

Comparação de biocarvão de matrizes têxteis naturais para ozonização de efluente de aquicultura simulado

C.C.G. Alves^{1,2}, A.A. Morandim-Giannetti², J.S. Komatsu³, B. Ramos^{2,3}

¹Escola Técnica Estadual “Lauro Gomes”, Centro Paula Souza, São Bernardo do Campo, Brasil

²Laboratório de Engenharia Microfluidica e Fotoeletrocatalítica (μ FEC), Centro Universitário FEI, São Bernardo do Campo, Brasil

³Brechó do Carbono, São Paulo, Brasil

Este trabalho avaliou biocarvões de resíduos têxteis em um sistema de ozonização em coluna para tratar efluente aquícola simulado. Os biocarvões apresentaram rendimentos entre 23,38% e 26,23%. Com ozônio, anéis de vidro e alumina atingiram cerca de 75% de remoção óptica, enquanto a alumina com ar alcançou aproximadamente 20%. O biocarvão também contribuiu por adsorção, e a matriz húmica reduziu a remoção aparente da oxitetraciclina.

Palavras-chave: Biocarvão; Ozonização; Economia Circular; Tratamento de Efluentes

INTRODUÇÃO

Atualmente, a aquicultura, definida como a criação e o cultivo de organismos aquáticos, destaca-se como um dos setores de maior crescimento mundial, superando a pesca extrativista em volume de produção. Em 2022, a atividade aquícola mundial alcançou a cifra inédita de 130,9 milhões de toneladas, das quais 94,4 milhões correspondem à produção de animais aquáticos, representando cerca de 51% da produção total do setor (FAO, 2024).

De acordo com reportagem publicada pela Seafood Brasil (2024), com base no relatório SOFIA 2024 da FAO, o comércio global de produtos aquáticos movimentou USD 195 bilhões em 2022, envolvendo mais de 230 países e territórios. Além disso, as exportações de animais aquáticos apresentaram crescimento médio anual de 7,2%, evidenciando a importância econômica e estratégica da atividade.

No Brasil, a aquicultura também vem apresentando expressiva expansão. Segundo dados do IBGE, o valor da produção aquícola atingiu R\$11,7 bilhões em 2024, representando um crescimento de 15,4% em relação a 2023, sendo impulsionado especialmente pela piscicultura e carcinicultura, setores que têm se destacado no cenário nacional. A crescente produção de alimentos de origem aquícola apresenta elevado potencial no combate à insegurança alimentar e à má nutrição. Entretanto, os sistemas de produção aquícola podem gerar efluentes ricos em matéria orgânica, compostos nitrogenados (amônia, nitrito e nitrato), fósforo e microrganismos, que, quando descartados sem tratamento adequado,

podem provocar a eutrofização dos corpos hídricos e comprometer a qualidade da água (Silva, Losekann e Hisano, 2013).

Diante desse cenário, tornam-se fundamentais estratégias de remediação que possibilitem o tratamento adequado dos efluentes e o cumprimento das normas ambientais brasileiras, especialmente das Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011. Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) destacam-se como alternativa promissora. Essa tecnologia baseia-se na geração de espécies oxidantes altamente reativas, como radicais hidroxila livres ($\bullet$ OH), capazes de degradar parcial ou totalmente tanto compostos recalcitrantes quanto outras classes de substâncias. Esses radicais oxidam as substâncias orgânicas por meio de um processo químico denominado mineralização, convertendo esses poluentes em substâncias menos nocivas como dióxido de carbono (OLIVEIRA, 2025).

Entre os POAs, destaca-se a utilização do ozônio (O_3), um agente oxidante com elevada capacidade de degradação de compostos orgânicos presentes em efluentes. Além disso, quando associado a outros processos, como a radiação ultravioleta, pode ocorrer a geração adicional de espécies oxidantes, aumentando a eficiência do tratamento. De acordo com estudo realizado por Haluch e Haluch (2023), foi possível obter taxas de remoção de 93,3% de DQO (Demanda Química de Oxigênio), 96,9% de sólidos, 88% de nitrogênio total e 97,7% de fósforo, utilizando ozônio em duas horas de contato na Estação ELISA. Apesar dos resultados promissores, a

aplicação desses processos ainda apresenta desafios relacionados ao consumo energético, custo operacional e necessidade de materiais capazes de aumentar a eficiência oxidativa. Nesse sentido, destaca-se a ozonização catalítica utilizando carvão ativado ou biocarvão como uma alternativa para acelerar a decomposição do ozônio e aumentar a produção de radicais livres. Devido à sua elevada área superficial, à presença de poros e à abundância de grupos funcionais ativos, esse material apresenta significativa capacidade adsorvente e pode atuar como catalisador no processo de ozonização (ASSALIN e DURÁN, 2006).

Além disso, a utilização de biocarvão possibilita a integração dos princípios da economia circular, uma vez que o biocarvão (biochar) pode ser obtido a partir de diferentes resíduos sólidos que, de outra forma, seriam descartados. Dessa maneira, agrega-se valor a esses materiais e prolonga sua vida útil, alinhando à sustentabilidade. Nesse sentido, a utilização de biocarvão produzido a partir de matrizes têxteis naturais surge como uma alternativa promissora, pois associa o tratamento de efluentes à valorização de resíduos, possibilitando a obtenção de materiais com propriedades superficiais adequadas para aplicação na ozonização catalítica.

Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência da ozonização catalítica utilizando biocarvão obtido de resíduos têxteis naturais (algodão, juta em fio e em pó), estudando seus resultados na remoção de substâncias húmicas e do oxitetraclina (antibiótico), simulando tratamento em um efluente aquícola. Dessa forma, este estudo contribui para o desenvolvimento de métodos de purificação e reúso da água na aquicultura, tornando a atividade alinhada às práticas sustentáveis e menos prejudiciais ao meio ambiente.

MATERIAL E MÉTODOS

Produção do biocarvão

Para a produção dos biocarvões, foram utilizados como matérias-primas fibras têxteis naturais: 29,46g de algodão, 45,89g de juta em fio e 26,42g de juta moída, sendo esses, apresentados na Figura 1, como A1, A2 e A3, respectivamente. As amostras foram colocadas em cadinhos de porcelana e submetidas ao tratamento térmico em forno mufla para obtenção dos biocarvões. O processo de carbonização foi realizado por meio de pirólise. A técnica é descrita por Lopes (2022), como um tratamento térmico que consiste em aquecer o material com a ausência parcial ou total de oxigênio. Para evitar a oxidação completa do material e a formação excessiva de cinzas, os cadinhos foram tampados durante o processo de aquecimento. A carbonização foi realizada por pirólise lenta, utilizando uma rampa de aquecimento

inicial de 5 °C/min até atingir 300 °C, permanecendo nessa temperatura durante 10 minutos. Em seguida, a temperatura foi elevada a uma rampa de 2 °C/min até atingir 500 °C, permanecendo por 1 hora.

Após o resfriamento até a temperatura ambiente, os biocarvões obtidos do algodão, juta em fio e juta moída foram denominados B1, B2 e B3, respectivamente. Em seguida, foram pesados e armazenados em recipientes fechados até sua utilização nos ensaios. O procedimento foi realizado de forma idêntica para todas as biomassas, assegurando a padronização das condições experimentais.

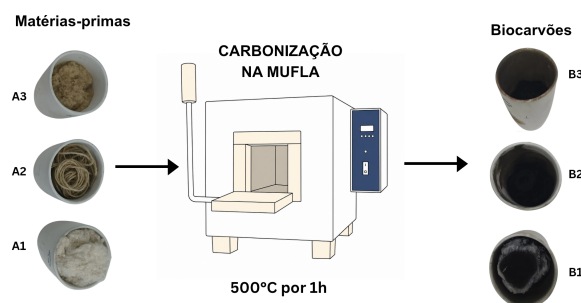


Figura 1. Esquema da obtenção do biocarvão

Ensaio de ozonização

Para a realização dos ensaios, foram preparadas soluções contendo substâncias húmicas na concentração de 0,05 g/L (50 ppm), utilizando como fonte de matéria orgânica o fertilizante MogiVita (250 g), com 33% de carbono orgânico total (COT). Além disso, foi preparada uma solução de oxitetraclina na concentração de 20 mg/L, utilizando como fonte do antibiótico o produto comercial Avitrin, destinado à aplicação em aves.

Os biocarvões obtidos por meio do processo de pirólise foram utilizados como catalisadores no tratamento de efluentes aquícolas simulados, empregando a técnica de ozonização catalítica. A configuração do sistema experimental está apresentada na Figura 2, sendo o biocarvão indicado pelo numeral 5. Nesse sistema, o biocarvão foi utilizado em conjunto com anéis de Raschig, com o objetivo de aumentar o contato entre o gás ozônio e as soluções avaliadas. Estes foram empregados como material de preenchimento da coluna, representados pelos itens 4 e 6 da Figura 2, sendo avaliados anéis de vidro e alumina quanto à eficiência para aplicação na técnica. A coluna de cromatografia (2), utilizada no sistema de ozonização em leito fixo, apresenta 22,5 cm de altura, 1,8 cm de diâmetro interno, área

total de 2,54 cm² e volume interno de 48 mL. O ozônio foi produzido por um gerador de ozônio AZ-1000MG-G (1) e conduzido até a coluna por meio de dois tubos (7), com vazão de 0,5 L/min, determinada utilizando um medidor de fluxo de ar (3). Para evitar a sobrecarga do ozonizador, o equipamento foi interrompido por 5 minutos a cada coleta de alíquota realizada na saída da coluna.

A princípio, foram realizados ensaios utilizando 35 mL da solução de substâncias húmicas em contato com biocarvão no sistema de leito fixo. Foram utilizados 1,43g de biocarvão de juta em fio, com volume do leito de carvão de aproximadamente 24,13 cm³.

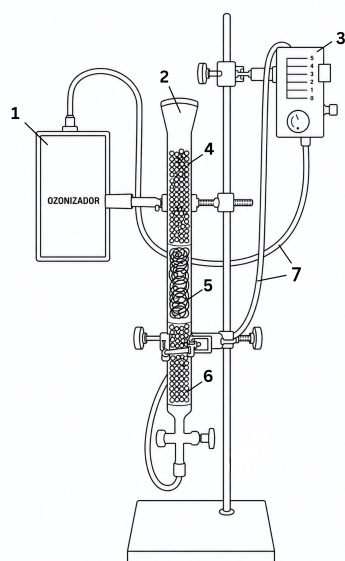


Figura 2. Ilustração do aparato experimental

Durante o tratamento, foram coletadas alíquotas de 100 µL em intervalos de 15 minutos, totalizando quatro amostras correspondentes aos tempos de reação de 15, 30, 45 e 60 minutos, como também, antes do tratamento para fins de comparação. Para interromper a ação residual do ozônio e garantir maior precisão nas análises posteriores, foi utilizado solução de tiossulfato de sódio pentahidratado (Na₂S₂O₃·5H₂O) e concentração 10 mM (0,010 g/L) na amostra. O tiossulfato atua como agente sequestrador de hidroxilas, evitando a continuidade das reações de oxidação após a coleta. Para cada amostra, foram adicionados 20 µL da solução. Em seguida, foi analisada a porcentagem de degradação da matéria orgânica sob ação do ozônio pela espectrofotometria por UV-VIS. Também foi avaliada a influência da etapa de filtração. O mesmo procedimento foi aplicado para a solução de oxitetraciclina, porém utilizando o equipamento HPLC, para verificar o percentual de degradação.

Assim como, foi investigada a eficiência do tratamento utilizando simultaneamente substâncias húmicas e a oxitetraciclina na coluna, simulando a presença conjunta de matéria orgânica e compostos farmacêuticos em efluentes aquícolas. Para o estudo da efetividade da técnica, foi empregado o uso da espectrofotometria UV-VIS, como também, a HPLC. Os resultados foram comparados considerando a porcentagem de remoção dos compostos em função do tempo de tratamento e do biocarvão utilizado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção do biocarvão

Como resultado da etapa de pirólise (carbonização em mufla) das biomassas utilizadas, obteve-se a síntese dos biocarvões que apresentaram diferentes rendimentos conforme representado pela Tabela 1. O cálculo se deu pela razão da massa do carvão em gramas pela massa do material antes do tratamento térmico (gramas), sendo convertidos posteriormente em porcentagem (%).

Observou-se que o biocarvão obtido a partir da juta moída apresentou o maior rendimento (26,23%). Esse resultado pode estar relacionado ao aquecimento homogêneo da biomassa durante o processo de pirólise, devido à redução do tamanho das partículas, favorecendo uma transferência de calor mais uniforme e uma degradação térmica mais controlada. Além disso, a temperatura utilizada no tratamento térmico pode ter contribuído para a maior retenção da parte sólida, uma vez que temperaturas superiores podem intensificar a decomposição dos principais componentes lignocelulósicos (hemicelulose, celulose e lignina), como também favorecer o craqueamento térmico do material, interferindo negativamente no rendimento, como foi descrito por Tripathi et al. (2022).

Comparado ao carvão de juta moída, o biocarvão de algodão apresentou menor rendimento (23,38%), evidenciando uma maior perda de material durante o tratamento térmico (22,57 g). Essa perda foi superior à observada para a juta moída (19,46 g). Esse comportamento pode ser explicado pela composição do algodão, constituído predominantemente por celulose (cerca de 90%), a qual apresenta elevada degradação térmica durante a pirólise, principalmente na faixa de 315–400 °C. Nessa etapa, ocorre a formação e liberação de compostos voláteis, como CO, e compostos orgânicos oxigenados, como carbonila, resultando em maior perda de massa e menor fração sólida residual. Em contrapartida, a juta apresenta maior quantidade de lignina em sua composição, um componente estrutural mais resistente à degradação térmica devido à presença de estruturas aromáticas complexas. Dessa forma, a lignina favorece maior retenção de carbono residual,

e consequentemente, maior rendimento (YANG et al., 2006).

Assim sendo, maiores rendimentos de biocarvão

contribuem para uma melhor utilização da biomassa inicial, reduzindo perdas durante o processo e aumentando a eficiência da produção.

Tabela 1. Tabela de rendimento dos biocarvões

Amostra	Massa inicial da biomassa (g)	Massa final da biomassa (g)	Rendimento (%)
Algodão	29,46 g	6,89 g	23,38%
Juta em fio	45,89 g	10,9 g	23,75%
Juta moída	26,42 g	6,93 g	26,23%

Desempenho com efluente simulado

A eficiência do sistema de ozonização foi avaliada a partir da capacidade da coluna em promover a remoção de contaminantes presentes no efluente simulado, por meio da comparação dos parâmetros de qualidade antes e após o tratamento.

Os resultados obtidos para a utilização dos anéis de Raschig na solução contendo matriz orgânica indicam que a alumina apresenta potencial de

adsorção devido à presença de poros em sua superfície, visto que apresentou uma taxa de remoção de aproximadamente 20% apenas com a aplicação de ar comprimido, conforme apresentado nos gráficos da Figura 3. Além disso, quando associada ao ozônio, a alumina contribuiu para o aumento da remoção em comparação ao tratamento apenas com ar, atingindo uma remoção de aproximadamente 75%, indicando uma possível contribuição do material como suporte catalítico na reação de oxidação.

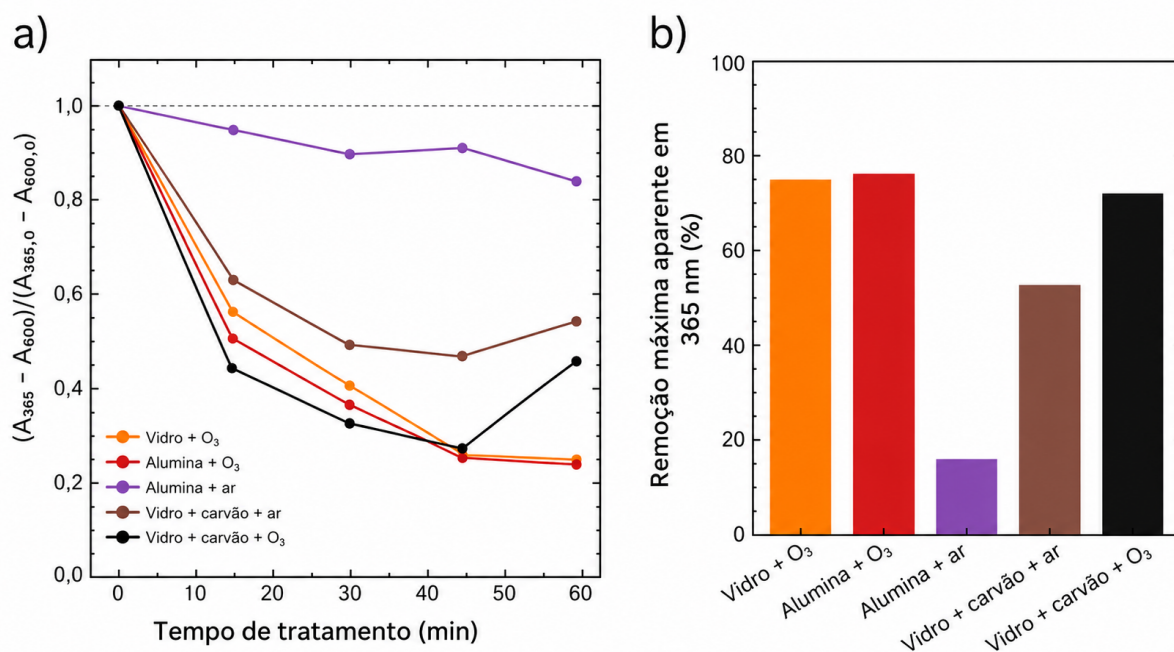


Figura 3. Análise da eficiência dos diferentes sistemas de tratamento por espectrofotometria UV-VIS. **(a)** Variação da absorbância em função do tempo de tratamento; **(b)** Percentual máximo de remoção de contaminantes do efluente simulado.

Entretanto, embora a utilização da alumina tenha promovido uma remoção mais rápida nos primeiros 30 min em comparação com os anéis de vidro, ambos os materiais apresentaram comportamento semelhante, atingindo aproximadamente 75% de remoção após 45 minutos de reação. Esse resultado sugere que, nas condições avaliadas, a oxidação promovida pelo ozônio foi o principal mecanismo responsável pela remoção dos compostos presentes na solução, enquanto os anéis de Raschig apresentaram contribuição de suporte no contato entre solução e ozônio no processo.

Além disso, foi observado que os biocarvões utilizados apresentam capacidade de adsorção. Os resultados demonstraram que, apenas com a utilização do material carbonáceo, houve remoção de aproximadamente 55% da matéria orgânica presente na solução.

Quando associado ao processo de ozonização, o biocarvão também apresentou potencial como suporte catalítico, promovendo uma remoção de aproximadamente 75%. Entretanto, após 45 minutos de reação, observou-se uma redução na taxa de remoção. Esse comportamento pode estar relacionado à ocupação progressiva dos sítios ativos presentes na superfície do carvão, limitando a adsorção de novos compostos. Além disso, a ocupação dos poros pode favorecer a dessorção de moléculas previamente adsorvidas, resultando na liberação parcial dos compostos retidos e, conseqüentemente, na redução da eficiência do processo ao longo do tempo.

Ademais, quanto aos testes feitos na coluna com o antibiótico e a matriz orgânica, os dados do gráfico gerado pelo equipamento de HPLC demonstram que o ozônio consegue degradar o fármaco, porém os ácidos húmicos presentes no efluente simulado dificultam essa remoção. Essa limitação pode estar relacionada pelo fato que o ácido húmico possui estruturas complexas e diversos grupos funcionais capazes de reagir com o ozônio. Dessa forma, ocorre uma competição entre as moléculas do antibiótico e os compostos orgânicos presentes na matriz, reduzindo a disponibilidade do ozônio para atuar diretamente sobre o contaminante de interesse.

Além do mais, quanto ao teste de filtração das alíquotas, observou-se que a coloração das amostras não filtradas foram removidas mais rápido do que as que passaram por filtração, como também, o ozônio conseguiu destruir todo o material em suspensão da solução.

CONCLUSÃO

Os biocarvões foram obtidos com rendimentos entre 23,38 e 26,23%, sendo a juta moída a biomassa de maior rendimento. Nos ensaios em coluna, os anéis de vidro e de alumina associados ao ozônio apresentaram desempenho final semelhante, com remoção próxima de 75%, enquanto a alumina submetida apenas ao ar apresentou remoção de aproximadamente 20%. Esse contraste indica que o ozônio foi o principal responsável pela alteração da matéria orgânica nas condições estudadas. O biocarvão de juta também promoveu remoção por adsorção, mas a redução observada após 45 min no sistema combinado recomenda cautela ao atribuir o resultado exclusivamente à catálise, pois saturação e dessorção podem ter contribuído. A presença de ácidos húmicos diminuiu a remoção aparente da oxitetraciclina, evidenciando a competição da matriz orgânica pelo oxidante. Assim, o sistema mostrou potencial para o tratamento de efluente aquícola simulado, embora ensaios adicionais, com réplicas e controles, sejam necessários para distinguir e quantificar as contribuições de adsorção e oxidação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Universitário FEI pelo apoio institucional e ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica Júnior; ao Centro de Laboratórios Químicos da FEI (CLQ/FEI), pela infraestrutura e pelo suporte técnico; à Escola Técnica Estadual “Lauro Gomes”, pelo apoio à iniciação científica da estudante; e ao Brechó do Carbono, pela colaboração e pelo fornecimento dos resíduos têxteis empregados no trabalho.

REFERÊNCIAS

- ASSALIN, M. R.; DURÁN, N. Novas tendências para aplicação de ozônio no tratamento de resíduos: ozonização catalítica. *Revista Analytica*, São Paulo, n. 26, p. 76–86, dez. 2006/jan. 2007.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*: Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?id=450.&option=com_sisconama&task=arquivo.download. Acesso em: 29 jun. 2026.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357/2005. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89, 16 maio 2011. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/index.php?id=1835&option=>

com_sisconama&view=processo. Acesso em: 29 jun. 2026.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue Transformation in action. Rome: FAO, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4060/cd0683en>.

HALUCH, S. M.; HALUCH, F. C. Eficiência do ozônio em tratamentos de efluentes domésticos e industriais segundo a NBR ISO 30.500:2021. Revista FT, v. 27, ed. 126, 27 set. 2023. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8383991>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Valor da produção da pecuária e da aquicultura chega a R\$ 132,8 bilhões em 2024, com recorde nas produções de leite, ovos de galinha e mel. Agência de Notícias IBGE, 18 set. 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/44534-valor-da-producao-da-pecuaria-e-da-aquicultura-chega-a-r-132-8-bilhoes-e-m-2024-com-recorde-nas-producoes-de-leite-ovos-de-galinha-e-mel>. Acesso em: 29 jun. 2026.

LOPES, E. Pirólise para tratamento de resíduos? Santa Cecília Resíduos, 18 ago. 2022. Disponível em: <https://santaceciliaresiduos.com.br/pirolise-para-tratamento-de-residuos/>. Acesso em: 29 jun. 2026.

OLIVEIRA, J. V. R. Análise comparativa de processos oxidativos avançados em tratamento de efluentes e águas residuárias. 2025. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/82590>. Acesso em: 29 jun. 2026.

SEAFOOD BRASIL. FAO/Sofia 2024: pela primeira vez, a aquicultura global supera a pesca. Seafood Brasil, 13 jun. 2024. Disponível em: <https://www.seafoodbrasil.com.br/fao-sofia-2024-pela-primeira-vez-a-aquicultura-global-supera-a-pesca>. Acesso em: 29 jun. 2026.

SILVA, M. S. G. M. e; LOSEKANN, M. E.; HISANO, H. Aquicultura: manejo e aproveitamento de efluentes. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2013. 39 p. (Documentos, 95). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/972692/1/Doc95.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2026.

TRIPATHI, N.; RODRIGUEZ URIBE, A.; WELDEKIDAN, H.; MISRA, M.; MOHANTY, A. K. Upcycling of waste jute biomass to advanced biocarbon materials: the effect of pyrolysis temperature on their physicochemical and electrical properties. Materials Advances, v. 3, p. 9071–9082, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1039/D2MA00678B>.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; ZHENG, C.; LEE, D. H.; LIANG, D. T. In-depth investigation of biomass pyrolysis based on three major components: hemicellulose, cellulose and lignin. Energy & Fuels, v.

20, n. 1, p. 388–393, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1021/ef0580117>.