

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA EVOLUÇÃO DA PESQUISA CIENTÍFICA SOBRE BIOCHAR DO LODO DE ESGOTO: REVISÃO DOS ÚLTIMOS 10 ANOS (2012-2022)

ANTONIO KARLOS ARAÚJO VALENÇA

JOELDA DANTAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

KELLY CRISTIANE GOMES

THAÍS DE OLIVEIRA ALMEIDA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA UFPB

Introdução

O mundo inteiro enfrenta a problemática em torno das alterações climáticas, e isto se deve a fatores como a rápida industrialização, que por sua vez, gera a enorme quantidade de resíduos durante a produção de bens e serviços, agravando a situação. No contexto do desenvolvimento sustentável, a sociedade e os governos têm importantes desafios a serem enfrentados. Quanto à questão ambiental existe a necessidade urgente de melhorar a gestão de resíduos, reduzir a emissão de gases do efeito estufa, e utilizar com cautela os recursos hídricos, bem como promover a sua preservação.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Com o intuito de oferecer dados sobre o progresso do aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos por meio do processo de pirólise nos últimos 10 anos, nesta pesquisa foi realizada uma revisão bibliométrica da literatura que trata da utilização do biochar oriundo do lodo de esgoto, bem como ainda buscou-se apresentar e quantificar dados em torno do tema com o auxílio do VOSviewer, além de explicar as possíveis aplicações em função de suas características adequadas.

Fundamentação Teórica

Estudos reportam que o biocarvão à base de carbono derivado de biorresíduos ou materiais industriais, está atraindo cada vez mais atenção devido às matérias-primas amplamente disponíveis e ao excelente desempenho, bem como à redução e reciclagem eficientes de biorresíduos (Wang, et al., 2023). O lodo de esgoto, tido como um subproduto proveniente das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), é um resíduo de composição variável, rico em matéria orgânica e nutriente, torna-se um produto com características desejáveis para o setor agrícola e florestal (Krebs, 2014; Gomes et al., 2013).

Metodologia

A pesquisa, quanto à sua natureza, é classificada como quantitativa, tendo por objetivo mensurar ou quantificar um determinado fenômeno, neste caso, realizar a análise da produção científica que trata do biocarvão (biochar) oriundo do lodo de esgoto. Quanto aos meios, foi realizada pesquisa documental dos periódicos publicados nos últimos 10 anos (2012-2022). Os registros utilizados são de base secundária e foram obtidos mediante consulta à base de dados Scopus. Esta base foi escolhida devido a sua relevância e difusão dentro da comunidade acadêmica (Caviggioli; Ughetto, 2019).

Análise dos Resultados

Por meio da análise bibliométrica foi possível identificar que, ao longo dos anos, houve um crescimento significativo e gradativo das publicações sobre o biochar oriundo do lodo de esgoto, com um quantitativo de 977 trabalhos publicados nos últimos 10 anos e um pico de publicações no ano de 2022 com 197 trabalhos. A área temática que mais houve publicação envolveu as Ciências Ambientais com 40% do total das publicações. A China foi o país que mais intensificou os estudos sobre o biochar do lodo de esgoto, sendo também, o país que mais produziu lodo de esgoto nos últimos anos.

Conclusão

A presente pesquisa apresenta como contribuição uma análise das publicações destacando os eixos temáticos associados, bem como os impactos e desafios enfrentados. Cabe destacar a relevância e a atualidade do tema aqui abordado. Adotar as práticas sustentáveis vai ao encontro da necessidade vital de preservação do meio ambiente e dos recursos naturais. Nesse contexto o biocarvão surge como uma forte aliada para viabilizar essa transformação, trazendo novas técnicas capazes de transformar o processo produtivo.

Referências Bibliográficas

GOMES, D. R.; CALDEIRA, M. V. W.; DELARMELINA, W. M.; ONÇALVES, E. O.; RAZZI, P. A. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona randis* L. Cerne, Lavras, v. 19, n. 1, p. 123-131, 2013. KREBS, R. B. Caracterização do biochar por Pirólise Rápida. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. WANG, Jianlong; WANG, Shizong. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 227, p. 1002-1022, 2019.

Palavras Chave

Biochar, Lodo de Esgoto, Bibliometria

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo suporte financeiro.

ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA DA EVOLUÇÃO DA PESQUISA CIENTÍFICA SOBRE BIOCHAR DO LODO DE ESGOTO: REVISÃO DOS ÚLTIMOS 10 ANOS (2012-2022)

1. INTRODUÇÃO

O mundo inteiro enfrenta a problemática em torno das alterações climáticas, e isto se deve a fatores como a rápida industrialização, que por sua vez, gera a enorme quantidade de resíduos durante a produção de bens e serviços, agravando a situação (Saeed *et al.*, 2024). Tanto é assim que, nos últimos anos a economia circular tem ganhado atenção como estratégia para alcançar o desenvolvimento sustentável através de uma produção mais limpa e da redução de resíduos e poluição (Mondal; Singh; Gupta, 2023).

No contexto do desenvolvimento sustentável, a sociedade e os governos têm importantes desafios a serem enfrentados. Quanto à questão ambiental existe a necessidade urgente de melhorar a gestão de resíduos, reduzir a emissão de gases do efeito estufa, e utilizar com cautela os recursos hídricos, bem como promover a sua preservação (Marcelino; Loss; Andrade, 2020). Em paralelo, é preciso pensar em maneiras de suprir a demanda energética por fontes não-renováveis, sendo a gestão de resíduos, a reciclagem, a reutilização, práticas sustentáveis que reduzem o desperdício produzido pelas empresas.

Dentre os modelos em ascensão de energias renováveis, como solar, eólica e biomassa, esta última tem sido destaque em pesquisas cujo foco está na busca pela conservação da água, fertilização do solo visando suprir as necessidades energéticas, segurança familiar e sanitária. Uma das matérias-primas orgânicas que vem se destacando e com potencial de utilização é o lodo do tratamento de esgoto (LE), uma vez que a geração diária de grandes volumes deste passivo ambiental representa um grave problema, sendo, talvez, um dos mais complexos enfrentados pela Engenharia Sanitária (Andreoli *et al.*, 2006; Caldeira *et al.*, 2014; Marcelino; Loss; Andrade, 2020), e isto se deve a presença recalcitrante de poluentes nocivos como microrganismos, patógenos e metais pesados.

O lodo é um resíduo sólido, semissólido ou líquido gerado durante o processamento nas Estações de Tratamentos de Esgotos (ETEs) (Arvind, 2004), sendo que o rápido crescimento das populações urbanas exige o desenvolvimento de métodos mais eficientes e ambientalmente sustentáveis para o tratamento de resíduos e recuperação de recursos (Thomsen; Anastasakis; Biller, 2024).

Como a produção do lodo de esgoto municipal tem aumentado anualmente, isto impõe um enorme fardo econômico e ambiental à sociedade. O custo do tratamento do lodo de esgoto depende diretamente do volume a ser tratado e do teor de umidade. Grandes quantidades de lamas são o produto de várias fases do seu tratamento e normalmente contêm mais de 90% de água e sérios contaminantes (Zhang *et al.*, 2023). Vários métodos são utilizados visando a sanitização do lodo de esgoto, tanto para permissão da destinação em aterros, quanto para aplicação por exemplo na agricultura, sendo que estes métodos envolvem muitas etapas por logo tempo, e ainda se mostram ineficientes para um resultado completo de sanitização, o que limita os usos desse tipo de resíduo sólido.

No entanto, em se tratando do aproveitamento do potencial energético do lodo, o processo de pirólise se destaca, pois, além de propiciar uma completa sanitização de agentes patogênicos, de componentes orgânicos e de metais pesados, e ainda envolve a geração de bioprodutos como biochar, biogás e bio-óleo (Silva *et al.*, 2020). Também conhecido como biocarvão (*biocharcoal* ou biochar) vem sendo sugerido como um material e ferramenta para se ter ganhos agrônômicos, ao aprimorar os atributos edáficos, melhorando a saúde e qualidade do solo, como também a retenção de nutrientes, aumentando a produtividade das culturas, sendo então uma técnica de manejo agrícola e de solos com vários benefícios ao meio ambiente e à

agricultura. Há também ganhos ambientais e sanitários, os quais são reflexos da transformação de resíduos em potenciais produtos de valor agregado com segurança sanitária, ao diminuir ou eliminar potenciais riscos como os agentes patogênicos, genes resistentes à antibióticos, contaminantes farmacêuticos, pesticidas e metais pesados (Marcelino; Loss; Andrade, 2020).

Ademais, o biochar se apresenta como uma alternativa sustentável para se combater as mudanças climáticas, uma vez que é rico em carbono recalcitrante, e quando adicionado ao solo atua como um agente de sequestro de carbono, contribuindo na captura e armazenamento de carbono orgânico no solo por período mais longo, o que pode ajudar na mitigação da emissão de potenciais gases de efeito estufa (GEE) como dióxido de carbono (CO₂) e óxido nitroso (N₂O) para a atmosfera (Coelho et al., 2023).

Possui uma multifuncionalidade, podendo ser usado também como filtro de água e gases, em substituição ao carvão ativado (Marcelino; Loss; Andrade, 2020). No entanto, algumas questões ainda precisam ser resolvidas, como o custo da implementação da tecnologia nas estações de tratamento, e a otimização dos processos de purificação dos biocombustíveis biogás e bio-óleo gerados.

Com o intuito de oferecer dados sobre o progresso do aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos por meio do processo de pirólise nos últimos 10 anos, nesta pesquisa foi realizada uma revisão bibliométrica da literatura que trata da utilização do biochar oriundo do lodo de esgoto, bem como ainda buscou-se apresentar e quantificar dados em torno do tema com o auxílio do VOSviewer, além de explicar as possíveis aplicações em função de suas características adequadas.

2. BREVE REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BIOCHAR

Estudos reportam que o biocarvão à base de carbono derivado de biorresíduos ou materiais industriais, está atraindo cada vez mais atenção devido às matérias-primas amplamente disponíveis e ao excelente desempenho, bem como à redução e reciclagem eficientes de biorresíduos (Wang, et al., 2023). O biocarvão ou biochar é um material rico em carbono produzido a partir da queima da biomassa em um ambiente parcial ou totalmente isento de oxigênio, sendo o processo mais utilizado é o de pirólise (Marcelino; Loss; Andrade, 2020; Krebs, 2014).

O conceito do biocarvão envolve a ideia de transformar resíduos orgânicos, como restos de culturas, madeira ou cascas de coco, em um material estável e rico em carbono que pode ser usado para diversas aplicações, entre elas a melhoria da saúde do solo, retenção de água e nutrientes, e contribuição para a mitigação das mudanças climáticas. É uma prática sustentável que combina agricultura, gestão de resíduos e conservação ambiental para promover a eficiência agrícola e a redução das emissões de GEE.

2.2 BIOCHAR DO LODO DE ESGOTO

O lodo de esgoto, tido como um subproduto proveniente das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), é um resíduo de composição variável, rico em matéria orgânica e nutriente, torna-se um produto com características desejáveis para o setor agrícola e florestal (Krebs, 2014; Gomes *et al.*, 2013). Durante o processo de tratamento do esgoto, microrganismos como as bactérias e os fungos quebram as moléculas orgânicas que servem como fonte de alimento para seu desenvolvimento, utilizando os nutrientes para crescerem e se reproduzirem (Krebs, 2014). Quando esses microrganismos morrem, constituem a massa orgânica do lodo de esgoto,

que, após passar pelo processo de estabilização passa a ser denominado biossólido (Pequeno *et al.*, 2008; Gomes *et al.*, 2013).

Existe, atualmente, uma grande preocupação ambiental com estes resíduos. Os grandes centros urbanos a produção de lodo de esgoto alcança toneladas e toneladas de material, tendo uma relação direta com o aumento populacional e volume de esgoto produzido (Nuvolari, 2013). Para se ter uma ideia, a Europa produz cerca de 17 milhões de toneladas de lodo seco por ano (Biachini *et al.*, 2016). Na china, por exemplo, a desidratação mecânica é o método mais amplamente utilizado de desidratação de lodo, mas só pode reduzir o teor de umidade que é de 90% para cerca de 80% devido à presença de componentes orgânicos, como bactérias e substância polimérica extracelular, e a água removida inclui um pouco de água livre e uma pequena quantidade de água intersticial, mas é difícil remover a água adsorvida e a água combinada (Zhang *et al.*, 2024).

No Brasil, foi estimado, em 2019, um total anual de 5,8 bilhões de m³ de esgoto coletado e 4,5 bilhões de m³ ao ano de esgoto tratado (BRASIL, 2019). De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), atualmente apenas 51,20% de todo o esgoto gerado é devidamente tratado, isso significa o lançamento diário de cerca de 5.500 piscinas olímpicas de esgoto sem tratamento na natureza, poluindo rios, lagos e outros mananciais.

Por ser rico em matéria orgânica, o lodo de esgoto é capaz de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do substrato ou do meio no qual está sendo utilizado (Melo *et al.*, 1994). Diversos autores têm estudado a aplicabilidade do lodo de esgoto como fertilizantes para diversas culturas, como trigo e soja (Brown; Angle; Chaney, 1997), milho (Silva *et al.*, 1997), girassol e feijão (Deschamps; Favaretto, 1997), milho e feijão (Nascimento *et al.*, 2004; Quitana; Carmo; Melo, 2011).

No entanto, Lopes *et al.* (2005) afirma que o emprego do lodo de esgoto traz consigo a disponibilidade e o risco de contaminação do solo com metais pesados. Conforme Abreu *et al.* (1995) e Collier *et al.* (2004), existe a preocupação ambiental em relação às áreas nas quais os metais pesados se acumulam, o que pode agravar o problema quando eles entram na cadeia alimentar. Ressalta-se que o conhecimento das formas químicas dos metais do solo permite uma melhor avaliação sobre a biodisponibilidade e mobilidade desses metais e seus riscos ao meio ambiente (Nogueira *et al.*, 2007).

3. METODOLOGIA

A pesquisa, quanto à sua natureza, é classificada como quantitativa, tendo por objetivo mensurar ou quantificar um determinado fenômeno, neste caso, realizar a análise da produção científica que trata do biocarvão (biochar) oriundo do lodo de esgoto. Quanto aos meios, foi realizada pesquisa documental dos periódicos publicados nos últimos 10 anos (2012-2022). Os registros utilizados são de base secundária e foram obtidos mediante consulta à base de dados Scopus. Esta base foi escolhida devido a sua relevância e difusão dentro da comunidade acadêmica (Caviggioli; Ughetto, 2019). Em relação aos fins, trata-se de uma pesquisa exploratória, pois possibilita um melhor entendimento sobre um fenômeno e descritiva, buscando descrever as características de um determinado objeto de estudo (Gil, 2008).

Como método de análise dos registros, utilizou-se o método da análise bibliométrica, que consiste é um método muito utilizado quando se necessita mensurar ou quantificar a produção de documentos. Esta abordagem permite identificar tendência de publicações em determinados temas, lacunas de pesquisa, autores relevantes, área de estudo e contribuições científicas da área ou temática. A busca foi realizada utilizando a *query string* (*TITLE-ABS-KEY ("biochar") OR TITLE-ABS-KEY ("biocharcoal") AND TITLE-ABS-KEY ("sewage*

sludge)), totalizando 1.159 documentos que tratam do assunto. Foram identificados 10 tipos de documentos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de documentos encontrados na busca

| Tipo de documento | Nº de documentos |
|--------------------------|-------------------------|
| Article | 1004 |
| Review | 66 |
| Conference Paper | 46 |
| Book Chapter | 29 |
| Conference Review | 6 |
| Note | 3 |
| Data Paper | 2 |
| Erratum | 1 |
| Editorial | 1 |
| Book | 1 |
| Total | 1.159 |

Fonte: Autores (2023)

O primeiro filtro realizado para este estudo reuniu somente artigos dos últimos 10 anos (2012-2022), resultando em 977 documentos. O segundo filtro reuniu trabalhos publicados somente em periódicos (856) e artigos de revisão (45), chegando ao quantitativo de 901 trabalhos. Após a realização dos filtros para o refinamento dos registros, as informações foram exportadas em formato Comma-Separated Values (Valores Separados por Vírgula, ou, .csv), formato necessário para o tratamento das informações no MS Excel e VOSViewer. No Excel, as informações foram organizadas manualmente para a obtenção dos dados de publicações por ano e quantidade de autores por artigo. O VOSViewer (Van Eck; Waltman, 2010) foi necessário para complementar as análises, tendo como foco a elaboração de mapas de rede de autores e coautores, ocorrência de palavras-chave, localização geográfica dos países com o maior quantitativo de publicações, periódicos mais relevantes e, mapa de citações e cocitações. Os resultados consolidados serão apresentados a seguir.

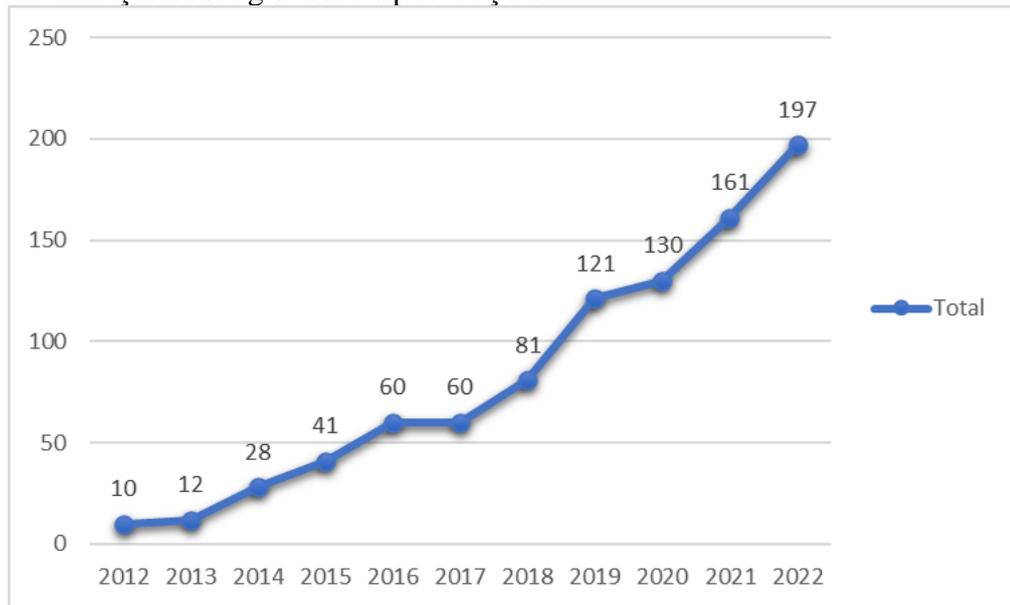
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE DAS PUBLICAÇÕES

A Figura 1 apresenta o gráfico com a evolução dos registros de publicações no período de 2012 a 2022. É possível perceber uma evolução positiva e gradativa ao longo dos anos. Esta informação leva a um entendimento de que existe um interesse da comunidade acadêmica em aprofundar os estudos sobre o biochar a partir do lodo de esgoto, achar soluções viáveis e aplicações para este material. Sem contar que, os resíduos provenientes do lodo de esgoto têm um custo muito alto e os processos para seu descarte são complexos, sendo assim a necessidade de buscar soluções para o seu manuseio.

O ano com o maior número de publicações foi em 2022, com 197 trabalhos. Neste ano pode-se destacar o estudo de Ji et al (2022) com 73 citações. Este estudo trata de uma revisão sistêmica da literatura sobre o desenvolvimento do biocarvão à base de diferentes matérias-primas e os seus efeitos na remediação do solo, incluindo o lodo de esgoto como umas das fontes para essa finalidade.

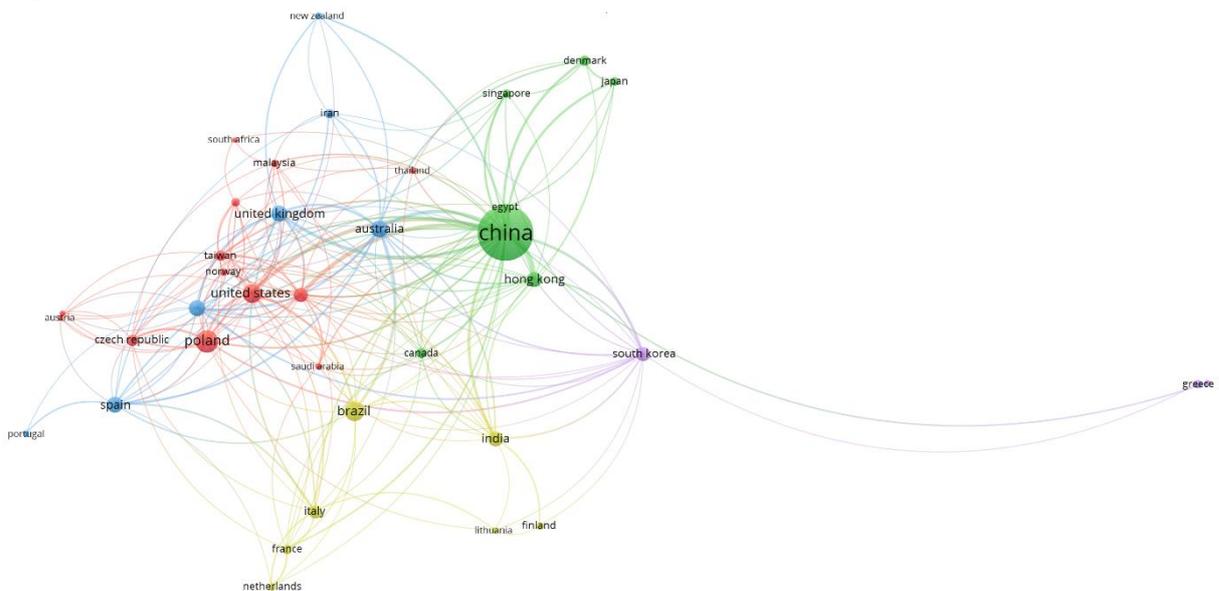
Figura 1 - Evolução dos registros das publicações



Fonte: Autores (2023)

A Figura 2, gerada pelo VOSViewer, apresenta a distribuição dos países que produziram trabalhos sobre o assunto. Vale destacar a China com 480 produções, seguida da Polônia com 80 publicações, Brasil com 62, Estados Unidos com 57 e Austrália com 47 trabalhos. A China possui uma geração de, aproximadamente, 3,71 milhões de toneladas de lodo todos os anos (Gao et al., 2014), fato este que pode ter motivado os estudos por busca de soluções viáveis para descarte do lodo, bem como o interesse de pesquisadores em estudar esse material. No Brasil, estima-se que a produção anual de lodo varia entre 150 e 220 mil toneladas de massa seca (Pedroza et al., 2010), ao menos 50% do lodo gerado no país é disposto em aterro sanitário, 15% é utilizado na agricultura e 35% não se sabe a correta disposição dada ao resíduo (Machado, 2001).

Figura 2 - Mapa de rede da distribuição dos países que publicaram trabalhos.



Fonte: Autores (2023)

A Tabela 2 apresenta os trabalhos destaques de cada país com base no quantitativo de citações. A contagem do número de citações demonstra o quão é relevante aquele trabalho para os estudos que abordam biochar.

Tabela 2 - Publicações dos países que mais publicaram trabalhos sobre a temática.

| Título | Autores | Periódico | Citações | País |
|--|--------------------------|--|-----------------|-------------|
| Preparation, modification and environmental application of biochar: A review | Wang e Wang (2019) | Journal of Cleaner Production | 1043 | China |
| Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment | Cao e Pawłowski (2012) | Renewable and Sustainable Energy Reviews | 348 | Polônia |
| Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils | Penido et al. (2019) | Ecotoxicology and Environmental Safety | 131 | Brasil |
| Producing pipeline-quality biomethane via anaerobic digestion of sludge amended with corn stover biochar with in-situ CO ₂ removal | Shen et al. (2015) | Applied Energy | 227 | EUA |
| A feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: Production, characterization and potential applications | Srinivasan et al. (2015) | Science of the Total Environment, 512-513, pp. 495–505 | 158 | Austrália |

Fonte: Autores (2023)

Wang e Wang (2019) publicaram o artigo mais citado acerca da temática estudada, tendo como foco uma revisão sistêmica que analisou e resumiu a preparação, caracterização, modificação e especialmente a aplicação ambiental do biochar, com base em mais de 200 artigos publicados nos últimos 10 anos, fornecendo uma visão geral do biochar com detalhes sobre sua aplicação e perspectivas na remediação ambiental.

Cao e Pawłowski (2012) apresentaram uma breve visão geral da digestão anaeróbica e da pirólise na aplicação à produção de bioenergia a partir de lodo de esgoto. Os autores também apresentaram uma avaliação da eficiência de conversão de energia de dois caminhos paralelos de lodo em energia. O primeiro caminho depende de um processo exclusivo de pirólise, sendo alimentado com lodo bruto, enquanto o segundo caminho é baseado na digestão anaeróbica seguida de pirólise, alimentada com lodo digerido. Concluiu-se que o caminho combinado de digestão anaeróbica e pirólise poderia alcançar maior eficiência energética em comparação com a via que emprega apenas a pirólise.

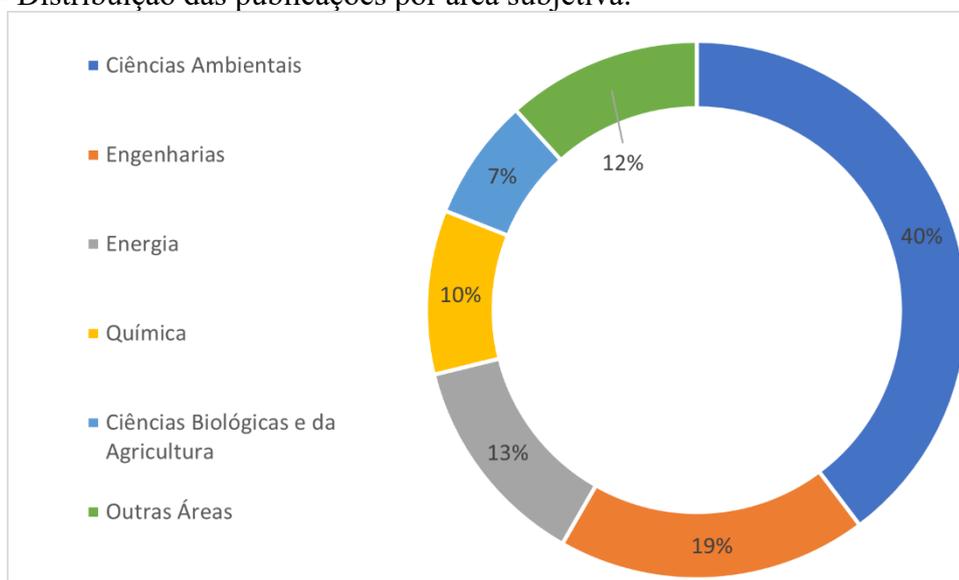
Penido et al. (2019) estudaram a capacidade do biocarvão derivado de lodo de esgoto (SSB), pó de carvão de madeira (doravante denominado biocarvão de madeira – WB), lodo de esgoto bruto (SS) e sua mistura (WB/SS) para melhorar as propriedades do solo e imobilizar Cd, Pb e Zn após sua adição a solos contaminados com metais pesados de uma área de mineração de Zn. Pode-se concluir que o uso de biocarvão derivado de lodo de esgoto ou a combinação de lodo de esgoto com biocarvão de madeira em áreas de mineração são alternativas potenciais para reutilizar e agregar valor a esses resíduos disponíveis localmente, oferecendo uma oportunidade para resolver problemas de remediação de solo e disposição de resíduos de uma só vez.

O estudo de Shen et al. (2015) apresentou um novo processo para a produção de biometano de qualidade de gasoduto por digestão anaeróbica (AD) de lodo com limpeza e atualização de biogás in-situ usando biochar de palha de milho.

Srinivasan et al. (2015) realizaram um estudo de viabilidade de biomassa agrícola e de esgoto como matéria-prima de biocarvão, bioenergia e biocompósitos. Foram pirolisadas seis biomassas derivadas de resíduos: serragem de pinheiro (PSD), capim pança (PG), cama de frango (BL), lodo de esgoto (SS), lodo de lagoa desidratado (DWP) e lodo de flutuação de ar dissolvido (DAF). Os resultados mostram que o biochar PSD tem o maior potencial para sequestro de carbono e remediação de contaminantes devido à sua alta área superficial, aromatização e teor de carbono.

Por fim, a Figura 3 traz a distribuição dos trabalhos por área. Destaca-se a área das Ciências Ambientais com 40% das publicações, seguido da Engenharias com 19%, Energia com 13%, Química com 10%, Ciências Biológicas e da Agricultura com 7% e Outras Áreas com 12%. As outras áreas incluem Ciências dos Materiais, Bioquímica, Farmacologia, Toxicologia, Ciências Sociais, Ciências da Terra e Microbiologia.

Figura 3 - Distribuição das publicações por área subjetiva.



Fonte: Autores (2023)

4.4 ANÁLISE DE AUTORIA

Conforme pode ser visualizado na Tabela 3, os autores com maior produtividade na área de interesse deste estudo possuem entre 19 e 33 artigos publicados, sendo totalizado 4085 citações nos últimos 10 anos.

Tabela 3 - Autores com o maior número de publicações.

| Autores | Artigos | N° Citações | Afiliação | País |
|------------------|----------------|--------------------|--|-------------|
| Oleszczuk, P. | 33 | 1.637 | Department of Environmental Chemistry | Polônia |
| Paz-Ferreiro, J. | 20 | 1.613 | Departamento de Edafología | Espanha |
| Wang, Y. | 19 | 835 | CAS Key Laboratory of Urban Pollutant Conversion | China |

Fonte: Autores (2023)

Oleszczuk tem realizado contribuições em pesquisas sobre o lodo de esgoto, fertilização de solos e biocarbono. Os principais direcionamentos de suas pesquisas envolvem os efeitos do lodo de esgoto como biochar, suas características e processos de pirólise em diferentes temperaturas aplicados ao lodo e aprimoramento de solo para cultivo. Paz-Ferreiro tem estudado diversas culturas para formação do biochar, incluindo o lodo de esgoto e suas características. Wang, por sua vez, tem estudado formas para estabilizar os metais pesados provenientes dos biochar após a pirólise.

A Tabela 4 apresenta o Top 5 com os trabalhos mais citados sobre as pesquisas que estudaram o biochar de maneira geral, assim como o biochar oriundo de lodo de esgoto e suas aplicações.

Tabela 4 - Artigos mais citados.

| Título | Autores | Periódico | Citações |
|--|-------------------------|---|-----------------|
| Preparation, modification and environmental application of biochar: A review | Wang e Wang (2019) | Journal of Cleaner Production | 1043 |
| Relative distribution of Pb ²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar | Lu et al. (2012) | Water Research | 860 |
| Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge | Chen et al. (2014) | Bioresource Technology | 556 |
| Biochar production by sewage sludge pyrolysis | Agrafioti et al. (2013) | Journal of Analytical and Applied Pyrolysis | 453 |
| Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge | Jin et al. (2016) | Journal of Hazardous Materials | 433 |

Fonte: Autores (2023)

Lu et al. (2012) analisaram a distribuição relativa dos mecanismos de sorção de Pb²⁺ por um biocarvão derivado de lodo. Verificou-se que o biocarvão derivado do tratamento de pirólise de lodo de esgoto poderia efetivamente remover Pb²⁺ da solução ácida com capacidades de 16,11, 20,11, 24,80 e 30,88 mgg⁻¹ em pH inicial 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

Chen et al. (2014) estudaram a influência da temperatura de pirólise nas características e desempenho adsorptivo de metais pesados do biocarvão derivado de lodo de esgoto municipal chinês. Nos experimentos em lote de adsorção de cádmio (II), a capacidade de remoção dos

biocarvões melhorou sob temperaturas mais altas, especialmente a 800 °C e 900 °C, mesmo uma ordem de grandeza superior à do carvão ativado comercialmente. Tanto para recuperação de energia quanto para remoção de metais pesados, a temperatura ideal de pirólise é 900 °C.

Agrofoti et al. (2013) avaliaram a produção de biochar de lodo de esgoto através do processo de pirólise. O lodo de esgoto bruto, bem como amostras de biocarvão, foram submetidos a testes de lixiviação para investigar a potencial liberação de metais pesados. Os resultados O Biochar removeu aproximadamente 70% do Cr (III) no tempo de equilíbrio, enquanto apenas 30% do Ácido Ascórbico [As (V)] foi adsorvido na superfície do biochar, implicando que o biochar é mais eficiente na remoção de cátions do que ânions de soluções aquosas.

Jin et al. (2016) estudaram a influência da temperatura de pirólise nas propriedades e na segurança ambiental de metais pesados em biocarvões derivados de lodo de esgoto municipal chinês. Os resultados indicaram que o rendimento do biocarvão do lodo diminuiu significativamente com o aumento da temperatura de pirólise, mas o pH, o teor de cinzas e a área superficial específica aumentaram. Por fim, o presente estudo indica que a pirólise é um método promissor de tratamento de lodo para imobilização de metais pesados em biochar, e destaca o potencial para minimizar os efeitos nocivos do biochar, controlando a temperatura da pirólise.

Em relação ao quantitativo de autores que publicaram artigos, a Tabela 5 apresenta esta análise. Foram identificados no total 5134 autores, tendo maiores destaques para trabalhos que tiveram entre 4 e 6 autores, o que corresponde a 53% do total identificado.

Tabela 5 - Quantitativo de autores identificados na pesquisa.

| Nº Autores | Nº Artigos | Nº Autores | Nº Artigos |
|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 6 | 9 | 46 |
| 2 | 51 | 10 | 24 |
| 3 | 91 | 11 | 16 |
| 4 | 165 | 12 | 16 |
| 5 | 170 | 13 | 5 |
| 6 | 142 | 14 | 3 |
| 7 | 95 | 15 | 3 |
| 8 | 67 | 16 | 1 |

Fonte: Autores (2023)

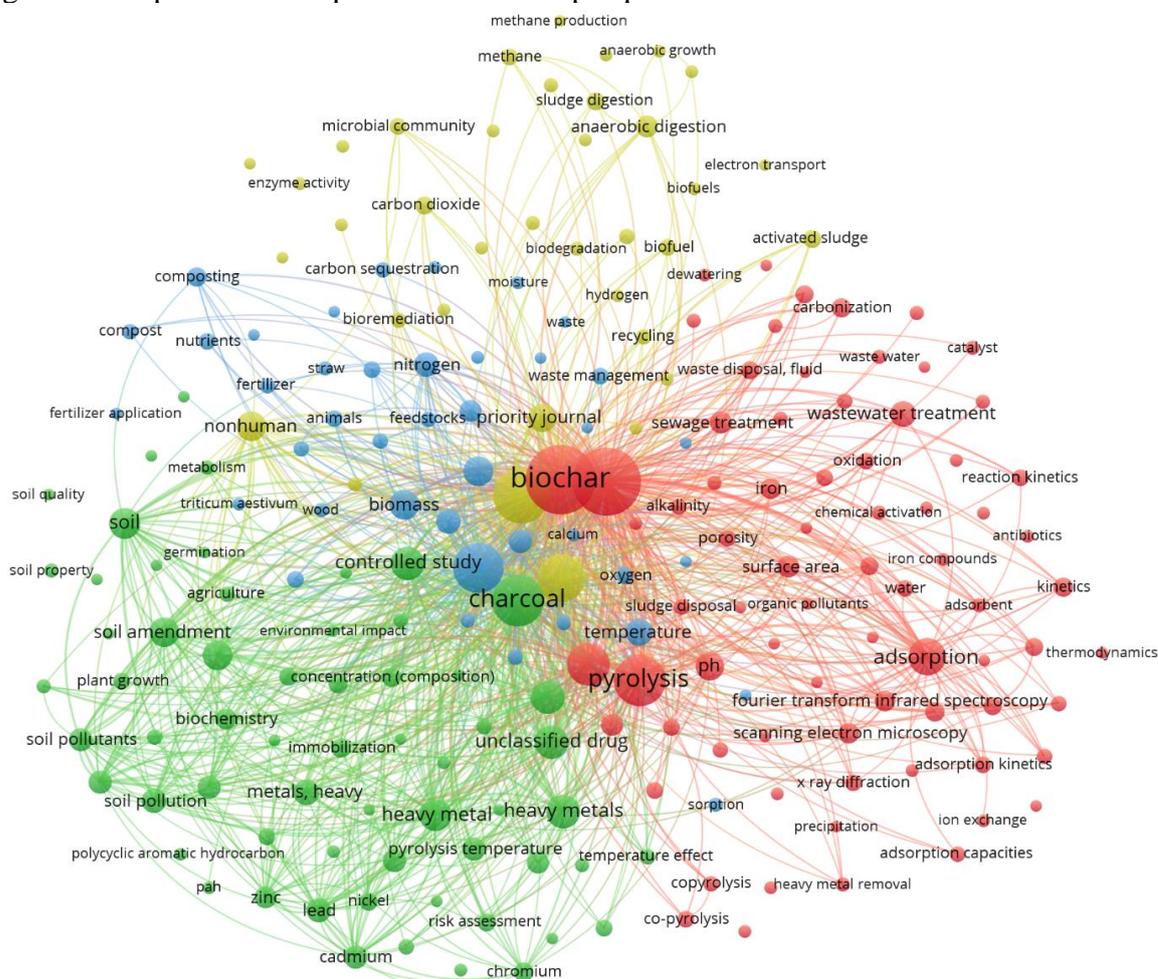
O maior quantitativo de autores identificado foi 16, que elaborou o estudo intitulado “*Modeling water flow and phosphorus sorption in a soil amended with sewage sludge and olive pomace as compost or biochar*” (Filipović, Vilim et al., 2020). Este estudo teve como objetivo investigar os efeitos do biochar e composto produzido a partir de lodo de esgoto e bagaço de azeitona nas propriedades hidráulicas do solo, fluxo de água e transporte de P (isto é, sorção) usando modelagem numérica (HYDRUS-1D) aplicada a dois tipos de solo (Terra Rosa e Rendzina). Os resultados mostraram alta sorção de P em todos os tratamentos (K_d 21,24 a 53,68 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$) e alta confiabilidade do modelo quando utilizado o procedimento de modelagem inversa (R^2 0,93–0,99). No geral, a adição de lodos de esgoto ou bagaço de azeitona como composto ou biochar melhorou a retenção de água de Terra Rosa e Rendzina, não aumentando a mobilidade de P nestes solos, provando ser uma fonte sustentável de carbono e materiais ricos em P.

chave, com um mínimo de 20 ocorrências, apontam a presença de 4 clusters nas cores, Vermelho, Azul Turquesa, Verde e Amarelo, como mostra a Figura 5.

As palavras com maiores ocorrências são biochar (691 ocorrências) e sewage sludge (670 ocorrências) situadas no cluster vermelho. Pode-se dizer que a cor vermelha trata de trabalhos com foco no tratamento do lodo, tratamentos de água e obtenção biochar do lodo de esgoto através da utilização do processo de pirólise. Também foram identificadas técnicas de caracterização de materiais como, Espectroscopia de Infravermelho (FTIR), Difração de Raios-X (DRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

A palavra sewage com 445 ocorrências está situada no cluster amarelo. Este cluster trata de pesquisas que envolvem biocombustíveis, biodegradação, processo de reciclagem e digestão anaeróbica. O cluster verde aborda trabalhos com a temática de tratamento de solos, poluição dos solos, qualidade dos solos, impactos ambientais, tratamento e remoção de metais pesados. No cluster azul, os principais temas tratados são compostagem, nutrientes, biomassa tendo o lodo de esgoto como matéria-prima.

Figura 5 - Mapa de rede de palavras-chave da pesquisa.



Fonte: Autores (2023)

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por meio da análise bibliométrica foi possível identificar que, ao longo dos anos, houve um crescimento significativo e gradativo das publicações sobre o biochar oriundo do lodo de esgoto, com um quantitativo de 977 trabalhos publicados nos últimos 10 anos e um pico de publicações no ano de 2022 com 197 trabalhos. A área temática que mais houve publicação

envolveu as Ciências Ambientais com 40% do total das publicações. A China foi o país que mais intensificou os estudos sobre o biochar do lodo de esgoto, sendo também, o país que mais produziu lodo de esgoto nos últimos anos. O Brasil assumiu a 4ª colocação dentre os países que mais publicaram trabalhos. Isso mostra que o país tem se preocupado com os impactos ambientais causados pelo não tratamento e descarte incorreto deste material. Além disso, tem buscado alternativas para o seu consumo e aproveitamento, como fonte de energia limpa e fertilização dos solos.

A pesquisa também identificou um total de 5134 autores que participaram dos trabalhos, seja como autor ou coautor. As equipes que mais tiveram publicações giram em torno de 4 a 6 autores, o que corresponde a 53% do total. Os autores, Oleszczuk, Paz-Ferreiro e Wang foram identificados como os mais relevantes nas pesquisas sobre biochar do lodo de esgoto com 33, 20 e 19 artigos publicados, respectivamente.

Análise de periódicos apresentou os três com mais publicações, Bioresource Technology (58), Science of The Total Environment (58), Chemosphere (57), todos com Qualis A1 e indexados pela editora Elsevier. A análise de co-ocorrência de palavras, mostrou a formação de quatro clusters, apresentado temas correlatos com foco no tratamento do lodo, tratamento e filtragem de água, reutilização, produção do biochar, incluindo os subprodutos como biogás, bioóleo, biocombustíveis. Os trabalhos que focam no uso como fertilizantes tem visado a utilização de outras culturas.

A presente pesquisa apresenta como contribuição uma análise das publicações destacando os eixos temáticos associados, bem como os impactos e desafios enfrentados. Cabe destacar a relevância e a atualidade do tema aqui abordado. Adotar as práticas sustentáveis vai ao encontro da necessidade vital de preservação do meio ambiente e dos recursos naturais. Nesse contexto o biocarvão surge como uma forte aliada para viabilizar essa transformação, trazendo novas técnicas capazes de transformar o processo produtivo.

Por fim, como limitações do estudo, cabe ressaltar que somente foi utilizada a base de dados da Scopus. Recomenda-se a ampliação para outras bases de dados como Web of Science, Scielo, Medline, entre outras. Estudos futuros seriam interessantes no sentido de buscar apresentar outras aplicações do biochar, quais as culturas que tem sido mais utilizadas para a produção do biochar e qual o panorama atual de medidas efetivas para promover a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ABREU, C. A. et al. Comparação de métodos para avaliar a disponibilidade do manganês em solos. Revista brasileira de ciência do solo, v. 18, n. 1, p. 81-90, 1994.

AGRAFIOTI, E.; BOURAS, G.; KALDERIS, D.; DIAMADOPOULOS, E. Biochar production by sewage sludge pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 101, p.72–78, 2013.

ANDREOLI, C. V.; TAMANINI, C. R.; HOLSBACH, B.; PEGORINI, E. S.; NEVES, P. S. Uso de lodo de esgoto na produção de substrato vegetal. In: ANDREOLI, C.V. (Coord). Alternativas de uso de resíduos do saneamento. Rio de Janeiro: Prosab/ABES, 2006. p. 87-116.

ARVIND, K. Environmental pollution. A text book of environmental science. New Delhi: APH Publishing Corporation, 2004.

BIANCHINI, Augusto et al. Sewage sludge management in Europe: a critical analysis of data quality. *International Journal of Environment and Waste Management*, v. 18, n. 3, p. 226-238, 2016.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Serviço Nacional de Informações de Saneamento. Informações para o planejar o Esgotamento Sanitário. Diagnostico SNIS-AE 2019. Brasília, DF: SNIS, 2019. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/cadernos/2019/DO_SNIS_AO_SINISA_ESGOTO_SNIS_2019.pdf. Acesso em: 28 set. 2023.

BROWN, S.; ANGLE, J.S. & CHANEY, R.L. Correction of limed biosolid induced manganese deficiency on a long term field experiment. *J. Environ. Qual.*, 26:1375-1384, 1997.

CALDEIRA, M. V. W; FAVALESSA, M. F; GONÇALVES, E. O. DELARMELENA, W. M; SANTOS, F. E. V; VIEIRA, M. Lodo de esgoto como componente de substrato para produção de mudas de *Acacia mangium* Wild. *Comunicata Scientiae*, Bom Jesus, v. 5, n.1, p. 34-43, 2014.

CAO, Yucheng; PAWŁOWSKI, Artur. Sewage sludge-to-energy approaches based on anaerobic digestion and pyrolysis: Brief overview and energy efficiency assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 3, p. 1657-1665, 2012.

CAVALI, Matheus et al. A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. *Science of The Total Environment*, v. 857, p. 159627, 2023.

CAVIGGIOLI, Federico; UGHETTO, Elisa. A bibliometric analysis of the research dealing with the impact of additive manufacturing on industry, business and society. *International journal of production economics*, v. 208, p. 254-268, 2019.

CHEN, Tan et al. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresource technology*, v. 164, p. 47-54, 2014.

COÊLHO, Diego de Lima et al. Soil and Root System Attributes of Forage Cactus under Different Management Practices in the Brazilian Semiarid. *Agronomy*, v. 13, n. 3, p. 743, 2023.

COLLIER, Leonardo Santos et al. Efeito do composto de resíduo sólido urbano no teor de metais pesados em solo e goiabeira. *Bragantia*, v. 63, p. 415-420, 2004.

DESCHAMPS, C. & FAVARETTO, N. Efeito do lodo complementado com fertilizante mineral na produtividade e desenvolvimento da cultura do feijoeiro e do girassol. *Sanare*, 8:33-38, 1997.

FILIPOVIĆ, Vilim et al. Modeling water flow and phosphorus sorption in a soil amended with sewage sludge and olive pomace as compost or biochar. *Agronomy*, v. 10, n. 8, p. 1163, 2020.

GAO, N.; LI, J.; QI, B.; LI, A.; DUAN, Y.; WANG, Z. Thermal analysis and products distribution of dried sewage sludge pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 105, p. 43-48, Jan. 2014.

GIL, Antonio Carlos. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. 6. ed. Editora Atlas SA, 2008.

GOMES, D. R; CALDEIRA, M. V. W; DELARMELINA, W. M; ONÇALVES, E. O; RAZZI, P. A. Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona randis* L. *Cerne*, Lavras, v. 19, n. 1, p. 123-131, 2013.

Ji, Mengyuan et al. Effects of different feedstocks-based biochar on soil remediation: A review. *Environmental Pollution*, v. 294, p. 118655, 2022.

JIN, Junwei et al. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *Journal of hazardous materials*, v. 320, p. 417-426, 2016.

KRAHN, Katinka M. et al. Sewage sludge biochars as effective PFAS-sorbents. *Journal of Hazardous Materials*, v. 445, p. 130449, 2023.

KREBS, R. B. Caracterização do biochar por Pirólise Rápida. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

LOPES, José Carlos et al. Produção de alface com doses de lodo de esgoto. *Horticultura Brasileira*, v. 23, p. 143-147, 2005.

LU, Huanliang et al. Relative distribution of Pb²⁺ sorption mechanisms by sludge-derived biochar. *Water research*, v. 46, n. 3, p. 854-862, 2012.

MACHADO, M. F. S. A situação brasileira dos biossólidos. 2001. 282 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Campinas, Campinas, 2001.

MARCELINO, Igor Polla; LOSS, Arcângelo; ANDRADE, Marcio Antonio Nogueira. ASPECTOS GERAIS DO USO DO BIOCHAR PARA SUSTENTABILIDADE COM ÊNFASE AOS ATRIBUTOS EDÁFICOS: A REVISÃO. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, p. 301-319, 2020.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; SANTIAGO, G. & CHELLI, R.A. Efeito de doses crescentes de lodo de esgoto sobre frações da matéria orgânica e CTC de um Latossolo cultivado com cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:449-455, 1994.

MONDAL, Sourav; SINGH, Saumya; GUPTA, Himanshu. Green entrepreneurship and digitalization enabling the circular economy through sustainable waste management-An exploratory study of emerging economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 422, p. 138433, 2023.

NASCIMENTO, CWA do et al. Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 385-392, 2004.

NOGUEIRA, Thiago AR et al. Metais pesados e patógenos em milho e feijão caupi consorciados, adubados com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 11, p. 331-338, 2007.

NUVOLARI, A. O lançamento in natura e seus impactos. In: NUVOLARI, A. *Esgoto anitário: Coleta, transporte, tratamento e Reúso Agrícola*. São Paulo: Editora Edgard Blücher. 2003. p. 171-207.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEM, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão. *Revista Liberato*. v. 11, n. 16, p. 89-XX, Jul. -Dez. 2010.

PENIDO, Evanise Silva et al. Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 172, p. 326-333, 2019.

QUINTANA, Núria Rosa Gagliardi; CARMO, Maristela Simões do; MELO, Wanderley José de. Lodo de esgoto como fertilizante: produtividade agrícola e rentabilidade econômica. *Nucleus*, p. 183-191, 2011.

SAEED, Asif et al. The role of audit quality in waste management behavior. *International Review of Economics & Finance*, v. 89, p. 1203-1216, 2024.

SHEN, Yanwen et al. Producing pipeline-quality biomethane via anaerobic digestion of sludge amended with corn stover biochar with in-situ CO₂ removal. *Applied energy*, v. 158, p. 300-309, 2015.

SILVA, Fabrício Machado et al. Produção de Materiais Renováveis Utilizando Biomassa Agroindustrial (Soja) por meio de De Reator Termoquímico. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica*, p. 682-697, 2020.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. & SHARMA, R.D. Utilização do lodo de esgoto como fonte de fósforo e nitrogênio para milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997.

SRINIVASAN, Prakash et al. A feasibility study of agricultural and sewage biomass as biochar, bioenergy and biocomposite feedstock: production, characterization and potential applications. *Science of the total environment*, v. 512, p. 495-505, 2015.

THOMSEN, Lars Bjørn Silva; ANASTASAKIS, Konstantinos; BILLER, Patrick. Hydrothermal liquefaction potential of wastewater treatment sludges: Effect of wastewater treatment plant and sludge nature on products distribution. *Fuel*, v. 355, p. 129525, 2024.

VAN ECK, Nees; WALTMAN, Ludo. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *scientometrics*, v. 84, n. 2, p. 523-538, 2010.

WANG, Jianlong; WANG, Shizong. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 227, p. 1002-1022, 2019.

WANG, Zhiwei et al. Enhanced Pb (II) removal from wastewater by co-pyrolysis biochar derived from sewage sludge and calcium sulfate: Performance evaluation and quantitative mechanism analysis. *Separation and Purification Technology*, p. 125124, 2023.

ZHANG, Yuxin et al. Investigation of the properties and mechanism of activated sludge in acid-magnetic powder conditioning and vertical pressurized electro-dewatering (AMPED) process. *Separation and Purification Technology*, p. 124973, 2023.