

O USO DA ADSORÇÃO EM CARVÃO ATIVADO PULVERIZADO NA REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA NATURAL EM ETA DE CICLO COMPLETO

Adalcino Fernandes Reis Neto 1 (UFT) E-mail: neto.afr@gmail.com

Rodrigo Folha Moreira 2 (IFTO) E-mail: rodrigofomo@gmail.com

Emerson Adriano Guarda 3 (UFT) E-mail: emersonprof@uft.edu.br

Giulliano Guimarães Silva 4 (IFTO) E-mail: giullianogsilva@gmail.com

Sérgio Carlos Bernardo Queiroz 5 (UFT) E-mail: sergiocbq@gmail.com

Resumo: 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 com a estiagem, e que dispõe de condições naturais para ocorrências matéria orgânica natural. As consequências podem ser a eutrofização, ocorrências de sabor e odor, formação de subprodutos da cloração e interferências no processo de tratamento da água. Uma das alternativas empregada nas ETAs para remoção de material orgânico é a adsorção em carvão ativado pulverizado (CAP). Neste contexto, o presente trabalho teve objetivo de 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 em ciclo completo. Foi realizada a avaliação com uso de dois tipos de CAPs de origem vegetal. O CAP proveniente da madeira teve significativa influência do tempo de contato e dosagem na remoção de matéria orgânica medida em carbono orgânico total (COT), ou seja, maiores dosagem e tempo 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 91% e concentração de COT de 2,05 mg/L.

Palavras-chave: Tratamento de água em ciclo completo, Carvão Ativado em Pó, dosagem, tempo de contato.

THE USE OF POWDERED ACTIVATED CARBON ADSORPTION IN THE REMOVAL OF NATURAL ORGANIC MATTER IN A FULL CYCLE WATER

Abstract: Currently there is an evident concentration of organic matter in water courses and/or water reservoirs that receive inputs from domestic sewage and untreated industrial effluents, that suffer from drought, and that have natural conditions for occurrences of natural organic matter. The consequences can be eutrophication, occurrences of taste and odor, formation of by-products of chlorination and interferences in the water treatment process. One of the alternatives used in ETAs to remove organic material is adsorption on pulverized activated carbon (CAP). In this context, the present study aimed to investigate the influence of the variables contact time, dosage and type of pulverized activated carbon, on the efficiency of the adsorption of organic matter in raw water submitted to the full cycle treatment process. The evaluation was carried out using two types of CAPs of plant origin. CAP from wood had a significant influence on contact time and dosage in the removal of organic matter measured in total organic carbon (TOC), that is, higher dosage and contact time 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 91% and TOC concentration of 2.05 mg/L.

Keywords: Full cycle water treatment, activated carbon powder, dosage, contact time

1. Introdução

Os 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).

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, por ser de fácil implementação, 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).

Previamente a implantação de um sistema de adsorção em carvão ativado pulverizado, devem ser avaliadas as melhores condições desta aplicação, visto que tempos de contato maiores de adsorção, 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 as variáveis que podem influenciar na eficiência da adsorção de matéria orgânica em água bruta submetida ao processo de tratamento de água com aplicação de dois tipos de carvão ativado pulverizado (de origem vegetal), variando tempo de contato e dosagem.

2. Materiais e métodos

Para realização dos referidos ensaios os experimentos foram divididos em três etapas conforme evidenciado na Tabela 1.

Tabela 1 – Divisão das etapas para o desenvolvimento do presente trabalho.

Etapas	Atividade
ETAPA 01 - Coleta e caracterização da água de estudo	Identificação do manancial objeto de estudo, e regiões críticas com concentração de matéria orgânica no mesmo. Coleta e transporte de amostra de água para o Laboratório. Caracterização da água de estudo, com análise dos parâmetros físico químicos.
ETAPA 02 – Definição das condições da água submetida aos ensaios de	Definição da condição de coagulação com realização de ensaios para construção do diagrama de coagulação com definição de dosagem de coagulante policloreto de alumínio (PAC) e pH de coagulação.
ETAPA 03 – Planejamento Experimental, Ensaios de tratabilidade e investigação da	Estruturação do planejamento experimental, realização dos ensaios de tratabilidade simulando ETA de ciclo completo, variando tempo de contato, dosagem e tipo de carvão ativado pulverizado (CAP).

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 2 apresenta os equipamentos que foram utilizados na realização dos experimentos, juntamente com sua respectiva função.

Tabela 2 – Especificações e funções de cada um dos equipamentos usados na pesquisa.

Equipamentos	Função na Pesquisa
Jarteste, Nova Ética – Modelo LDB 6	Ensaio de tratabilidade
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.

A Tabela 3 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).

Tabela 3 – Parâmetros físico-químicos, unidades, métodos de medição, unidades e limites.

Parâmetro	Unidades	Métodologia	Referências	Limite de 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
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 4. Também são apresentadas as concentrações de cada um dos produtos com as condições de preparo das soluções.

Tabela 4 – Concentrações dos produtos e condições a que foi submetido o preparo das soluções.

Produto Químico	Concentração	Solução – Preparo
Cloreto de Polialumínio - PAC	Produto comercial líquido 16 a 18% Al_2O_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

Fonte: Autor, 2020.

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.

No reservatório de acumulação de água (Figura 1). O monitoramento objetivou identificar no reservatório, regiões críticas com concentração de matéria orgânica.



Figura 1 – Reservatório de água do Córrego Caracol e ponto de amostragem da água de estudo.

Utilizando um equipamento Jartest, foram realizados, ensaios de coagulação, floculação e sedimentação visando à verificação das condições de coagulação utilizando o coagulante policloreto de alumínio (PAC) e alcalinizante cal hidratada. As condições dos ensaios foram expressas na Tabela 5:

Tabela 5 – Condições de ensaio para água bruta.

Condições para os ensaios da água bruta	
Parâmetro	Condições
Coagulante	policloreto de alumínio 18% – Dosagem variando de 20 a 120 mg/L;
Mistura rápida	Tempo de mistura rápida (Tmr) = 30 s, Gmr = 1000 s-1
Floculação	Tempo de floculação (Tf) = 20 min, Gf = 25 s-1
Sedimentação	Velocidade de sedimentação (Vs) - Vs1 = 1,0 cm/min e Vs2 = 0,5 cm/min
Parâmetros de controle	pH de coagulação, turbidez e cor aparente da água decantada.

Fonte: Autor, 2020.

Por fim foi realizado o planejamento experimental para realização dos ensaios de tratabilidade utilizando os dois tipos de CAPs selecionados para estudo. As condições experimentais para os ensaios de tratabilidade foi realizada por meio do software online Protimiza Experimental Design (<http://experimental-design.protimiza.com.br/>) com a metodologia de Delineamento de Faces Centradas, conforme Figura 2.



Figura 2 - Representação do planejamento experimental do DFC para o estudo das condições de aplicação dos CAPs.

A Tabela 6 mostra as condições experimentais e seus níveis reais e codificados e os valores mínimos e máximos das variáveis.

Tabela 6 – Variáveis do DCF para o estudo das condições de aplicação do carvão ativado pulverizado.

Variável	Unidade	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.

Foram realizados 11 experimentos com cada tipo de carvão, conforme Tabela 7. A dosagem de coagulante para todos os ensaios, seguiu o pré-fixado a partir da avaliação do diagrama de coagulação. Em cada série de ensaios há três repetições de medida de ponto central com a função de validar o modelo.

Tabela 7 – Condições dos ensaios tratabilidade com CAPs estudados.

Ensaio	Variáveis	
	Dosagem de CAP X_1 (mg/L)	Tempo de Contato X_2 (min)
1	5	5
2	30	5
3	5	45
4	30	45
5	5	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.

Com uso do equipamento Jartest foram simuladas todas as etapas de tratamento previstas num sistema de ciclo completo. A simulação da filtração utilizou filtros de laboratório de areia constituídos de material acrílico e preenchidos com 15 cm de areia (areia tipo I com grãos entre 0,30 e 0,59 mm).

Os ensaios de tratabilidade com as etapas de adsorção em carvão ativado seguem as condições abaixo apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Condições para os ensaios de tratabilidade.

Condições para os ensaios de tratabilidade		
Tópico	Condições	Parâmetros
Adsorção com CAP	Adsorvente	2 tipos de CAP
	Dosagem CAP	Variável conforme Planejamento Experimental
	Gradiente da adsorção	100 s-1
	Tempo de Contato	Variável conforme Planejamento Experimental
Coagulação / Floculação	Coagulante	Policloreto de Alumínio 18%; Dosagem PAC: 120 mg/L
	Tempo de mistura rápida	30 segundos
	Gradiente de mistura rápida	1000 s-1
	Tempo de floculação (T_f)	20 min
	Gradiente de floculação	25 s-1
	Velocidade de sedimentação	0,5 cm/min
Filtração	Meio Filtrante	Areia tipo I com grãos entre 0,30 e 0,59 mm
	Altura do meio filtrante	15 cm
Parâmetros de controle	Água coagulada	pH
	Água filtrada	turbidez, cor aparente, COT

Fonte: Autor, 2020.

Todos os dados gerados nos delineamentos experimentais, passaram pelo tratamento

estatístico. Para os resultados que apresentaram significância estatística para alguma variável, o software elaborou um modelo matemático. Cada modelo matemático foi submetido a análise de variância (ANOVA), onde foi verificada a adequação dos valores previstos com os valores experimentais, e posteriormente validado o modelo matemático pela ANOVA, foram gerados os gráficos de superfície de resposta para cada índice de desempenho.

3. Resultados e discussões

Foram selecionados dois tipos de carvão ativado para investigação no presente estudo, cujo as características estão disponíveis na Tabela 9.

Tabela 9 – Característica dos carvões selecionados para realizado do estudo.

CAP	Origem	Número de Iodo (mg I ₂ /g)	Umidade (%)
CAP A	Vegetal (Madeira)	600,0	8,0
CAP B	Vegetal (Coco Babaçu)	851,6	35,8

Fonte: Autor, 2020.

A Tabela 10 apresenta os resultados da caracterização físico-química da água de estudo.

Tabela 10 – Características físico-químicas da amostra da água de estudo - Córrego Caracol.

Parâmetro	Unidade	Resultado
Alcalinidade	mg/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.

A partir da análise dos resultados, foi identificada 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 identificada elevada cor aparente e verdadeira, situação essa perceptível na amostra, além de significativa presença de metais, no caso, ferro e manganês.

A partir dos ensaios de coagulação/floculação, 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. 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.

Em seguida foram realizados os ensaios de tratabilidade variando dosagem e tempo de contato. 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. E em seguida foram feitos os ensaios de tratabilidade para cada um dos CAPs.

Relativo à avaliação de eficiência de remoção de matéria orgânica na água objeto de estudo, utilizando o CAP A, na Tabela 11 são apresentados os resultados da matriz dos ensaios das variáveis estudadas, bem como as respostas observadas (COT, turbidez e cor aparente). 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 11 – Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP A (COT, Turbidez e Cor).

Ensaio	Variáveis		CAP A		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo de Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)
1	5	5	3,92	0,48	6
2	30	5	3,74	0,19	6
3	5	45	3,93	0,98	12
4	30	45	3,66	0,16	4
5	5	25	4,05	0,20	5
6	30	25	2,05	0,32	4
7	17,5	5	3,86	0,32	6
8	17,5	45	3,85	0,13	5
9	17,5	25	4,45	0,41	5
10	17,5	25	4,28	0,14	5
11	17,5	25	4,06	0,14	5

Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se os resultados da Tabela 11, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 12 que mostra o tratamento estatístico para os dados de COT e cor aparente com o uso do CAP A. Nela 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 12 – Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas para o CAP A (COT e Cor).

CAP A									
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 * X2	-0,02	0,32	-0,07	0,9459	X1 * X2	-2,00	0,65	-3,06	0,0280

L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Avaliando os dados da Tabela 12, que demonstra resultados da condição de uso do CAP A, 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 (X1) e interação entre os dois (X1 e X2) teve significância ($p \leq 0,10$).

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 A, em função das variáveis estudadas.

Equação 1

$$\text{Cor Aparente (uC)} = 4,80 - 1,50 x_1 + 1,70 x_2^2 - 2 x_1x_2 \tag{1}$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP A.

COT (mg/L)					
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) = 62,17% $F_{0,10;2;8} = 3,11$

Fonte: Autor, 2020.

A Figura 3 apresenta a superfície de resposta obtida para cor aparente em função da dosagem e tempo de contato do CAP A.

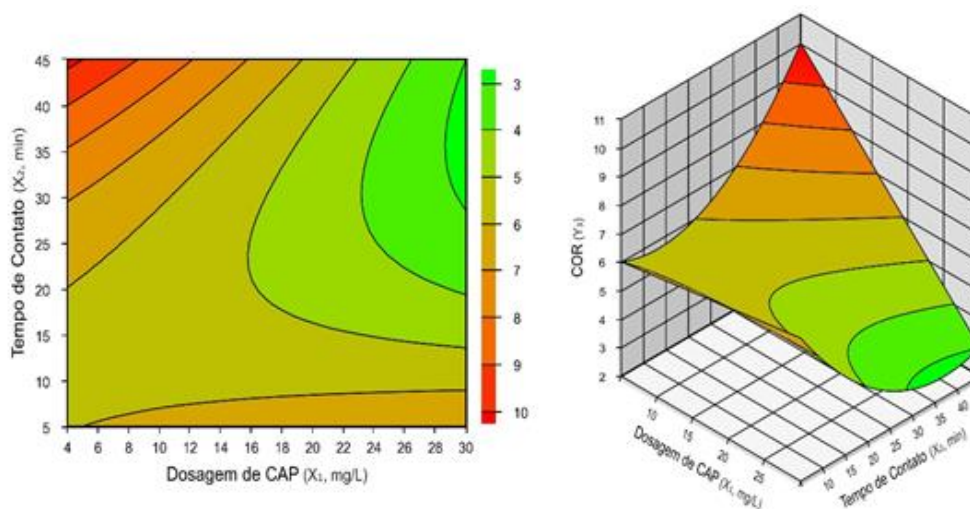


Figura 3 - Superfície de resposta do resultado de cor aparente (uC) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP A.

O aumento de dosagem e tempo de contato do CAP A, favorece a obtenção de resultados com cor aparente baixa. Todos os resultados obtidos atenderam a legislação vigente, que estabelece o limite máximo de 15 uC.

O segundo carvão avaliado, foi o CAP B, a Tabela 14 apresenta os resultados dos ensaios das variáveis estudadas, bem como as respostas observadas para condições de água bruta. O procedimento de análise se deu igual ao apresentado na Tabela 11.

Tabela 14 – Delineamento de face centrada e respostas observadas para o CAP B (COT, Turbidez e Cor).

Ensaio	Variáveis		CAP B		
	Dosagem de CAP (mg/L)	Tempo de Contato (min)	COT (mg/L)	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uC)
1	5	5	4,72	0,24	5
2	30	5	4,35	0,35	3
3	5	45	4,43	0,28	5
4	30	45	2,7	0,24	5
5	5	25	4,35	0,24	5
6	30	25	3,01	0,25	4
7	17,5	5	4,69	0,13	5
8	17,5	45	3,87	0,14	5
9	17,5	25	4,46	0,13	4
10	17,5	25	4,33	0,13	4
11	17,5	25	4,51	0,17	5

Fonte: Autor, 2020.

Analisando-se os resultados da Tabela 14, foi possível calcular os efeitos das variáveis estudadas, os quais estão apresentados na Tabela 16 que mostra o tratamento estatístico para os dados de COT e cor aparente com o uso do CAP B. O procedimento de análise se deu igual ao apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Coeficiente de regressão e desvio padrão das respostas para o CAP B (COT e Cor).

CAP A									
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

L- termos lineares; Q- termos quadráticos

Fonte: Autor, 2020.

Por meio da Tabela 14, avaliando os dados da condição de uso do CAP B para os resultados de COT, apenas o termo quadrático do tempo de contato (X2) não teve significância estatística ($p \leq 0,10$). Relativos aos resultados de cor aparente apenas o termo linear da dosagem de CAP (X1) foi estaticamente significativo ($p \leq 0,10$).

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 B, em função das variáveis estudadas.

Equação 2

$$\text{COT (mg/L)} = 4,37 - 0,57 x_1 - 0,45 x_1^2 - 0,46 x_2 - 0,34 x_1x_2 \quad (2)$$

Equação 3

$$\text{Cor Aparente (uC)} = 4,55 - 0,50 x_1 + 0,50 x_1x_2 \quad (3)$$

Os parâmetros não significativos foram incorporados aos resíduos para o cálculo da análise de variância (ANOVA), conforme apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Análise da variância (ANOVA) de Cor Aparente com CAP B.

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) = 62,17% $F_{0,10;2;8} = 3,11$					

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 4.

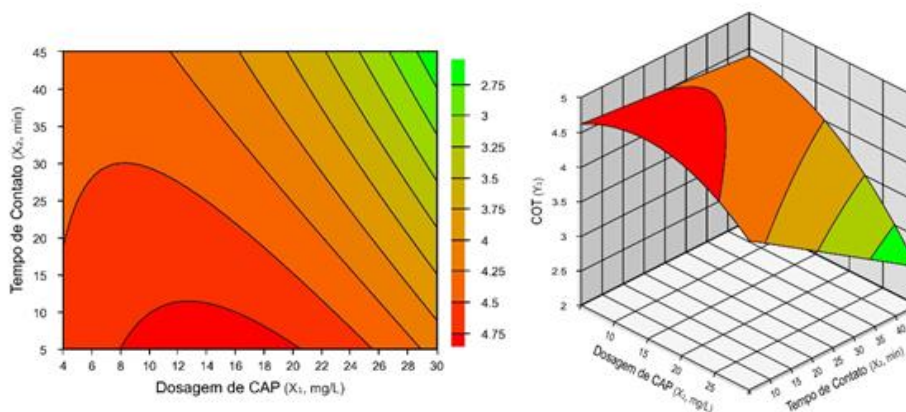


Figura 4 - Superfície de resposta do resultado de cor aparente (uC) em relação as variáveis dosagem e tempo de contato do CAP B.

Avaliando a superfície de resposta obtida, percebe-se que há significativas reduções da concentração de matéria orgânica, quanto mais alta as dosagens e tempo de contato do CAP. 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.

No estudo em questão com o uso do carvão de origem vegetal CAP B, oriundo do coco babaçu, 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).

Após a análise individualizada de cada um dos dois tipos de CAPs, foi realizada a análise comparativa entre os carvões. Os resultados de concentração e eficiência de remoção de COT, foram compilados e são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultados de concentração e eficiência de remoção de COT para cada tipo de CAP avaliado.

Resultados					
Dosagem CAP (mg/L)	Tempo de Contato (min)	Concentração COT (mg/L)		Eficiência de remoção COT (%)	
		CAP A	CAP B	CAP A	CAP B
5	5	3,92	4,72	83%	80%
5	45	3,93	4,43	83%	81%
5	25	4,05	4,35	82%	81%
17,5	5	3,86	4,69	83%	80%
17,5	45	3,85	3,87	83%	83%
17,5	25	4,45	4,46	81%	81%
17,5	25	4,28	4,33	81%	81%
17,5	25	4,06	4,51	82%	80%
30	5	3,74	4,35	84%	81%
30	45	3,66	2,7	84%	88%
30	25	2,05	3,01	91%	87%

Fonte: Autor, 2020.

É possível identificar concentrações de COT na ordem de 2,05 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.

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/L. Nas figuras a seguir são apresentados gráficos de comparação entre os dois tipos de CAPs avaliados.

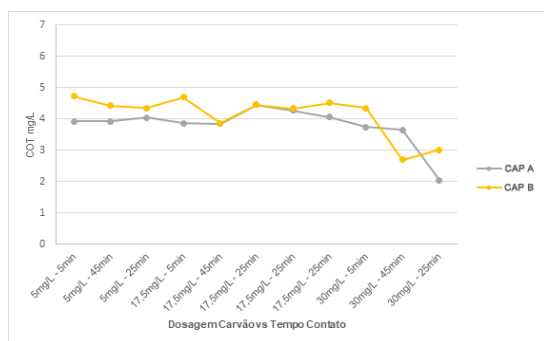


Figura 5 – Comparativo CAPs – Resultados COT (mg/L).

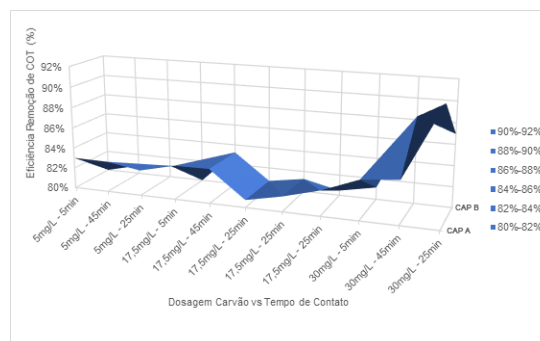


Figura 6 – Comparativo CAPs – Eficiência Remoção COT (%)

Avaliando os gráficos comparativos entre os CAPs foi possível identificar que ambos os CAPs foram bem eficientes (87 a 91%), alcançando concentrações de COT próximo a 2,0 mg/L na amostra do filtrado. Dentre os 2 CAPs, o CAP A foi o de melhores resultados em condições de alta dosagem e tempo de contato do CAP. O CAP B também teve comportamento semelhante, ou seja, mais eficiência com maiores dosagem e tempo de contato conforme identificado nos diversos trabalhos similares.

Foi observado que o CAP de melhor resultado, ou seja, eficiência em torno de remoção de 90% e concentração final de COT de 2,05 mg/L, foi o CAP A. O uso desses CAPs nas condições de melhor eficiência é ideal para evitar a formação de subprodutos orgânico halogenados, potencialmente tóxicos aos seres humanos, que no caso tem como principal precursor a matéria orgânica presente na água (DI BERNARDO, 2017).

4. Conclusões

O sistema de tratamento em ciclo completo sem pré-oxidação e aplicação de CAP, obteve aproximadamente 40% de eficiência de remoção de matéria orgânica, evidenciando dessa forma necessidade de complementação do processo de tratamento para obtenção de resultados de COT que atendam os limites recomendados;

A condição de pré-oxidação para a água objeto de estudo, não favoreceu a obtenção de melhores resultados na remoção de matéria orgânica, quando comparado com os resultados obtidos na condição sem pré-oxidação;

Ambos 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;

A aplicação dos CAPs A e B sem pré-oxidação apresentaram eficiências de remoção de matéria orgânica com resultados superiores a 90%, inclusive com concentrações de COT abaixo do limite recomendado;

A aplicação do CAP A sem pré-oxidação obteve o melhor custo benefício quando comparado com o CAP B. Eficiências similares foram obtidas com variações de custos na ordem de até 300%;

Necessária 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.

Referências

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

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.

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.; 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. 2020

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.

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/epadrinkingwateradvicenoteadvicenoten_o4.html>. Acesso em: 16 mar. 2020.