

Potencial de uso de carvão ativado de endocarpo da macaúba como pós-tratamento de efluente em protótipo de ETE descentralizada para remoção de nutrientes e melhoria de parâmetros físico-químicos

Potential use of activated carbon from macauba endocarp as post-treatment of effluent in a decentralized WWTP prototype for nutrient removal and improvement of physical-chemical parameters

Potencial uso de carbón activado del endocarpio de macaúba como postratamiento de efluentes en un prototipo de PTAR descentralizada para eliminar nutrientes y mejorar parámetros físico-químicos

DOI: 10.54033/cadpedv21n12-251

Originals received: 10/28/2024

Acceptance for publication: 11/18/2024

Joana Gabriely Ferreira

Graduanda em Ciências Ambientais, Bolsista IC Fap-DF na Embrapa Hortaliças

Instituição: Universidade de Brasília - campus Universitário Darcy Ribeiro

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: jo.witczak69@gmail.com

Carlos Eduardo Pacheco Lima

Doutor em Solos e Nutrição de Plantas

Instituição: Embrapa Hortaliças

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: carlos.pacheco-lima@embrapa.br

Mariana Rodrigues Fontenelle

Doutora em Microbiologia Agrícola

Instituição: Embrapa Hortaliças

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: mariana.fontenelle@embrapa.br

Marcos Brandão Braga

Doutor em Irrigação e Drenagem

Instituição: Embrapa Hortaliças

Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil

E-mail: marcos.braga@embrapa.br

Simone Palma Fávaro

Doutora em Ciência de Alimentos
Instituição: Embrapa Agroenergia
Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil
E-mail: simone.favaro@embrapa.br

Rossano Gambetta

Doutor em Engenharia Química
Instituição: Embrapa Agroenergia
Endereço: Brasília, Distrito Federal, Brasil
E-mail: rossano.gambetta@embrapa.br

RESUMO

Os índices de tratamento de esgoto sanitário no Brasil ainda são preocupantes, especialmente em áreas rurais, onde esse cenário é mais desafiador. Com o intuito de desenvolver uma alternativa tecnológica para atendimento a comunidades rurais e isoladas, e viabilizando também o reúso de água para irrigação, foi desenvolvido um protótipo de Estação de Tratamento de Esgoto Sanitário (ETE) descentralizada constituída de materiais de fácil acesso e de fácil operação. O sistema de tratamento utilizado é composto por um sistema Tanque-Séptico + Filtro Anaeróbio + Filtração Lenta + Desinfecção por ácido tricloroisocianúrico. Visando a melhoria da qualidade do efluente final foi testado, em escala de laboratório, o uso do carvão ativado produzido a partir do endocarpo do fruto da macaúba (CAEM). A macaúba constitui uma fonte de biomassa cujo uso industrial está se consolidando no Brasil. O endocarpo do fruto dessa palmeira é um material com propriedades adequadas para a produção de biocarvões. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o uso do carvão ativado produzido a partir do endocarpo da macaúba como pós-tratamento do efluente de um protótipo de ETE descentralizada para atendimento a comunidades rurais e isoladas. Foram quantificados os efeitos do uso do carvão ativado sobre os seguintes parâmetros do efluente: pH, Oxigênio Dissolvido (OD), Cor, Condutividade Elétrica (CE), nitrogênio amoniacal (N-NH₃), nitrito (N-NO₂), nitrato (N-NO₃) e fosfato (P-PO₄). Para tal, foram conduzidos experimentos doses baixas (experimento 1) e doses altas (experimento 2) de carvão ativado. Os resultados mostraram que o CAEM foi eficiente na remoção de cor, amônia, nitrato, nitrito e fosfato. Doses altas do carvão ativado, porém, promoveram aumento expressivo das concentrações de amônia e dos valores de pH. A dose de 8% do CAEM foi aquela que apresentou melhor desempenho.

Palavras-chave: Tratamento de Esgoto Sanitário. Bioeconomia. Economia Circular. Reúso de Água. Desenvolvimento Sustentável. ODS 6.

ABSTRACT

The sewage treatment rates in Brazil are still worrying, especially in rural areas, where this scenario is more challenging. In order to develop a technological alternative to serve rural and isolated communities, and also to enable the reuse of water for irrigation, a prototype of a decentralized Sewage Treatment Plant

(STP) was developed, consisting of easily accessible and easy-to-operate materials. The treatment system used consists of a Septic Tank + Anaerobic Filter + Slow Filtration + Disinfection with trichloroisocyanuric acid. Aiming to improve the quality of the final effluent, the use of activated carbon produced from the endocarp of the macaúba fruit (CAEM) was tested on a laboratory scale. The macaúba is a source of biomass whose industrial use is consolidating in Brazil. The endocarp of the fruit of this palm tree is a material with properties suitable for the production of biochar. In view of the above, the objective of this study was to evaluate the use of activated carbon produced from the endocarp of the macaúba palm tree as post-treatment of effluent from a prototype decentralized WWTP to serve rural and isolated communities. The effects of the use of activated carbon on the following effluent parameters were quantified: pH, dissolved oxygen (DO), color, electrical conductivity (EC), ammonia nitrogen (N-NH₃), nitrite (N-NO₂), nitrate (N-NO₃) and phosphate (P-PO₄). For this purpose, experiments were conducted with low doses (experiment 1) and high doses (experiment 2) of activated carbon. The results showed that CAEM was efficient in removing color, ammonia, nitrate, nitrite and phosphate. High doses of activated carbon, however, promoted a significant increase in ammonia concentrations and pH values. The 8% dose of CAEM was the one that presented the best performance.

Keywords: Sewage Treatment. Bioeconomy. Circular Economy. Water Reuse. Sustainable Development. SDG 6.

RESUMEN

Las tasas de tratamiento de aguas residuales sanitarias en Brasil siguen siendo preocupantes, especialmente en las zonas rurales, donde este escenario es más desafiante. Con el objetivo de desarrollar una alternativa tecnológica para atender a comunidades rurales y aisladas, y además posibilitar la reutilización del agua para riego, se desarrolló un prototipo de Estación de Tratamiento de Aguas Residuales (ETE) descentralizada compuesta por materiales de fácil acceso y funcionamiento. El sistema de tratamiento utilizado consta de un sistema de Fosa Séptica + Filtro Anaeróbico + Filtración Lenta + Desinfección por ácido tricloroisocianúrico. Con el objetivo de mejorar la calidad del efluente final, se probó a escala de laboratorio el uso de carbón activado producido a partir del endocarpo del fruto de macaúba (CAEM). Macaúba constituye una fuente de biomasa cuyo uso industrial se está consolidando en Brasil. El endocarpo del fruto de esta palmera es un material con propiedades adecuadas para la producción de biocarbón. Teniendo en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo fue evaluar el uso de carbón activado producido a partir del endocarpo de macaúba como postratamiento de efluentes de un prototipo de PTAR descentralizada para atender a comunidades rurales y aisladas. Se cuantificaron los efectos del uso de carbón activado sobre los siguientes parámetros del efluente: pH, Oxígeno Disuelto (OD), Color, Conductividad Eléctrica (CE), nitrógeno amoniacal (N-NH₃), nitrito (N-NO₂), nitrato (N-NO₃).) y fosfato (P-PO₄). Para ello, se realizaron experimentos con dosis bajas (experimento 1) y dosis altas (experimento 2) de carbón activado. Los resultados mostraron que CAEM fue eficiente en la eliminación de color, amoníaco, nitrato, nitrito y fosfato. Sin embargo, altas dosis de carbón activado provocaron un

aumento significativo de las concentraciones de amoníaco y de los valores del pH. La dosis de CAEM al 8% fue la que mejor comportamiento mostró.

Palabras clave: Tratamiento de Aguas Residuales Sanitarias. Bioeconomía. Economía Circular. Reutilización del Agua. Desarrollo Sostenible. ODS 6.

1 INTRODUÇÃO

A situação dos índices de coleta e tratamento de esgoto sanitário no Brasil apresenta desafios complexos que refletem disparidades regionais e socioeconômicas. Dados recentes indicam que, apesar dos esforços empreendidos, uma parcela significativa da população brasileira ainda carece de acesso adequado a serviços de esgotamento sanitário. Em algumas regiões do país, os índices de coleta de esgoto podem ser substancialmente inferiores à média nacional, evidenciando uma disparidade geográfica notável. Dados compilados pelo Instituto Trata Brasil dão conta que, por dia, é despejada no ambiente quantidade de esgoto sanitário equivalente a 5,2 mil piscinas olímpicas (aproximadamente 10.000 m³/dia) (Trata Brasil, 2024a). Detalhando, cerca de 100 milhões de habitantes, sequer tem acesso à rede coletora de esgoto e apenas 52,2% do esgoto é tratado em algum nível. As regiões norte e nordeste apresentam os piores percentuais de tratamento de esgoto (19,8% e 34,3%, respectivamente), enquanto as regiões sudeste e centro-oeste apresentam os melhores números (61,6% e 59,3%, respectivamente). Já a região Sul apresenta cerca de 48% do esgoto tratado (Trata Brasil, 2024b).

O cenário brasileiro é ainda mais desafiador quando se trata da coleta e tratamento de esgoto sanitário em áreas rurais. Os índices registrados apontam para precariedade dos serviços nessas áreas. Os dados referentes à coleta, à disposição final e ao tratamento de esgoto sanitário no Brasil, disponibilizados pelo Programa Nacional de Saneamento Rural, estão desatualizados e apresentando informações apenas no período de 1991 e 2010 (PNSR, 2019). No entanto, apontam para a pequena evolução destes serviços. No período avaliado, cerca de 64% dos domicílios rurais dispunham seu esgoto sanitário em fossas rudimentares, 16% em valas, lagos e mar, 16% em fossas sépticas e 4%

em rede coletora. O detalhamento desses números mostra que 20,6% dos brasileiros residentes em áreas rurais têm acesso adequado a serviços de tratamento de esgoto sanitário, 54,1% têm acesso precário e 25,3% não possuem nenhum tipo de atendimento. Essa realidade afeta cerca de 40 milhões de brasileiros (PNSR, 2019). Estudo mais recente no estado de Goiás, aponta que esse cenário continua sendo o predominante e reflete o menor poder aquisitivo e a exclusão social que a população rural vivência no Brasil (Vale *et al.*, 2022).

Existe uma clara necessidade de que estratégias específicas, que considerem as peculiaridades das áreas rurais, devem ser desenvolvidas e utilizadas. Fatores como a criticidade da viabilidade financeira, necessidade de soluções tecnológicas diferenciadas e a limitação de formação de técnicos capacitados para lidar com soluções alternativas e com a participação da comunidade na gestão dos sistemas, devem ser consideradas (Revista DAE, 2019). Essa realidade tem levado ao desenvolvimento e uso de uma série de sistemas descentralizados de tratamento de esgoto como, por exemplo, os conjuntos tanques sépticos e filtros anaeróbios (Vianna *et al.*, 2018), os tanques de evapotranspiração – TEVAP (Reis *et al.*, 2023) e a Fossa Séptica Biodigestora – (FSB) (Embrapa, 2001). A qualidade final do efluente final desses sistemas de tratamento, porém, pode ser melhorada, levando a um menor risco de contaminação ambiental e até mesmo permitindo que usos mais nobres do efluente como, por exemplo, o reuso de água, sejam alcançados.

Dessa forma, fica clara a necessidade de desenvolvimento de sistemas, de processos e de materiais de baixo custo, capazes de auxiliar o tratamento de esgoto sanitário em áreas rurais. O uso de materiais alternativos como cascalho natural, pedra britada número 2 e cascalho lavado em leitos cultivados como pós-tratamento de um conjunto de tanques sépticos foi avaliado por (Colares & Sandri, 2013), com grande melhoria da qualidade do efluente final. Baettker *et al.* (2018), por sua vez, avaliou o uso de diferentes meios filtrantes em filtros anaeróbios, quais sejam: carvão ativado, cerâmica de argila e borracha de pneu. Os resultados mostraram que o carvão ativado apresentou maior eficiência na redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO) em esgoto sintético. O uso

de carvão ativado de origem diversas tem se mostrado eficiente na melhoria da qualidade do efluente final em diferentes processos de tratamento (Paterniani *et al.*, 2011; Skouteris *et al.*, 2015; Bou *et al.*, 2018; Ribeiro & Botari, 2022).

Novas fontes de carvão ativado produzido a partir resíduos agroindustriais podem ser utilizadas neste processo de tratamento sanitário. Uma biomassa que vem se destacando é a palmeira macaúba (*Acrocomia aculeata*). Trata-se de uma promissora espécie vegetal para fins agroindustriais devido às características dos sistemas de produção integrado é à diversidade de aplicações que oferece (Vargas-Carpinteiro, 2022; Cardoso *et al.* 2019). É uma planta nativa das regiões tropicais e subtropicais da América Latina com elevada produtividade em óleo e outras biomassas. Explorada em larga escala, a partir de maciços de ocorrência natural, no Paraguai desde a década de 40 (Poetsch *et al.*, 2012), está ganhando tração no Brasil, como fonte de matéria-prima para biocombustíveis, alimentos e cosméticos, por meio de cultivos organizados (Junqueira, 2019; Favaro & Rocha, 2022).

O fruto da macaúba é formado por uma casca externa, polpa, endocarpo e amêndoa. Os óleos são obtidos da polpa e da amêndoa. O endocarpo coreáceo é rico em celulose, hemicelulose e lignina (49%, 15%, 37%, respectivamente) (Nascimento, 2012). Portanto, apresenta elevados poder calorífico (poder calorífico inferior $17,1 \text{ MJ kg}^{-1}$) e densidade energética ($8,6 \text{ GJ m}^{-3}$) (Evaristo *et al.*, 2016). Esta composição evidenciou seu potencial para a produção de biocarvões e uso como combustível sólido (Chavez, 2021).

Em termos de rendimento de produção agrícola, o endocarpo pode gerar quantidades muito expressivas, chegando a atingir 7 t ha^{-1} (Favaro & Rocha, 2022). A destinação adequada deste coproduto é fundamental para a consolidação da cadeia produtiva da macaúba. Assim, sua conversão a carvão ativado é uma importante rota de agregação de valor e redução de impacto ambiental. A aplicação dos carvões no tratamento de esgoto sanitário em áreas rurais atende à chamada economia circular, que pode ser definida como um modelo de produção que possibilita um ideal aproveitamento e reaproveitamento sistemático de produtos industrializados, bens duráveis e não duráveis, desde a etapa de concepção de projeto, até mesmo após a sua reutilização (Abdalla &

Sampaio, 2018). Dessa forma, o aproveitamento dos subprodutos e coprodutos dos sistemas industriais se torna ferramenta chave para que os sistemas produtivos se tornem cada vez mais sustentáveis.

Diante do exposto, o objetivo desse trabalho foi avaliar o uso potencial de um carvão ativado, produzido a partir do endocarpo da Macaúba, em condições de laboratório, como pós-tratamento do efluente de um protótipo de ETE descentralizada para atendimento a comunidades rurais e isoladas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 PROTÓTIPO DE SISTEMA DE TRATAMENTO E ESGOTO SANITÁRIO E CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE FINAL

A Embrapa Hortaliças vem, desde 2018, desenvolvendo um protótipo de sistema descentralizado de tratamento de esgoto sanitário para uso em áreas rurais e isoladas. O sistema, que utiliza como processo principal um conjunto Tanque-Séptico + Filtro Anaeróbio + Filtração Lenta + Desinfecção por ácido tricloroisocianúrico, atende às premissas anteriormente citadas para atendimento à essas áreas e visa a obtenção de efluente final com qualidade suficiente para permitir o reuso na irrigação agrícola para produção de hortaliças.

Foi utilizado, para condução do experimento, o efluente final de um protótipo do mencionado sistema de tratamento projetado. Tal protótipo está instalado na Embrapa Hortaliças e opera em escala real, atendendo a um público de 200 a 250 pessoas diariamente. Ainda trata o efluente de um restaurante que atende que, estima-se, serve cerca de 100 refeições por dia.

Figura 1 – Imagem do protótipo de sistema descentralizado de tratamento de esgoto sanitário instalado na Embrapa Hortaliças.



Fonte: Carlos Eduardo Pacheco Lima.

Como a produção de esgoto concentra-se durante o expediente de trabalho, num período de até 10 horas por dia, com possível ausência de produção de esgoto sanitário no restante do dia, o funcionamento do protótipo se aproxima do regime em batelada. Em função das condições experimentais disponíveis, os ensaios foram realizados com duas bateladas distintas de efluente final, denominadas doravante de efluente 1 e efluente 2, cujas características estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas e concentrações de nutrientes (formas nitrogenadas e fosfato) das duas amostras de efluente final do protótipo de ETE descentralizada utilizadas nos experimentos com o Carvão Ativado do Endocarpo da Macaúba (CAEM).

Efluente final	pH	OD mg/L	Cor µH	CE µS.cm ⁻³	N-NH ₃ mg.L ⁻¹	N-NO ₂ mg.L ⁻¹	N-NO ₃ mg.L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ mg.L ⁻¹
Efluente 1	9,0	5,7	20,3	716	7,6	39,2	258,7	14,7
Efluente 2	6,9	3,4	23,3	686,3	3,7	62,5	328,7	15,7

Legenda: OD - Oxigênio Dissolvido; CE – Condutividade Elétrica; N-NH₃ – N-amônia; N-NO₂ – N-Nitrito; N-NO₃ - N-Nitrato; PO₄³⁻ - Fosfato.

Fonte: Carlos Eduardo Pacheco Lima.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE FINAL ANTES E DEPOIS DA ADIÇÃO DE DOSES DO CAEM

Foram analisadas as seguintes características das amostras de efluente final utilizadas em cada um dos experimentos: pH, OD, Cor, CE, além das concentrações de N-NH₃, N-NO₂, N-NO₃ e PO₄³⁻.

Os valores de pH, OD e CE foram determinados em amostras de 200 mL do efluente final e do efluente após tratamento com diferentes doses de CAEM, utilizando-se uma sonda multiparâmetro AK 88. As amostras foram dispostas em

béquer de 250 mL. Depois de calibrados, sensores específicos, para cada uma das características a serem determinadas, foram imersos nas amostras do efluente até a cobertura total deles. Procurou-se evitar a criação de bolhas e a agitação intensa do efluente. Esperou-se a estabilização da leitura e então os valores foram anotados em ata de laboratório destinada ao registro dos dados observados.

As concentrações de N-NH_3 , N-NO_2 , N-NO_3 e PO_4^{3-} , por sua vez, foram determinadas por fotometria, utilizando um fotômetro digital Exact Micro 20. Para tal, foram utilizadas amostras de 4 mL do efluente final e do efluente após tratamento com cada uma das doses de CAEM. A estas foram adicionados reagentes presentes em fitas-reagentes específicas para cada um dos íons avaliados, movimentando-as de forma horizontal conforme instruções do fabricante. O tempo de contato do reagente com a amostra analisada também foi utilizado conforme instruções do fabricante. Depois desse período, foi realizada a leitura dos valores referentes a cada uma das amostras avaliadas.

2.3 OBTENÇÃO DO CARVÃO ATIVADO DE ENDOCARPO DE MACAÚBA (CAEM) E SUAS CARACTERÍSTICAS

O endocarpo da macaúba, obtido da cooperativa Cooperriachão (Montes Claros / MG/Brazil), foi carbonizado em reator (Modelo PRGS1104, PID Eng&Tech) operado em modo batelada, com carga inicial de 3,5 kg de endocarpo, que após ser inertizado é submetido a aquecimento até 750 °C. Após atingir esse patamar, passou-se à alimentação com vapor d'água, em vazão de 7,5 mL/min por 4 horas (total de 1,8 kg de água). Nessas condições, o rendimento de carvão ativado foi de 22,5%. As características físico-químicas apresentadas são: área superficial de $589 \pm 22,1 \text{ m}^2/\text{g}$ ($483,7 \text{ m}^2/\text{g}$ de microporos e $58,7 \text{ m}^2/\text{g}$ de mesoporos); análise imediata: 12,71% de voláteis, 80,90% carbono fixo e 6,39% de cinzas (ABNT NBR 16587:2017); análise elementar: 81,11% de C, 1,48% de H e 0,33% de N (DIN 51732:2014-07); poder calorífico superior de 29,29 MJ/Kg (NBR8633 DE 12/2014); índice de iodo de 1104,55

mg/g (ABNT NBR 12073:1991); e índice de azul de metileno de 130,7 mg/g (JIS K 1474).

2.4 ENSAIOS COM O USO DO CARVÃO ATIVADO DO ENDOCARPO DA MACAUBA

Os experimentos foram conduzidos em escala de laboratório, adicionando-se diferentes doses do carvão ativado em Erlenmeyers de 500 mL e o volume completado com o efluente final para 250 mL. As doses de CAEM utilizadas em cada experimento, expressas em porcentagem massa/volume de efluente, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Doses de carvão ativado de endocarpo de macaúba (CAEM) utilizadas para avaliar efeito sobre características físico-químicas e remoção de nutrientes em efluentes finais de protótipo de ETE descentralizada.

Experimento	Dose avaliadas de CAEM			
1	0%	2%	4%	6%
2	0%	8%	10%	12%

Fonte: Carlos Eduardo Pacheco Lima.

Posteriormente, a suspensão contendo as doses do carvão ativado e a amostra do efluente final foram mantidos sob agitação orbital por duas horas. A seguir, o material foi filtrado em papel de filtro com capacidade de reter partículas com diâmetro igual ou superior a 2 μm .

Para cada um dos experimentos foi utilizado o Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) com 4 tratamentos e 3 repetições, totalizando 12 parcelas experimentais. Os dados obtidos foram verificados quanto à sua distribuição normal e depois submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias foram testadas pelo Teste de Tukey com um erro estatístico de 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um resumo da análise de variância para cada uma das características do efluente com e sem tratamento com diferentes doses do carvão ativado produzido a partir do endocarpo do fruto da Macaúba, para cada um dos dois experimentos, conduzidos, pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo da Análise de Variância (ANOVA) dos valores de pH, oxigênio dissolvido (OD), cor e condutividade elétrica (CE), além das concentrações de N amoniacal (N-NH₃), N Nitrito (N-NO₂), N Nitrato (N-NO₃) e fosfato (PO₄³⁻) determinados em amostras de efluente final de um protótipo de ETE descentralizada com vistas ao atendimento a comunidades rurais e isoladas antes e depois do tratamento com diferentes doses com CAEM.

	pH		OD		Cor		CE		N-NH ₃		N-NO ₂		N-NO ₃		PO ₄ ³⁻	
	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc	QM	Fc
Exp. 1	0,1	5,7	0,1	9,0	133,6	89,0	40912,2	222,4	45,1	32,0	186,9	40,7	6942,5	15,2	15,7	79,8
Exp. 2	6,9	559,7	3,0	103,3	235,9	22,1	242295,2	32,2	45,5	164,5	672,8	54,7	14352,2	242,7	103,4	445,3

Fonte: Carlos Eduardo Pacheco Lima.

A adição do CAEM foi capaz de promover efeito significativo sobre todas as características do efluente final avaliadas, nos dois experimentos conduzidos. Na Tabela 4 estão dispostos os resultados obtidos pelo teste de médias.

Tabela 4. Efeitos da adição de diferentes doses de CAEM sobre características físico-químicas e remoção de nutrientes (formas nitrogenadas e fosfato) do efluente final de um protótipo de ETE descentralizada com vistas ao tratamento de esgoto em comunidades rurais e isoladas.

Doses	pH	OD	Cor	CE	N-NH ₃	N-NO ₂	N-NO ₃	PO ₄ ³⁻
%		mg/L	µH	µS.cm-3	mg/L			
Experimento 1								
0	9,0 b*	5,7 ab	20,3 a	716,0 d	7,6 b	39,2 a	258,7 a	14,7 a
2	9,3 ab	5,9 a	7,0 b	814,0 c	2,2 c	25,2 b	172,4 b	12,7 b
4	9,5 a	5,8 a	6,7 b	890,3 b	10,8 a	34,9 a	160,0 b	14,2 a
6	9,4 a	5,5 b	7,3 b	991,7 a	10 ab	22,5 b	157,6 b	9,6 c
Experimento 2								
0	6,9 b	3,3 c	23,3 a	683,3 c	3,4 b	62,5 a	328,7 a	15,7 a
8	9,8 a	5,0 b	11,0 b	1020,0 b	1,4 c	31,8 b	210,5 c	1,5 d
10	9,9 a	5,6 a	3,3 b	1125,3 b	9,4 a	36,5 b	167,3 d	7,8 c
12	10,0 a	5,4 ab	6,0 b	1371,7 a	8,7 a	30,7 b	258,7 b	9,6 b

*Médias seguidas pelas mesmas letras não são diferentes pelo Teste de Tukey a 5%.
Fonte: Carlos Eduardo Pacheco Lima.

De modo geral, foi possível observar que o CAEM apresenta potencial para melhorar a qualidade do efluente final de um protótipo de ETE descentralizada com vistas ao tratamento de esgoto sanitário em comunidades rurais e isoladas. Nesse sentido, observou-se o potencial desse produto de reduzir a cor e manter níveis mais baixos de concentração das formas nitrogenadas e de fosfato, além de elevar os teores de oxigênio dissolvido (OD).

Por outro lado, embora dentro de certos limites possa constituir também em uma melhoria da qualidade do efluente final, também foi encontrada clara tendência de elevação dos valores de pH e condutividade elétrica. Doses mais elevadas do carvão ativado, entretanto, promoveram intensa elevação desses valores, atingindo níveis preocupantes para disposição final do efluente tratado em corpos d'água e também para o reuso agrícola.

No primeiro experimento, quando doses mais baixas do carvão ativado foram utilizadas, observou-se que os valores de pH seguiram a seguinte ordem, do menor para o maior, em relação volume deste produto utilizado: 0% ≤ 2% ≤

4% = 6%. Já no segundo experimento, foi observada a seguinte ordem: 0% < 8% = 10% = 12%. Os valores de pH nas amostras de efluente final (Tratamento 0%) coletadas para cada um dos experimentos e determinado por meio das leituras em sonda multiparâmetro apresentaram-se bastante distintas. Nas amostras utilizadas para o primeiro experimento o valor médio observado no tratamento controle foi de 9,01, enquanto no segundo experimento foi de 6,9. Apesar dessa diferença, os valores observados quando as amostras foram tratadas com as diferentes doses do carvão ativado apresentaram valores muito próximos, promovendo, de modo geral, uma elevação dos valores iniciais.

Todos os tratamentos apresentaram valores médios de pH fora da faixa considerada como de amplitude usual para água utilizada para irrigação por Ayers & Westcot (1994). Também apresentaram valores em desconformidade com a Resolução CONAMA 430/2011 para lançamento de efluentes em corpos d'água, sendo, portanto, necessário que correções no sistema de tratamento de esgoto sejam efetuadas, bem como que o ajuste das doses do carvão ativado também seja efetuado, de modo a cumprir as exigências técnicas e legais, a depender, obviamente, do uso dado ao efluente tratado. É possível, ainda, que o elevado valor de pH registrado no efluente final da ETE não tratado com carvão ativado registrado no experimento 1 possa estar ligado a descartes acidentais de reagentes nos laboratórios. A Embrapa Hortaliças utiliza, em seu sistema de gestão ambiental, processo de descarte de resíduos de laboratórios que os destina para empresa especializada de modo a dar tratamento e disposição final adequada, reduzindo a ocorrência de impactos negativos sobre o sistema biológico de tratamento de esgoto. Entretanto, ocasionalmente, é possível que erros aconteçam de modo a que descartes acidentais aconteçam, sendo necessário treinamento frequente dos colaboradores, em especial dos estagiários que constituem mão-de-obra temporária que, por vezes, quando do início do seu trabalho, desconhecem os processos de gestão ambiental utilizados.

Estudos anteriores também observaram que o uso de carvão ativado produzidos a partir de diferentes matrizes, em diferentes processos de tratamento de águas residuárias, pode resultar em elevação do pH (Baettker et

al., 2018; Sher et al., 2021). A elevação do pH no efluente final após tratamento com carvão ativado tem sido atribuída a fatores como a adsorção de ácidos orgânicos e a liberação de íons hidroxila presentes na superfície desses produtos. O carvão ativado pode ser entendido como um adsorvente microporoso obtido por uma grande variedade de materiais carbonáceos. A adsorção de compostos orgânicos em carvão ativado é controlada por interações físicas e químicas que ocorrem nos microporos ou em superfícies. Nestas, destaca-se o papel das propriedades ácido-base superficiais, proporcionadas por grupos funcionais presentes como, por exemplo, carbonila, carboxila, hidroxila e enóis, como mecanismo essencial (Guilarducci, et al., 2006). Nesse sentido, a formação de complexos doador-receptor representa um dos mecanismos mais importantes de adsorção de compostos orgânicos dos carvões ativados, reforçando a possibilidade da adsorção de ácidos orgânicos, comumente presentes em efluentes de tratamento de esgoto sanitário, no complexo sortivo provocar a troca por íons OH^- e, conseqüentemente, do aumento dos valores de pH em efluentes finais tratados com esses materiais.

As concentrações de OD apresentaram valores iniciais muito distintos no efluente não tratado com carvão ativado nos experimentos 1 e 2. O monitoramento do efluente em longo prazo, realizado desde 2020, mostra que a média histórica se aproxima mais daquele valor médio observado nas amostras do experimento 1 ($5,7 \text{ mg.L}^{-1}$) do que o observado nas amostras do experimento 2 ($3,3 \text{ mg.L}^{-1}$). É possível que o menor valor médio registrado nas amostras utilizadas para o experimento 2 esteja ligado a um erro amostral, com a coleta e determinação dos valores realizada logo após o processo de cloração. O processo de cloração pode levar à formação de subprodutos organoclorados (Padhi et al., 2019; Lou et al., 2019) capazes de induzir a formação de espécies de oxigênio reativas (ROS) (Lou et al., 2019). Entende-se por ROS um grupo de derivados do oxigênio molecular e de radicais livres com atividade redox (Zhang et al., 2018); Estes autores relatam que os ROS compreendem não apenas radicais livres como os superóxidos (O_2^-), radicais hidroxila ($\text{OH}^\cdot$), radical peroxil ($\text{ROO}^\cdot$) e radical alcóxila ($\text{RO}^\cdot$), mas também espécies de oxigênio molecular não-radical como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), oxigênio singlete ($^1\text{O}_2$) e ácido

hipocloroso (HOCl). É possível que a formação de ROS se dê por meio de reações bioquímicas (Zhang et al., 2018) de degradação dos mencionados subprodutos realizadas por microrganismos presentes efluente ou, até mesmo, por reações redox destes poluentes orgânicos persistentes, assim como observado para outros contaminantes orgânicos emergentes e relatados por Liu et al. (2023), resultando no consumo de OD (Chuang & Mitch, 2017). A poluição orgânica pode resultar em queda expressiva do OD, que é utilizado para degradação dos compostos orgânicos, decaindo mais rapidamente do que sua capacidade de reposição (Zahmatkesh et al., 2023). O consumo de dióxido de cloro utilizado para desinfecção, por exemplo, mostrou-se maior quando maiores teores de carbono orgânico dissolvido (COD) foram observados em água para abastecimento na Holanda (Wondergen & Dijk-Looijaard, 1991).

No experimento 1, quando os níveis iniciais de OD já eram relativamente altos para um efluente de ETE, não foi observado efeito significativo dos tratamentos com carvão ativado sobre esse parâmetro. Ao contrário, no experimento 2, quando os níveis iniciais de OD eram baixos, observou-se efeito significativo dos tratamentos. Neste caso, todos os tratamentos apresentaram efeito positivo sobre a elevação dos níveis de OD. O tratamento que utilizou a doses de carvão ativado de 10% foi aquele que apresentou maior média desse parâmetro no efluente final, sendo estatisticamente igual ao valor médio encontrado para o tratamento que utilizou o volume de 12%. Este tratamento, porém, apresentou níveis de OD que não se diferenciaram estatisticamente daquele observados no tratamento que utilizou 8%. Os resultados observados no experimento 2 mostram que, quando aplicados em efluentes de estações de tratamento de esgoto que apresentam baixos níveis de OD, as doses testadas são capazes de promover elevação deles, constituindo uma alternativa tecnológica para tal finalidade.

O uso do carvão ativado biológico (CAB) para remoção de contaminantes orgânicos tem sido amplamente relatado na literatura científica. O uso de sistemas de ozonização + filtração com CAB como pós-tratamento tratamento de água residuária municipal, tem apresentado remoção de COD que se situa numa faixa entre 20% e 70%, sendo a maior parte dessa remoção realizada pelo

filtro com CAB (Chuang & Mitch, 2017). Já o uso de filtração lenta + carvão ativado produzido a partir da borra de café resultou em remoção de 95% dos surfactantes presentes no efluente de um reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF) utilizado para tratamento de esgoto sanitário (Ribeiro & Botari, 2021). O uso de carvão ativado como material suporte para crescimento de biomassa microbiana, por sua vez, apresentou eficiência de remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO) de até 94% em esgoto sintético (Baettker et al., 2018). Esses resultados demonstram que carvões ativados oriundos de diferentes matrizes biológicas apresentam potencial de remoção das Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e da Demanda Química de Oxigênio (DQO) por meio da remoção de COD e de outros poluentes orgânicos, resultando em maiores concentrações de OD no efluente final. O principal mecanismo de remoção do material orgânico é a adsorção, porém, o carvão ativado utilizado como recheio de filtros anaeróbios também se mostrou capaz de servir como suporte para crescimento da biomassa microbiana, que atua como decompositora do material orgânico presente em esgotos (Baettker et al., 2018).

A melhoria da cor de efluentes de ETEs, por meio da remoção de moléculas que conferem essa característica a eles, também têm sido comumente observada. No presente trabalho houve uma intensa remoção de cor no efluente final do protótipo de ETE descentralizada com vistas ao atendimento a populações rurais e isoladas. Todas as doses de CAEM utilizadas promoveram uma melhoria da cor do efluente final, como pode ser exemplificado pela Figura 1.

Figura 2 – Exemplo de efluente após ensaio de adsorção realizado com doses de CAEM (à esquerda - A) e do efluente sem tratamento com este produto (à direita – B). realizado com efluente final de protótipo de ETE descentralizada com vistas ao atendimento a comunidades rurais e isoladas.



Fonte: Carlos Eduardo Pacheco Lima.

Os resultados observados para o experimento 1 mostraram a seguinte ordem de cor determinada nas amostras de efluente após ensaio de adsorção com CAEM: 2% = 4% = 6% < 0%. Já a ordem observada no experimento 2 foi: 8% = 10% = 12% < 0%. Em valores médios foram observadas as seguintes eficiências de remoção de cor, nos experimentos 1 e 2, respectivamente: 65,5% e 70,96% (Tabela 5). Partindo-se do princípio de que os valores iniciais de cor do efluente da ETE foram semelhantes, é possível inferir que existe uma tendência de os tratamentos que utilizaram maiores doses do carvão ativado do endocarpo do fruto da Macaúba apresentarem maior eficiência de remoção da cor do efluente.

Tabela 5 – Eficiência de remoção de cor e de nutrientes pelo uso de carvão ativado produzido a partir do endocarpo do fruto da Macaúba visando a melhoria da qualidade final de efluente de um protótipo ETE descentralizada para atendimento a comunidades rurais e isoladas.

Doses	Cor	N-NH ₃	N-NO ₂	N-NO ₃	P-PO ₄ ³⁻
Experimento 1					
0%					
2%	65,52%	71,05%	35,71%	33,36%	13,61%
4%	66,99%	-42,11%	10,97%	38,15%	3,40%
6%	64,04%	-31,60%	42,60%	39,08%	34,69%
Experimento 2					
0%					

8%	52,80%	58,82%	49,12%	35,96%	90,46%
10%	85,84%	-176,47%	41,60%	49,10%	50,32%
12%	74,25%	-155,88%	50,88%	21,30%	38,85%

Fonte: Carlos Eduardo Pacheco Lima.

A remoção da cor de uma mistura de esgoto sintético e diferentes doses de lixiviado de aterro sanitário por um sistema de lodos ativados com carvão ativado em pó foi avaliada por Bou et al. (2018). Estes autores verificaram que a adição doses mais altas do carvão ativado em pó resultou em maior eficiência de remoção de cor da mistura. Nos tratamentos que utilizaram doses menores do carvão ativado em pó, entretanto, foi observado pelos autores a possibilidade de saturação do complexo sortivo quando maiores concentrações do lixiviado foi adicionada à mistura.

Remoção da cor de efluente sanitário por meio do uso de filtro contendo um carvão ativado comercial foi verificado no trabalho de Nurfida & Widiasta (2018). Estes autores argumentam que a cor em efluentes de sistemas de tratamento de esgoto está relacionada com a presença de matéria orgânica e com íons dissolvidos na água como, por exemplo, Ferro e Manganês. Os resultados deste estudo mostraram que doses crescentes do carvão ativado apresentaram crescente remoção da cor do efluente final e que o principal mecanismo de remoção foi a adsorção física dos compostos e íons anteriormente mencionados. A eficiência de remoção de cor por eles encontrada chegou a 91,51% em relação à cor do efluente final, quando a maior dose de carvão ativado comercial foi utilizada.

A Resolução CONAMA 357/2005 indica, para enquadramento de corpos d'água como Classe 2 e 3, valores de cor verdadeira menor ou igual a 75 µH. Já a Portaria do Ministério da Saúde (GM/MS 888/2021) que dispõe sobre os padrões de potabilidade de água para abastecimento, apresenta como limite superior o valor de 15 µH. É possível inferir, portanto, que os valores mensurados no efluente do protótipo de ETE descentralizada para atendimento a comunidades rurais e isoladas já apresentam valores relativamente baixos, indicando boa eficiência do tratamento. Ainda assim, as doses de carvão ativado produzido a partir do endocarpo da Macaúba foi capaz de melhorar essa característica do efluente, atingindo valores que, inclusive, se adequam àquele

mais restritivo proposto pela Portaria GM/MS 888/2021, mostrando grande potencial de uso desse produto para o pós-tratamento de efluentes de tratamento de esgoto sanitário.

No que tange respeito à remoção dos nutrientes avaliados (formas nitrogenadas e fosfato), observou-se maior variabilidade dos resultados em função das doses do carvão ativado produzido a partir do endocarpo da Macaúba. Não houve, portanto, um padrão de comportamento dessas variáveis claramente definidos, sendo necessária a condução de novos estudos para complementar aquelas informações obtidas no presente trabalho.

Com relação ao nitrogênio amoniacal total (N-NH_3), pode ser observado com base nos resultados dispostos na Tabela 1, que, nos dois experimentos, apenas os tratamentos com as menores doses (2% e 8%) foram capazes de reduzir a concentração média inicial observada nas amostras de efluente utilizadas para condução do experimento. As doses mais elevadas utilizadas no experimento 1 (4% e 6%) e no experimento 2 (10% e 12%) provocaram aumento ou mantiveram a concentração inicial de N-NH_3 . Ainda assim, todas as médias de N-NH_3 , incluindo aquelas quantificadas nas amostras sem tratamento com o carvão ativado, estiveram dentro do padrão de lançamento de efluentes estabelecido pela Resolução CONAMA 430/2011, que é de 20 mg/L. O nitrogênio amoniacal é resultado da degradação biológica de moléculas orgânicas presentes no esgoto sanitário como, por exemplo, a uréia e aminoácidos, sendo uma forma tóxica de nitrogênio quando presente em corpos d'água. Também apresenta elevado potencial para causar eutrofização dos recursos hídricos causando, dentre outros impactos, redução dos níveis de OD e, conseqüentemente, mortandade de espécies aquáticas dependentes de oxigênio.

Kehl (2015) avaliou o potencial de remoção de nitrogênio amoniacal em diferentes concentrações por carvão ativado e observou um maior potencial de adsorção em valores de pH entre 6 e 10, situação análoga à presente nas condições das amostras utilizadas no presente trabalho, o que pode explicar a elevada capacidade de remoção verificada no presente trabalho. O autor também verificou que, ao avaliar os efeitos de diferentes doses do carvão ativado

entre 0,1 g/L e 50 g/L, a maior eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal total se deu pela concentração de 10 g/L, permanecendo com um comportamento próximo ao constante a partir desta, porém apresentando, de modo geral, valores absolutos que representam tendência de menor eficiência de remoção deste poluente quando elevadas doses de carvão ativado são utilizadas. É possível que, nestas situações possa haver uma conversão de formas mais oxidadas de N, como o nitrito (N-NO_2) e o nitrato (N-NO_3) a nitrogênio amoniacal, induzido pela elevada superfície de contato presente nessas situações. Entretanto, essa hipótese ainda é muito incipiente e estudos futuros visando ao entendimento e detalhamento desse processo ainda precisam ser ainda conduzidos. Em estudo de adsorção de nitrogênio amoniacal em zeólitas, Alshameri et al. (2014) atribuiu a menor eficiência de remoção, quando elevados teores do adsorvato foram utilizadas, à saturação dos sítios de adsorção, levando à diminuição de sítios por unidade de massa, o que resulta em menores taxas de adsorção.

Os resultados encontrados para as formas oxidadas de nitrogênio (N-NO_2 e N-NO_3) mostraram comportamento mais bem definido do que aqueles observados para nitrogênio amoniacal total. Com exceção dos efeitos do tratamento com a dose de 4% para o N-NO_2 , todas as outras apresentaram redução expressiva dos teores de formas oxidadas de nitrogênio. É possível que este resultado esteja ligado a um possível erro experimental, uma vez que comportamento muito claro foi determinado para todas as outras doses avaliadas. A remoção média dos dois tratamentos em que foram observadas redução das concentrações de N-NO_2 no experimento 1 foi de 39,16%, enquanto aquela observada para o experimento 2 foi de 47,2%, demonstrando um maior potencial de remoção quando doses maiores do carvão ativado foram utilizadas. Já para o N-NO_3 , foi observada eficiência de remoção de 36,86% para o experimento 1 e de 35,45% para o experimento 2. São valores muito próximos, indicando que as doses utilizadas apresentaram bom desempenho. Entretanto, é necessário frisar, que a eficiência média de remoção de N-NO_3 no experimento 2 foi negativamente influenciada pelo resultado encontrado para a dose de 12%, que distou do comportamento observado para os demais tratamentos, o que

pode estar também relacionado a algum tipo de erro experimental. Cabe ressaltar, entretanto, que todos os tratamentos utilizados foram capazes de reduzir significativamente as concentrações de N-NO_3 observadas nas amostras de efluentes finais do protótipo de ETE descentralizada para atendimento a comunidades rurais e isoladas. Ainda, é preciso considerar que as concentrações de formas nitrogenadas encontradas em todos os tratamentos são mais elevadas do que aquelas comumente encontradas em esgoto sanitário, sendo possível que este fato esteja associado às próprias características do esgoto bruto ou, mesmo, à desinfecção por ácido tricloroisocianúrico. Esta última possibilidade, porém, ainda carece de melhor esclarecimento e de entendimento de seus mecanismos.

O enriquecimento do efluente com fontes nitrogenadas pode ser útil quando é objetivado o reuso na agricultura, visando a fertirrigação com o efluente tratado. Entretanto, para lançamento em corpos d'água, os valores elevados desses compostos podem causar impactos ambientais importantes. Em conjunto com o fósforo, a presença de compostos nitrogenados em corpos d'água pode resultar em processo de eutrofização, levando ao crescimento acelerado de algas e cianobactérias, diminuindo as concentrações de OD, bem como diminuição da passagem de luz (CETESB, 2022). A Ficha de Informação Toxicológica (FIT) da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), citada anteriormente, também atribui ao consumo de alimentos e de água as principais vias de exposição humana aos íons nitrito e nitrato. No que tange respeito à água, nela consta descrito que a água para consumo humano pode constituir a principal fonte de nitrato e, ocasionalmente, de nitrito. Ainda citam que o ingresso de altas concentrações de nitrato no corpo humano pode, por meio de oxidação, levar a hemoglobina a metemoglobina, resultando na diminuição do transporte de oxigênio para os tecidos, diminuição da pressão arterial, aumento do batimento cardíaco, dor de cabeça, cólica abdominal, vômito e até mesmo a morte. Em bebês pode ainda ocorrer a Síndrome do Bebê Azul, quando a diminuição dos níveis de oxigênio no sangue confere uma coloração azulada na pele, principalmente dos pés, mãos, rosto e lábios. A ingestão de

nitrato e de nitrito ainda pode levar à geração endógena de nitrosaminas como prováveis cancerígenos (CETESB, 2022).

O potencial de uso de carvões ativados para remoção de formas oxidadas de nitrogênio tem sido relatado na literatura científica. Carbono ativado por meio de tratamento com ácido sulfúrico teve sua eficiência em remover nitrito e nitrato em amostras de água por adsorção verificada por Afkami et al. (2007). A eficiência de remoção de nitrato por adsorção em carvão ativado produzido a partir de diferentes espécies vegetais também foi constatado por Nunell et al. (2012). Diferentes carvões ativados também foram utilizados por Bahri et al. (2008) como catalisadores metálicos suportados em carbono visando à remoção de nitrato e de nitrito em água, com boa eficiência constatada. Já Qin et al. (2020) avaliou o uso de um filtro de fase sólida com fibras de carvão ativado para remoção de nitrato por meio de desnitrificação, também mostrando-se uma boa alternativa tecnológica para tal fim.

A capacidade de redução dos níveis de fosfato no efluente utilizado também foi constatada. Com exceção da dose 4%, assim como anteriormente verificado para formas nitrogenadas, reforçando a hipótese de que tenha ocorrido um erro experimental, todas as outras doses de carvão ativado produzido a partir do endocarpo da macaúba apresentaram redução significativa das concentrações de fosfato em relação à amostra do efluente final do protótipo de estação de tratamento de esgoto sanitário descentralizado para atendimento a comunidades rurais e isoladas. A eficiência média de remoção de fosfato observada nos tratamentos que apresentaram resultados estatísticos significativos em relação ao controle, no experimento 1, foi de 24,15%. Já no experimento 2, eficiência média de 59,87% foi observada. É possível inferir, portanto, que doses mais altas do carvão ativado apresentaram maior potencial de remoção deste nutriente, com destaque para a eficiência de remoção promovida pelo tratamento com a dose de 8%, que foi de 90,4%.

A avaliação do desempenho de um filtro lento enriquecido com carvão ativado na remoção do fósforo foi realizada por Melo Júnior et al. (2018). Os autores verificaram que o uso do carvão ativado melhorou o desempenho do filtro lento para remoção desse nutriente, tendo apresentado, durante a

condução do experimento, eficiência média de 16,46% ante os 7,89% observados no filtro sem o carvão. Durante o período de avaliação a eficiência máxima observada foi de cerca de 67%. Al-Zboon (2018), por sua vez, observou aumento significativo na eficiência de remoção de fosfato quando carvão ativado foi utilizado enriquecido com nano sílica ou isoladamente, sendo o primeiro tratamento aquele que mostrou melhor desempenho. Neste caso, remoção de até 98% da concentração inicial desse íon foi observada. A possibilidade de uso de carvão ativado de casca de laranja impregnado com hidróxidos duplo lamelares (LDHs) de Zn-Fe como removedor de fosfato em água também foi verificado por Karthikeyan & Meenakshi (2020). O principal mecanismo ligado à remoção de fósforo nos trabalhos citados foi a adsorção. Entretanto, novas tecnologias que utilizam carvão ativado também estão sendo desenvolvidas. Nesse sentido, esse produto foi utilizado como composição de eletrodos desenvolvidos para promoção de remoção eletroquímica de íons fosfato em água, apresentando bons resultados (Song et al., 2023).

4 CONCLUSÕES

O carvão ativado produzido a partir do endocarpo do fruto da Macaúba apresentou grande potencial para uso como removedor de cor do efluente final do protótipo de ETE descentralizada para atendimento a comunidades rurais e isoladas. A remoção das formas nitrogenadas avaliadas e de fosfato também foram constatadas. Maior eficiência de remoção foi encontrado para N-NO₂ e N-NO₃ do que para N-NH₃. Para esta última forma, observou-se aumento significativo das concentrações quando elevadas doses do carvão ativado foram utilizadas sem, contudo, elevarem os valores em desconformidade com a Resolução CONAMA 430/2011. O aumento significativo dos valores de pH, apresentando-se em desconformidade com a resolução anteriormente mencionada e para o reuso de água para irrigação agrícola deve ser mais bem avaliado e solucionado. Finalmente, é possível inferir que a dose de 8% foi aquela que apresentou um conjunto de resultados mais promissores, porém, novos estudos, sobretudo em nível de prototipagem, são necessários para o

desenvolvimento de processos de uso do carvão ativado para as finalidades avaliadas no presente estudo.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, F. A.; FREIRE SAMPAIO, A. C. **Entorno Geográfico**, n. 15, p. 82, 13 jul. 2018.
- AFKHAMI, A.; MADRAKIAN, T.; KARIMI, Z. The effect of acid treatment of carbon cloth on the adsorption of nitrite and nitrate ions. **Journal of Hazardous Materials**, v. 144, n. 1-2, p. 427–431, jun. 2007.
- AL BAHRI, M. et al. Activated carbon supported metal catalysts for reduction of nitrate in water with high selectivity towards N₂. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 138-139, p. 141–148, 17 jul. 2013.
- ALSHAMERI, A. et al. An investigation into the adsorption removal of ammonium by salt activated Chinese (Hulaodu) natural zeolite: Kinetics, isotherms, and thermodynamics. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 45, n. 2, p. 554–564, mar. 2014.
- AL-ZBOON, K. K. Phosphate removal by activated carbon–silica nanoparticles composite, kaolin, and olive cake. **Environment, Development and Sustainability**, v. 20, n. 6, p. 2707–2724, 2 ago. 2017.
- AN, S. et al. Free chlorine induced phototransformation of graphene oxide in water: Reaction kinetics and product characterization. **Chemical Engineering Journal**, v. 381, p. 122609, fev. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 12073: Carvão ativado pulverizado – Determinação do número de iodo – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 16587: Carvão mineral – Determinação do teor de materiais voláteis**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 8633: Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BAETTKER, E. C. et al. Materiais alternativos como meio suporte de filtros anaeróbios para tratamento de esgoto sanitário sintético. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 6, p. 1091–1102, dez. 2018.
- BOU, S. F. et al. Remoção da cor no tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico via processo PACT®. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 385–393, 28 mar. 2018.

CETESB. **Ficha de informação toxicológica: nitrato e nitrito**. São Paulo: CETESB, dez. 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/12/Nitrato-e-Nitrito.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. CONAMA 430: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Brasília: CONAMA, mai. 2011. Disponível em: < <https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/resolucoes/resolucao-conama-no-430-de-13-de-maio-de-2011/view>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

CHAVEZ, S. D. **Thermochemical valorization of Acrocomia aculeata endocarp: solid and liquid pyrolysis products analysis**. 2021. Tese (Phd Chemical and Process Engineering) — Université Paris-Saclay; Universidad Nacional de Asunción, 2021.

CHUANG, Y.-H.; MITCH, W. A. Effect of Ozonation and Biological Activated Carbon Treatment of Wastewater Effluents on Formation of N-nitrosamines and Halogenated Disinfection Byproducts. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 4, p. 2329–2338, 3 fev. 2017.

COLARES, C. J. G.; SANDRI, D. Efficiency of sewage treatment with septic tanks followed by constructed wetlands with different support materials. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 8, n. 1, 30 abr. 2013.

EVARISTO, A. B. et al. Actual and putative potentials of macauba palm as feedstock for solid biofuel production from residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 85, p. 18–24, 1 fev. 2016a.

EVARISTO, A. B. et al. POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DO FRUTO DA MACAÚBA E SUA UTILIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 571–577, 20 jun. 2016b.

FÁVARO, S. P.; ROCHA, J. D. **A nova cadeia produtiva da macaúba para bioprodutos e descarbonização**. Brasília: Embrapa Agroenergia, Documentos 46, 31 p., 2022. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1149154>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

GUILARDUCI, V. V. DA S. et al. Adsorção de fenol sobre carvão ativado em meio alcalino. **Química Nova**, v. 29, n. 6, p. 1226–1232, dez. 2006.

JUNQUEIRA, N. T. V. et al. **Caracterização de populações naturais de macaúba e avaliação do potencial produtivo**. Brasília: Embrapa Cerrados, Documentos 354, 32 p., 2019. Disponível em:

<<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1122305/1/Doc-354-biblioteca.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

KARTHIKEYAN, P.; MEENAKSHI, S. Enhanced removal of phosphate and nitrate ions by a novel Zn Fe LDHs-activated carbon composite. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 25, p. e00154, set. 2020.

KEHL, C. C. P. L. **Remoção de nitrogênio amoniacal por carvão ativado**. 2015. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

MELO JÚNIOR, A. S. et al. **Vista do desempenho na remoção de fósforo em sistema de filtração lenta**. São Paulo: INOVAE, v. 6, p. 254-278, 2018. Disponível em: <<https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/inovae/article/view/1844/1384>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

NASCIMENTO, V.F. **Caracterização de biomassas amazônicas – ouriço de castanha-do-brasil, ouriço de sapucaia e caroço do fruto do tucumã – visando sua utilização em processo de termoconversão**. 2012. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, 2012.

NUNELL, G. V. et al. Conversion of biomass from an invasive species into activated carbons for removal of nitrate from wastewater. **Biomass and Bioenergy**, v. 44, p. 87–95, set. 2012.

NURFIDA, A.; WIDIASA, I. N. Study on color removal of Sewage Treatment Plant (STP) effluent using granular activated carbon. **MATEC Web of Conferences**, v. 156, p. 03011, 2018.

CARDOSO, A. et al. Opportunities and challenges for sustainable production of *A. aculeata* through agroforestry systems. **Industrial Crops and Products**, v. 107, p. 573–580, nov. 2017.

PATERNIANI, J. E. S. et al. Pré-filtração em pedregulho e filtração lenta com areia, manta não tecida e carvão ativado para polimento de efluentes domésticos tratados em leitos cultivados. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 803–812, 2011.

POETSCH, J.; HAUPENTHAL, D.; LEWANDOWSKI, I.; OBERLANDER D.; HILGER T. **Acrocomia aculeata – a sustainable oil crop**. Rural 21: The International Journal for Rural Development, 2012. Disponível em: <<https://www.rural21.com/english/archive/2012/03/detail/article/acrocomia-aculeata-a-sustainable-oil-crop.html>>. Acesso em: 25 nov. 2024.

QIN, W. et al. Process safety and environmental protection: An optimized solid phase denitrification filter by using activated carbon fibers for secondary effluent

treatment. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 142, p. 99–108, 1 out. 2020.

REVISTA DAE. Saneamento rural: desafio que exige novas soluções. **Revista DAE**, v. 67, n. 220, p. 6–14, 2019.

RIBEIRO, M. P.; BOTARI, A. Evaluation of effluent post-treatment by slow filtration and adsorption with activated carbon produced from spent coffee grounds in surfactant removal in sewage treatment. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 17, n. 1, p. 1–10, 8 fev. 2022.

SHER, F. et al. Coupling of electrocoagulation and powder activated carbon for the treatment of sustainable wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, 28 abr. 2021.

SKOUTERIS, G. et al. The effect of activated carbon addition on membrane bioreactor processes for wastewater treatment and reclamation - A critical review. **Bioresource Technology**, v. 185, p. 399–410, 1 jun. 2015.

SONG, X. et al. MOFs-derived Fe, N-co doped porous carbon anchored on activated carbon for enhanced phosphate removal by capacitive deionization. **Separation and Purification Technology**, v. 307, p. 122694, fev. 2023.

VARGAS-CARPINTERO, R. et al. *Acrocomia* spp.: neglected crop, ballyhooed multipurpose palm or fit for the bioeconomy? A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, n. 6, 11 nov. 2021.

WENK, J. et al. Chemical Oxidation of Dissolved Organic Matter by Chlorine Dioxide, Chlorine, And Ozone: Effects on Its Optical and Antioxidant Properties. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 19, p. 11147–11156, 16 set. 2013.

WONDERGEM, E.; VAN DIJK-LOOIJAARD, A. M. Chlorine dioxide as a post-disinfectant for Dutch drinking water. **Science of The Total Environment**, v. 102, p. 101–112, fev. 1991.

ZAHMATKESH, S. et al. Sustainable and optimized values for municipal wastewater: The removal of biological oxygen demand and chemical oxygen demand by various levels of granular activated carbon- and genetic algorithm-based simulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 417, p. 137932, 10 set. 2023.

ZHANG, R.; SONG, B.; YUAN, J. Bioanalytical methods for hypochlorous acid detection: Recent advances and challenges. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 99, p. 1–33, fev. 2018.