

UPGRADING AMBIENTAL DO LODO DE ESGOTO VIA ROTA PIROLÍTICA: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROKNOW-C

ENVIRONMENTAL UPGRADING OF SEWAGE SLUDGE VIA PYROLYTIC ROUTE: APPLICATION OF THE PROKNOW-C METHOD

MEJORA AMBIENTAL DE LODOS DE DEPURADORA VÍA PIROLÍTICA: APLICACIÓN DEL MÉTODO PROKNOW-C

Rennêr Ribeiro Pinto¹, Joelda Dantas², Elvia Leal³, Marta Maria da Conceição⁴

DOI: 10.54899/dcs.v22i82.3406

Recibido: 29/08/2025 | Aceptado: 01/09/2025 | Publicación en línea: 18/09/2025.

RESUMO

O volume progressivo de lodo de esgoto, uma mistura complexa de contaminantes e agentes patogênicos, está relacionada com a melhoria das tecnologias adotadas pelas estações de tratamento de esgoto (ETE's). Entretanto, seu gerenciamento ainda é um tema problemático, pois é uma tarefa complicada que requer um planejamento consistente, conforme os critérios estabelecidos pela Resolução nº 498/2020 do CONAMA e a Lei nº 12.305/2010. Esta revisão bibliométrica e sistemática utilizando o método proknow-C tem como objetivo fornecer uma avaliação do efeito de processos termoquímicos no tratamento/descarte do lodo de esgoto. Este estudo enfatiza a conversão do lodo em produtos valiosos, como adsorvente e biofertilizante, além de seu manejo sustentável na construção civil, na recuperação de elementos e no aprisionamento de metais pesados. Mesmo diante dos obstáculos como variabilidade, escassez de dados ecotoxicológicos e falta de regulamentação, a diversidade de aplicações relatadas demonstra seu potencial na transição para um modelo de economia circular. Dos principais resultados obtidos com a busca nas bases de dados Science Direct e Web of Science, as palavras-chave que mais frequentemente apareceram foram “sewage sludge”, “pyrolysis”, “biomass”, “biochar” e “heavy metal”, sendo os países China, Estados Unidos e Espanha aqueles que mais trabalham sobre o tema, ficando o Brasil na 6ª posição. Os achados desta revisão aprofundam a compreensão do descarte/eliminação do lodo de esgoto, orientando futuras recomendações de pesquisas nesta área para cumprir alinhamento com ODS e ESG.

Palavras-chave: Lodo de Esgoto. Passivo Ambiental. Tratamento Termoquímico. Bioprodutos. Proknow-C.

¹ Doutorando em Desenvolvimento e Meio Ambiente em Associação a Rede Prodemá, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil. E-mail: ribeirorenner93@gmail.com
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5003-9486>

² Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brasil. E-mail: joelda.dantas@cear.ufpb.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2512-8089>

³ Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brasil. E-mail: elvialeal@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7672-8995>

⁴ Doutora em Química, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, Paraíba, Brasil.
E-mail: martamaria8@yahoo.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2654-2276>

ABSTRACT

The increasing volume of sewage sludge, a complex mixture of contaminants and pathogens, is linked to improved technologies adopted by sewage treatment plants (STPs). However, its management remains a problematic issue, as it is a complex task that requires consistent planning, in accordance with the criteria established by CONAMA Resolution No. 498/2020 and Law No. 12.305/2010. This bibliometric and systematic review, using the proknow-C method, aims to assess the effect of thermochemical processes on sewage sludge treatment/disposal. This study emphasizes the conversion of sludge into valuable products, such as adsorbent and biofertilizer, as well as its sustainable management in civil construction, element recovery, and heavy metal sequestration. Even faced with obstacles such as variability, scarcity of ecotoxicological data, and lack of regulation, the diversity of reported applications demonstrates its potential in the transition to a circular economy model. Among the main results obtained from the search in the Science Direct and Web of Science databases, the most frequently appearing keywords were "sewage sludge," "pyrolysis," "biomass," "biochar," and "heavy metal." China, the United States, and Spain are the countries that have worked most on this topic, with Brazil ranking sixth. The findings of this review deepen the understanding of sewage sludge disposal and disposal, guiding future research recommendations in this area to align with the SDGs and ESG.

Keywords: Sewage Sludge. Environmental Liabilities. Thermochemical Treatment. Bioproducts. Proknow-C.

RESUMEN

El creciente volumen de lodos de depuradora, una mezcla compleja de contaminantes y patógenos, está vinculado a las tecnologías mejoradas adoptadas por las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Sin embargo, su gestión sigue siendo un asunto problemático, ya que es una tarea compleja que requiere una planificación consistente, de acuerdo con los criterios establecidos por la Resolución CONAMA No. 498/2020 y la Ley No. 12.305/2010. Esta revisión bibliométrica y sistemática, utilizando el método proknow-C, tiene como objetivo evaluar el efecto de los procesos termoquímicos en el tratamiento/disposición de lodos de depuradora. Este estudio enfatiza la conversión de lodos en productos valiosos, como adsorbentes y biofertilizantes, así como su gestión sostenible en la construcción civil, la recuperación de elementos y el secuestro de metales pesados. Incluso frente a obstáculos como la variabilidad, la escasez de datos ecotoxicológicos y la falta de regulación, la diversidad de aplicaciones reportadas demuestra su potencial en la transición hacia un modelo de economía circular. Entre los principales resultados obtenidos de la búsqueda en las bases de datos Science Direct y Web of Science, las palabras clave más frecuentes fueron "lodos de depuradora", "pirólisis", "biomasa", "biocarbón" y "metales pesados". China, Estados Unidos y España son los países que más han trabajado en este tema, con Brasil en sexto lugar. Los hallazgos de esta revisión profundizan la comprensión de la eliminación y el desecho de lodos de depuradora, orientando las futuras recomendaciones de investigación en este ámbito para alinearlas con los ODS y los ESG.

Palabras clave: Lodos de Depuradora. Pasivos Ambientales. Tratamiento Termoquímico. Bioproductos. Proknow-C.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

Com a pressão do crescimento da população mundial e da florescente economia, aumenta-se a necessidade de suprir a demanda de tratamento de lodo. Nessa perspectiva, Mohamed *et al.* (2022) e Balkrishna *et al.* (2025) apontam que a gestão e eliminação de lodo de esgoto (SS) continuam sendo desafios críticos, devido aos elevados custos das estações de tratamento de águas residuais (ETAR) e das emissões de gases com efeito estufa (GEE).

Liu *et al.* (2025) apontam que a complexidade das composições de lodo e as características do alto teor de umidade levam à dificuldade no manejo sustentável do lodo. Muitas substâncias perigosas estão presentes no lodo, que comumente englobam metais pesados (HM), patógenos e poluentes orgânicos como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), substâncias per e polifluoroalquil (PFAS), dibenzodioxinas policloradas (PCDD) (Biney *et al.*, 2025) e microplásticos (MPs) (Havukainen *et al.*, 2022).

Contudo, Sukhorukov *et al.* (2024) apontaram que as abordagens existentes para a gestão do lodo de esgoto, a despeito de certas vantagens econômicas, dispõem um impacto negativo no estado do ambiente e, conseqüentemente, na saúde humana. Para evitar danos ambientais, Xi *et al.* (2023) relataram que se faz necessário implementar uma série de procedimentos intrincados de tratamento e eliminação, atualmente, incluem principalmente abordagens físicas, biológicas e termoquímicas.

Os processos termoquímicos, incluindo gaseificação, pirólise e liquefação hidrotérmica, são amplamente considerados como sendo as tecnologias mais promissoras no campo da gestão de resíduos e da manufatura sustentável, devido à sua flexibilidade e ampla gama de aplicações (Zhu *et al.*, 2025).

Ao contrário dos métodos tradicionais de descarte, a pirólise não apenas reduz o volume de lodo e estabiliza componentes nocivos, mas também contribui para a recuperação de recursos e a geração de energia renovável (Hamed *et al.*, 2025).

Portanto, este trabalho se concentra na atualização, por meio de um estudo bibliométrico e sistemático, de dados relevantes em relação ao tratamento e descarte do lodo de esgoto, enfatizando particularmente a aplicação de processos termoquímicos com ênfase em pirólise. São resumidas e apresentadas as tendências de desenvolvimento e investigação sobre o tema.

METODOLOGIA

Para atender aos objetivos da pesquisa, adotou-se a metodologia do *Knowledge Development Process – Constructivist* (Proknow-C) para seletar artigos cientificamente relevantes, de forma delineada, e identificar características que contribuam ao tema da pesquisa, a fim de reduzir a aleatoriedade e imaterialidade no processo de revisão.

Originário da Universidade Federal de Santa Catarina, no Laboratório de Metodologia Multicritério para Auxílio à Decisão (LabMCDA), o ProKnow-C é operacionalizado por meio das seguintes etapas: (I) Seleção de um Portfólio Bibliográfico (PB) sobre o tema; (II) Análise Bibliométrica do PB selecionado; (III) Análise Sistêmica dos artigos do PB; e (IV) Pergunta de pesquisa e oportunidades comprovadas. Para a pesquisa em questão, foram realizadas as três primeiras etapas.

Seleção do Portfólio Bibliográfico (PB)

Inicialmente foram determinadas as áreas do conhecimento, intituladas de eixos de pesquisa. Para cada eixo, identificou-se um conjunto de palavras-chave que melhor representava cada eixo, com base em sua relevância para o tema central da pesquisa.

Para a intersecção do conjunto de palavras-chave de cada eixo (áreas do conhecimento), criou-se uma expressão booleana para operacionalizar a busca nas bases de dados adotadas *Science Direct* e *Web of Science*.

Os eixos de pesquisa selecionados foram: Rejeito Perigoso e Disposição Termoquímica. Assim, as palavras-chave definidas para os dois eixos foram: *sewage sludge*, *disposal*, *thermal treatment* e *thermochemical process*, como representado na Tabela 1.

Com os eixos de pesquisa e palavras-chave estabelecidas, a consulta nas bases de dados consideradas foi executada no período entre 18 e 19 de fevereiro de 2025, com recorte de tempo dos últimos 5 anos, e os resultados foram analisados por meio do *software VOSviewer*.

Tabela 1. *Strings* baseados em eixos de pesquisa e palavras-chave.

<i>Strings</i> de busca
“Sewage Sludge” and “Disposal”
“Sewage Sludge” and “Thermal Treatment”
“Sewage Sludge” and “Thermochemical Process”

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na consulta das bases, foram definidos 4 critérios de seleção: (i) à delimitação temporal com intervalo entre 2015-2025, (ii) escrita em inglês, (iii) *strings* presentes nos títulos, resumos ou palavras-chaves, (iv) o estudo não ser de revisão. Resultando em uma coleção de artigos brutos de 4.911 documentos.

Com a assistência do *software* bibliográfico *Mendeley*, os artigos identificados foram organizados e deu-se início aos processos de filtragem. Na Tabela 1 são apresentados os números de publicações encontradas em cada base de dados selecionada, para a formação do portfólio.

Tabela 1. Quantidade de publicações identificadas por base de dados para a composição do portfólio bibliográfico bruto na etapa de busca inicial considerando os critérios de seleção aplicados.

Base de dados	<i>String</i> 1	<i>String</i> 2	<i>String</i> 3	Total
Science Direct	586	399	100	-
Web of Science	1.940	1.538	348	-
Total	2.526	1.937	448	4.911

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir de então, foi possível examinar a existência de duplicidade, levando à exclusão de 1.273 artigos, restando 3.638 artigos para avaliação do alinhamento do título. Após a verificação dos títulos, os artigos considerados não alinhados ao escopo da pesquisa foram excluídos, resultando em um total de 1.015 documentos.

Para mensurar o reconhecimento científico verificou-se o número de citações de cada artigo, através do Google Acadêmico (<http://scholar.google.com.br/>). Os dados coletados nesta etapa se referem ao mês de abril de 2025. Utilizando o Microsoft Office Excel, os artigos foram classificados em ordem decrescente de citações e suas frequências relativas e cumulativas foram medidas.

Estabeleceu-se um critério de seleção de 80 % de representação do acervo do Portfólio Bibliográfico (PB). Isso resultou em 334 artigos classificados como tendo relevância científica comprovada, formando o Repositório K (conjunto de documentos não duplicados com títulos alinhados e reconhecimento científico comprovado). Os 681 artigos restantes foram dispostos ao Repositório P (conjunto de documentos não duplicados com títulos alinhados e reconhecimento científico ainda a ser confirmado).

Na sequência, procedeu-se à leitura dos resumos dos artigos dos Repositório K e P para então classificá-los como alinhados ou não ao tema proposto. Revisados os resumos do Repositório K, foram identificados 205 artigos com conteúdo alinhados com o tema proposto, formando o Repositório A (conjunto de documentos não duplicados com títulos alinhados, resumos e reconhecimento científico confirmado). Os autores dos artigos que compõem o Repositório A foram identificados e constituíram o Repositório BA (conjunto de autores).

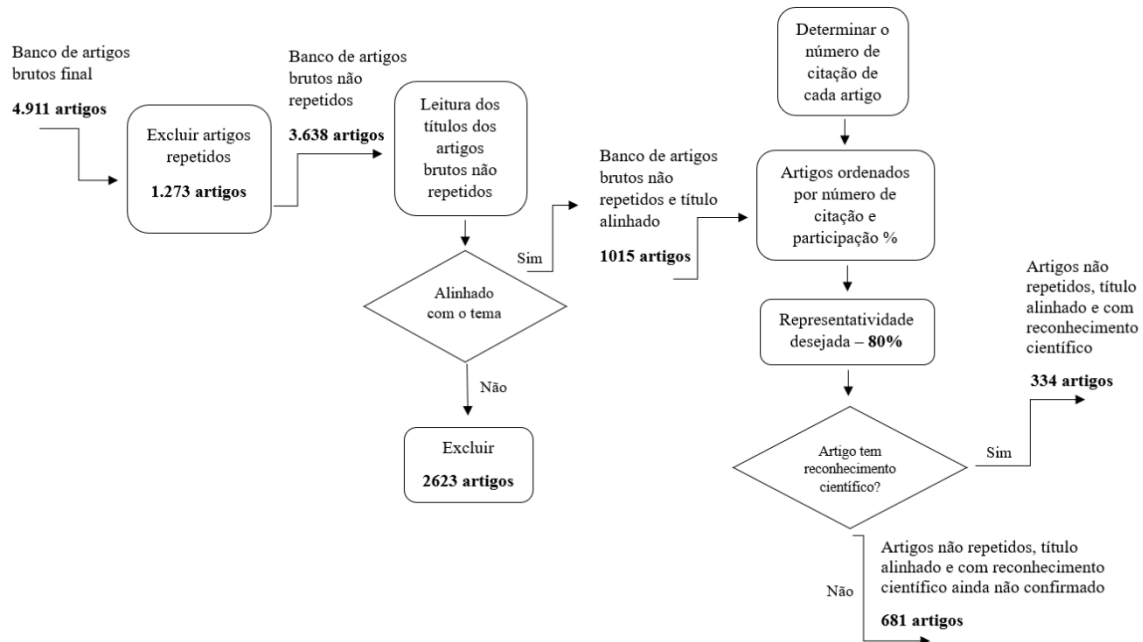
Os artigos do Repositório P foram revisados e foram divididos em dois grupos: (i) artigos publicados antes de 2023, totalizando 369 artigos e (ii) artigos publicados entre 2023 e 2025, totalizando 312 artigos.

Do conjunto de artigos mais antigos, 195 foram escritos por autores presentes na base de dados do autor (BA) e retornaram ao processo. Após a leitura dos resumos da soma de artigos (312 artigos + 195 artigos), 358 artigos foram revalidados por estarem alinhados, assim formando o Repositório B (um conjunto de documentos não duplicados, alinhados com a pesquisa e com potencial reconhecimento científico).

Portanto, a soma dos artigos dos repositórios A e B decorreu em 562 artigos, constituindo assim o Repositório C (um conjunto de documentos não duplicados, com títulos e resumos alinhados e com reconhecimento ou potencial reconhecimento científico), conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2.

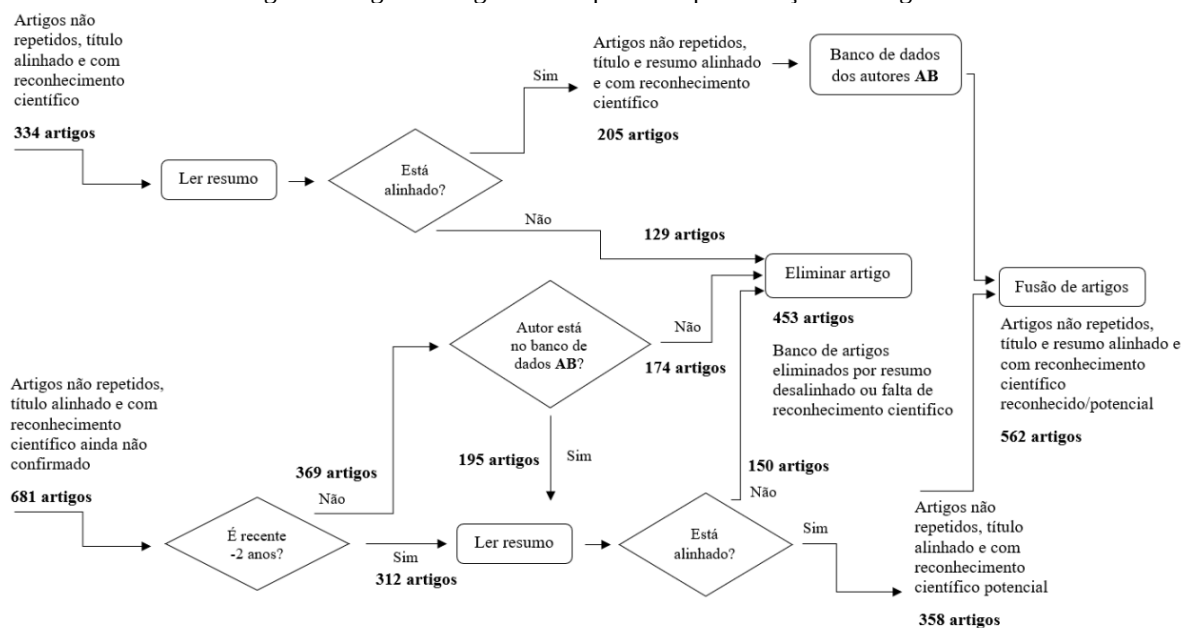
Como procedimento final, passou-se então à leitura integral das publicações com base nos *strings* de busca. Após uma leitura completa, 551 artigos confirmaram seu alinhamento com a pesquisa e assim poder descrever o estado atual da arte. Conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 1. Primeiro fragmento do processo para seleção de artigos.



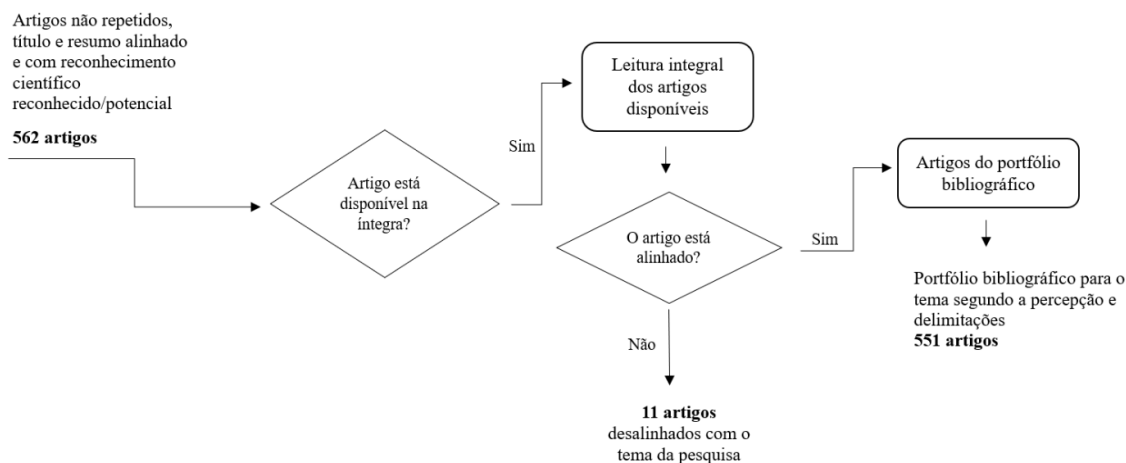
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2. Segundo fragmento do processo para seleção de artigos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3. Fragmento final do processo para seleção de artigos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Portanto, a união dos repositórios A e B constituiu um portfólio bibliográfico final representando $\approx 11\%$ do portfólio inicial bruto. Na Tabela 3 constam listados os 40 artigos mais relevantes em termos do número de citações no repositório final. Este valor é baseado na recomendação de Ensslin *et al.* (2010) para avaliar um volume ideal entre 20 e 40 artigos.

Tabela 3. Seleção dos 40 artigos mais relevantes do portfólio bibliográfico final, conforme o número de citações.

Título	Citações	Autores
Microplastics in Sewage Sludge: Effects of Treatment	1065	Mahon <i>et al.</i> 2017
Sustainable efficient adsorbent: Alkali-acid modified magnetic biochar derived from sewage sludge for aqueous organic contaminant removal	586	Tang <i>et al.</i> 2018
Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO ₂ -equivalent emissions analysis.	369	Wei <i>et al.</i> 2020
Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic	338	Zielińska <i>et al.</i> 2015
Co-pyrolysis of sewage sludge and sawdust/rice straw for the production of biochar	319	Huang <i>et al.</i> 2017
Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge	277	Jayaraman <i>et al.</i> 2015
Speciation Dynamics of Phosphorus during (Hydro)Thermal Treatments of Sewage Sludge	267	Huang <i>et al.</i> 2015
Cumulative effects of bamboo sawdust addition on pyrolysis of sewage sludge: Biochar properties and environmental risk from metals	259	Jin <i>et al.</i> 2017
The transformation pathways of nitrogen in sewage sludge during hydrothermal treatment	225	Zhuang <i>et al.</i> 2017
Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China	203	Chen <i>et al.</i> 2019
Facile synthesis of sludge-derived MnOx-N-biochar as an efficient catalyst for peroxymonosulfate activation	200	Mian <i>et al.</i> 2019
Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge	196	Barry <i>et al.</i> 2019
Biomass based activated carbon obtained from sludge and sugarcane bagasse for removing lead ion from wastewater	194	Tao <i>et al.</i> 2015

Hydrothermal carbonization of sewage sludge: Effect of aqueous phase recycling	190	Xu <i>et al.</i> 2020
Pyrolysis treatment of sewage sludge: A promising way to produce phosphorus fertilizer	189	Frišták <i>et al.</i> 2018
Effects of calcium carbonate on pyrolysis of sewage sludge	171	Kwon <i>et al.</i> 2018
Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge	163	Medina-Martos <i>et al.</i> 2020
Characterization and application of bio-chars from liquefaction of microalgae, lignocellulosic biomass and sewage sludge	161	Leng <i>et al.</i> 2015
Catalytic role of conditioner CaO in nitrogen transformation during sewage sludge pyrolysis	161	Liu <i>et al.</i> 2015
Migration and risk assessment of heavy metals in sewage sludge during hydrothermal treatment combined with pyrolysis	161	Wang <i>et al.</i> 2016
Co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks	159	Wang <i>et al.</i> 2019
Optimized preparation of activated carbon from coconut shell and municipal sludge	156	Liang <i>et al.</i> 2020
Stabilization of cationic and anionic metal species in contaminated soils using sludge-derived biochar	147	Fang <i>et al.</i> 2016
Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements	143	Pavlík <i>et al.</i> 2016
Hydrothermal conversion of dewatered sewage sludge: Focusing on the transformation mechanism and recovery of phosphorus	141	Shi <i>et al.</i> 2019
Potential of phosphorus recovery from sewage sludge and manure ash by thermochemical treatment	139	Havukainen <i>et al.</i> 2016
Beneficial synergistic effect on bio-oil production from co-liquefaction of sewage sludge and lignocellulosic biomass	137	Leng <i>et al.</i> 2018
Pharmaceutical residues in sewage sludge: Effect of sanitization and anaerobic digestion	137	Malmborg <i>et al.</i> 2015
Environmental investigation on co-combustion of sewage sludge and coal gangue: SO ₂ , NO _x and trace elements emissions	137	Yang <i>et al.</i> 2016
Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass	135	Kijo-Kleczkowska <i>et al.</i> 2016
Biochar production from sewage sludge and microalgae mixtures: properties, sustainability and possible role in circular economy	134	Bolognesi <i>et al.</i> 2021
Co-pyrolysis of sewage sludge and rice husk/ bamboo sawdust for biochar with high aromaticity and low metal mobility	133	Zhang <i>et al.</i> 2020
Microwave co-pyrolysis of sewage sludge and rice straw	129	Huang <i>et al.</i> 2015
The synthesis of heterogeneous Fenton-like catalyst using sewage sludge biochar and its application for ciprofloxacin degradation	129	Li <i>et al.</i> 2019
Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two-year field experiment	127	Faria <i>et al.</i> 2018
Continuous Pyrolysis of Sewage Sludge in a Screw-Feeding Reactor: Products Characterization and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals	126	Gao <i>et al.</i> 2017
Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia	125	Đurđević <i>et al.</i> 2019
Effects of residence time on characteristics of biochars prepared via co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks	125	Wang <i>et al.</i> 2019
Co-combustion of industrial coal slurry and sewage sludge: Thermochemical and emission behavior of heavy metals	122	Fu <i>et al.</i> 2019

Fonte: Elaborado pelos autores.

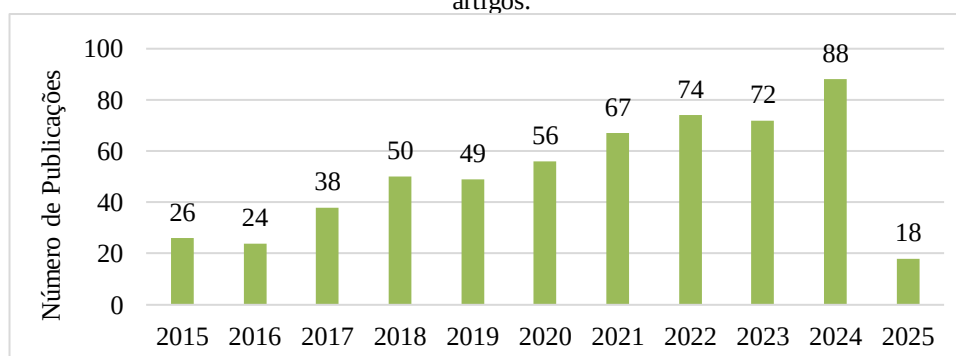
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a identificação e definição do portfólio bibliográfico, procedeu-se com a etapa de análise bibliométrica. Buscando uma análise quantitativa das informações dos artigos, foram considerados cinco aspectos: (i) reconhecimento científico dos artigos; (ii) palavras-chave mais utilizadas; (iii) reconhecimento dos autores; (iv) países de origem; (v) reconhecimento dos periódicos.

Na Figura 4 está apresentada a evolução temporal das publicações científicas do portfólio bibliográfico final, com base no ano de publicação dos artigos analisados. Observa-se uma tendência de crescimento contínuo da produção científica sobre o tema ao longo dos anos, indicando consolidação e amadurecimento da temática na comunidade científica.

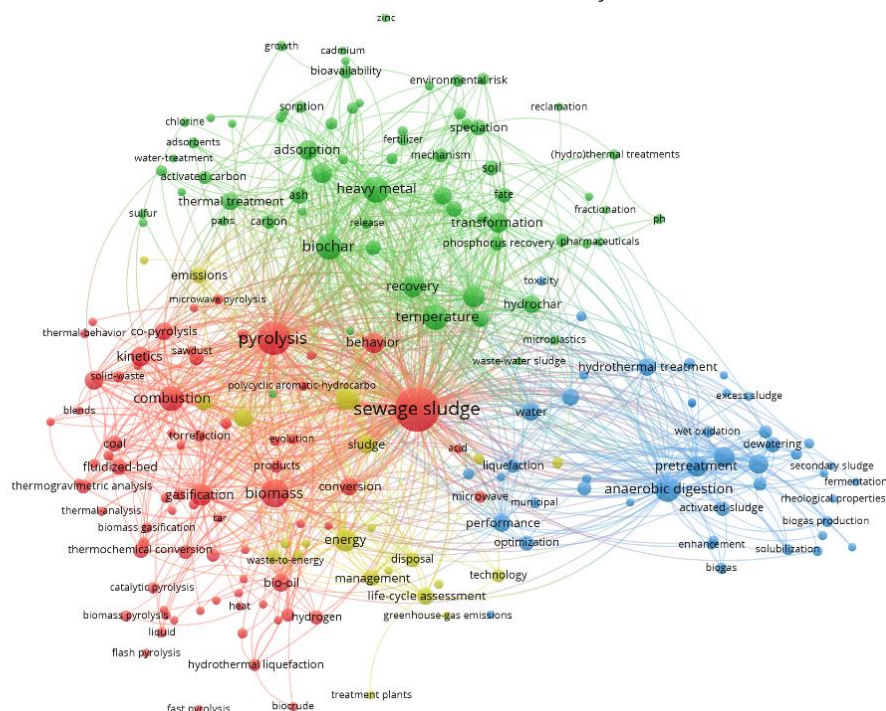
Outra análise realizada corresponde à distribuição das palavras-chave extraídas do portfólio bibliográfico. Ao todo, foram identificadas 2.211 palavras-chave. Aplicando-se um critério de ocorrência mínima de cinco menções por termo, obteve-se uma amostra final composta por 208 palavras-chave inter-relacionadas entre os artigos. Conforme apresentado na Figura 5, cada cor representa um *cluster* temático distinto, evidenciando agrupamentos de áreas correlacionadas.

Figura 4. Evolução temporal das publicações do portfólio bibliográfico final com base no ano de publicação dos artigos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5. Mapeamento em rede das palavras-chave inter-relacionadas no portfólio bibliográfico, considerando o critério de ocorrência mínima de cinco menções.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na distribuição das palavras-chave, em relação ao *cluster* vermelho, observa-se a proeminência do termo “sewage sludge” com 373 ocorrências, enfatizando sua posição como tema central desta pesquisa.

Dentre os processos termoquímicos, observa-se uma concentração expressiva de ocorrências para o termo “pyrolysis”, evidenciando sua predominância sobre outros processos, seguido dos termos “combustion”, “gasification” e “hydrothermal carbonization”.

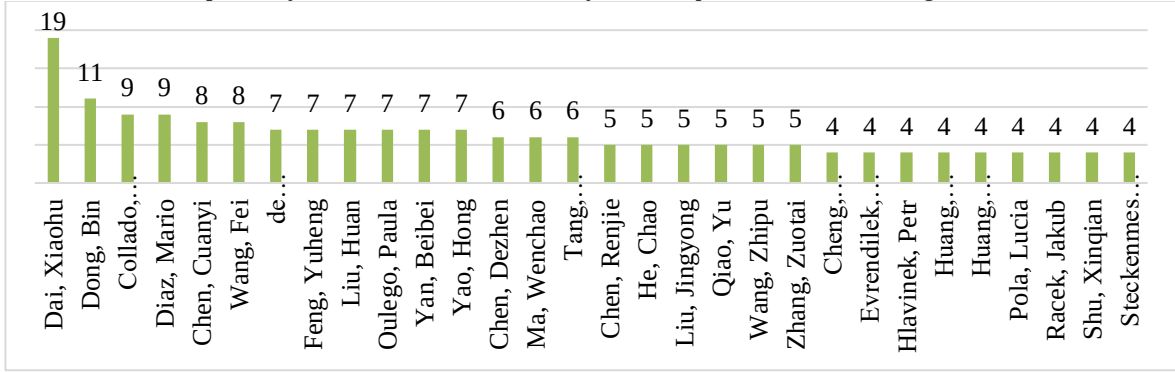
O *cluster* verde aparece como grupo relacionado aos produtos sólidos da pirólise, notadamente o biochar, e seu uso na adsorção de poluentes, recuperação de fósforo, tratamento de águas, além de sua relevância como condicionador de solo. Com centralidade para pré-tratamentos, digestão anaeróbia e processos hídricos, o *cluster* azul representa a vertente biotecnológica e os tratamentos híbridos.

Por fim, o *cluster* amarelo representa intersecções de “Sewage Sludge” como núcleo comum, visto que este termo surge como nó central, conectando-se fortemente a todos os *clusters*.

Na Figura 6 estão apresentados os 30 autores mais produtivos do portfólio bibliográfico analisado, extraídos de um total de 2.362 autores identificados. Os dados destacam Dai Xiaohu figurando como o autor mais proeminente, na sequência, Dong Bin seguido por Collado, Sergio, Díaz, Mario, Chen, Chanyi e Wang, Fei.

Nota-se um expressivo número de autores oriundos de instituições chinesas, como Tongji University, Harbin Institute of Technology e Chinese Academy of Sciences.

Figura 6. Distribuição dos 30 autores mais produtivos do portfólio bibliográfico analisado, com base no número de publicações relacionadas à valorização termoquímica do lodo de esgoto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Na estrutura das colaborações científicas entre países, com base nos artigos do portfólio analisado, os principais foram China (288 publicações), Estados Unidos (34), Espanha (33) e Alemanha (26). O Brasil ocupa a sexta posição em volume de publicações (20).

A identificação e distribuição dos periódicos mais recorrentes no portfólio bibliográfico permite compreender quais são os principais canais de disseminação científica sobre o tema investigado. Ao todo, foram identificados 142 periódicos distintos no portfólio bibliográfico, contudo, encontram-se destacados na Tabela 4 os 10 periódicos com o maior número de publicações, incluindo a participação percentual e o Fator de Impacto (IF) mais atual consultado no Clarivate.

Tabela 4. Principais periódicos do portfólio bibliográfico, com número de publicações, participação percentual no total de documentos analisados e respectivos fatores de impacto.

Periódico	Publicações	% total (aprox.)	Fator de Impacto (2024/2023)
Waste Management	43	10,3 %	7,1
Fuel	28	6,7 %	7,5
Science of the Total Environment	28	6,7 %	8,0
Journal of Cleaner Production	26	6,2 %	10,0
Bioresource Technology	21	5,0 %	9,0
Journal of Environmental Management	20	4,8 %	8,4
Chemosphere	16	3,8 %	8,1 (2023)
Journal of Analytical and Applied Pyrolysis	16	3,8 %	6,2
Journal of Environmental Chemical Engineering	15	3,6 %	7,2
Water Research	15	3,6 %	12,4

Fonte: Elaborado pelos autores.

Análise Sistemática

O portfólio bibliográfico, composto por 551 artigos e estruturado com base na metodologia ProKnow-C, foi analisado com o objetivo de caracterizar o panorama científico relacionado aos processos termoquímicos aplicados ao tratamento de lodo de esgoto.

Na Tabela 3 reportada anteriormente, que apresenta os artigos mais citados do portfólio, destaca-se uma convergência temática voltada à mitigação de contaminantes orgânicos e inorgânicos presentes nos resíduos, ao mesmo tempo em que revela um movimento crescente da comunidade científica em direção a uma abordagem circular e sustentável.

Considerando essa relevância, o aprofundamento subsequente da análise foi dedicado a pirólise do lodo de esgoto, com foco em seus parâmetros operacionais, desempenho dos produtos gerados (biochar, bio-óleo e biogás), e perspectivas de aplicação. A análise aprofundada da literatura permitiu identificar nove estudos empíricos que representam avanços significativos na conversão termoquímica do lodo de esgoto por meio da pirólise e co-pirólise.

Trabalhos como os de Zielińska *et al.* (2015), Gao *et al.* (2017), Leng *et al.* (2018) e Liang *et al.* (2020) exploram diferentes combinações de temperatura, tempo de residência e biomassa complementar, demonstrando forte influência desses parâmetros sobre os rendimentos de biochar e bio-óleo, bem como sobre a área superficial e o teor de cinzas dos materiais gerados.

A co-pirólise, em especial, revelou-se eficaz ao elevar o desempenho energético do processo e melhorar a qualidade do biochar, como evidenciado por Bolognesi *et al.* (2021) e Huang *et al.* (2015). Já os estudos de Jayamaram *et al.* (2015), Yang *et al.* (2016) e Fu *et al.* (2019) ampliam a discussão ao abordar aspectos térmicos e ambientais da pirólise em escala aplicada, incluindo co-combustão e retenção de metais pesados.

Esses dados consolidados não apenas comprovam a versatilidade e aplicabilidade da pirólise como rota preferencial para valorização do lodo de esgoto, mas também fornecem subsídios técnicos para o desenvolvimento de soluções escaláveis e ambientalmente seguras.

CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou a crescente relevância científica das abordagens tecnológicas voltadas ao tratamento e valorização do lodo de esgoto, com destaque para os processos termoquímicos, como a pirólise que se mostram como processos promissores para fornecer uma

descarga de lodo de esgoto limpa e segura, conforme foi demonstrado por meio da aplicação do instrumento metodológico Proknow-C assegurando uma seleção criteriosa e robusta da literatura, resultando em um portfólio final de 551 artigos científicos extraídos de um conjunto inicial de 4911 publicações indexadas nas bases de dados internacionais, nos últimos 10 anos (2015-2025).

A análise sistemática desse portfólio permitiu identificar as principais tendências, contribuições acadêmicas, lacunas teórico-metodológicas e oportunidades de pesquisa na área, consolidando uma base sólida para o avanço do conhecimento e a proposição de soluções inovadoras para a gestão do lodo no contexto da economia circular e da sustentabilidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) através da bolsa concedida Termo de Autorga nº 1927/2022, emitido em 01/10/2022.

REFERÊNCIAS

- BALKRISHNA, A., KAUSHIK, P., SINGH, S., AGRAHARI, P., KUMAR, B., KUMAR, P., ARYA, V. P. Potential Use of Sewage Sludge as Fertilizer in Organic Farming. **Cleaner Waste Systems**, p. 100245, 2025.
- BARRY, D., BARBIERO, C., BRIENS, C., BERRUTI, F. Pyrolysis as an economical and ecological treatment option for municipal sewage sludge. **Biomass and Bioenergy**, v.122, p. 472-480, 2019.
- BINEY, M. A., GUSIATIN, M. Z., TRAKAL, L., MOŠKO, J., POHOŘELÝ, M. Utilization of co-substrates in municipal sewage sludge co-pyrolysis: yields and characterization of biochar, bio-oil, and syngas, with economic feasibility analysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, p.107091, 2025.
- BOLOGNESI, S., BERNARDI, G., CALLEGARI, A., DONDI, D., CAPODAGLIO, A. G. Biochar production from sewage sludge and microalgae mixtures: properties, sustainability and possible role in circular economy. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v.11, n. 2, p. 289-299, 2021.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº498, de 19 de agosto de 2020**: “Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências.”, 2020.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**: “Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.”, 2010.
- CHEN, G., WANG, X., LI, J., YAN, B., WANG, Y., WU, X., MA, W. Environmental, energy, and economic analysis of integrated treatment of municipal solid waste and sewage sludge: A case study in China. **Science of the Total Environment**, v. 647, p. 1433-1443, 2019.
- ĐURĐEVIĆ, D., BLECICH, P., JURIC, Ž. Energy recovery from sewage sludge: The case study of Croatia. **Energies**, v. 12, n. 10, p. 1927, 2019.
- ENSSLIN, L., GONÇALVES, A., ENSSLIN, S. R., DUTRA, A. Bibliometric and systemic review of the state of the art of occupational risk management in the construction industry. **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**, v. 29, n. 3, p. 1107-1120, 2023.
- FANG, S. E., TSANG, D. C., ZHOU, F., ZHANG, W., QIU, R. Stabilization of cationic and anionic metal species in contaminated soils using sludge-derived biochar. **Chemosphere**, v. 149, p.263-271, 2016.
- FARIA, W. M., FIGUEIREDO, C. C. D., COSER, T. R., VALE, A. T., SCHNEIDER, B. G. Is sewage sludge biochar capable of replacing inorganic fertilizers for corn production? Evidence from a two-year field experiment. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 64, n. 4, p. 505-519, 2018

FRIŠTÁK, V., PIPÍŠKA, M., SOJA, G. Pyrolysis treatment of sewage sludge: A promising way to produce phosphorus fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 1772-1778, 2018.

FU, B., LIU, G., MIAN, M. M., ZHOU, C., SUN, M., WU, D., LIU, Y. Co-combustion of industrial coal slurry and sewage sludge: Thermochemical and emission behavior of heavy metals. **Chemosphere**, v. 233, p. 440-451, 2019.

GAO, N., QUAN, C., LIU, B., LI, Z., WU, C., LI, A. Continuous pyrolysis of sewage sludge in a screw-feeding reactor: products characterization and ecological risk assessment of heavy metals. **Energy & Fuels**, v. 31, n. 5, p. 5063-5072, 2017.

HAMED, A. S. A., MUNAJAT, N. F., RASIT, N., ALMANASSRA, I. W., ATIEH, M. A., SAYED, K., ALJOMARD, H. Advancing pyrolysis of sewage sludge: Bibliometrics analysis, life cycle assessment, and circular economy insights. **Thermal Science and Engineering Progress**, p.103693, 2025.

HAVUKAINEN, J., NGUYEN, M. T., HERMANN, L., HORTTANAINEN, M., MIKKILÄ, M., DEVIATKIN, I., LINNANEN, L. Potential of phosphorus recovery from sewage sludge and manure ash by thermochemical treatment. **Waste Management**, v.49, p.221-229, 2016.

HAVUKAINEN, J., SAUD, A., ASTRUP, T. F., PELTOLA, P., HORTTANAINEN, M. Environmental performance of dewatered sewage sludge digestate utilization based on life cycle assessment. **Waste Management**, v.137, p.210-221, 2022.

HUANG, Y. F., SHIH, C. H., CHIUEH, P. T., LO, S. L. Microwave co-pyrolysis of sewage sludge and rice straw. **Energy**, v.87, p.638-644, 2015.

HUANG, R., TANG, Y. Speciation dynamics of phosphorus during (hydro) thermal treatments of sewage sludge. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n.24, p.14466-14474, 2015.

HUANG, H. J., YANG, T., LAI, F. Y., WU, G. Q. Co-pyrolysis of sewage sludge and sawdust/rice straw for the production of biochar. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 125, p. 61-68, 2017.

JAYARAMAN, K., GÖKALP, I. Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge. **Energy Conversion and Management**, v. 89, p. 83-91, 2015.

JIN, J., WANG, M., CAO, Y., WU, S., LIANG, P., LI, Y., CHRISTIE, P. Cumulative effects of bamboo sawdust addition on pyrolysis of sewage sludge: biochar properties and environmental risk from metals. **Bioresource Technology**, v. 228, p. 218-226, 2017.

KIJO-KLECZKOWSKA, A., ŚRODA, K., KOSOWSKA-GOLACHOWSKA, M., MUSIAŁ, T., WOLSKI, K. (2016). Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass. **Fuel**, v. 170, p.141-160, 2016.

KWON, E. E., LEE, T., OK, Y. S., TSANG, D. C., PARK, C., LEE, J. Effects of calcium carbonate on pyrolysis of sewage sludge. **Energy**, v.153, p.726-731, 2018.

LENG, L. J., YUAN, X. Z., HUANG, H. J., WANG, H., WU, Z. B., FU, L. H., ZENG, G. M. Characterization and application of bio-chars from liquefaction of microalgae, lignocellulosic biomass and sewage sludge. **Fuel Processing Technology**, v. 129, p. 8-14, 2015.

LENG, L., LI, J., YUAN, X., LI, J., HAN, P., HONG, Y., ZHOU, W. Beneficial synergistic effect on bio-oil production from co-liquefaction of sewage sludge and lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v.251, p.49-56, 2018.

LI, J., PAN, L., YU, G., XIE, S., LI, C., LAI, D., WANG, Y. The synthesis of heterogeneous Fenton-like catalyst using sewage sludge biochar and its application for ciprofloxacin degradation. **Science of the Total Environment**, v. 654, p. 1284-1292, 2019.

LIANG, Q., LIU, Y., CHEN, M., MA, L., YANG, B., LI, L., LIU, Q. Optimized preparation of activated carbon from coconut shell and municipal sludge. **Materials Chemistry and Physics**, v. 241, p. 122327, 2020.

LIU, H., ZHANG, Q., HU, H., LIU, P., HU, X., LI, A., YAO, H. Catalytic role of conditioner CaO in nitrogen transformation during sewage sludge pyrolysis. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 35, n. 3, p. 2759-2766, 2015.

LIU, Y., ZHOU, J., LU, S., REN, J. Towards the new era of sewage sludge management in China: Status, challenges, and perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, p. 107201, 2025.

MAHON, A. M., O'CONNELL, B., HEALY, M. G., O'CONNOR, I., OFFICER, R., NASH, R., MORRISON, L. Microplastics in sewage sludge: effects of treatment. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 2, p. 810-818, 2017.

MALMBORG, J., MAGNÉR, J. Pharmaceutical residues in sewage sludge: Effect of sanitization and anaerobic digestion. **Journal of Environmental Management**, v.153, p.1-10, 2015.

MEDINA-MARTOS, E., ISTRATE, I. R., VILLAMIL, J. A., GÁLVEZ-MARTOS, J. L., DUFOUR, J., MOHEDANO, Á. F. Techno-economic and life cycle assessment of an integrated hydrothermal carbonization system for sewage sludge. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 122930, 2020.

MIAN, M. M., LIU, G., FU, B., SONG, Y. Facile synthesis of sludge-derived MnO_x-N-biochar as an efficient catalyst for peroxymonosulfate activation. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 255, p. 117765, 2019.

MOHAMED, B. A., LI, L. Y., HAMID, H., JERONIMO, M. Sludge-based activated carbon and its application in the removal of perfluoroalkyl substances: a feasible approach towards a circular economy. **Chemosphere**, v. 294, p. 133707, 2022.

PAVLÍK, Z., FOŘT, J., ZÁLESKÁ, M., PAVLÍKOVÁ, M., TRNÍK, A., MEDVED, I., ČERNÝ, R. Energy-efficient thermal treatment of sewage sludge for its application in blended cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 409-419, 2016.

SHI, Y., LUO, G., RAO, Y., CHEN, H., ZHANG, S. (2019). Hydrothermal conversion of dewatered sewage sludge: Focusing on the transformation mechanism and recovery of phosphorus. **Chemosphere**, v. 228, p.619-628, 2019.

SUKHORUKOV, D. A., KUKUSHKIN, R. G., ALEKSEEVA, M. V., BULAVCHENKO, O. A., ZAIKINA, O. O., REVYAKIN, M. E., YAKOVLEV, V. A. Upgrading of sewage sludge-derived pyrolysis oil via hydrotreatment over NiMo-based catalysts. **Fuel**, v. 359, p. 130383, 2024.

TANG, L., YU, J., PANG, Y., ZENG, G., DENG, Y., WANG, J., FENG, H. Sustainable efficient adsorbent: alkali-acid modified magnetic biochar derived from sewage sludge for aqueous organic contaminant removal. **Chemical Engineering Journal**, v. 336, p. 160-169, 2018.

TAO, H. C., ZHANG, H. R., LI, J. B., DING, W. Y. Biomass based activated carbon obtained from sludge and sugarcane bagasse for removing lead ion from wastewater. **Bioresource Technology**, v. 192, p. 611-617, 2015.

WANG, X., LI, C., ZHANG, B., LIN, J., CHI, Q., WANG, Y. Migration and risk assessment of heavy metals in sewage sludge during hydrothermal treatment combined with pyrolysis. **Bioresource Technology**, v. 221, p.560-567, 2016.

WANG, Z., XIE, L., LIU, K., WANG, J., ZHU, H., SONG, Q., SHU, X. Co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks. **Waste Management**, v. 89, p. 430-438, 2019.

WANG, Z., LIU, K., XIE, L., ZHU, H., JI, S., SHU, X. Effects of residence time on characteristics of biochars prepared via co-pyrolysis of sewage sludge and cotton stalks. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.142, p.104659, 2019.

WEI, L., ZHU, F., LI, Q., XUE, C., XIA, X., YU, H., BAI, S. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis. **Environment International**, v. 144, p. 106093, 2020.

XI, D., XIE, W., QI, F., HUANG, Z., WEN, S., FAN, B., YANG, S. Sustainable treatment of sewage sludge via plasma-electrolytic liquefaction for bio-friendly production of polyurethane foam. **Journal of Environmental Management**, v. 329, p. 117072, 2023.

XU, Z. X., SONG, H., LI, P. J., HE, Z. X., WANG, Q., WANG, K., DUAN, P. G. Hydrothermal carbonization of sewage sludge: Effect of aqueous phase recycling. **Chemical Engineering Journal**, v. 387, p.123410, 2020.

YANG, Z., ZHANG, Y., LIU, L., WANG, X., ZHANG, Z. Environmental investigation on co-combustion of sewage sludge and coal gangue: SO₂, NO_x and trace elements emissions. **Waste Management**, v.50, p.213-221, 2016.

ZHANG, J., JIN, J., WANG, M., NAIDU, R., LIU, Y., MAN, Y. B., SHAN, S. Co-pyrolysis of sewage sludge and rice husk/bamboo sawdust for biochar with high aromaticity and low metal

mobility. **Environmental Research**, v.191, p.110034, 2020.

ZIELIŃSKA, A., OLESZCZUK, P., CHARMAS, B., SKUBISZEWSKA-ZIĘBA, J., PASIECZNA-PATKOWSKA, S. Effect of sewage sludge properties on the biochar characteristic. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 112, p. 201-213, 2015.

ZHU, H., BABKOOR, M., COPPENS, M. O., MATERAZZI, M. Thermochemical technologies for conversion of biomass and waste into light olefins (C2-C4). **Fuel Processing Technology**, 267, 108174, 2025.

ZHUANG, X., HUANG, Y., SONG, Y., ZHAN, H., YIN, X., WU, C. The transformation pathways of nitrogen in sewage sludge during hydrothermal treatment. **Bioresource Technology**, v. 245, p.463-470, 2017.