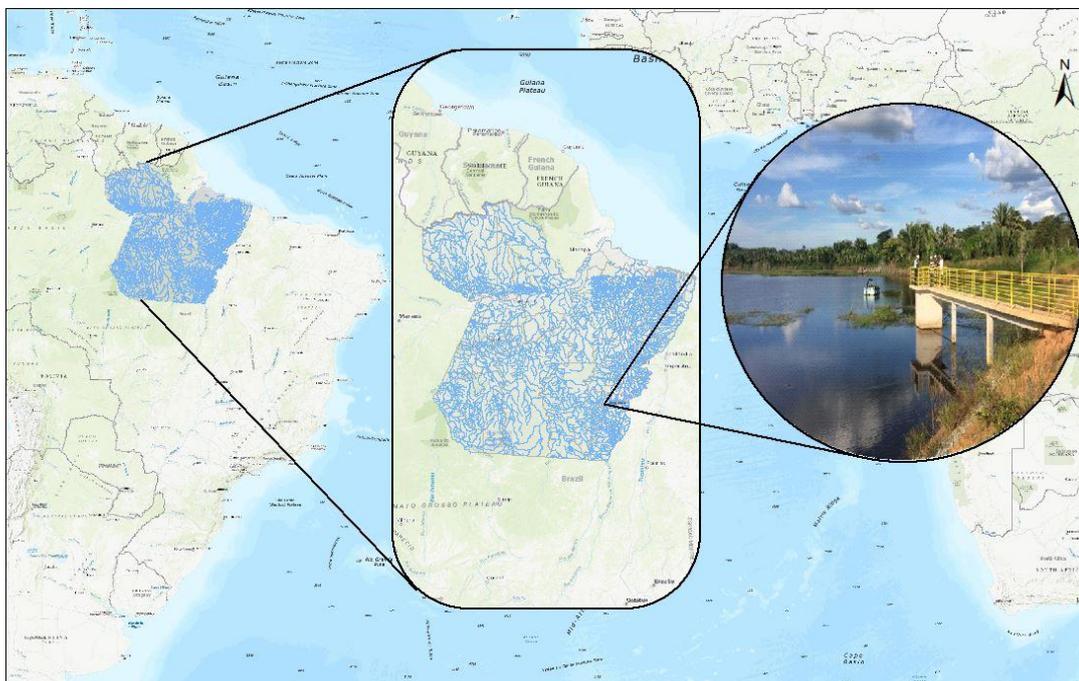
Fonte: Autor, 2020.

4.4 Etapa 02 – Coleta e caracterização da água submetida aos ensaios de tratabilidade

Foram avaliados a série histórica dos resultados de carbono orgânico total dos principais mananciais submetidos ao abastecimento de água no Estado do Tocantins e Pará. A partir dessa avaliação foram identificados mananciais com ocorrências de alta concentração de matéria orgânica.

A amostra de água bruta foi coletada no reservatório de acumulação do Córrego Caracol, localizado no município de Xinguara no Estado do Pará. O manancial em questão é utilizado para captação de água e abastecimento público do município e está localizado nas coordenadas geográficas: 7° 4' 28.06" S e 49° 56' 7.69" O. A Figura 6 ilustra o mapa de localização do reservatório de acumulação.

Figura 6 – Mapa de Localização do reservatório de acumulação do Córrego Caracol



Fonte: Autor, 2020.

No reservatório de acumulação de água, foram estabelecidos 10 pontos de monitoramento alocados ao longo da área e profundidade do mesmo. O monitoramento objetivou identificar regiões críticas com concentração de matéria orgânica, ou seja, a proposta foi de realizar testes com os adsorventes, garantindo uma água na sua pior condição relativo a concentração de matéria orgânica, com nova amostragem sendo realizada no ponto com a maior concentração

Dentre os 10 pontos, identificado aquele com a pior concentração de COT, foi realizado nova amostragem em dezembro de 2019 com a coleta de 1000 litros de água. A amostra de água foi transportada em bombonas para o Laboratório de Saneamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins – IFTO em Palmas-TO, local onde foram realizados os ensaios de tratabilidade.

Uma amostra do lote de água coletado foi direcionada ao Laboratório de Controle de Águas de Palmas, de responsabilidade da concessionária de abastecimento de água do município, onde foram realizadas as análises para caracterização físico química da água (Figura 7).

Figura 7 - Córrego Caracol e ponto de amostragem da água de estudo



Fonte: Autor, 2020.

Durante a realização dos ensaios de tratabilidade, a água bruta foi armazenada em reservatório com capacidade 1 m³, garantindo o monitoramento constante das características da água, e homogeneização sempre que necessário, para assegurar a qualidade dos ensaios (Figura 8).

Figura 8 – Armazenamento e homegeinação da amostra de estudo



Fonte: Autor, 2020.

4.5 Etapa 03 – Definição das condições da água submetida aos ensaios de tratabilidade

Os ensaios de tratabilidade previam avaliação da eficiência do uso de CAPs em condições onde a água bruta era ou não submetida a aplicação de cloro, ou seja, os ensaios foram executados com e sem o uso da pré oxidação com cloro. Nesse sentido foram realizados ensaios de pré-oxidação em jarreste para determinação das demandas do oxidante (cloro) e do tempo de contato do cloro.

Além da determinação da condição de pré-oxidação da água bruta, também foi realizado preliminarmente ensaios de coagulação, floculação e sedimentação visando à verificação das condições de coagulação utilizando o coagulante policloreto de alumínio e alcalinizante cal hidratada.

Em resumo nessa etapa foi identificado a demanda de cloro de água bruta e melhor condição de coagulação/floculação. Na sequência são apresentados em detalhes as condições dos ensaios preliminares de demanda de cloro e coagulação/floculação.

4.5.1 Demanda de Cloro

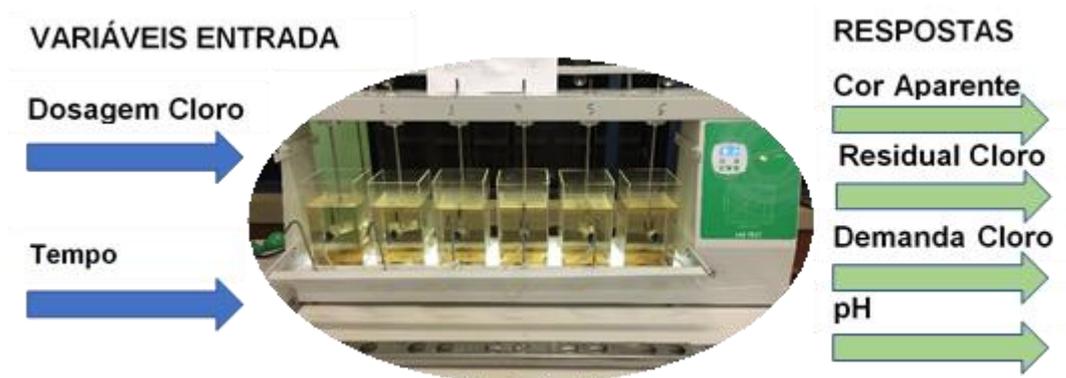
Foram realizados em jarreste ensaios de pré-oxidação da água bruta objeto do estudo, para determinação da demanda do oxidante e do tempo de contato. As condições dos ensaios foram:

- Oxidante: Solução de Hipoclorito de Cálcio - $\text{CaO}(\text{Cl})_2$;
- Dosagens de Oxidante: 0,1, 2,05 e 4,0 mg/L;
- Pré-oxidação: Tempos de contato = 10, 20 e 30 min;
- Gradiente de Oxidação = 100 s^{-1} ;
- Parâmetros de controle: Cor aparente, Residual de cloro livre, Demanda de Cloro e pH;

As condições experimentais para os ensaios de pré-oxidação foram realizadas por meio do software online Protimiza Experimental Design (<http://experimental->

design.protimiza.com.br/). As condições do planejamento experimental são mostradas na Figura 9 e Tabela 6.

Figura 9 - Representação do planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de pré oxidação.



Fonte: Autor, 2020.

Tabela 6 - Condições dos ensaios de demanda de cloro para a etapa de pré oxidação

Ensaio	Variáveis	
	Dosagem de Oxidante (mg/L)	Tempo Contato (min)
1	0,1	10
2	4	10
3	0,1	30
4	4	30
5	0,1	20
6	4	20
7	2,05	10
8	2,05	30
9	2,05	20
10	2,05	20
11	2,05	20

Fonte: Autor, 2020.

4.5.2 Diagrama de Coagulação

Utilizando o equipamento Jarreste (Figura 10) foram realizados ensaios de coagulação, floculação e sedimentação visando à verificação das condições de coagulação utilizando o policloreto de alumínio - PAC como coagulante. As condições dos ensaios foram as seguintes:

- Coagulante: policloreto de alumínio 18% (dosagens referentes ao produto comercial sólido) – Dosagem variando de 20 a 120 mg/L;
- Alcalinizante: cal hidratada – solução concentração 5% - (dosagens referentes ao produto comercial sólido) – Dosagem variando de 0 a 30 mg/L;
- Mistura rápida: Tempo de mistura rápida (T_{mr}) = 30 s, G_{mr} = 1000 s⁻¹;
- Floculação: Tempo de floculação (T_f) = 20 min, G_f = 25 s⁻¹;
- Sedimentação: Velocidade de sedimentação (V_s) - V_{s1} = 1,0 cm/min e V_{s2} = 0,5 cm/min;
- Parâmetros de controle: pH de coagulação, turbidez e cor aparente da água decantada;

Figura 10 - Equipamento jarrest utilizado na realização dos ensaios



Fonte: Autor, 2020.

Identificada a condição de coagulação, foram fixadas as dosagens de coagulante e alcalinizante para realização dos ensaios.

4.6 Etapa 04 – Planejamento experimental

4.6.1 Planejamento Experimental dos Ensaios de Tratabilidade com CAPs

Nessa etapa foi realizado o planejamento experimental para realização dos ensaios de tratabilidade utilizando os 05 tipos de CAPs selecionados para estudo. As condições experimentais para os ensaios de tratabilidade com os CAPs, foi realizada por meio do software online Protimiza Experimental Design (<http://experimental-design.protimiza.com.br/>) com a metodologia de Delineamento de Faces Centradas.

O planejamento experimental foi definido considerando condições de água bruta com uso da pré-oxidação e sem uso da pré-oxidação com hipoclorito de cálcio (Figuras 11 e 12).

Figura 11 - Representação do planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de aplicação do carvão sem pré oxidação



Fonte: Autor, 2020.

Figura 122 - Representação do planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de aplicação do carvão com pré oxidação



Fonte: Autor, 2020.

Onde:

Variável 1: Dosagem de CAP (mg/L);

Variável 2: Tempo de Contato (min);

Resultado 1: Carbono Orgânico Total – COT (mg/L);

Resultado 2: Turbidez do Filtrado (uT);

Resultado 3: Cor Aparente (uC);

As condições experimentais e seus níveis reais e codificados e os valores mínimos e máximos das variáveis são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis do DCF para o estudo das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado

Nome da Variável	Código	Nível		
		-1	0	+1
Dosagem de CAP (mg/L)	X_1	5	17,5	30
Tempo de Contato (min)	X_2	5	25	45

Fonte: Autor, 2020.

Para variável de Dosagem do CAP (X_1), o nível máximo (+1) de 30 mg/L foi estabelecido como um valor crítico usualmente empregado nas plantas em operação no Tocantins e Pará com uso de carvão. O nível médio (0) de 17,5 mg/L, como sendo

típico das condições operacionais de sistemas e o nível mínimo (-1) resultou em 5,0 mg/L como valor raramente empregado.

Foram realizados 11 experimentos com cada tipo de carvão, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo uma rodada de 55 ensaios (11 por tipo de carvão) com água bruta sem pré-oxidação e outra com água bruta com pré-oxidação conforme condições de aplicação de oxidante definidas na avaliação da demanda. A dosagem de coagulante para todos os ensaios, seguiu o pré-fixado a partir da avaliação do diagrama de coagulação.

Tabela 8 - Condições dos ensaios tratabilidade com CAPs estudados para água bruta com e sem pré-oxidação

Ensaio	Variáveis	
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo Contato (min)
1	5,0	5
2	30	5
3	5,0	45
4	30	45
5	5,0	25
6	30	25
7	17,5	5
8	17,5	45
9	17,5	25
10	17,5	25
11	17,5	25

Fonte: Autor, 2020.

4.6.2 Ensaio de Tratabilidade

Todos os ensaios foram realizados em 02 equipamentos de jarreste (marca Nova Ética), sendo um deles constituído por seis jarros e outro com três jarros, os quais todos os jarros possuíam um volume total de 2 L, com paletas individuais para cada jarro, que permitiam obtenção de gradiente de velocidade variável, conforme rotação pré-definida (0 a 600 rpm). Com o equipamento foi possível a realização de ensaios de coagulação, floculação e sedimentação.

Envolvendo todas as etapas de tratamento previstas num sistema de ciclo

completo, a simulação da filtração em areia utilizou filtros de laboratório de areia (FLAs) constituídos de material acrílico e preenchidos com 15 cm de areia (areia tipo I com grãos entre 0,30 e 0,59 mm). Os filtros através de suporte específico foram acoplados ao equipamento de jarreste conforme ilustra Figura 13. Buscou-se garantir taxa de filtração inferior a 240 m³/m².dia durante o processo de filtração.

Figura 13 - Filtros de laboratório de areia (FLAs) utilizados pesquisa



Fonte: Autor, 2020.

Os ensaios de tratabilidade com etapas de pré-oxidação com hipoclorito de cálcio, adsorção em carvão ativado, coagulação, floculação, sedimentação e filtração em filtro de areia, seguiram as condições abaixo:

PRÉ-OXIDAÇÃO (quando aplicável)

- Oxidante: Solução de Hipoclorito de Cálcio – CaO(Cl)₂;
- Dosagem de Oxidante: 4,0 mg/L;
- Gradiente da pré-oxidação: 100 s⁻¹;
- Tempo de contato: 30 min;

ADSORÇÃO CAP

- Adsorvente: 05 Tipos de CAP;
- Dosagem CAP: Variável conforme Planejamento Experimental;
- Gradiente da adsorção = 100 s⁻¹;
- Tempo de contato: Variável conforme Planejamento Experimental;

COAGULAÇÃO / FLOCULAÇÃO

- Alcalinizante: Não utilizado;
- Coagulante: Policloreto de Alumínio 18%;
- Dosagem PAC: 120 mg/L;
- Tempo de mistura rápida (T_{mr}): 30 segundos;
- Gradiente de mistura rápida (G_{mr}): 1000 s⁻¹;
- Tempo de floculação (T_f): 20 min;
- Gradiente de floculação: 25 s⁻¹;

DECANTAÇÃO

- Sedimentação: Velocidade de sedimentação = 0,5 cm/min;

FILTRAÇÃO

- Filtro: Filtro em acrílico – Filtro de laboratório de areia (FLAs);
- Meio filtrante: Areia tipo I com grãos entre 0,30 e 0,59 mm;
- Altura do meio filtrante: 15cm;

PARÂMETROS DE CONTROLE

- Água coagulada: pH;
- Água filtrada: turbidez, cor aparente, cloro residual livre e COT;

Anteriormente ao início dos ensaios com os CAPs, foi avaliado a remoção de matéria orgânica da água em estudo, sem o uso de CAP, ou seja, foi realizado ensaio de tratabilidade, com todas as etapas de um sistema de tratamento em ciclo completo, porém não foi aplicado CAP para adsorção de matéria orgânica.

4.6.3 Investigação da eficiência dos CAPs estudados

O processo de tratamento estatístico dos dados gerados nos ensaios de tratabilidade, e a forma de avaliação e validação dos resultados, teve o seguinte roteiro:

- Todos os dados gerados nos delineamentos experimentais, passaram pelo

tratamento estatístico no software Protimiza Experimental Design, sendo obtido o grau de significância de cada variável pesquisada (p-valor);

- Para os resultados que apresentaram significância estatística para alguma variável, o software elaborou um modelo matemático, que detalha as mudanças dos níveis das variáveis sobre as respostas (índices de desempenho);
- Cada modelo matemático foi submetido a análise de variância (ANOVA), onde foi verificado a adequação dos valores previstos com os valores experimentais;
- Validado o modelo matemático pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de resposta para cada índice de desempenho.
- Com informações disponibilizadas pelos fornecedores relativas ao custo de aquisição para cada um dos CAPs estudados, foi relacionado custo e eficiência de remoção para os carvões que obtiveram resultados satisfatórios, ou seja, concentrações inferiores a 3,0 mg/L.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada uma das etapas que foram necessárias na avaliação da eficiência de remoção de matéria orgânica com o uso dos 05 tipos de carvões estudados.

5.1 Carvões de estudo

Foram selecionados 05 tipos de carvão para investigação no presente estudo, de forma que fosse contemplado as diversas origens (animal, vegetal e mineral). As características químicas disponibilizadas pelos fornecedores e que foi comum para todos contactados foi número de iodo e umidade, com exceção para carvão de origem animal o qual foi oportunizado emprego de carvão produzido pelo Laboratório de Pesquisa em Química Ambiental e de B combustíveis (LAPEQ) da Universidade Federal do Tocantins (UFT) e que não teve caracterização físico-química.

Na Tabela 9 e Figura 14 são apresentados os carvões definidos para realização dos ensaios de tratabilidade com objetivo de avaliar a eficiência de remoção de matéria orgânica.

Tabela 9: Características dos carvões selecionados para realização do estudo

CAP	Origem	Número de Iodo (mg I ₂ /g)	Umidade (%)
CAP A	Mineral (Betuminoso)	800,0	8,0
CAP B	Vegetal (Pinus)	860,5	7,5
CAP C	Vegetal (Madeira)	600,0	8,0
CAP D	Vegetal (Coco Babaçu)	851,6	35,8
CAP E	Animal (Escama de Peixe)	-	-

Fonte: Autor, 2020.

Figura 14 – Amostra dos carvões selecionados para realização do estudo



Fonte: Autor, 2020.

5.2 Água buta

Definido o manancial (reservatório de acumulação - Córrego Caracol), procedeu-se com a identificação dos pontos críticos com concentração de COT. Foi realizado amostragem simples (Figura 15) de 10 pontos de monitoramento distribuídos na área do reservatório, com amostragem de água de superfície e fundo.

Figura 15 – Amostragem simples no reservatório de acumulação



Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para cada um desses pontos, com o monitoramento do parâmetro COT, indicador da concentração de matéria orgânica.

Tabela 10 - Resultados do monitoramento de COT no reservatório de acumulação do Córrego Caracol.

Identificação do Ponto	Coordenadas Geográficas	COT (mg/L)	
		Superfície	Fundo
1° Ponto - 1° Direito	(-7.0755164 / - 49.9361291)	8,31	-
2° Ponto - 2° Direito	(-7.0750585 / - 49.9357034)	15,20	16,21
3° Ponto - 3° Direito	(-7.0443752 / - 49.9354375)	8,00	-
4° Ponto - 1° Frente	(-7.0737908 / - 49.9363362)	8,45	-
5° Ponto - 2° Frente	(-7.0728940 / - 49.9363362)	8,38	11,21
6° Ponto - 3° Frente	(-7.0723923 / - 49.9379610)	8,53	-
7° Ponto - 1° Esquerdo	(-7.0734299 / - 49.9398780)	8,40	-
8° Ponto - 2° Esquerdo	(-7.0744006 / - 49.9393092)	8,02	13,34
9° Ponto - 3° Esquerdo	(-7.0755612 / - 49.9386709)	9,00	-
10° Ponto - Central	(-7.0760354 / - 49.9377864)	8,13	-

Fonte: Autor, 2020.

A Figura 16 apresenta uma vista geral do reservatório, onde é evidente a presença de vegetação em seu interior, principalmente próximo ao ponto de amostragem, o que de certa forma pode contribuir com as altas concentrações de matéria orgânica encontrada nos resultados obtidos com o monitoramento do COT.

Figura 16 – Vista geral do reservatório de acumulação do Córrego Caracol e ponto de amostragem da água da água de estudo



Fonte: Autor, 2020.

Avaliando os resultados obtidos foi possível identificar áreas críticas com concentração de matéria orgânica, nesse caso representado pelos resultados de COT. A partir da análise dos resultados obtidos, ficou evidente que regiões mais profundas e afastadas da área de influência direta do vertedouro do reservatório, tendem a apresentar maior concentração de matéria orgânica (> 10 mg/L), que de alguma forma podem ter influência do tempo de detenção e regime de escoamento da água no reservatório.

O ponto de amostragem de água definido foi próximo a região do 2º ponto direito, onde foi realizada uma nova amostragem da água de fundo que por sinal apresentou maior concentração de COT conforme Tabela 11.

A partir da realização da coleta e estando disponíveis os 1000 litros da amostra de água objeto do estudo foi realizado a caracterização físico-química de uma amostra do lote total. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Características físico-químicas da amostra da água de estudo - Córrego Caracol.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Alcalinidade	mgCaCO ₃ /L	91
Alumínio dissolvido	mg/L	0,107
Cor aparente	uC	352
Cor verdadeira	uC	179
COT	mg/L	23,09
DBO	mg/L	4,5
Dureza	mg/L	134
Ferro dissolvido	mg/L	0,876
Fósforo	mg/L	0,015
Manganês dissolvido	mg/L	0,154
Nitrato	mg/L	0,214
Nitrito	mg/L	0,009
Nitrogênio amoniacal	mg/L	0,182
pH (a 25°C)	-	7,07
Turbidez	uT	44,5

Fonte: Autor, 2020.

Analisando os resultados obtidos na caracterização da água bruta, foi possível identificar uma alta concentração de matéria orgânica, nesse caso identificado pelo resultado de COT (23,09 mg/L), satisfazendo dessa forma a condição da água necessária para realização dos ensaios. Além do COT, também foi identificado

elevada cor aparente (352 uC) e verdadeira (179 uC), situação essa perceptível na amostra, além de significativa presença de metais, no caso, ferro e manganês.

De um modo geral os resultados de cor verdadeira, alumínio dissolvido, ferro dissolvido e manganês dissolvido não atendem aos limites máximos estabelecidos para águas doces Classe II conforme Resolução CONAMA N° 357, de 17 de Março de 2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento.

5.3 Demanda de Cloro e Diagrama de Coagulação

Após a coleta e caracterização da água de estudo, foram realizados ensaios para definição das condições de pré-oxidação (demanda de cloro) e coagulação/floculação (diagrama de coagulação).

5.3.1 Demanda de cloro

Os ensaios de pré-oxidação para determinação da demanda de cloro e do tempo de contato foram realizados em equipamento jar teste (Figura 17) seguindo as condições pré definidas no planejamento experimental.

Figura 17 – Ensaio de verificação da demanda de cloro na pré-oxidação.



Fonte: Autor, 2020.

A caracterização da água de estudo, permitiu identificar altas concentrações de metais e matéria orgânica. A matéria orgânica dissolvida, as algas e as cianobactérias e seus metabólitos, inclusive suas toxinas, possuem grande influência na demanda de cloro numa etapa de pré oxidação. Ainda cabe destacar a influência dos metais (ferro e manganês), já que em situações de ocorrências de altas concentrações de matéria orgânica, como é o caso da água em estudo, estes metais podem estar complexados com a matéria orgânica, demandando ainda mais de cloro na etapa de pré-oxidação.

Para avaliar a demanda de cloro na pré-oxidação, estão apresentados na Tabela 12 os valores das variáveis estudadas, bem como as respostas obtidas, ou seja, cor aparente, pH, cloro residual livre e demanda de cloro.

Tabela 12 Delineamento de face centrada e respostas observadas nos ensaios de demanda de cloro na pré oxidação

Ensaio	Variáveis		Respostas			
	Dosagem de Cloro (mg/L)	Tempo Contato (min)	Cor Aparente (uC)	Residual Cloro (mg/L)	Demanda Cloro (mg/L)	pH
1	0,1	10	177	0,02	0,08	6,94
2	4	10	152	0,13	3,87	6,92
3	0,1	30	181	0,02	0,1	6,85
4	4	30	151	0,08	3,92	6,87
5	0,1	20	179	0,02	0,1	6,87
6	4	20	151	0,11	3,89	6,9
7	2,05	10	159	0,02	2,05	6,86
8	2,05	30	165	0,02	2,03	6,86
9	2,05	20	166	0,04	2,01	6,83
10	2,05	20	165	0,04	2,01	6,86
11	2,05	20	168	0,03	2,02	6,87

Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se os resultados da Tabela 12, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 13. A Tabela 13 apresenta os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância.

Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X1 e X2) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 13 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o ensaio de demanda de cloro

Demanda de Cloro (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	2,02	0,01	214,30	0,0000	Média	165,37	1,14	144,84	0,0000
X1 (L)	1,90	0,01	253,35	0,0000	X1 (L)	-13,83	0,91	-15,22	0,0000
X1 (Q)	-0,03	0,01	-2,92	0,0331	X1 (Q)	1,08	1,40	0,77	0,4752
X2 (L)	0,01	0,01	1,11	0,3170	X2 (L)	1,50	0,91	1,65	0,1597
X2 (Q)	0,01	0,01	0,98	0,3719	X2 (Q)	-1,92	1,40	-1,37	0,2279
X1 x X2	0,01	0,01	0,82	0,4513	X1 x X2	-1,25	1,11	-1,12	0,3123

L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Por meio da Tabela 13, observa-se que os termos lineares e quadráticos da dosagem de cloro (X1) foram estaticamente significativos ($p \leq 0,10$) para a demanda de cloro e termo linear dosagem de cloro (X1) para cor aparente, o que significa nível de confiança superior a 90%. Já relativo aos termos lineares e quadráticos do tempo de contato (X2) e as interações entre as variáveis (X1 x X2) não foram estatisticamente significativos ($p > 0,10$) para demanda de cloro e cor aparente.

Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obtiveram-se as Equações, que representam o modelo quadrático da demanda de cloro (mg/L), e linear para cor aparente em função das variáveis estudadas.

$$\text{Demanda de Cloro (mg/L)} = 2,02 + 1,90 x_1 - 0,03 x_1^2 \quad \text{Equação 1}$$

$$\text{Cor aparente (uC)} = 164,91 - 13,83 x_1 \quad \text{Equação 2}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), apresentada na Tabela 14.

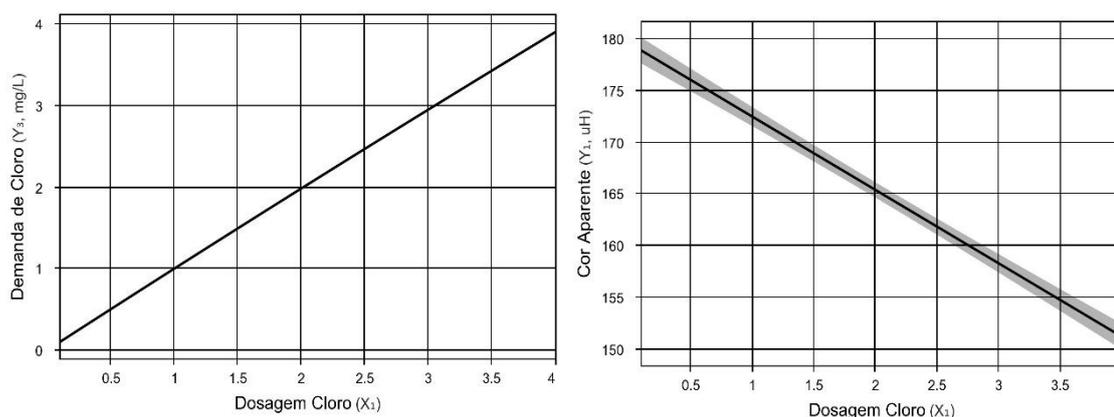
Tabela 14 - Análise da variância (ANOVA) do COT e Cor Aparente no ensaio de demanda de cloro

Demanda de Cloro (mg/L)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	21,7	2,0	10,8	32657,1	0,00000
Resíduos	0,0	8,0	0,0		
Total	21,7	10,0			
% variação explicada (R ²) = 99,99 % F _{0,10;2;8} = 3,11					
Cor Aparente (uC)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	1148,2	1,0	1148,2	188,8	0,00000
Resíduos	54,7	9,0	6,1		
Total	1202,9	10,0			
% variação explicada (R ²) = 95,45 % F _{0,10;1;9} = 3,36					

Fonte: Autor, 2020.

Sendo assim foi possível construir gráficos lineares que demonstram a influência da dosagem de cloro na demanda de cloro e cor aparente, conforme Figura 18.

Figura 18 - Ensaio de verificação da demanda de cloro na pré-oxidação com a água de estudo - jarteste em operação



Fonte: Autor, 2020.

De um modo geral ficou evidenciado que para a água de estudo, na etapa de pré-oxidação, quanto maior a dosagem de cloro, maior a demanda de cloro e menor

a cor aparente. Não foram identificadas alterações significativas no pH quando do aumento da dosagem de cloro.

Para as dosagens de cloro aplicadas e os tempos de contato estudados, a demanda de cloro variou de 0,1 a 3,89 mg/L. De modo a evitar a saturação do CAP com cloro residual após a pré-oxidação, a concentração deste deve ser próxima a 0,1 mg/L. Desta forma, as condições de pré-oxidação da água de estudo e que foram selecionadas para realização dos ensaios são: dosagem de 4,0 mg/L e tempo de contato de 30 min, já que nessas condições o residual médio de cloro foi de 0,1 mg/L para as três condições realizadas.

5.3.2 Diagrama de Coagulação

Na Tabela 15 são apresentados os resultados dos ensaios para definição das condições de coagulação da água objeto de estudo, com uso de policloreto de alumínio e cal hidratada.

Tabela 15 - Condições de coagulação com PAC e Cal Hidratada

Dosagem (mg/L)		pH Coagulação	Turbidez		Cor Aparente	
PAC	Cal Hidratada		Vs: 1,0 cm/min	Vs : 0,5 cm/min	Vs: 1,0 cm/min	Vs : 0,5 cm/min
20	0	7	14,60	9,96	237,00	205,00
25	0	7	16,20	9,04	234,00	219,00
30	0	6,96	13,70	8,45	224,00	212,00
30	5	7,08	14,30	13,80	239,00	226,00
30	10	7,03	13,90	15,20	226,00	213,00
30	15	7,1	18,90	18,10	247,00	233,00
35	0	6,91	14,10	8,32	212,00	207,00
40	0	6,95	9,75	8,03	190,00	185,00
45	0	6,92	8,13	4,95	184,00	146,00
50	0	6,84	5,47	3,57	80,00	75,00
50	1	6,74	6,39	3,77	107,00	75,00
50	2	6,75	7,48	3,26	112,00	81,00
50	3	6,77	7,27	4,37	121,00	83,00
52,5	1	6,75	9,26	5,31	100,00	68,00
52,5	2	6,75	6,74	3,65	94,00	62,00
52,5	3	6,75	9,11	4,18	105,00	65,00
55	0	6,83	4,12	2,52	61,00	65,00
55	0	6,87	8,43	4,39	96,00	56,00
55	1	6,83	8,48	3,66	102,00	59,00
55	2	6,82	7,72	4,04	93,00	59,00
55	3	6,83	6,46	4,01	80,00	53,00
55	4	6,84	5,53	3,31	90,00	61,00

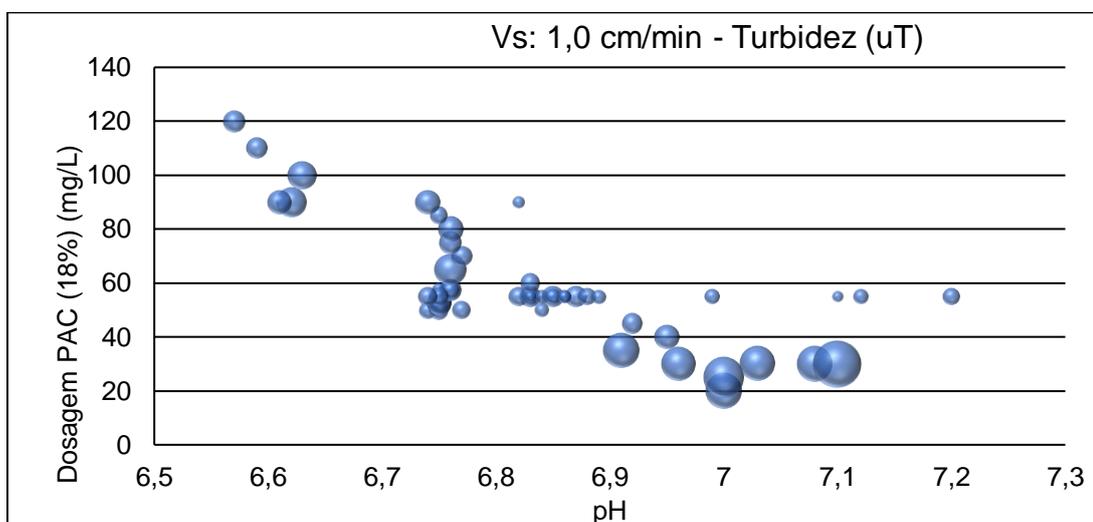
55	5	6,85	8,24	3,23	89,00	73,00
55	6	6,85	6,07	3,11	86,00	64,00
55	7	6,86	4,55	3,06	81,00	65,00
55	8	6,88	6,86	3,86	101,00	85,00
55	5	6,75	7,30	4,19	108,00	80,00
55	10	6,74	7,43	4,63	156,00	146,00
55	15	6,86	5,34	3,72	148,00	142,00
55	20	6,99	6,06	3,93	149,00	140,00
55	25	7,12	5,78	2,75	141,00	139,00
55	30	7,2	6,85	4,38	146,00	143,00
55	25	7,1	3,93	2,73	159,00	135,00
55	0	6,89	5,59	2,23	118,00	68,00
57,5	1	6,76	8,78	4,07	103,00	61,00
57,5	2	6,75	5,35	3,08	86,00	47,00
57,5	3	6,76	6,82	3,54	81,00	63,00
60	0	6,83	7,56	3,49	64,00	48,00
65	0	6,76	12,50	5,12	98,00	66,00
70	0	6,77	7,92	4,38	90,00	46,00
75	0	6,76	8,99	4,08	83,00	45,00
80	0	6,76	10,10	3,69	80,00	55,00
85	0	6,75	6,89	3,56	53,00	29,00
90	0	6,74	9,83	2,82	72,00	43,00
90	0	6,62	11,80	2,60	82,00	32,00
90	15	6,61	9,07	4,08	74,00	44,00
90	30	6,82	4,65	1,82	60,00	48,00
100	0	6,63	11,40	4,38	84,00	41,00
110	0	6,59	8,59	4,73	63,00	35,00
120	0	6,57	8,30	2,22	48,00	24,00

Fonte: Autor, 2020.

Observa-se que mesmo com grandes variações da dosagem de coagulante, não houveram grandes variações de pH já que a água objeto de estudo apresenta alta alcalinidade, ou seja, 91 mg/L CaCO₃. Dosagens de coagulante na ordem de 57,5 mg/L, 85 mg/L e 90 mg/L alcançaram relativa redução de turbidez e cor aparente se comparado as demais dosagens, porém os melhores resultados foram alcançados com dosagem de coagulante de 120 mg/L.

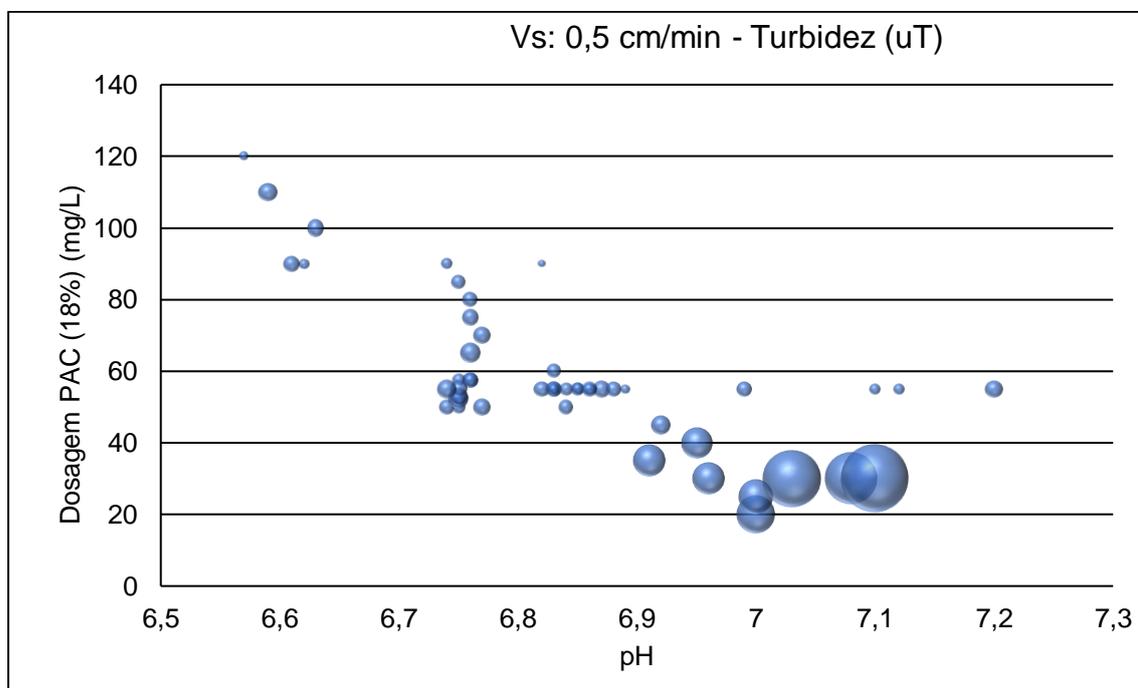
Com os dados da Tabela 15 foram construídos os diagramas de coagulação para remoção de turbidez, apresentados nas Figuras 19 e 20, e os diagramas de coagulação para remoção de cor aparente, apresentados nas Figuras 21 e 22. Nos gráficos apresentados, os resultados obtidos para os parâmetros turbidez e cor aparente são representados pelo tamanho das esferas, ou seja, quanto menor a esfera menor o resultado.

Figura 19 – Resultados de turbidez da água decantada (esferas) com Vs 1,0 cm/min em função da dosagem de PAC e do pH de coagulação



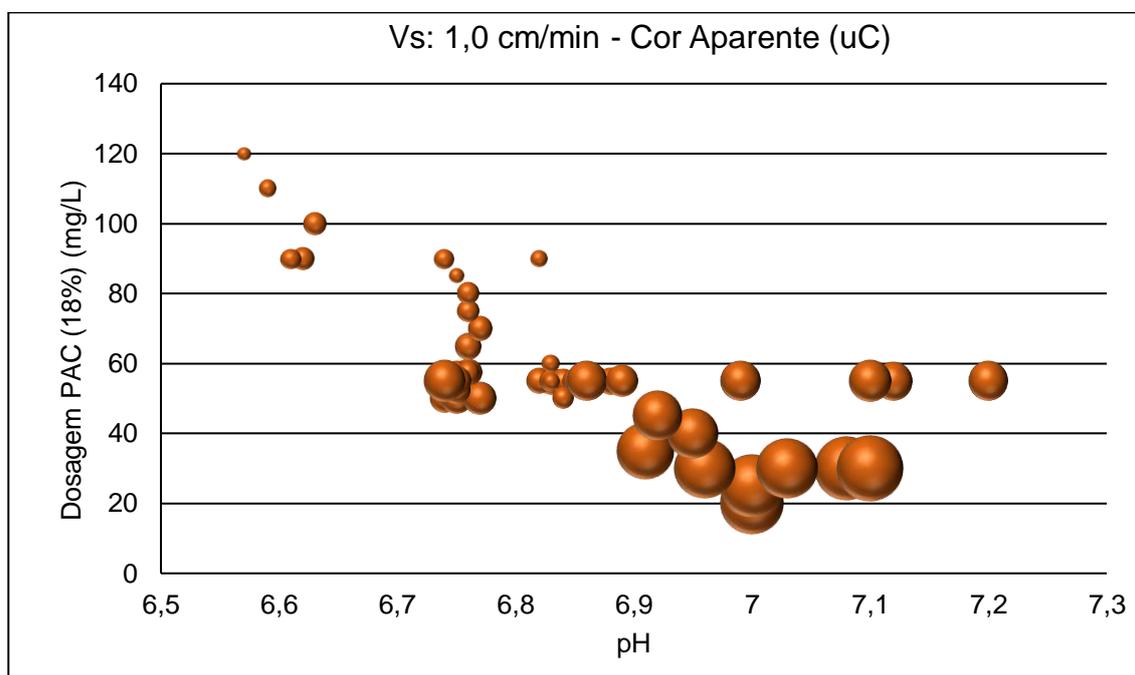
Fonte: Autor, 2020.

Figura 20 – Resultados de turbidez da água decantada (esferas) com Vs 0,5 cm/min em função da dosagem de PAC e do pH de coagulação



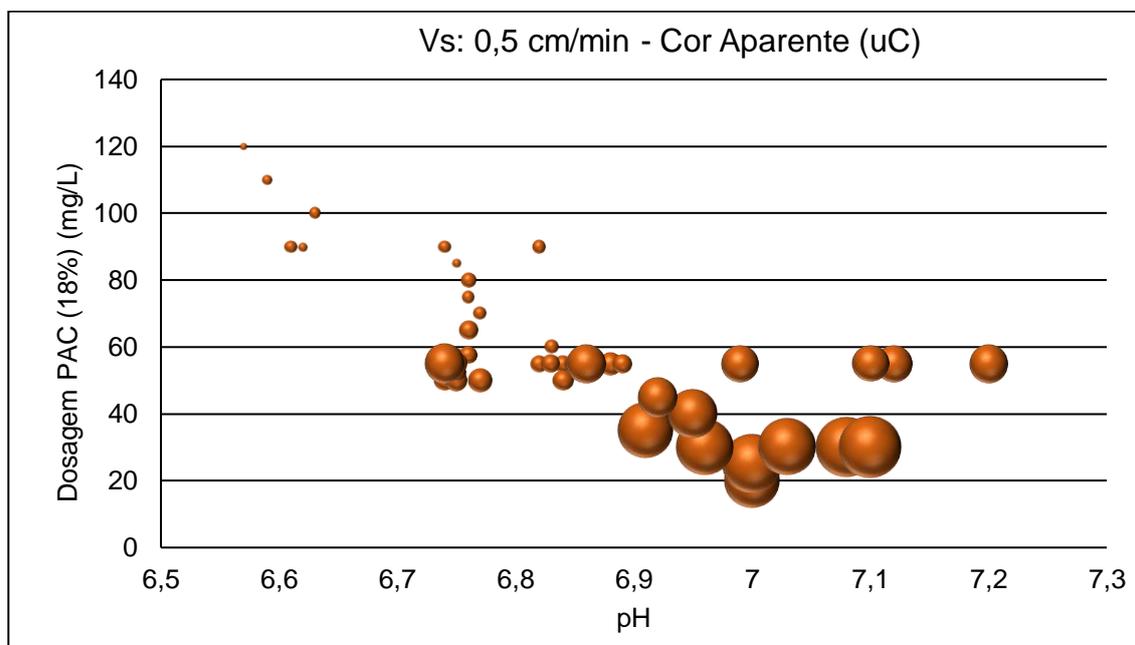
Fonte: Autor, 2020.

Figura 21 – Resultados de cor aparente da água decantada (esferas) com Vs 1,0 cm/min em função da dosagem de PAC e do pH de coagulação



Fonte: Autor, 2020.

Figura 22 – Resultados de cor aparente da água decantada (esferas) com Vs 0,5 cm/min em função da dosagem de PAC e do pH de coagulação



Fonte: Autor, 2020.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios (Tabela 15), e avaliação dos diagramas de coagulação foi selecionada a dosagem de 120 mg/L de policloreto de alumínio, sem uso de alcalinizante (cal hidratada) e pH de coagulação de 6,57 conforme Tabela 15. Nessa condição de coagulação foram obtidos os menores valores de turbidez e cor aparente remanescente para as velocidades de sedimentação estudadas, ou seja, turbidez de 2,22 uT e cor aparente de 24 uC com velocidade de sedimentação de 0,5 cm/min conforme observado na Figura 21.

Em trabalhos que avaliaram a remoção de matéria orgânica e elevados teores de coloração em água bruta (cor verdadeira >100 uC), Sloboda et al (2010) só alcançou resultados de cor remanescente inferiores a < 5 uC com emprego de dosagens de coagulante a base de alumínio em dosagens superiores a 105 mg/L, com pH de coagulação entre 4,8 e 5,2.

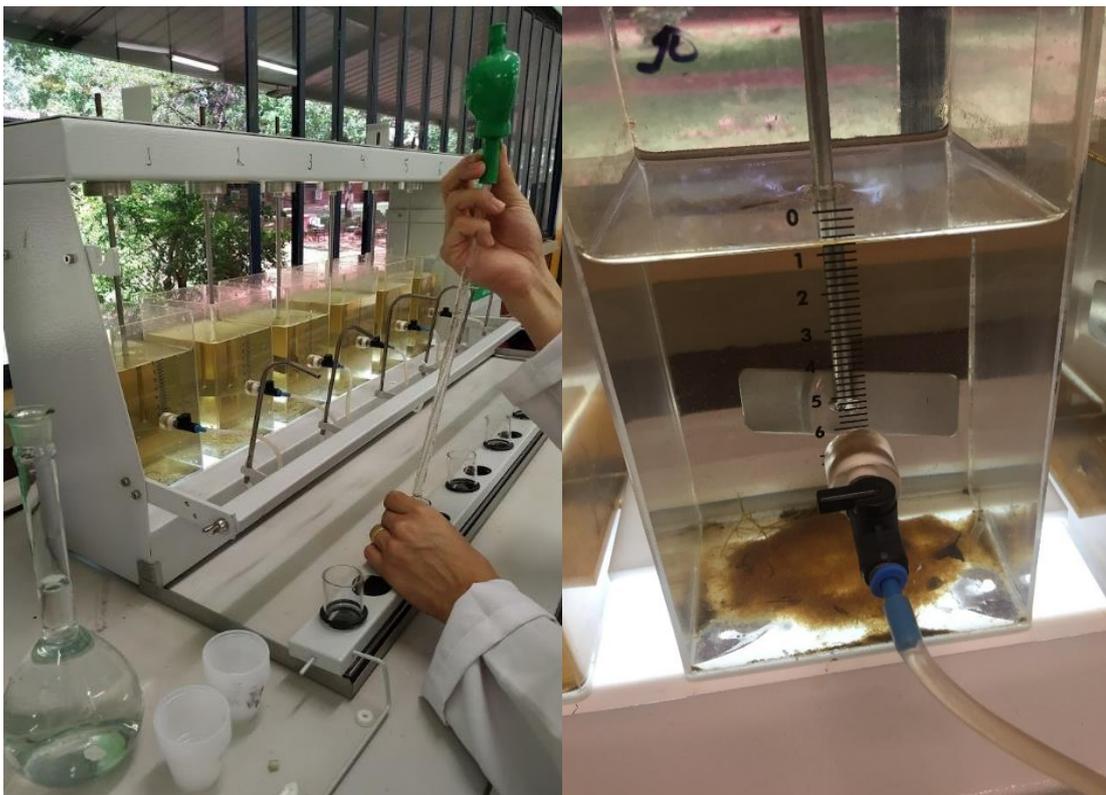
Mendes (1989) em estudos de construção de diagramas de coagulação para remoção de cor verdadeira, identificou eficiências de remoção superiores as 90% apenas em condições de aplicação coagulante a base de alumínio com dosagens que variavam entre 30 e 200 mg/L com pH de coagulação entre 6,0 e 8,0, considerando um água bruta com elevada cor verdadeira variando, ou seja, entre 100 e 450 uC, e turbidez com valores máximo de 30 NTU.

A água de estudo do referido trabalho, relativo aos parâmetros cor e turbidez, apresenta características semelhantes as águas estudadas por Sloboda et al (2010) e Mendes (1989), ou seja, altos valores de cor verdadeira e aparente e baixos valores de turbidez, com relativa concentração de matéria orgânica.

5.4 Ensaios de tratabilidade e avaliação de eficiência dos CAPs

Selecionado os carvões, coletado e caracterizado a amostra de água objeto de estudo e definida as condições de pré-oxidação e coagulação foram realizados os ensaios de tratabilidade (Figuras 23 e 24) variando dosagem e tempo de contato com e sem pré-oxidação para cada um dos CAPs conforme estabelecido no planejamento experimental.

Figura 23 – Realização dos ensaios de tratabilidade em equipamento jarteste



Fonte: Autor, 2020.

Figura 24 – Realização dos ensaios de tratabilidade seguido de filtração e análise de COT



Fonte: Autor, 2020.

Foi obtido a concentração de COT de 13,75 mg/L para uma amostra do filtrado após realização dos ensaios de tratabilidade sem CAP, nesse caso o “branco”. Isso demonstra que para a água objeto desse estudo, somente o processo de tratamento

convencional em dosagens adequadas de coagulante, é possível remover 40% da matéria orgânica presente na água.

Vale destacar que Dantas et al (2017) num estudo de caso que avaliou a eficiência de remoção de COT na operação de uma ETA de ciclo completo para o abastecimento público, identificou eficiências de até 60% na remoção de COT na água filtrada, considerando uma água bruta com concentração de cerca de 17 mg/L de COT, sem uso de carvão ativado, apenas com otimização do processo de coagulação/floculação

5.4.1 Ensaios de tratabilidade com adsorção usando CAP A

Quanto a avaliação de eficiência de remoção de matéria orgânica na água objeto desse estudo, utilizando o CAP A de origem mineral, na Tabela 16 são apresentados os resultados da matriz dos ensaios das variáveis estudadas, bem como as respostas observadas (COT, turbidez e cor aparente) para condições de água bruta com e sem o uso da pré-oxidação. O delineamento de face centrada (DFC) foi realizado para otimização da eficiência do carvão nos ensaios de bancada, considerando as seguintes variáveis: X1 (dosagem de CAP) e X2 (tempo de contato).

Tabela 16 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP A sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor)

Ensaio	Variáveis		CAP A					
			Sem pré oxidação			Com pré oxidação		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)
1	5	5	4,21	0,20	5	4,47	0,33	6
2	30	5	4,09	0,39	8	4,41	0,3	11
3	5	45	4,23	0,74	10	5,16	0,43	2
4	30	45	3,89	0,55	7	4,34	0,5	4
5	5	25	4,12	0,55	9	4,99	0,56	5
6	30	25	4,02	0,47	2	4,12	0,53	2
7	17,5	5	4,81	0,87	16	4,66	0,35	4
8	17,5	45	4,03	0,48	7	4,71	0,18	4
9	17,5	25	4,42	0,66	7	4,78	0,17	5
10	17,5	25	4,31	0,57	8	4,8	0,2	4
11	17,5	25	4,38	0,56	7	4,31	0,24	6

Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se os resultados da Tabela 16, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 17 que mostra o tratamento estatístico para os dados de COT e cor aparente com o uso do CAP A na condição sem e com pré-oxidação. Na tabela 17 são apresentados os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância. Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X1 e X2) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 17 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP A sem e com pré oxidação (COT e Cor)

CAP A sem pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	4,37	0,09	46,14	0,0000	Média	7,79	1,78	4,37	0,0072
X1 (L)	-0,09	0,08	-1,24	0,2709	X1 (L)	-1,17	1,42	-0,82	0,4480
X1 (Q)	-0,31	0,12	-2,65	0,0453	X1 (Q)	-2,97	2,18	-1,36	0,2311
X2 (L)	-0,16	0,08	-2,12	0,0874	X2 (L)	-0,83	1,42	-0,59	0,5822
X2 (Q)	0,04	0,12	0,36	0,7316	X2 (Q)	3,03	2,18	1,39	0,2241
X1 x X2	-0,06	0,09	-0,60	0,5775	X1 x X2	-1,50	1,74	-0,86	0,4271

CAP A com pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	4,63	0,11	41,39	0,0000	Média	4,32	1,31	3,28	0,0219
X1 (L)	-0,29	0,09	-3,27	0,0221	X1 (L)	0,67	1,05	0,64	0,5520
X1 (Q)	-0,08	0,14	-0,60	0,5718	X1 (Q)	0,21	1,61	0,13	0,9011
X2 (L)	0,11	0,09	1,25	0,2655	X2 (L)	-1,83	1,05	-1,75	0,1401
X2 (Q)	0,05	0,14	0,34	0,7451	X2 (Q)	0,71	1,61	0,44	0,6774
X1 x X2	-0,19	0,11	-1,74	0,1421	X1 x X2	-0,75	1,28	-0,59	0,5838

L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Por meio da Tabela 17, avaliando os dados da condição de uso do CAP A sem pré-oxidação observa-se que o termo quadrático da dosagem de CAP (X1) e termo linear do tempo de contato (X2) foram estatisticamente significativo ($p \leq 0,10$) para a concentração de COT, enquanto que todos os demais não apresentaram nenhum

efeito estatístico. Relativo aos resultados de cor aparente usando CAP A sem pré-oxidação nenhum termo apresentou efeito estatístico.

Já com relação ao uso do CAP A com pré-oxidação só foi estaticamente significativo ($p \leq 0,10$) o termo linear da dosagem de CAP (X_1).

Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obteve-se a Equação, que representa o modelo quadrático da concentração de COT (mg/L) resultante da aplicação do CAP sem pré-oxidação, em função das variáveis estudadas.

$$\text{Concentração de COT (mg/L)} = 4,39 - 0,30 x_1^2 - 0,16 x_2 \quad \text{Equação 3}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentados na Tabela 18 e Tabela 19.

Tabela 18 - Análise da variância (ANOVA) do COT com CAP A sem pré oxidação

COT (mg/L)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	0,4	2,0	0,2	6,6	0,02048
Resíduos	0,2	8,0	0,0		
Total	0,6	10,0			

% variação explicada (R^2) = 62,17% $F_{0,10;2;8} = 3,11$

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 19 - Análise da variância (ANOVA) do COT e Cor Aparente com CAP A com pré oxidação

COT (mg/L)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	0,7	2,0	0,3	7,9	0,01282
Resíduos	0,3	8,0	0,0		
Total	1,0	10,0			

% variação explicada (R^2) = 66,35% $F_{0,10;2;8} = 3,11$

Cor Aparente (uC)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	20,2	1,0	20,2	4,6	0,06059
Resíduos	39,5	9,0	4,4		
Total	59,6	10,0			

% variação explicada (R^2) = 33,82 $F_{0,10;1;9} = 3,36$

Fonte: Autor, 2020.

A superfície de resposta obtida para concentração de COT em função da dosagem e tempo de contato do CAP A sem pré-oxidação não apresentou representatividade estatística.

A eficiência média de remoção de matéria orgânica foi de 82% para a condição sem pré oxidação e 80% para a condição com pré oxidação. A concentração final de COT na amostra filtrada variou entre 3,9 e 5,2 mg/L.

Marchetto e Filho (2005) utilizando carvão ativado de origem mineral não observaram influência do pH e ponto de aplicação na remoção de MIB em água bruta, além de que também concluíram que as melhores eficiências de remoção se davam com maior dosagem e tempo de contato.

No estudo em questão não foi avaliado a influência do pH e não foi possível identificar influências da dosagem (máxima 30 mg/L) e tempo de contato (45 min) do CAP A na eficiência de remoção de matéria orgânica medida em COT, tanto para condição sem e com uso da pré-oxidação.

5.4.2 Ensaios de tratabilidade com adsorção usando CAP B

Relativo a avaliação de eficiência de remoção de matéria orgânica na água objeto de estudo, utilizando o CAP B de origem vegetal, na Tabela 20 são apresentados os resultados da matriz dos ensaios das variáveis estudadas, bem como as respostas observadas (COT, turbidez e cor aparente) para condições de água bruta com e sem o uso da pré-oxidação. O delineamento de face centrada (DFC) foi realizado para otimização da eficiência do carvão nos ensaios de bancada, considerando as seguintes variáveis: X1 (dosagem de CAP) e X2 (tempo de contato).

Tabela 20 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP B sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor)

Ensaio	Variáveis		CAP B					
			Sem pré oxidação			Com pré oxidação		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)

1	5	5	4,83	0,91	6	4,94	0,69	9
2	30	5	3,71	0,46	5	4,14	0,38	4
3	5	45	4,61	0,51	5	4,64	0,53	6
4	30	45	1,97	0,20	6	4,44	0,49	7
5	5	25	4,73	0,26	6	4,78	0,53	7
6	30	25	2,15	0,30	5	4,25	0,84	5
7	17,5	5	3,63	0,24	5	3,86	0,86	9
8	17,5	45	3,16	0,42	3	4,76	1,11	9
9	17,5	25	4,05	0,19	3	5,25	0,6	8
10	17,5	25	4,16	0,24	5	3,61	0,42	8
11	17,5	25	3,96	0,20	4	3,51	0,65	7

Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se os resultados da Tabela 20, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 21 que mostra o tratamento estatístico para os dados de COT e cor aparente com o uso do CAP B na condição sem e com pré-oxidação. Na tabela são apresentados os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância. Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X1 e X2) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 21 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP B sem e com pré oxidação (COT e Cor)

CAP B sem pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	3,85	0,22	17,63	0,0000	Média	4,00	0,44	9,11	0,0003
X1 (L)	-1,06	0,17	-6,09	0,0017	X1 (L)	-0,17	0,35	-0,48	0,6537
X1 (Q)	-0,09	0,27	-0,33	0,7513	X1 (Q)	1,50	0,54	2,79	0,0385
X2 (L)	-0,41	0,17	-2,33	0,0669	X2 (L)	-0,33	0,35	-0,95	0,3841
X2 (Q)	-0,13	0,27	-0,50	0,6361	X2 (Q)	0,00	0,54	0,00	1,0000
X1 x X2	-0,38	0,21	-1,79	0,1339	X1 x X2	0,50	0,43	1,17	0,2956
CAP B com pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	4,16	0,34	12,23	0,0001	Média	7,84	0,24	32,51	0,0000

X1 (L)	-0,26	0,27	-0,94	0,3892	X1 (L)	-1,00	0,19	-5,21	0,0034
X1 (Q)	0,31	0,42	0,74	0,4946	X1 (Q)	-2,11	0,30	-7,13	0,0008
X2 (L)	0,15	0,27	0,55	0,6032	X2 (L)	0,00	0,19	0,00	1,0000
X2 (Q)	0,10	0,42	0,24	0,8170	X2 (Q)	0,89	0,30	3,03	0,0291
X1 x X2	0,15	0,33	0,45	0,6697	X1 x X2	1,50	0,24	6,38	0,0014

L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Por meio da Tabela 21, avaliando os dados da condição de uso do CAP B sem pré-oxidação observa-se que os termos lineares de dosagem de cloro (X1) e tempo de contato (X2) foram estaticamente significativo ($p \leq 0,10$) para a concentração de COT, enquanto que para os resultados de cor aparente apenas o termo quadrático da dosagem de cloro (X1) foi estaticamente significativo ($p \leq 0,10$).

Já com relação ao uso do CAP B com pré-oxidação só foi estaticamente significativo ($p \leq 0,10$) o termo linear da dosagem de CAP (X1), enquanto que para o resultado de cor aparente tiveram significância os termos quadráticos da dosagem de CAP (X1) e tempo de contato (X2), além também da significância para a interação entre os dois (X1 e X2).

Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obteve-se a Equação, que representa o modelo quadrático da concentração de COT (mg/L) resultante da aplicação do CAP B sem pré-oxidação, em função das variáveis estudadas.

$$\text{Concentração de COT (mg/L)} = 3,72 - 1,06 x_1 - 0,40 x_2 - 0,38 x_1 x_2 \quad \text{Equação 4}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentados na Tabela 22 e Tabela 23.

Tabela 22 - Análise da variância (ANOVA) do COT e Cor Aparente com CAP B sem pré oxidação

COT (mg/L)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	8,3	3,0	2,8	19,4	0,00090
Resíduos	1,0	7,0	0,1		
Total	9,3	10,0			
% variação explicada (R^2) = 89,27 % $F_{0,10;3;7} = 3,07$					
Cor Aparente (uC)					

Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	6,1	1,0	6,1	10,0	0,01139
Resíduos	5,5	9,0	0,6		
Total	11,6	10,0			

% variação explicada (R^2) = 52,73 % $F_{0,10;1;9} = 3,36$

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 23 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP B com pré oxidação

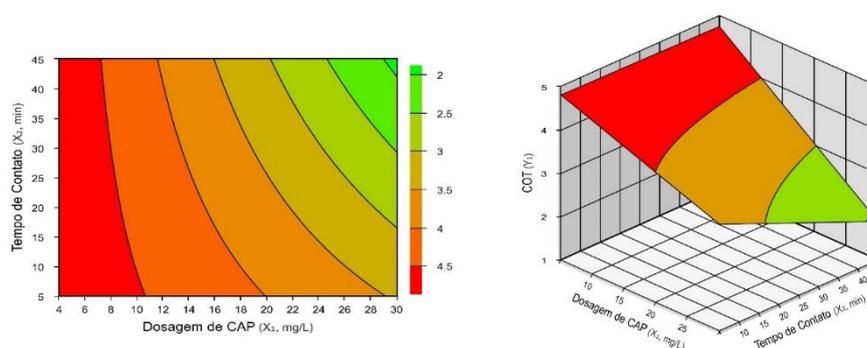
Cor Aparente (uC)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	26,5	4,0	6,6	36,0	0,00025
Resíduos	1,1	6,0	0,2		
Total	27,6	10,0			

% variação explicada (R^2) = 96,0 % $F_{0,10;4;6} = 3,18$

Fonte: Autor, 2020.

A superfície de resposta obtida para concentração de COT em função da dosagem e tempo de contato do CAP B sem pré-oxidação apresentou representatividade estatística, conforme evidenciado na Figura 25.

Figura 25 – Superfície de resposta da concentração de COT (mg/L) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP B sem pré-oxidação



Fonte: Autor, 2020.

Avaliando a superfície de resposta obtida, é possível identificar significativas reduções da concentração de matéria orgânica, com dosagens superiores a 25 mg/L

e tempo de contato de 30 min, evidenciando justamente o que pode ser observado em demais pesquisas realizadas, conforme revisão de literatura.

Marchetto et al (2006) em sua pesquisa utilizando carvão ativado pulverizado de origem vegetal com a dosagem fixa de CAP de 30 mg/L e tempo de adsorção de 16 minutos, e sem pré oxidação, obteve eficiências entre 50 a 60% na remoção de MIB.

Já no estudo em questão, considerando o uso do CAP B também de origem vegetal, em condições sem pré-oxidação foi identificado eficiências de remoção superiores a 90%. A concentração final de COT na amostra filtrada variou entre 2,0 e 5,3 mg/L, ou seja, foram obtidos próximo ao recomendado pela Environmental Protection Agency (USEPA, 2012) que recomenda máximo de 2,0 mg/L de COT na água tratada.

5.4.3 Ensaio de tratabilidade com adsorção usando CAP C

Ainda na avaliação dos carvões de origem vegetal, os resultados a seguir são relativos a avaliação do CAP C, na Tabela 24 são apresentados os resultados da matriz dos ensaios das variáveis estudadas, bem como as respostas observadas (COT, turbidez e cor aparente) para condições de água bruta com e sem o uso da pré-oxidação. O delineamento de face centrada (DFC) foi realizado para otimização da eficiência do carvão nos ensaios de bancada, considerando as seguintes variáveis: X1 (dosagem de CAP) e X2 (tempo de contato).

Tabela 24 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP C sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor)

Ensaio	Variáveis		CAP C					
			Sem pré oxidação			Com pré oxidação		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)
1	5	5	3,92	0,48	6	4,62	0,4	3
2	30	5	3,74	0,19	6	3,74	0,35	5
3	5	45	3,93	0,98	12	4,7	0,53	6
4	30	45	3,66	0,16	4	3,24	0,42	6
5	5	25	4,05	0,20	5	4,47	0,22	10
6	30	25	2,05	0,32	4	3,04	0,49	4

7	17,5	5	3,86	0,32	6	4,45	0,44	5
8	17,5	45	3,85	0,13	5	3,32	0,83	7
9	17,5	25	4,45	0,41	5	4,14	0,33	10
10	17,5	25	4,28	0,14	5	4,3	0,23	2
11	17,5	25	4,06	0,14	5	4,04	0,32	4

Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se os resultados da Tabela 24, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, apresentados na Tabela 25 que mostra o estatístico para os dados de COT e cor aparente com o CAP C na condição sem e com pré-oxidação. Na tabela são apresentados os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância. Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X1 e X2) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 25 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP C sem e com pré oxidação (COT e Cor)

CAP C sem pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	4,02	0,32	12,40	0,0001	Média	4,58	0,67	6,84	0,0010
X1 (L)	-0,41	0,26	-1,58	0,1740	X1 (L)	-1,50	0,53	-2,81	0,0374
X1 (Q)	-0,60	0,40	-1,51	0,1926	X1 (Q)	0,55	0,82	0,67	0,5305
X2 (L)	-0,01	0,26	-0,05	0,9607	X2 (L)	0,50	0,53	0,94	0,3914
X2 (Q)	0,21	0,40	0,52	0,6226	X2 (Q)	1,55	0,82	1,89	0,1170
X1 x X2	-0,02	0,32	-0,07	0,9459	X1 x X2	-2,00	0,65	-3,06	0,0280
CAP C com pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	4,03	0,17	23,45	0,0000	Média	5,89	1,71	3,45	0,0183
X1 (L)	-0,63	0,14	-4,59	0,0059	X1 (L)	-0,67	1,36	-0,49	0,6448
X1 (Q)	-0,09	0,21	-0,44	0,6812	X1 (Q)	0,26	2,09	0,13	0,9048
X2 (L)	-0,26	0,14	-1,89	0,1179	X2 (L)	1,00	1,36	0,74	0,4952
X2 (Q)	0,04	0,21	0,18	0,8634	X2 (Q)	-0,74	2,09	-0,35	0,7392
X1 x X2	-0,15	0,17	-0,86	0,4268	X1 x X2	-0,50	1,67	-0,30	0,7761

L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Avaliando os dados da Tabela 25, que demonstra resultados da condição de uso do CAP C sem pré-oxidação observa-se que para a concentração de COT, nenhum resultado foi estaticamente significativo ($p \leq 0,10$). Já com relação a cor aparente o termo linear da dosagem de CAP (X_1) e interação entre os dois (X_1 e X_2) teve significância ($p \leq 0,10$).

Já com relação ao uso do CAP C com pré-oxidação só foi estaticamente significativo ($p \leq 0,10$) o termo linear da dosagem de CAP (X_1) para concentração de COT.

Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obteve-se a Equação, que representa o modelo quadrático da cor aparente (uC) resultante da aplicação do CAP C sem pré-oxidação, em função das variáveis estudadas, e a Equação que representa o modelo quadrático da concentração de COT (mg/L) resultante da aplicação do CAP C com pré-oxidação.

$$\text{Cor Aparente (uC)} = 4,80 - 1,50 x_1 + 1,70 x_2^2 - 2 x_1 x_2 \quad \text{Equação 5}$$

$$\text{Concentração de COT (mg/L)} = 4,01 - 0,63 x_1 - 0,26 x_2 \quad \text{Equação 6}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentados na Tabela 26 e Tabela 27.

Tabela 26 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP C sem pré oxidação

Cor Aparente (uC)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	37,4	3,0	12,5	8,1	0,01128
Resíduos	10,8	7,0	1,5		
Total	48,2	10,0			
% variação explicada (R^2) = 77,58 % $F_{0,10;3;7} = 5,27$					

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 27 - Análise da variância (ANOVA) do COT com CAP C com pré oxidação

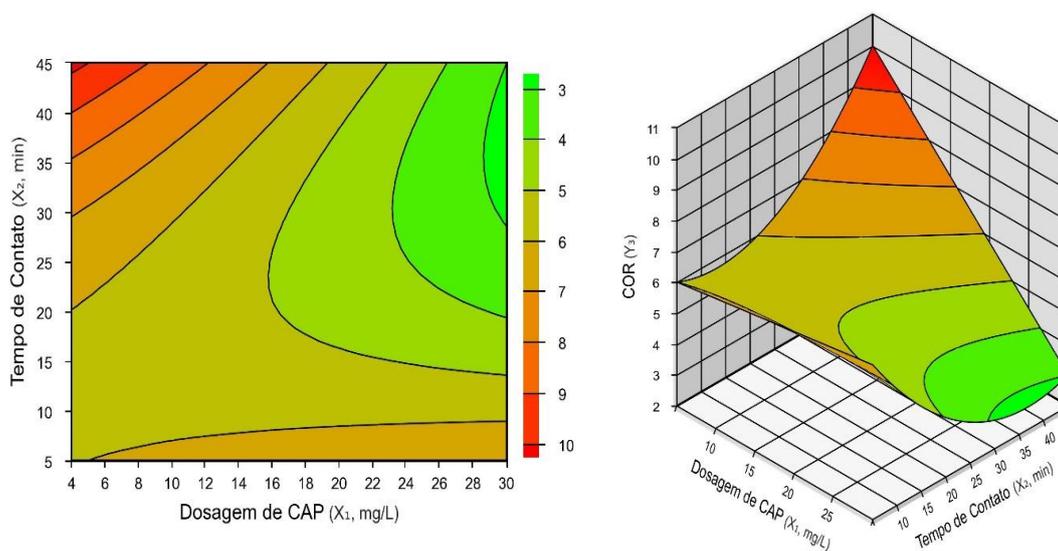
COT (mg/L)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	2,8	2,0	1,4	16,6	0,00143
Resíduos	0,7	8,0	0,1		
Total	3,4	10,0			

% variação explicada (R^2) = 80,5 % $F_{0,10;2;8} = 3,11$

Fonte: Autor, 2020.

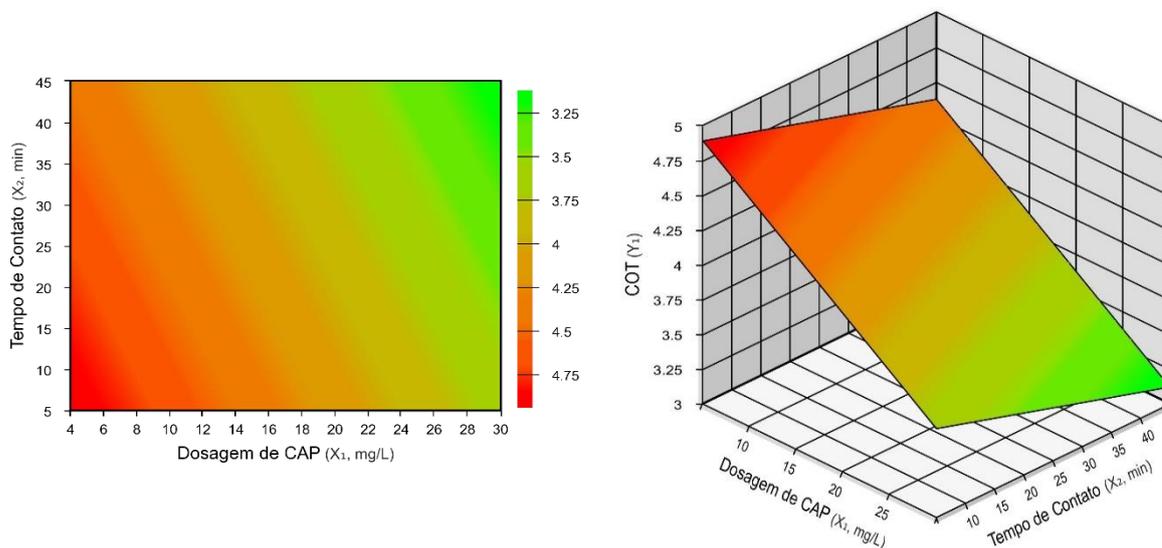
As Figuras 26 e 27 apresentam a superfície de resposta obtida para concentração de COT e cor aparente em função da dosagem e tempo de contato do CAP C com e sem pré-oxidação

Figura 26 – Superfície de resposta do resultado de cor aparente (uC) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP C sem pré-oxidação



Fonte: Autor, 2020

Figura 27 - Superfície de resposta da concentração de COT (mg/L) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP C com pré-oxidação



Fonte: Autor, 2020.

O aumento de dosagem e tempo de contato do CAP C em condições onde não haja pré-oxidação, favorece a obtenção de resultados com cor aparente baixa, apesar de que praticamente 99% os resultados obtidos para o parâmetro cor aparente com os demais carvões, estão dentro do limite estabelecido pela legislação vigente, que estabelece o limite máximo de 15 uC.

Destaca-se ainda significância estatística para remoção de matéria orgânica com o uso do CAP C na condição com pré oxidação. Avaliando a superfície de resposta obtida, é possível identificar significativas reduções da concentração de matéria orgânica, com dosagens superiores a 25 mg/L e tempo de contato de 30 min, assim como observado com o uso do CAP B, porém na condição sem pré-oxidação.

Alguns estudos que avaliaram a remoção de carbono orgânico com uso de pré-oxidação concluíram que não há notórias melhoras de eficiência com o uso da pré-oxidação. A exemplo, num estudo recente realizado por Mavaieie Júnior (2019), que avaliou a remoção de COD com e sem o emprego de pré oxidação, porém nesse caso com uso de ozônio, foi observado que a ozonização não produziu efeitos significativos na remoção da matéria orgânica natural, neste caso medida como COD quando comparados a adsorção sem adição de ozônio.

Para o estudo em questão a pré oxidação com cloro, principalmente pelo acréscimo de custos envolvidos com seu uso, não se mostra como uma alternativa viável, se comparado com os resultados de eficiência obtidos sem pré oxidação.

Com o uso do carvão vegetal CAP C, em condições sem pré-oxidação, foi observado eficiências de remoção na ordem de quase 92%, enquanto que com uso da pré oxidação eficiências máxima de 87%, ou seja, a pré oxidação não se mostra vantajosa, ao contrário, incrementa custos e não melhora eficiência.

Eficiências de remoção inferiores com uso da pré oxidação podem estar relacionadas a provável competição do residual de cloro disponível ao final de todo o processo de pré oxidação, com o carvão ativado.

Em termos de resultados de concentração de COT os resultados das amostras filtradas com uso do CAP C sem pré oxidação variaram entre 2,1 e 4,5 mg/L.

5.4.4 Ensaios de tratabilidade com adsorção usando CAP D

O quarto carvão avaliado, ainda de origem vegetal, foi o CAP D, a Tabela 28 apresenta os resultados da matriz dos ensaios das variáveis estudadas, bem como as respostas observadas (COT, turbidez e cor aparente) para condições de água bruta com e sem o uso da pré-oxidação. O delineamento de face centrada (DFC) foi realizado para otimização da eficiência do carvão nos ensaios de bancada, considerando as seguintes variáveis: X1 (dosagem de CAP) e X2 (tempo de contato).

Tabela 28 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP D sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor)

Ensaio	Variáveis		CAP D					
			Sem pré oxidação			Com pré oxidação		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)
1	5	5	4,72	0,24	5	5,23	0,16	4
2	30	5	4,35	0,35	3	5,45	0,36	9
3	5	45	4,43	0,28	5	5,52	0,42	5
4	30	45	2,7	0,24	5	5,14	0,21	7
5	5	25	4,35	0,24	5	5,98	0,2	2
6	30	25	3,01	0,25	4	5,47	1,64	29
7	17,5	5	4,69	0,13	5	5,54	0,27	4
8	17,5	45	3,87	0,14	5	5,79	0,63	6

9	17,5	25	4,46	0,13	4	5,36	0,51	8
10	17,5	25	4,33	0,13	4	5,37	0,26	6
11	17,5	25	4,51	0,17	5	5,27	0,24	4

Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se os resultados da Tabela 28, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 29 que mostra o tratamento estatístico para os dados de COT e cor aparente com o uso do CAP D na condição sem e com pré-oxidação. Na tabela são apresentados os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância. Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X1 e X2) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 29 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP D sem e com pré oxidação (COT e Cor)

CAP D sem pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	4,32	0,11	39,66	0,0000	Média	4,47	0,26	17,23	0,0000
X1 (L)	-0,57	0,09	-6,61	0,0012	X1 (L)	-0,50	0,21	-2,42	0,0601
X1 (Q)	-0,48	0,13	-3,58	0,0159	X1 (Q)	-0,18	0,32	-0,58	0,5875
X2 (L)	-0,46	0,09	-5,30	0,0032	X2 (L)	0,33	0,21	1,61	0,1676
X2 (Q)	0,12	0,13	0,91	0,4024	X2 (Q)	0,32	0,32	0,99	0,3662
X1 x X2	-0,34	0,11	-3,20	0,0240	X1 x X2	0,50	0,25	1,98	0,1051
CAP D com pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	5,49	0,15	36,93	0,0000	Média	7,74	3,53	2,19	0,0801
X1 (L)	-0,11	0,12	-0,94	0,3882	X1 (L)	5,67	2,81	2,02	0,0999
X1 (Q)	0,01	0,18	0,07	0,9506	X1 (Q)	5,16	4,33	1,19	0,2867
X2 (L)	0,04	0,12	0,32	0,7588	X2 (L)	0,17	2,81	0,06	0,9550
X2 (Q)	-0,05	0,18	-0,26	0,8018	X2 (Q)	-5,34	4,33	-1,23	0,2718
X1 x X2	-0,15	0,14	-1,04	0,3476	X1 x X2	-0,75	3,44	-0,22	0,8362

L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Por meio da Tabela 29, avaliando os dados da condição de uso do CAP D sem pré-oxidação para os resultados de COT, apenas o termo quadrático do tempo de contato (X_2) não teve significância estatística ($p \leq 0,10$). Relativos aos resultados de cor aparente apenas o termo linear da dosagem de CAP (X_1) foi estaticamente significativo ($p \leq 0,10$).

Com relação ao uso do CAP D com pré-oxidação só foi estaticamente significativo ($p \leq 0,10$) o termo linear da dosagem de CAP (X_1) tanto para os resultados de COT quanto cor aparente.

Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obtiveram-se as Equações, que representam o modelo quadrático da concentração de COT (mg/L) e cor aparente (uC) resultante da aplicação do CAP D sem pré-oxidação, em função das variáveis estudadas, e a Equação que representa o modelo quadrático de cor aparente (uC) resultante da aplicação do CAP D com pré-oxidação.

Para CAP D sem pré oxidação:

$$\text{COT (mg/L)} = 4,37 - 0,57 x_1 - 0,45 x_1^2 - 0,46 x_2 - 0,34 x_1 x_2 \quad \text{Equação 7}$$

$$\text{Cor Aparente (uC)} = 4,55 - 0,50 x_1 + 0,50 x_1 x_2 \quad \text{Equação 8}$$

Para CAP D com pré oxidação:

$$\text{Cor Aparente (uC)} = 7,64 + 5,67 x_1 \quad \text{Equação 9}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentados na Tabela 30 e Tabela 31.

Tabela 30 - Análise da variância (ANOVA) do COT e Cor Aparente com CAP D sem pré oxidação

COT (mg/L)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	4,2	4,0	1,1	24,2	0,00076

Resíduos	0,3	6,0	0,0
Total	4,5	10,0	

% variação explicada (R^2) = 94,15 % $F_{0,10;4;6} = 3,18$

Cor Aparente (uC)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	2,5	2,0	1,3	4,5	0,04928
Resíduos	2,2	8,0	0,3		
Total	4,7	10,0			

% variação explicada (R^2) = 52,88 % $F_{0,10;2;8} = 3,11$

Fonte: Autor, 2020.

Tabela 31 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP D com pré oxidação

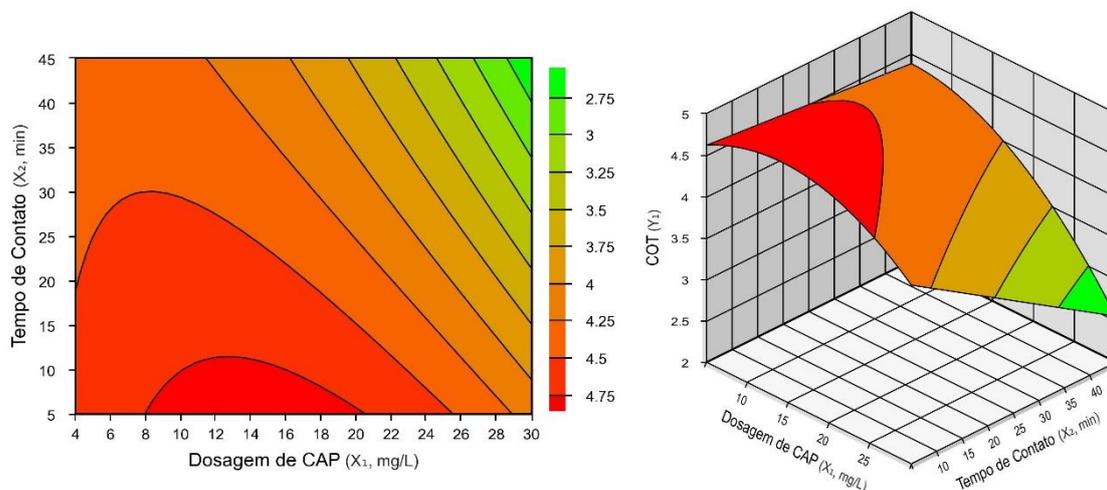
Cor Aparente (uC)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{cal}	p-valor
Regressão	192,7	1,0	192,7	5,0	0,05302
Resíduos	349,9	9,0	38,9		
Total	542,5	10,0			

% variação explicada (R^2) = 35,51 % $F_{0,10;1;9} = 3,36$

Fonte: Autor, 2020.

A superfície de resposta obtida para concentração de COT em função da dosagem e tempo de contato do CAP D sem pré-oxidação, apresentou representatividade estatística, conforme evidenciado na Figura 28.

Figura 28 – Superfície de resposta da concentração de COT (mg/L) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP D sem pré-oxidação



Fonte: Autor, 2020.

Avaliando a superfície de resposta obtida, percebe-se que assim como verificado no CAP B e CAP C sem pré oxidação, há significativas reduções da concentração de matéria orgânica, quanto mais alta as dosagens e tempo de contato do CAP D. Para esse caso em específico a ressalva é que melhores resultados, ou seja, valores de COT próximo a 2,0 mg/L, são alcançados com dosagens próximo a 30 mg/L e tempo de contato superiores a 40 min, o que é factível de operacionalização numa planta em operação de escala real. A depender da distancia do sistema de captação para o sistema de tratamento, faz-se necessário implantação de estrutura física que permita maiores tempo de contato.

Leal (2013) e Guerra (2014) também estudaram em escala experimental de tratamento convencional a remoção de orgânicos especificamente herbicida 2,4-D, utilizando carvões de origem vegetal (casca de coco e da madeira pinus), e obtiveram resultados satisfatórios com eficiências variando entre 53 e 71%, porém com aplicações de carvão ativado que alcançaram dosagens de até 150 mg/L e tempo de contato de até 30 minutos.

No estudo em questão com o uso do carvão de origem vegetal CAP D, oriundo do coco babaçu, em condições sem pré-oxidação não foram identificadas eficiências de remoção superiores a 90%, assim como observado para o CAP B e CAP C, porém cabe destacar que as concentrações finais de COT na amostra filtrada variaram entre

2,7 e 6,0 mg/L, onde para dosagem de 30 mg/L com tempo de contato de 25 e 45 minutos foram obtidas concentrações de 3,0 e 2,7 respectivamente, ou seja, nessas condições de aplicação são obtidos resultados que atendem a recomendação de pesquisadores, como a de que o valor seja igual a 3 mg/L (DI BERNARDO et al., 2017).

5.4.5 Ensaio de tratabilidade com adsorção usando CAP E

Por fim foi avaliado o CAP E, carvão de origem animal, não comercializado e produzido a nível de escala experimental de bancada. Na Tabela 32 são apresentados os resultados da matriz dos ensaios das variáveis estudadas, bem como as respostas observadas (COT, turbidez e cor aparente) para condições de água bruta com e sem o uso da pré-oxidação. O delineamento de face centrada (DFC) foi realizado para otimização da eficiência do carvão nos ensaios de bancada, considerando as seguintes variáveis: X1 (dosagem de CAP) e X2 (tempo de contato).

Tabela 32 - Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP E sem e com pré oxidação (COT, Turbidez e Cor)

Ensaio	Variáveis		CAP E					
			Sem pré oxidação			Com pré oxidação		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)
1	5	5	4,51	0,20	6	4,89	0,27	6
2	30	5	4,67	0,25	7	4,62	0,44	7
3	5	45	4,36	0,23	7	4,93	0,39	7
4	30	45	4,73	0,29	9	4,62	1,2	15
5	5	25	4,65	0,33	6	5,15	0,8	9
6	30	25	4,42	0,26	6	5,07	0,38	6
7	17,5	5	4,5	0,26	7	5,41	0,33	1
8	17,5	45	4,3	0,20	8	5,8	0,27	5
9	17,5	25	4,23	0,46	8	5,12	0,31	7
10	17,5	25	4,91	0,23	6	4,67	0,3	7
11	17,5	25	4,43	0,29	8	5,01	0,3	5

Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se os resultados da Tabela 32, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 33 que mostra o

tratamento estatístico para os dados de COT e cor aparente com o uso do CAP E na condição sem e com pré-oxidação. Na tabela são apresentados os coeficientes de regressão, bem como o desvio padrão e valores de t e p para as variáveis que foram estatisticamente significativas a 10% de significância. Valores de p-valor abaixo de 0,100 indicam que houve efeito estatístico das variáveis (X1 e X2) nas respostas estudadas, com nível de confiança de 90%.

Tabela 33 - Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas observadas para o CAP E sem e com pré oxidação (COT e Cor)

CAP E sem pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	4,49	0,14	33,12	0,0000	Média	7,11	0,47	15,04	0,0000
X1 (L)	0,05	0,11	0,46	0,6626	X1 (L)	0,50	0,38	1,33	0,2410
X1 (Q)	0,09	0,17	0,56	0,5970	X1 (Q)	-0,76	0,58	-1,32	0,2444
X2 (L)	-0,05	0,11	-0,45	0,6729	X2 (L)	0,67	0,38	1,77	0,1364
X2 (Q)	-0,04	0,17	-0,25	0,8134	X2 (Q)	0,74	0,58	1,27	0,2589
X1 x X2	0,05	0,13	0,40	0,7076	X1 x X2	0,25	0,46	0,54	0,6105

CAP E com pré oxidação									
COT (mg/L)					Cor Aparente (uC)				
	Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor		Coef. de regressão	Desvio padrão	t calculado	p-valor
Média	5,15	0,21	24,73	0,0000	Média	5,37	1,35	3,97	0,0107
X1 (L)	-0,11	0,17	-0,66	0,5361	X1 (L)	1,00	1,08	0,93	0,3956
X1 (Q)	-0,36	0,25	-1,41	0,2187	X1 (Q)	3,58	1,66	2,16	0,0832
X2 (L)	0,07	0,17	0,43	0,6833	X2 (L)	2,17	1,08	2,01	0,1003
X2 (Q)	0,14	0,25	0,54	0,6151	X2 (Q)	-0,92	1,66	-0,56	0,6022
X1 x X2	-0,01	0,20	-0,05	0,9626	X1 x X2	1,75	1,32	1,33	0,2418

L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Na condição de uso do CAP E sem pré-oxidação observa-se na Tabela 33 que não houve significância estatística para os resultados de COT e cor aparente. Relacionado ao uso do CAP E com pré-oxidação foi estatisticamente significativo ($p \leq 0,10$) apenas o termo quadrático da dosagem de CAP (X1) para o parâmetro cor aparente.

Considerando-se os parâmetros significativos ($p \leq 0,10$), obteve-se a Equação, que representa o modelo quadrático de cor aparente resultante da aplicação do CAP E com pré-oxidação, em função das variáveis estudadas.

$$\text{Cor Aparente (uC)} = 5 + 3,33 x_1^2 + 2,17 x_2 \quad \text{Equação 10}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP E com pré oxidação

Cor Aparente (uC)					
Fontes de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F _{cal}	p-valor
Regressão	58,5	2,0	29,2	4,2	0,05554
Resíduos	55,2	8,0	6,9		
Total	113,6	10,0			
% variação explicada (R^2) = 51,45 % $F_{0,10;2;8} = 3,11$					

Fonte: Autor, 2020.

Não houve coerência na superfície de resposta obtida para concentração de cor aparente em função da dosagem e tempo de contato do CAP E com pré-oxidação, ou seja, não houve representatividade estatística.

As concentrações de COT nas amostras finais (filtrada) com uso do carvão de origem animal CAP E nas condições com e sem pré-oxidação variaram entre 4,2 e 5,8 mg/L, ou seja, os maiores resultados obtidos dentre os 5 CAPs avaliados.

Em estudos similares em que foi avaliado a remoção de orgânicos com emprego de carvões de origem animal, mineral e vegetal, também foram obtidos melhores resultados com uso do carvão ativado vegetal. Em seu estudo Melo et al (2009) investigou a adsorção em carvão ativado pulverizado na remoção de saxitoxinas em águas de abastecimento submetidas ao tratamento em ciclo completo, utilizando os três tipos de carvão, sendo obtido melhores resultados com uso do carvão vegetal com dosagens de até 50 mg/L e tempo de contato de 2 horas, ou seja, o carvão de origem animal obteve resultados menos satisfatórios que o de origem vegetal.

A eficiência de remoção do CAP E, para ambas condições, com e sem pré-oxidação, não ultrapassou os 82% de eficiência, resultando nas menores eficiência observada entre os 5 carvões.

5.5 Avaliação comparativa de eficiência dos CAPs estudados

Após a análise individualizada de cada um dos 5 tipos CAPs avaliados, nas diferentes condições (com e sem pré-oxidação), foi realizada a análise comparativa entre os carvões.

5.5.1 Eficiência dos CAPs estudados na condição sem pré-oxidação

Os resultados de concentração e eficiência de remoção de COT, na condição de ensaios sem pré-oxidação, foram compilados e são apresentados na Tabela 35.

Tabela 35 - Resultados de concentração e eficiência de remoção de COT para cada tipo de CAP avaliado, com ensaios na condição sem pré-oxidação.

Dosagem CAP (mg/L)	Tempo de Contato (min)	Resultados SEM pré-oxidação									
		Concentração COT (mg/L)					Eficiência de remoção COT (%)				
		CAP A	CAP B	CAP C	CAP D	CAP E	CAP A	CAP B	CAP C	CAP D	CAP E
5,0	5,0	4,21	4,83	3,92	4,72	4,51	82%	79%	83%	80%	80%
5,0	45,0	4,23	4,61	3,93	4,43	4,36	82%	80%	83%	81%	81%
5,0	25,0	4,12	4,73	4,05	4,35	4,65	82%	80%	82%	81%	80%
17,5	5,0	4,81	3,63	3,86	4,69	4,50	79%	84%	83%	80%	81%
17,5	45,0	4,03	3,16	3,85	3,87	4,30	83%	86%	83%	83%	81%
17,5	25,0	4,42	4,05	4,45	4,46	4,23	81%	82%	81%	81%	82%
17,5	25,0	4,31	4,16	4,28	4,33	4,91	81%	82%	81%	81%	79%
17,5	25,0	4,38	3,96	4,06	4,51	4,43	81%	83%	82%	80%	81%
30,0	5,0	4,09	3,71	3,74	4,35	4,67	82%	84%	84%	81%	80%
30,0	45,0	3,89	1,97	3,66	2,70	4,73	83%	91%	84%	88%	80%
30,0	25,0	4,02	2,15	2,05	3,01	4,42	83%	91%	91%	87%	81%

Fonte: Autor, 2020.

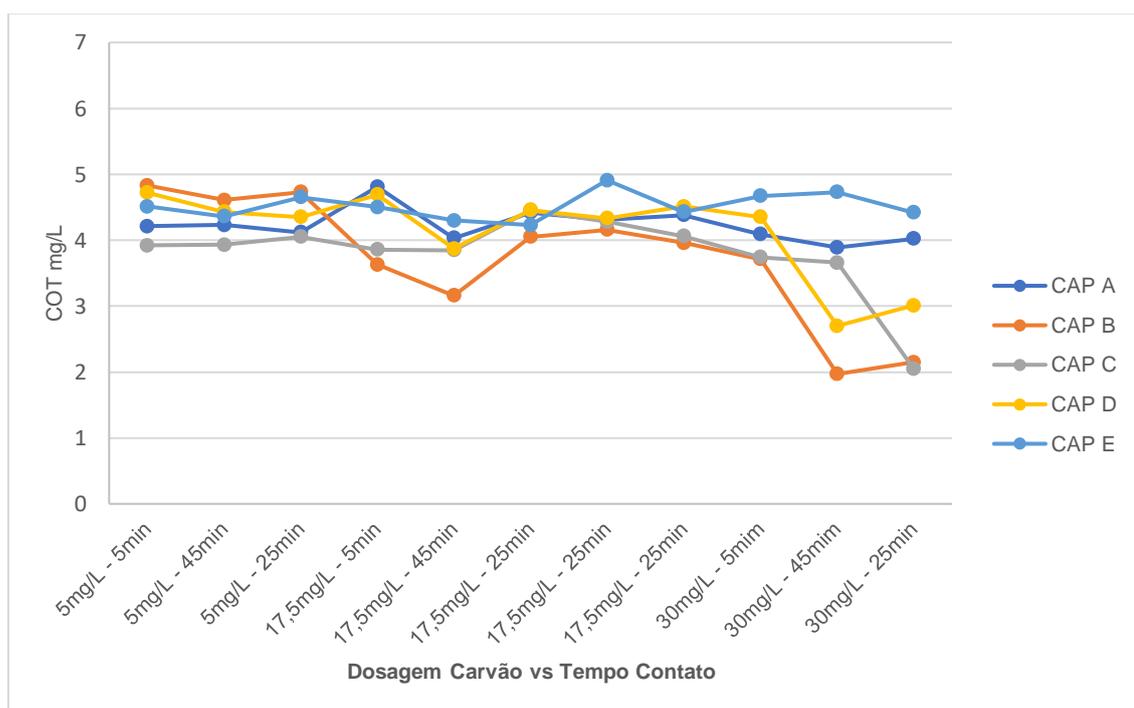
É possível identificar concentrações de COT na ordem de 1,97 mg/L na amostra filtrada, ou seja, etapa final de um sistema de ciclo completo. Apesar da legislação atual que defini os padrões de potabilidade da água, não estabelecer limites máximos permitidos para esse parâmetro, alguns resultados atingidos no estudo, atendem a

recomendação de pesquisadores da área (DI BERNANRDO, 2011) que recomendam 3,0 mg/L como limite máximo para água tratada, e inclusive a recomendação da Environmental Protection Agency (USEPA, 2012) que recomenda concentração de COT de máximo de 2,0 mg/L.

Foram alcançadas eficiências de quase 92% na remoção de matéria orgânica, bem acima do recomendado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (UESPA, 2012), que estabelece eficiência de remoção mínima de 40% para fontes abastecimento que possuam concentrações de COT acima de 8,0 mg/L e Alcalinidade entre 60 e 120 mg CaCO₃/L.

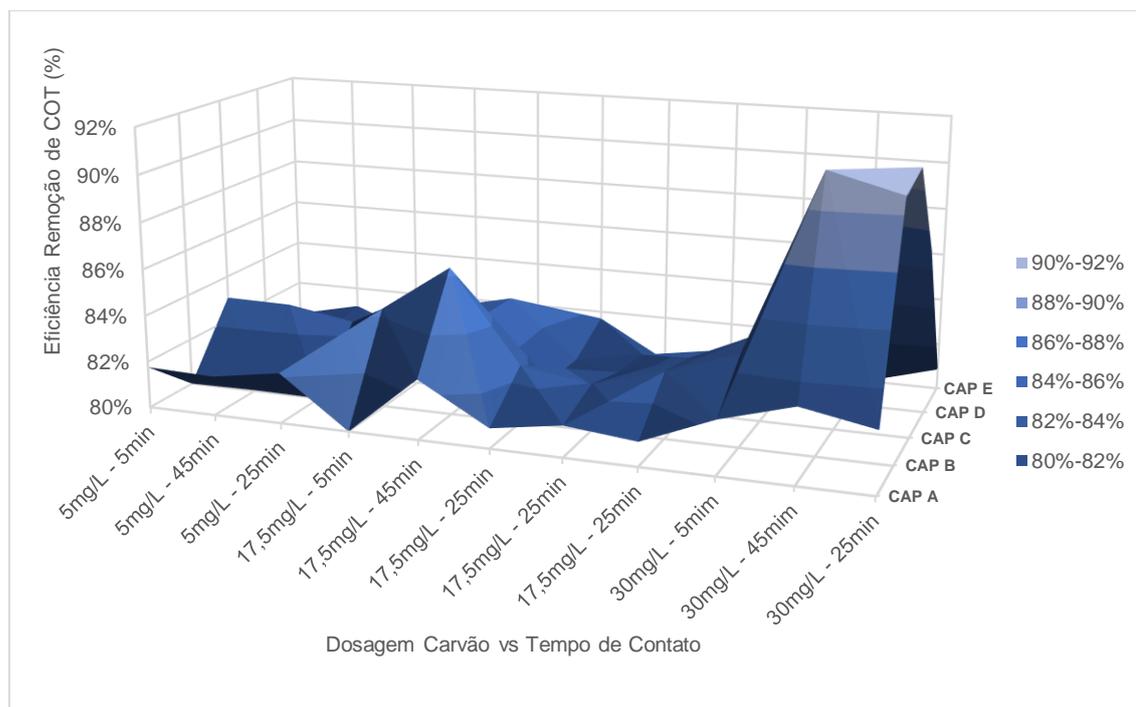
Nas figuras 29 e 30 a seguir são apresentados gráficos de comparação entre os 5 tipos de CAPs avaliados, na condição sem pré-oxidação.

Figura 29 – Comparativo CAPs sem pré-oxidação - Resultados COT (mg/L)



Fonte: Autor, 2020.

Figura 30 – Comparativo CAPs sem pré-oxidação - Eficiência Remoção COT (%)



Fonte: Autor, 2020.

Avaliando os gráficos comparativos entre os CAPs (Figuras 29 e 30) foi possível identificar que os CAPs B, C e D, tiveram melhores eficiências (87 a 92%), alcançando concentrações de COT próximo a 2,0 mg/L na amostra do filtrado. Dentre os 3 CAPs, o CAP B foi o que apresentou melhor resultado, ou seja, COT de 1,97 mg/L em condições de alta dosagem e tempo de contato do CAP. Cabe destacar que o CAP B apresenta maior número de iodo, ou seja, 860,5 mg de iodo por grama (Tabela 9), o que de certa forma influencia na obtenção dos melhores resultados. Os CAPs C e D também tiveram comportamentos semelhantes, ou seja, mais eficiência com maiores dosagem e tempo de contato conforme identificado nos diversos trabalhos similares.

Importante destacar que em muitos estudos que também avaliaram a remoção de orgânicos específicos com uso de carvão ativado, resultados com eficiências superiores a 80% só foram obtidos com altas dosagens e tempo de contato, com destaque para Fernandes (2011) que obteve bons resultados na remoção de hormônios com dosagem de 50 mg/L e tempo de contato de 60 minutos, Silva et al (2012) na remoção de antibióticos com tempo de contato de 120 minutos, e Melo et al (2009) na remoção de saxitoxinas com dosagens de 50 mg/L e tempo de contato de 120 minutos.

Foi observado que os 3 CAPs de melhores resultados, ou seja, eficiências em torno de remoção de 90% e concentrações finais de COT inferiores a 3 mg/L, são de origem vegetal. Dos carvões de origem vegetal avaliados, o CAP B obteve os resultados mais satisfatórios se comparado ao CAP C e D.

O CAP B possui a maior capacidade adsorptiva, nesse caso representado tanto pelo número de iodo indicado no laudo do fornecedor, ou seja, 860,5 mg I₂/g. O uso desses CAPs nas condições de melhor eficiência é ideal para evitar a formação de subprodutos orgânicos halogenados, potencialmente tóxicos aos seres humanos, que no caso tem como principal precursor a matéria orgânica presente na água (DI BERNANRDO, 2017). Para os CAP A e CAP E, (mineral e vegetal respectivamente), não foram identificadas alterações significativas de eficiência com a variação de dosagem e tempo de contato, ou seja, o aumento de dosagem e tempo de contato do CAP trouxeram melhoras na eficiência, assim como observado nos CAPs B, C e D.

5.5.2 Eficiência dos CAPs estudados na condição com pré-oxidação

Por último são apresentados os resultados de concentração e eficiência de remoção de COT, obtidos na condição de ensaios com pré-oxidação Tabela 36.

Tabela 36 - Resultados de concentração e eficiência de remoção de COT para cada tipo de CAP avaliado, com ensaios na condição com pré-oxidação.

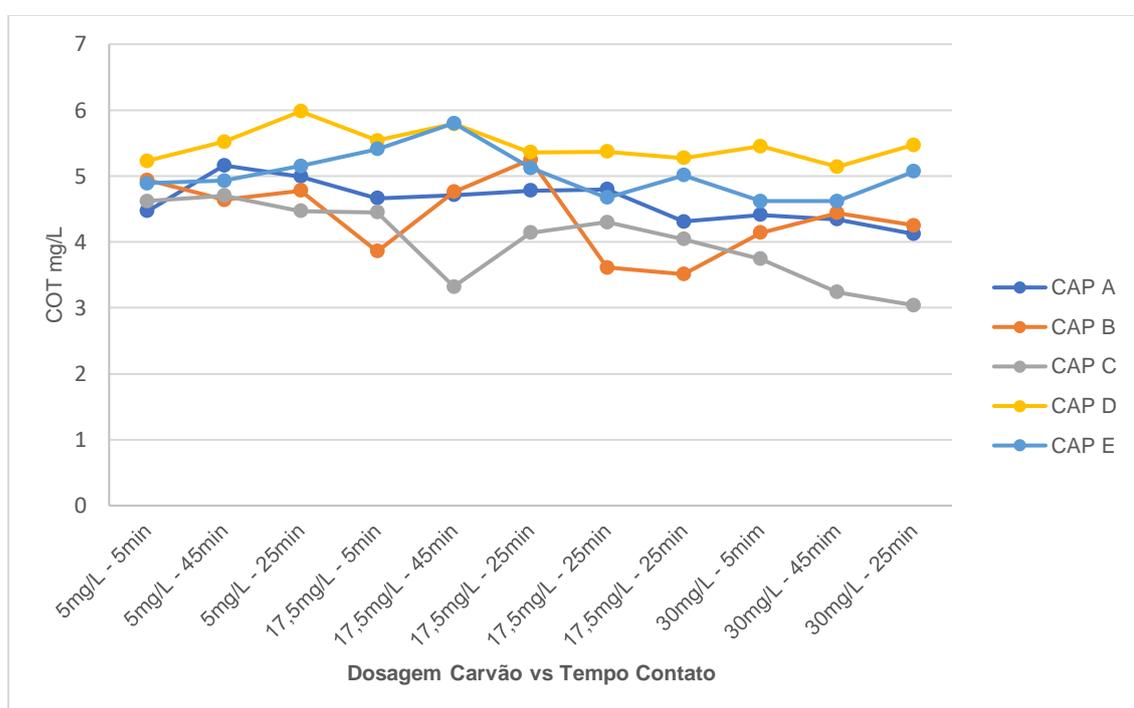
Dosagem CAP (mg/L)	Tempo de Contato (min)	Resultados COM pré-oxidação									
		Concentração COT (mg/L)					Eficiência de remoção COT (%)				
		CAP A	CAP B	CAP C	CAP D	CAP E	CAP A	CAP B	CAP C	CAP D	CAP E
5,0	5,0	4,47	4,94	4,62	5,23	4,89	81%	79%	80%	77%	79%
5,0	45,0	5,16	4,64	4,70	5,52	4,93	78%	80%	80%	76%	79%
5,0	25,0	4,99	4,78	4,47	5,98	5,15	78%	79%	81%	74%	78%
17,5	5,0	4,66	3,86	4,45	5,54	5,41	80%	83%	81%	76%	77%
17,5	45,0	4,71	4,76	3,32	5,79	5,80	80%	79%	86%	75%	75%
17,5	25,0	4,78	5,25	4,14	5,36	5,12	79%	77%	82%	77%	78%
17,5	25,0	4,80	3,61	4,30	5,37	4,67	79%	84%	81%	77%	80%
17,5	25,0	4,31	3,51	4,04	5,27	5,01	81%	85%	83%	77%	78%
30,0	5,0	4,41	4,14	3,74	5,45	4,62	81%	82%	84%	76%	80%
30,0	45,0	4,34	4,44	3,24	5,14	4,62	81%	81%	86%	78%	80%
30,0	25,0	4,12	4,25	3,04	5,47	5,07	82%	82%	87%	76%	78%

Fonte: Autor, 2020.

Os resultados obtidos na condição de ensaios com pré-oxidação foram bem aquém dos resultados obtidos na condição sem pré oxidação. As concentrações de COT na água do filtrado estiveram entre 4,0 e 5,0 mg/L, com algumas ocorrências de resultados inferiores a 4,0 mg/L, porém superiores a 3,2 mg/L.

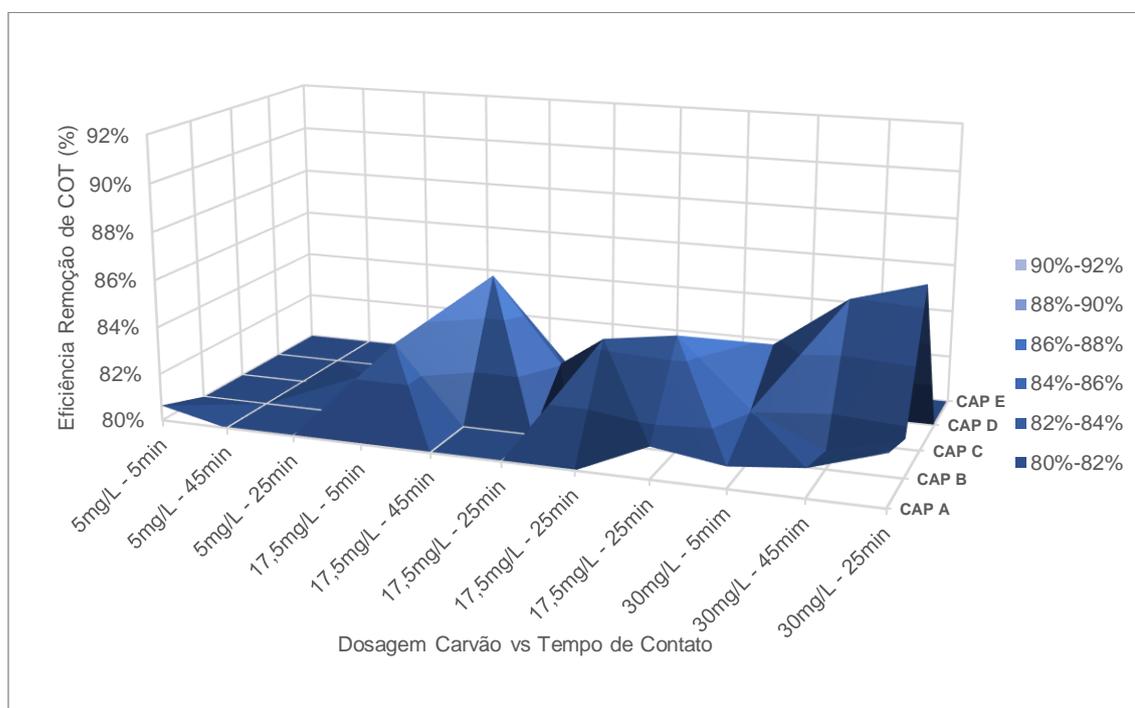
Não foram alcançadas eficiências superiores a 87% na remoção de matéria orgânica. Nas figuras a seguir são apresentados gráficos de comparação entre os 5 tipos de CAPs avaliados, na condição com pré-oxidação.

Figura 31 – Comparativo CAPs com pré-oxidação - Resultados COT (mg/L)



Fonte: Autor, 2020.

Figura 32 – Comparativo CAPs com pré-oxidação - Eficiência Remoção COT (%)



Fonte: Autor, 2020.

Na condição com pré-oxidação, avaliando os gráficos comparativos (Figuras 31 e 32) entre os CAPs foi possível identificar que apenas com o uso do CAP C, obtiveram-se resultados com concentrações finais próximo a 3,0 mg/L, limite máximo recomendado pela literatura.

Não foram identificadas alterações significativas de eficiência com a variação de dosagem e tempo de contato, na condição de ensaios com a pré-oxidação, ou seja, pelos resultados obtidos é possível identificar que não é vantajoso uso da pré oxidação com cloro na remoção de matéria orgânica na água objeto desse estudo. Possíveis residuais residual de cloro após o tempo de contato de oxidação, podem ter influenciado na disponibilidade do CAP para adsorção da matéria orgânica na etapa de adsorção.

5.5.3 Comparativo CAPs com melhor eficiência – custo e benefício

Pelos resultados obtidos foi realizada a análise de custo benefício para um eventual emprego do processo de pré-oxidação com cloro e uso de carvão ativado pulverizado numa operação em escala real e que tenha submetido ao seu processo

de tratamento em ciclo completo, uma água bruta com características físico químicas similares a água objeto desse estudo, especificamente com concentrações de carbono orgânico total em valores superiores a 20 mg/L.

Primeiramente é importante destacar que a condição de pré-oxidação anteriormente ao processo de oxidação, não foi uma alternativa vantajosa para a água objeto desse estudo. O emprego da pré-oxidação além de apresentar piores resultados de eficiência e remoção de COT, traria incrementos de custos ao processo de produção de água que poderiam representar até 30% do custo com o carvão ativado. Ainda é importante ressaltar o investimento em estrutura física necessária a aplicação do cloro e estrutura hidráulica que garanta o tempo de contato do cloro com a água bruta.

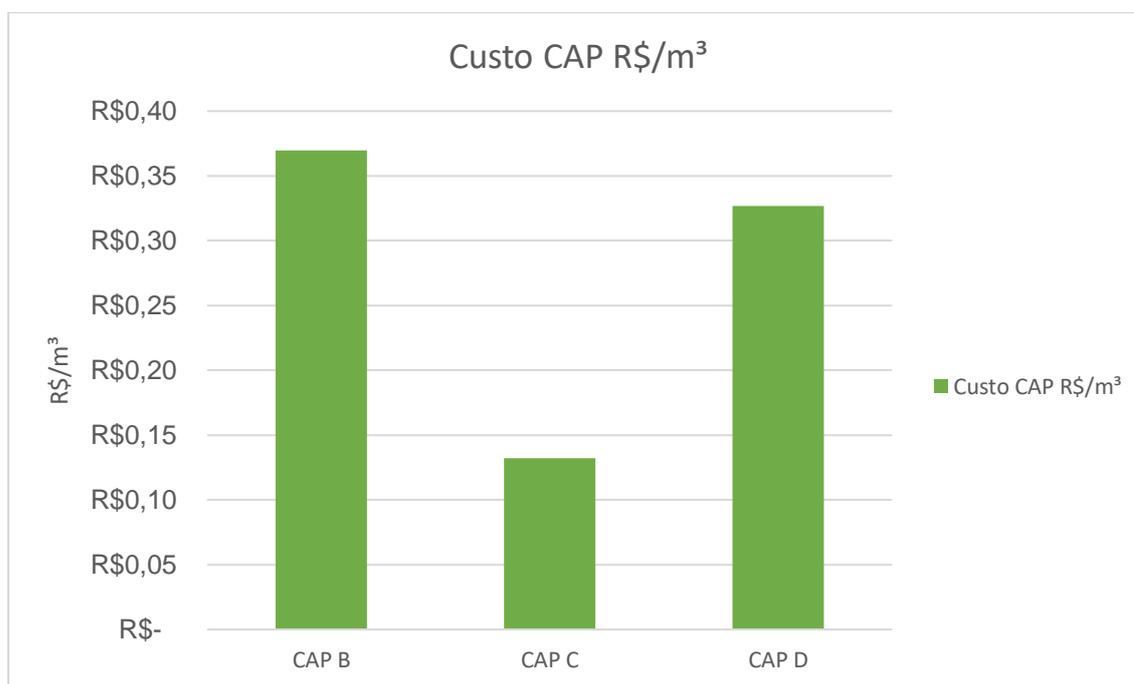
Relativo à remoção de COT em condições de adsorção sem uso da pré-oxidação, foram observados resultados mais eficientes se comparadas com a condição com uso da pré-oxidação. Dosagens com carvão ativado de origem vegetal de 30 mg/L com 5 minutos de tempo de contato obtiveram resultados remoção de COT que resultaram em concentrações finais próximo a 4 mg/L. Os melhores resultados (COT inferior ou igual a 3,0 mg/L) foram obtidos apenas com dosagem de 30 mg/L e tempo de contato de 25 min. A alteração do tempo de 25 para 45 minutos não traz alterações significativas nos resultados de COT e que justifiquem um possível maior investimento na implantação de uma câmara de adsorção de carvão com maior volume, e que garanta maior tempo de detenção hidráulico.

Avaliando os resultados é possível identificar que o atendimento de concentrações finais de COT que atendam a recomendação de pesquisadores no Brasil, ou seja, 3,0 mg/L, são obtidas com uso do carvão de origem vegetal com dosagens mínimas de 30 mg/L e tempo de contato mínimo de 30 minutos.

Para essa condição de aplicação, ou seja, dosagem de 30 mg/L e tempo de contato de 30 minutos foi avaliado o custo benefício com uso dos CAP B, C e D.

A Figura 33 evidencia o custo com carvão ativado para 1000 litros de água bruta submetida ao processo de tratamento.

Figura 33 – Comparativo de custo entre os CAPs com melhores eficiências – relação de custo e benefício.



Fonte: Autor, 2020.

Em relação ao custo benefício, apesar dos resultados de remoção de COT terem sido melhores com uso do CAP B, o uso do CAP C apresentou melhor custo benefício em relação aos demais, ou seja, o CAP C permite obtenção de resultados de COT inferiores ou próximo a 3,0 mg/L com o menor custo. O custo do CAP B e CAP D chegam a ser quase três vezes superior ao custo do CAP C.

Há de destacar ainda que para qualquer um dos CAPs avaliados, faz-se necessário garantia de tempo de contato do carvão próximo a 25 minutos, já que tempos de contato inferiores e/ou próximo a 5 minutos e que poderiam dispensar investimentos na implantação de uma câmara de adsorção de carvão, não possibilitaram obtenção de resultados inferiores a 3,0 mg/L de COT.

Análises de eficiência de remoção de COT com emprego de maiores dosagens e com menor tempo de contato, são importante de serem avaliadas do ponto de vista econômico, já que o carvão ativado pode representar até 50% dos custo total com os químicos utilizados no processo de tratamento e o investimento necessário para implantação de uma estrutura física necessária para garantir o tempo de contato do carvão pode ser muito alto.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O sistema de tratamento em ciclo completo sem pré-oxidação e aplicação de CAP, obteve aproximadamente 40% de eficiência de remoção de COT, evidenciando dessa forma necessidade de complementação do processo de tratamento para obtenção de resultados de COT que atendam os limites recomendados;
- Quando comparado com os resultados obtidos na condição sem pré-oxidação, o uso da pré-oxidação para a água objeto de estudo, não favoreceu a obtenção de melhores resultados na remoção de COT;
- Os CAPs de origem vegetal obtiveram melhores eficiências (87 a 91%) na remoção de COT em relação aos CAPs de origem mineral e animal;
- Os carvões de origem vegetal tiveram influência significativa das variáveis tempo de contato e dosagem em situações de aplicação com tempo > 25min e dosagem > 25 mg/L, enquanto que para os carvões de origem mineral e animal não foi identificado influência das variáveis estudadas;
- A aplicação dos CAPs B, C e D sem pré-oxidação apresentaram as melhores eficiências de remoção de COT com resultados superiores a 90%, inclusive com concentrações de COT abaixo do limite recomendado;
- A aplicação do CAP C sem pré-oxidação obteve o melhor custo benefício quando comparado com os demais CAPs. Eficiências similares foram obtidas com variações de custos na ordem de até 300%;
- Necessário avaliação dos CAPs de origem vegetal estudados em dosagens superiores a 30 mg/L de modo que seja possível avaliar e/ou minimizar investimentos necessários para garantia do tempo de contato do CAP,
- Recomenda-se avaliação de resultados de subprodutos da desinfecção em amostras de água com concentração de COT entre 3 e 5 mg/L;

7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS – ANA. (2012) **Panorama da qualidade das águas do Brasil**. Brasília: ANA. 266p.

ALBERS, C. N.; FELD, L.; JENSEN, L. E.; AAMAND, J. Degradation of trace concentrations of the persistent groundwater pollutant 2,6-dichlorobenzamide (bam) in bioaugmented rapid sand filters. **Water Research**, v.83, p. 61–70, out. 2015.

ALEXANDER, J.T.; HAI, F.I.; AL-ABOUD, T.M. Chemical coagulation-based processes for trace organic contaminant removal: Current state and future potential. **Journal of Environmental Management**, v.111, p. 195-207, 2012.

ALVARENGA, J. A. **Avaliação da formação de subprodutos da cloração em água para consumo humano**. 2010. 100p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais UFMG. Belo Horizonte, 2010.

ALVES, M. F.; BRITO, M. J. P.; BORGES, M. V.; BATISTA, A. S.; JESUS, F. W. A.; FERNANDES, S. A. A. Produção de carvão ativado obtido a partir do endocarpo da Amêndoa-da-Praia (*Terminalia cattapa* Linn) para adsorção de corantes orgânicos em meio aquoso. **Caderno de Ciências Agrárias**, v.7, n.2, p. 50-55, mai./ago. 2015.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA), Standard for Powdered Activated Carbon ANSI/AWWA B600-90, USA, 1991.

APHA Method: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd edition, 2017.

BAÇAOUI, A. S.; YAACOUBI, A.; DAHBI, A.; BENNOUNA, C.; LUU, R. P. T.; MALDONADO-HODAR, F.J.; RIVERA-UTTRILLA, J.; MORENO-CASTILLA, C. Optimization of conditions for the preparation of activated carbons from olive-waste cakes. **Carbon**, v. 39, n.3, p. 425-432, 2001.

BISCOLA, T. A.. **Influência das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado na eficiência de remoção de azul de metileno no tratamento em ciclo completo**. 2019. 112p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2019.

BORBA, C. E. **Modelagem da remoção de metais pesados em coluna de adsorção de leito fixo**. 2006. 145p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

BORGES, J. T. **A utilização da técnica mims na determinação de trihalometanos em águas de abastecimento e a influência do íon brometo, da amônia e de algas na formação desses compostos**. 2003. 151p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

BORGES, W.M.S.; ARANTES, A.C.C.; CASTRO, G.M.M.; BIANCHI, M.L.; NOBRE, J.R.C.; RESENDE, E. C.; CASTRO, J.P.; GUERREIRO, M.C. Produção caracterização e avaliação da capacidade adsorptiva de carvões ativados em forma de briquete. *Revista Matéria*, v. 21, n.4, p. 930-942, 2016.

BOTERO, W. G. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. *Revista Química Nova*, v.32, n.8, p. 2018-2022, 2009. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol32No8_2018_06-AR08376.pdf>. Acesso em: 20 de jan. 2020.

BRADY, R.D. (1990) **Activated carbon processes**. In: Water treatment plant design AWWA & ASCE. California: ASCE, p. 14.1-14.38

BRANDÃO, C.C.S.; SILVA, A.S. Remoção de cianotoxinas por adsorção em carvão ativado. In: PÁDUA, V.L. (Coord.) **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES, 2006, p. 415-465.

BYRNE, A.; BRAUN, K.; FABRIS, R.; MORRAN, J.; DRIKAS, M. (2014) Small particles in distribution systems: the effect of improving treatment. *JAWWA*, v. 106, n. 1, E21-E31.

CABRITA, I.R.C. **Carvões ativados para a remoção de compostos farmacêuticos em meio aquoso**. 2009. 83p. Dissertação (Mestrado em Química Tecnológica) - Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

CHEN, W.H.; YOUNG, T.M.; NDMA Formation during Chlorination and Chloramination of Aqueous Diuron Solutions. *Environmental Science & Technology*, Davis, California, v. 42, n.4, p.1072–1077, 2008.

CRITTENDEN, J.C.; TRUSSELL, R.R.; HAND, D.W.; HOWE, K.J.; TCHOBANOGLOUS, G. (2012) **MWH's water treatment: principles and design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 1901 p.

DANTAS, A. D. B.; DI BERNARDO, L.; VOLTAN, P. E. N.; KAYOMA, N. H.. **Eficiência de remoção de carbono orgânico total em ETA de ciclo completo no tratamento de água superficial contaminada – estudo de caso**. Congresso ABES – FENASAN - São Paulo-SP, 2017.

DE COSTA, P. D.; DOMINGUINI, L.; FURMANSKI, L. M. **Produção, caracterização e aplicação de carvão ativado de casca de nozes para adsorção de azul de metileno**. *Revista Virtual de Química*, Criciúma-SC, v.7, n.4, p. 1272-1285, mar. 2015.

DE JÚLIO, M.; FIORAVANTE, D.A.; FILHO, O.S.; GRAHAM, N.J.D. Remoção de cianobactérias de água proveniente de manancial Brasileiro eutrofizado, utilizando os diagramas de coagulação para o sulfato de alumínio e PAC. *Engenharia Civil*, n. 37, p. 47-61, 2010.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2º ed. São Carlos: RIMA, vol. 1 e 2, 2005.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 3ª edição. São Carlos-SP: LDIBE, 2017.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água**. 1ª edição. São Carlos-SP: LDIBE, 2011.

DRIKAS, M.; DIXON, M.; MORRAM, J. (2009) Removal of MIB and geosmin using granular activated carbon with and without MIEEX pre-treatment. *Water Research*, v. 43, n. 20, p. 5151-5159.

FERNANDES, R.; BRESAOLA JUNIOR, R. Remoção de 17 α -etinilestradiol de águas para abastecimento, utilizando diferentes tecnologias de tratamento físico-químico. **Revista DAE**, Campinas-SP, 2011. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_187_n_1463.pdf>. Acesso em: 20 de jan. 2020.

GUERRA, J. F. **Remoção do herbicida 2,4 diclorofenoxiacético (2,4-D) no tratamento convencional de água e associado à adsorção em carvão ativado em pó (CAP) em escala piloto**. 2014. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2014.

HU, Z.; SRINIVASAN, M. P. Mesoporous high-surface-area activated carbon. **Microporous and Mesoporous Materials**, v.43, n.3, p. 267-275, 2001.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Principais Estatísticas**. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas>>. Acesso em: 20 de jul. 2020.

KHAH, M. A.; ANSARI, R. Activated charcoal: preparation, characterization and applications: a review article. **International Journal of Chemistry & Technology Research**, Rasht, Iran, v.1, n.4, p. 2745-2788, 2009.

KURODA, E. K.; JÚNIOR, E.C.A.; DI BERNARDO, L.; TROFINO, J.C. Caracterização e Escolha do Tipo de Carvão Ativado a ser Empregado no Tratamento de Águas Contendo Microcistinas. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005, São Carlos. **Anais...** São Carlos: ABES, 2005. p. 1-10.

LEAL, W.P. **Remoção do Ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) por Adsorção em Carvão Ativado Pulverizado Associado ao Tratamento Convencional de Água para Consumo Humano**. 2013. 154p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.

LEGNER, C. O uso de carvão no processo de tratamento de água. **Revista Tae**, 2012. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/4922-noticias>>. Acesso em: 20 de mar. 2020.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de água**. 3ª edição, São Paulo: Átomo. 2010. 494p.

LIBÂNIO, M.; AQUINO S.F.; GUERRA, A.B.; CEBALHOS, B.S.O; OLIVEIRA, R.; SILVA, M.N.C (2017) **Hierarquização da eficiência de remoção de cianotoxinas por meio de adsorção em carvão ativado granular**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v.22, n.4, p.691-697, jul./set 2017.

LIMA, D. R. S.; TONUCCI, M. C.; LIBANIO, M.; AQUINO, S. F. Fármacos e desreguladores endócrinos em águas brasileiras: ocorrência e técnicas de remoção. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.22, n.6, p.1043-1054, Dez. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017165207>>. Acesso em: 26 de jan. 2019.

LIMA, D.R.S.; AFONSO, R.J.C.F.; LIBÂNIO, M.; AQUINO, S.F. Avaliação da remoção de fármacos e de desreguladores endócrinos em águas de abastecimento por clarificação em escala de bancada. **Revista Química Nova**, v. 37, n.5, p.783- 788, abr. 2014.

LOPES, C.W.; BERTELLA, F.; PERGHER, S.B.C.; FINGER, P.H.; DALLAGO, R.M.; PENHA, F.G. Síntese e Caracterização de Carvões Ativados Derivados do Sabugo de Milho. **Perspectiva**, v.37, n.139, p.27-35, set. 2013.

LOPES, L.G.; MARCHI, M.R.R.; SOUZA, J.B.G.; MOURA, J.A. Hormônios Estrogênicos no Ambiente e Eficiência das Tecnologias de Tratamento para Remoção em Água e Esgoto. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 13, n.4, p.123-131, out./dez 2008.

MACHADO, C. R. A.; SAGGIORO, E.M.; SILVA, Y. G. L.; PEREIRA, L. P. S.; CAMPOS, J.C. Avaliação da adsorção de Fenol e Bisfenol A em carvões ativados comerciais de diferentes matrizes carbonáceas. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté-SP, v. 10, p. 915-927, out/dez. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980993X2015000400915&script=sci_abstract>. Acesso em: 26 jan. 2018.

MACROVENDA (2018). Disponível em: <www.macrovenda.com.br/carvão-ativado.php> . Acesso em: 25 de out. 2019.

MARCHETTO, M.; FILHO, F.S.S. Interferência do processo de coagulação na remoção de compostos orgânicos causadores de gosto e odor em águas de abastecimento mediante a aplicação de carvão ativado em pó. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.10, n.3, p. 243-252, jul./set 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522005000300009>>.

MARCHETTO, M.; FILHO, F.S.S. Otimização Multi-objetivo de Estações de Tratamento de Águas de Abastecimento: Remoção de Turbidez, Carbono Orgânico Total e Gosto e Odor. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.11, n.1, p. 7-15, jan./mar 2006.

MARMO, C. R. **Formação e Remoção de Trihalometanos em Águas de Abastecimento Tratadas, na Pré-Oxidação, com Cloro**. Dissertação (Mestrado), 253 f. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

MARMO, C. R.; SANTOS, B. V. A. P.; JÚNIOR, R.B. Remoção de trihalometanos (THM) em águas de abastecimento por tratamento convencional e adsorção em carvão ativado em pó (CAP). **Revista DAE**, p. 19-25, 2010. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_182_n_1461.pdf>. Acesso em 19 mar. 2019.

MAVAIEIE JÚNIOR, P. A. **Remoção de carbono orgânico dissolvido em águas de abastecimento por pré-oxidação e adsorção em carvão ativado granular**. 2019. 108p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRS. Porto Alegre-RS, 2010.

MENDES, C. G. N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. 1989. Tese Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 1989.

MELO S.C.; GIANI, A.; VERONEZI, V.M.; GOMES, L.L.; LIBÂNIO, M. Avaliação da remoção de saxitoxinas por meio de técnicas de tratamento das águas de abastecimento. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.14, n.2, p. 193-204, abr./jun., 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n2/a07v14n2.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2019.

MOREIRA, D.R. **Desenvolvimento de adsorventes naturais para tratamento de efluentes de galvanoplastia**. 2010. 79p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Material) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2010.

MORENO-CASTILLA, C. Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. **Carbon**, Granada, Spain, v. 42, n. 1, p. 83-94, 2004.

MUCCIACITO, J. C. Uso eficiente do carvão ativado como meio filtrante em processos industriais. **Revista Meio Filtrante**. Ed. 39, 2009. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/uso-eficiente-do-carvao-ativado-como-meio-filtrante-em-processos-industriais/>>. Acesso em: 30 set 2019.

MÜLLER, C. C.; RODRIGUEZ, M. T. M. R.; CYBIS, L. F. A. Adsorção em carvão ativado em pó para remoção de microcistina de água de abastecimento público. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 14, n.1, p. 29-38, jan./abr. 2009.

MURTHA, N.A.; CASTRO, J. E.; HELLER, L. Uma Perspectiva Histórica das Primeiras Políticas Públicas de Saneamento e de Recursos Hídricos no Brasil. **Revista Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. XVIII, n. 3, p. 193-210, jul./set 2015.

OLIVEIRA, M.D.; REZENDE, O.L.T.; OLIVEIRA, S.M.A.C.; LIBÂNIO, M. Nova abordagem do Índice de Qualidade de Água Bruta utilizando a Lógica Fuzzy. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v.19, n.4, p. 361-372, out./dez 2014.

PÁDUA, V. L. **Introdução ao tratamento de água**. In: **Abastecimento de água para consumo humano** (Organizadores PÁDUA, V.L.; HELLER, L) Belo Horizonte: UFMG, 2010. p. 531-583.

PÁDUA, Valter Lúcio. **Remoção de micro-organismos emergentes e microcontaminantes orgânicos no tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES (Prosab), 2009.

PARDO, S. D. A. **Avaliação do potencial de formação de trihalometanos em sistemas de abastecimento de água**. 1996. 119f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Campinas, Campinas, 1996.

PASCHOALATO, C. F. P. R.; DANTAS, A. D. B.; ROSA, I. D. A.; FALEIROS, R. J. R.; DI BERNARDO, L. **Uso de carvão ativado para remoção dos herbicidas diuron e hexazinona de água**. Revista DAE, São Paulo, v.179, p. 34-41, 2008. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_179_n_1402.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2019.

PASCHOALATO, C. F. P. R.; TRIMAILOVAS, M. R.; DI BERNARDO, L. **Formação de Subprodutos Orgânicos Halogenados nas Operações de Pré-oxidação com Cloro, Ozônio e Peroxônio e pós-cloração em Água Contendo Substância Húmica**. Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v.13, n.3, p.313-322, jul./set 2008.

PEREIRA, E. I. **Produção de carvão ativado a partir de diferentes precursores utilizando FeCl₃ como agente ativante**. 2010. 72p. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2010.

REN, L.; ZHANG, J.; LI, Y.; ZHANG, C. Preparation and evaluation of cattail fiber-based activated carbon for 2, 4-dichlorophenol and 2, 4, 6-trichlorophenol removal. **Chemical engineering journal**, v. 168, n. 2, p. 553-561, 2011.

RHEINHEIMER, M.O.W. **Remoção de Paracetamol por Adsorção em Carvão Ativado: Processo em Batelada e Coluna de Leito Fixo**. 2016. 45p. Trabalho de Diplomação em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2016.

RODRIGUEZ-MOZAZ, S.; DE ALDA, M. J. L.; BARCELÓ, D. **Monitoring of estrogens, pesticides and bisphenol A in natural waters and drinking water treatment plants by solid-phase extraction–liquid chromatography–mass spectrometry**. Journal of Chromatography A, Barcelona, v. 1045, n. 1-2, p. 85-92, 2004.

ROSALÉM, S.F.; AGRIZZI, A.D.; CARDOSO, M.C.M.C.; COELHO, E.R.C. (2013) **Avaliação de trihalometanos formados na etapa de pré-oxidação com cloro e permanganato de potássio em água de abastecimento**. Revista DAE, São Paulo, n. 191, p. 54-59. <https://doi.org/10.4322/dae.2014.100>

ROZÁRIO, A. **Avaliação da remoção do ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) em águas através do uso de carvão granular (CAG) em pequenas colunas (escala experimental)**. 2012. 208p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2012.

SANCHES, S.M.; PRADO, E.L.; FERREIRA, I.M.; BRAGA, H.F.; VIEIRA, E.M. Presença da toxina microcistina em água, impactos na saúde pública e medidas de controle. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**, v.33, n.2, p.181-187, 2012.

SANTOS, E.P.C.C. DOS; TEIXEIRA, A.R.; ALMEIDA, C.P.; LIBÂNIO, M.; PÁDUA, V.L. DE. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 12, n.4, p.361-370, out./dez 2007.

SILVA, N. C.; FILHO, N.L.D.; BASTOS, A.C.; VIEIRA, E.G.; GARCIA, E.F.; SOARES, I.V.; PERUJO, S.D. Remoção de antibióticos em meio aquoso usando carvão ativado preparado a partir da casca de coco da baía. **Revista Sociedade Brasileira de Química**, Ilha Solteira-SP, 2012. Disponível em: <<http://sec.s bq.org.br/cdrom/35ra/resumos/T1208-1.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2020.

SILVA, V.L.A. **Remoção de microcistinas de águas para abastecimento em sistema que associa unidades de adsorção por carvão ativado em pó e flotação por ar dissolvido em escala de laboratório**. 2005. 96p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-07102016-103812/es.php>>. Acesso em: 06 de jul. 2020.

SLOBODA, E.; SANTOS, C. T.; DANTAS, A. D. B.; DI BERNARDO, L. ; VIEIRA, E. M. (2010) **Color removal by coagulation from water containing aquatic humic substances with different apparent molecular size**. In: The World Conference on Humic Substances and Natural Organic Matter. 15th International Humic Substances Society Meeting, Tenerife. Canary Islands.

SNOEYINK, V. Adsorption of organic compounds. In: PONTIUS, F.W. Water quality and treatment. 4. ed. New York: AWWA, 1990. p. 781-867.

TEIXEIRA, M.B. **Remoção de Carbono Orgânico Dissolvido de Água de Abastecimento por Adsorção em Carvão Ativado Granular**. 2014. 75p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2014.

TRAMONTIN, D.P.; PETERSON, M.; PIZZOLO, J.P.; PIZZOLO, J. P. Adsorção do corante básico (azul de metileno) por carvão ativado preparado a partir de finos de carvão. In: **III Congresso Brasileiro De Carvão Mineral**. Gramado, RS, 2011. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/rede-Carvao/Sessoes_C4_C5_C6/C6_ARTIGO_01.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2019.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME (UNDP). **Human Development Report, 2006**. Disponível em: <<http://www.undp.org/content/dam/undp/library/corporate/HDR/2006%20Global%20HDR/HDR-2006-Beyond%20scarcity-Power-poverty-and-the-global-water-crisis.pdf>>. Acesso em: 13 fev. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **EPA Drinking Water Guidance on Disinfection by-Products** Advice Note n.4. Version 2. Disinfection By- Products in Drinking Water, 2012. Disponível em: <http://www.epa.ie/pubs/advice/drinkingwater/epadrinkingwateradvicenoteadvicenote_n_o4.html>. Acesso em: 16 mar. 2020.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Method 180.1: Determination of Turbidity by Nephelometry**, 1978. Disponível em: <https://www.umass.edu/mwwp/pdf/epa180_1turbidity.pdf> Acesso em: 21 nov. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Method 180.1: Determination of Turbidity by Nephelometry**, 1993. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/method_180-1_1993.pdf> Acesso em 05 dez. 2019.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Guidance Manual for Compliance With the Interim Enhanced Surface Water Treatment Rule: Turbidity Provisions**, 1999. Disponível em: <<https://www.epa.gov/dwreginfo/guidance-manuals-surface-water-treatment-rules>> Acesso em: 05 dez. 2019.

VALENÇA, R. M.; MACÊDO, W. V.; RODRIGUES, C. C.; NÓBREGA, S. W. Adsorção de Fluoreto em Solução Aquosa e em Água de Abastecimento em Carvão Ativado à Base de Casca de Castanha-do-Brasil. **Revista Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 14, n. 2, p. 44-54, jul./dez. 2017.

VALÊNCIA, C. A. V. **Aplicação da adsorção em carvão ativado e outros materiais carbonosos no tratamento de águas contaminadas por pesticidas de uso agrícola**. 2007. 116p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VOLTAN, P. E. N. **Remoção de diuron e hexazinona por meio de adsorção em carvão ativado, oxidação e tratamento em ciclo completo**. 2014. 256p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-30032017-085628/>>. Acesso em 20 mai. 2020.

WARTCHOW, D.; Freitas, A.F.R.; Luca, S.J. Utilização de carvões ativados nacionais no tratamento de águas residuárias. **Revista Dae**, Camboriú-SC, v.44, n.136, mar. 1984. Disponível em: <http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_136_n_1170.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2019.

YU, F. LI, Y.; HAN, S.; MA, J. Adsorptive removal of antibiotics from aqueous solution using carbon materials. **Chemosphere**, v. 153, p. 365–385, 2016

YU, J.G.; ZHAO, X.H.; YANG, H.Y.; CHEN, X.H.; YANG, Q.; YU, L.Y.; JIANG, J.H.; CHEN, X. Q. Aqueous adsorption and removal of organic contaminants by carbon nanotubes. **Science of the Total Environment**, v. 482, p.241-251, 2014.

ZAGO, J.F. **Influência das características físico-químicas de carvões ativados na adsorção de saxitoxinas**. 2010. 182p. Tese (Tese de doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2010.