

RELAÇÃO ENTRE COMPOSIÇÃO E BIODEGRADABILIDADE DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS AO POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

RELACIÓN ENTRE COMPOSICIÓN Y BIODEGRADABILIDAD DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS CON EL POTENCIAL BIOQUÍMICO DEL METANO: UN ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

RELATIONSHIP BETWEEN COMPOSITION AND BIODEGRADABILITY OF LIGNOCELLULOSIC WASTE WITH THE BIOCHEMICAL POTENTIAL OF METHANE: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Gislany Pereira de Lira¹; Guilherme Gomes de Sousa Magalhães²; Liliana Andréa dos Santos³ Tatiana Souza Porto⁴; André Felipe de Melo Sales Santos⁵

DOI: <https://doi.org/10.31692/2526-7701.VCOINTERPDVAgro.0012>

RESUMO

Os resíduos lignocelulósicos são materiais importantes encontrados na biomassa vegetal, termo assim empregado para designar matéria orgânica produzida tanto por espécies vegetais, como por resíduos lignocelulósicos. A biomassa lignocelulósica, que abrange resíduos agrícolas e recursos florestais subaproveitados, representa recursos energéticos renováveis promissores e acessíveis. A transformação biológica da biomassa lignocelulósica em energia é ecologicamente apropriada e economicamente vantajosa quando comparada a outras técnicas. A digestão anaeróbica (DA) da biomassa lignocelulósica é empregada para a produção de biogás. Recentemente, muitos pesquisadores têm focado em novas alternativas sustentáveis para o uso de resíduos agrícolas e/ou agroindustriais como biomassa na geração do biogás. Diante disso, esta pesquisa teve por objetivo uma revisão sistemática da literatura, como também uma análise bibliométrica sobre a relação entre composição e biodegradabilidade de resíduos lignocelulósicos ao potencial bioquímico de metano com vistas a sua valorização energética. Desta forma, este trabalho construiu uma rede de colaboração científica num período de 23 anos, sendo este, de 2000 – 2023. Metodologicamente, os estudos científicos analisados foram considerados qualitativos e quantitativos realizados a partir da base de dados do *Scopus* para análises sistemáticas, assim como a utilização do software VOSviewer para análise bibliométrica. Ao final da revisão, obteve-se como resultado, um aumento nas publicações relacionado a temática buscando-se pelas palavras-chave “*lignocellulosic*”, “*lignin*”, “*BMP*”, “*biochemical methane potential*” e “*biodegradable*” nos artigos. Neste contexto, foram selecionados 106 artigos científicos publicados nacional e internacionalmente, tendo sob análise de coautoria indicado o Triolo (2011) como o principal autor. Sendo assim, construídas 4 redes: citação de documentos dos autores, coocorrência de palavras-chave, autor mais citado e citação de documentos por países. Os países que mais se destacaram com maior número de publicações no contexto da pesquisa foram: China, França, Estados Unidos, Dinamarca e Índia. Pode-se concluir que pesquisas relacionadas ao tema tem apresentado um aumento promissor nos últimos anos.

¹ Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, gislany.plira@ufrpe.br

² Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, guilhermegomesdesousa123@gmail.com

³ Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal Rural de Pernambuco, liliana.andrea.santos@gmail.com

⁴ Doutora em Tecnologia Bioquímica-Farmacêutica, Universidade Federal Rural de Pernambuco, tatiana.porto@ufrpe.br

⁵ Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, andre.felipesantos@ufrpe.br

Palavras-chave: lignina, biodegradação, biomassa, bibliometria, energia

RESUMEN

Los residuos lignocelulósicos son materiales importantes que se encuentran en la biomasa vegetal, término utilizado para referirse a la materia orgánica producida tanto por especies vegetales como por residuos lignocelulósicos. La biomasa lignocelulósica, que incluye residuos agrícolas y recursos forestales infrautilizados, representa unos recursos energéticos renovables prometedores y accesibles. La transformación biológica de la biomasa lignocelulósica en energía es ecológicamente apropiada y económicamente ventajosa en comparación con otras técnicas. La digestión anaerobia (DA) de la biomasa lignocelulósica se utiliza para producir biogás. Recientemente, muchos investigadores se han centrado en nuevas alternativas sostenibles para utilizar residuos agrícolas y/o agroindustriales como biomasa para generar biogás. En vista de ello, el objetivo de esta investigación ha sido realizar una revisión sistemática de la literatura, así como un análisis bibliométrico de la relación entre la composición y biodegradabilidad de los residuos lignocelulósicos y el potencial bioquímico de metano con vistas a su valorización energética. De este modo, este trabajo ha construido una red de colaboración científica a lo largo de un periodo de 23 años, desde 2000 hasta 2023. Metodológicamente, los estudios científicos analizados fueron cualitativos y cuantitativos, utilizando la base de datos Scopus para el análisis sistemático, así como el software VOSviewer para el análisis bibliométrico. Al final de la revisión, el resultado fue un aumento de las publicaciones relacionadas con el tema mediante la búsqueda de las palabras clave «lignocellulosic», «lignin», «BMP», «biochemical methane potential» y «biodegradable» en los artículos. En este contexto, se seleccionaron 106 artículos científicos publicados a nivel nacional e internacional, indicando a Triolo (2011) como autor principal al analizar la coautoría. A continuación, se construyeron cuatro redes: citación de documentos por autores, co-ocurrencia de palabras clave, autor más citado y citación de documentos por país. Los países que destacaron con mayor número de publicaciones en el contexto de la investigación fueron: China, Francia, Estados Unidos, Dinamarca e India. Puede concluirse que la investigación sobre el tema ha registrado un aumento prometedor en los últimos años.

Palabras clave: lignina, biodegradación, biomasa, bibliometría, energía

ABSTRACT

Lignocellulosic residues are important materials found in plant biomass, a term used to refer to organic matter produced by both plant species and lignocellulosic residues. Lignocellulosic biomass, which includes agricultural waste and underutilized forest resources, represents promising and accessible renewable energy resources. The biological transformation of lignocellulosic biomass into energy is ecologically appropriate and economically advantageous when compared to other techniques. Anaerobic digestion (AD) of lignocellulosic biomass is used to produce biogas. Recently, many researchers have focused on new sustainable alternatives for using agricultural and/or agro-industrial waste as biomass for biogas generation. In view of this, the aim of this research was to carry out a systematic literature review, as well as a bibliometric analysis of the relationship between the composition and biodegradability of lignocellulosic waste and the biochemical potential of methane with a view to its energy recovery. In this way, this work has built up a network of scientific collaboration over a period of 23 years, from 2000 to 2023. Methodologically, the scientific studies analyzed were qualitative and quantitative, using the Scopus database for systematic analysis, as well as the VOSviewer software for bibliometric analysis. At the end of the review, the result was an increase in publications related to the topic by searching for the keywords “lignocellulosic”, “lignin”, “BMP”, “biochemical methane potential” and “biodegradable” in the articles. In this context, 106 scientific articles published nationally and internationally were selected, with Triolo (2011) indicated as the main author under co-authorship analysis. Four networks were then constructed: citation of documents by authors, co-occurrence of keywords, most cited author and citation of documents by country. The countries that stood out with the highest number of publications in the context of the research were: China, France, the United States, Denmark and India. It can be concluded that research on the subject has shown a promising increase in recent years.

Keywords: lignin, biodegradation, biomass, bibliometrics, energy

INTRODUÇÃO

A energia sempre foi reconhecida como a base do desenvolvimento das civilizações ao redor do mundo. No final do século XIX, por exemplo, o mundo passou por um processo de modernização após a Revolução Industrial, principalmente devido à necessidade de novas fontes energéticas, além da energia térmica, muito usada naquele momento. As fontes de energia podem ser classificadas em renováveis, conhecidas também como energia limpa, como exemplo da energia solar, eólica, biomassa e a hídrica, que obtêm respostas da natureza em períodos relativamente curtos de tempo e as não renováveis, também chamadas de energias sujas, cujas reservas esgotam sempre que utilizadas, sendo que a reposição das mesmas na natureza pode levar milhões de anos, ou simplesmente, não mais ocorrer. (LUSTOSA; MEDEIROS, 2014)

O método de decomposição anaeróbica tem sido frequentemente reconhecido como a solução mais vantajosa do ponto de vista ambiental e econômico para aproveitar a energia de diversos resíduos biodegradáveis, tais como resíduos provenientes da agricultura, esterco de animais, e resíduos gerados pela indústria agroalimentar. Além disso, esse método também é aplicado na co-digestão desses materiais (ARAVANI et al., 2022). Diante disso, o aumento em pesquisas relacionadas ao potencial de geração de energia através da produção do biogás, provenientes de processos de decomposição anaeróbia por resíduos de matérias orgânicas têm apresentado resultados satisfatórios. Os resíduos lignocelulósicos, por exemplo, são estruturas orgânicas complexas presentes na forma de biomassa vegetal. (PEREIRA, 2019).

A lignocelulose são materiais fibrosos, que formam matrizes complexas constituídas de celulose, um rígido polímero de glicose, hemiceluloses, pectinas e outras gomas. Adicionalmente, essa matriz é impregnada com lignina, a qual pode ser considerada como uma cobertura de resina plástica. O principal obstáculo limitante para a utilização da biomassa lignocelulósica na produção de metano é a reduzida velocidade de hidrólise, devido à estrutura intrincada e compacta (LI et al., 2018).

A biomassa vegetal é constituída por: florestas, produtos agrícolas, gramíneas com alto rendimento em fibras, resíduos agroindustriais como exemplo o bagaço de cana de açúcar. (SOUSA et al., 2023). Rica em componentes químicos dos materiais lignocelulósicos classificados em celulose, hemicelulose e lignina, dentre outros componentes da parede

celular.

Aproveitar o potencial energético de biomassas lignocelulósicas requer estudos para entender a melhor estratégia de quebrar as estruturas recalcitrantes das fibras. No entanto, a complexa estrutura da biomassa lignocelulósica é resistente à biodegradabilidade pelos microorganismos devido às suas propriedades estruturais (CAVALCANTE et al., 2018) dificultando a utilização eficiente deste biorecurso. Sua composição inicial pode dar um indicativo desse grau de dificuldade através da avaliação de sua degradabilidade.

Nesse sentido, o trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica das publicações de documentos que relacionam aspectos da composição e biodegradabilidade de resíduos lignocelulósicos ao potencial bioquímico de metano.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Resíduos Lignocelulósicos

Os resíduos lignocelulósicos são uma grande alternativa para a geração de energia, devido a sua grande disponibilidade na natureza. A biomassa lignocelulósica é composta por vários tipos de resíduos agroindustriais, sendo principalmente por celulose (15-99%), hemicelulose (0-85%) e lignina (0-40%). Devido à variação na composição desses componentes em diferentes tipos de biomassa lignocelulósica, eles apresentam respostas distintas durante o processo de digestão anaeróbia (LI et al., 2018). Qualquer hemicelulose contendo lignocelulose gera uma mistura de açúcares somente após pré-tratamento ou em combinação com hidrólise enzimática. A hemicelulose se apresenta de forma positiva para o processo de digestão anaeróbia, sendo este processo responsável pela geração do biogás. Porém, diante da presença da celulose e lignina podem interferir diretamente de forma negativa nesse processo (EL ACHKAR, 2016).

A utilização de resíduos da agroindústria brasileira, além de fornecer diferentes alternativas de substratos para a fermentação, também ajuda nos problemas de poluição ambiental. Uma das possibilidades na degradação de materiais lignocelulósicos é o uso de microorganismos que produzam enzimas específicas que hidrolisam a celulose, que atuam sobre a porção hemicelulósica e as enzimas oxidativas, que atuam sobre a lignina (MENEZES; BARRETO, 2015).

Nas últimas décadas houve uma crescente demanda na busca por maior utilidade dos resíduos agroindustriais. Diante disso, a procura por meios alternativos sustentáveis que pudessem minimizar o impacto desses resíduos foi se desenvolvendo. O acúmulo desses

resíduos de biomassa aumenta a cada ano. A utilização de resíduos agroindustriais em bioprocessos vem se tornando uma alternativa de pesquisa na produção de substratos no processo de metanização.

Digestão Anaeróbia de Resíduos Lignocelulósicos

Resultados indicam que os materiais alimentares que contêm alta densidade de energia e substratos facilmente degradáveis apresentam alto potencial de produção de metano e biodegradabilidade. A transformação biológica desses substratos em energia é ambientalmente sustentável e economicamente viável quando comparada a outras técnicas. A digestão anaeróbia (DA) da biomassa lignocelulósica é empregada para produção de biogás (SEESATAT et al., 2021). Proporcionando assim, uma abordagem favorável quanto a valorização sustentável dos recursos de biomassa como uma futura economia de base biológica. Sendo dividido em quatro fases, hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, na qual transformam a matéria orgânica principalmente em uma mistura de metano e dióxido de carbono chamada biogás, podendo gerar eletricidade através de sua combustão completa (EL ACHKAR, 2016).

Durante a digestão anaeróbica, uma comunidade diversificada de microrganismos, principalmente bactérias e metanógenos, conduz o processo através de complexas etapas microbiológicas na ausência de oxigênio. É um processo biológico natural que facilita interações enzimáticas e metabólicas em compostos orgânicos (biomassa residual), transformando-os principalmente em substância estabilizada, metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂). As bactérias hidrolisam os componentes poliméricos complexos presentes na matéria-prima, em substâncias mais simples, onde proteínas, carboidratos e lipídios são convertidos em aminoácidos, açúcares e ácidos graxos de cadeia curta (GUERI et al., 2017).

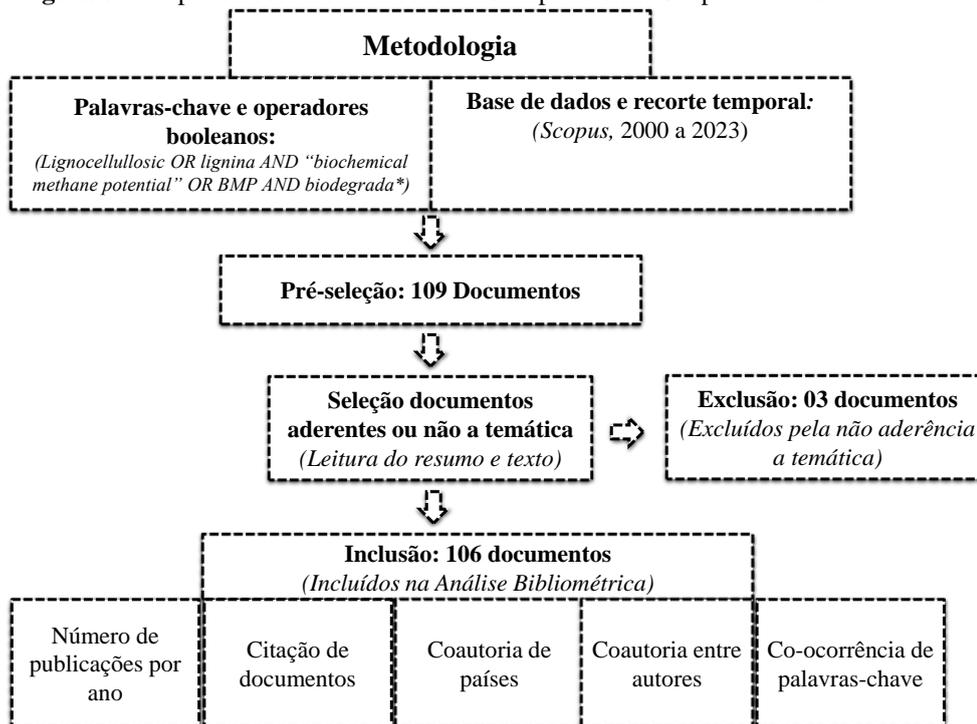
A produção de biogás e sua utilização para fins energéticos pode ser acessível em todas as escalas (pequena, média e grande) e usos (doméstico, agrícola e industrial), pois existem desde biodigestores de grande porte, com um custo mais elevado, até os mais simples, que podem ser construídos de forma mais rudimentar com materiais recicláveis, por exemplo. Isto demonstra que todos os cidadãos podem ter acesso a essa fonte de energia e contribuir para o desenvolvimento sustentável local (LINS; FURTADO; MITO, 2022). Os principais constituintes do biogás são o metano (60-70% v/v) e o dióxido de carbono (30-40% v/v); outros gases, como o sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono, também podem compor em pequena quantidade o biogás (SOUSA; RIZZATTO, 2022). De modo geral, a produção do biogás a partir da biodegradabilidade de matérias orgânicas

presentes em resíduos agropecuários e agroindustriais, apresenta-se como uma alternativa valiosa para a produção de energia, especialmente em propriedades rurais, contribuindo para a economia e a sustentabilidade ambiental, havendo um potencial significativo de produção de biogás através destas biomassas (SILVA; TREVISAN, 2019).

METODOLOGIA

Mediante a temática abordada neste trabalho, foi realizado um estudo bibliométrico através da coleta e análise de documentos científicos publicados nacionalmente e internacionalmente. A coleta de dados foi realizada no dia 16 de março de 2024, através da plataforma Portal Periódicos do *CapesCafe*. A base de dados científicos escolhida foi a *Scopus* por apresentar melhores resultados quando previamente comparada com as demais plataformas abertas disponíveis de modo a encontrar publicações que se enquadrassem na temática do projeto a ser desenvolvido. A Figura 01 mostra a Etapa 1 da coleta de dados na base *Scopus* e Etapa 2 da análise bibliométrica.

Figura 01: Etapas de coleta de dados através da plataforma Scopus e análise bibliométrica



Fonte: Própria (2024)

Foram utilizadas palavras-chave adotando a metodologia de relacionar as palavras em conjunto com os operadores booleanos “AND/OR” que representassem a temática do projeto. Diante disso, as pesquisas foram feitas adotando, o operador booleano “OR”, ligada às palavras (*lignocellulosic OR lignin*), correlacionando as palavras com o booleano “AND” (“*biochemical methane potential*” OR *BMP*) e “AND” (*biodegrada**) dessa forma, o

operador booleano “OR” foi empregado entre ambas as palavras, para que os resultados fossem atribuídos nas buscas, sem que estes entrassem em “conflito” como mostra na Figura 01. Ademais, o uso do caractere asterisco (*) e aspas (“”) na pesquisa foi relevante para melhorar o refinamento da busca, considerando que os asteriscos junto às palavras, faz com que a base de dados busque todas as variantes (sinônimos). O idioma utilizado na pesquisa foi o inglês, por ser apregado como um idioma universal, tendo em vista ser uma linguagem conhecida e difundida por todo o mundo, sobretudo o científico. Foi escolhido um recorte temporal de 23 anos (2000-2023).

Para o aprimoramento dos dados obtidos nas buscas, foi realizada uma análise e interpretação com afinamento dos documentos, com intuito de melhorar o direcionamento e aderência ao tema devido à possibilidade de encontrar artigos que se encaixem perfeitamente no eixo temático são usadas ferramentas digitais específicas para facilitar o entendimento dos grandes conjuntos de dados coletados e de suas correlações. Após selecionada a base com resultados mais relevantes obtidos pela Scopus, foram utilizados alguns softwares mais comumente empregados que possibilitaram uma análise eficaz dos documentos. Após a geração dos bancos de dados através da metodologia descrita, os dados foram exportados nos formatos de arquivo com "*CSV Excel e txt*" e analisados por meio do software *VOSviewer* “ferramenta de software para construção e visualização de redes bibliométricas”. Sendo principalmente útil para exibição de figuras e esquemas ilustrativos que visam tornar sua interpretação mais simplificada e de fácil entendimento (VAN ECK; WALTMAN, 2010).

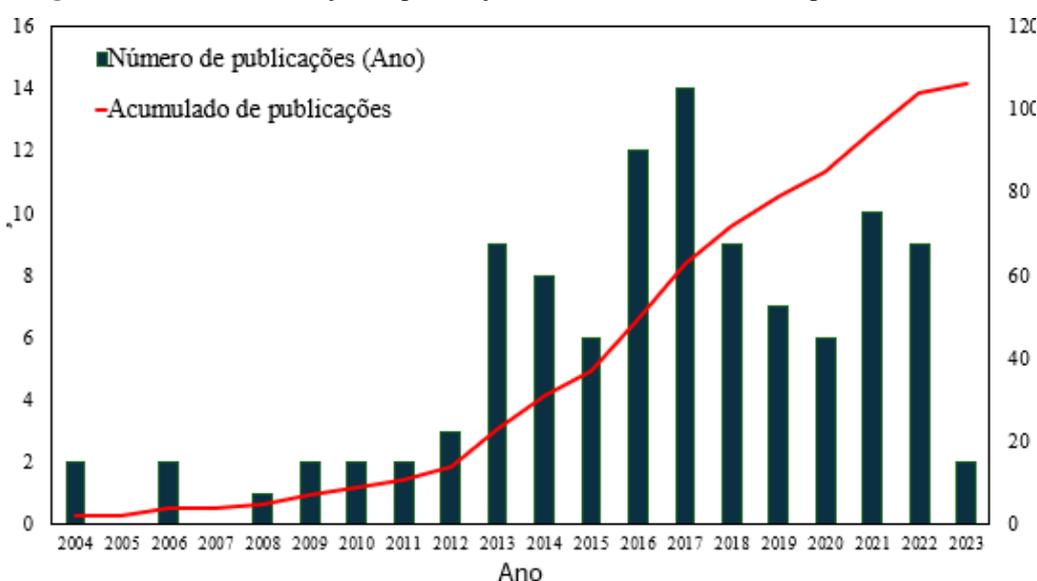
Além disso, foi realizada uma investigação quantitativa das amostras, de modo a facilitar uma análise sistemática dos dados por meio da estatística descritiva através do programa software *Excel*® e do *MapChart*® para elaboração do mapa mundial com os dados do top 5 dos países com maior número de documentos publicados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A pesquisa bibliométrica foi realizada através da plataforma *Scopus* e apresentou um importante conjunto de dados científicos resultou em 109 documentos, no período de 23 anos (2000 a 2023), contudo a temática em foco só apareceu a partir do ano de 2004. Dos

109 documentos iniciais submetidos a análises de forma individual e minuciosa do conteúdo apresentado (com intuito de selecionar e identificar possíveis documentos que não abordassem os objetivos propostos pelo projeto), 106 documentos foram considerado compatíveis e aderentes ao delineamento metodológico especificado. A temática teve foco nos documentos que citassem a correlação de teores de lignina, hemicelulose e celulose em resíduos lignocelulósicos de forma secundária. A Figura 02, mostra a evolução das publicações de documentos ao longo dos anos (2004 a 2023), referente a relações do teor de lignina em resíduos lignocelulósicos para produção do biogás.

Figura 02: Índice da evolução de publicações de documentos durante o período 2004 a 2023



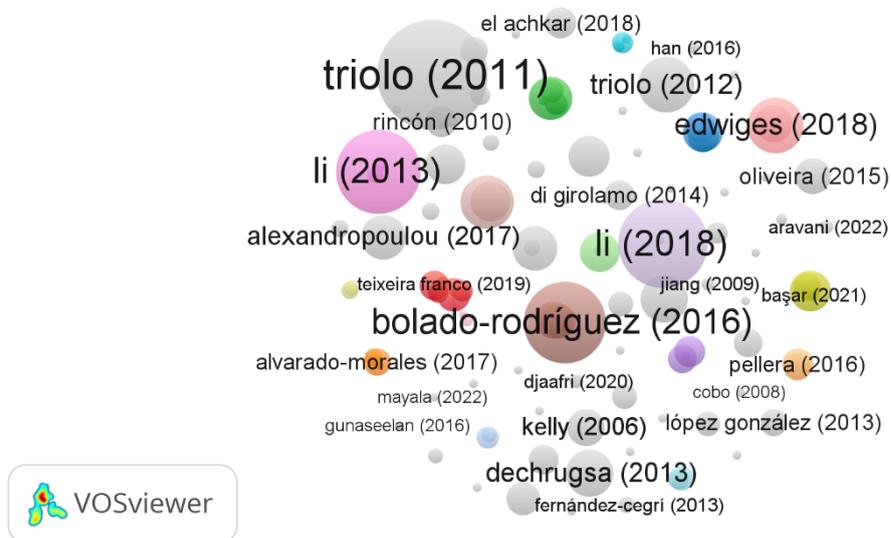
Fonte: Própria (2024)

Desde o ano de 2013, foi possível observar um aumento anual significativo, com um total de 81 documentos publicados entre 2013 e 2023, representando 75% do total de publicações. Além disso, é notório observar um pico máximo desses resultados no ano de 2017 com 14 documentos publicados com a temática aplicada. É possível observar na Figura 02 que nos anos de 2005 e 2007 não houveram publicações com a temática aplicada nesse estudo.

Análise bibliométrica de citação de documentos

Dos 106 documentos obtidos, todos documentos atendiam ao mínimo de citações (Figura 03). A rede bibliométrica mostra os documentos com relação de citação entre eles, divididos em setenta e cinco cluters. Na rede bibliométrica o tamanho dos círculos está representando o número de citações dos documentos no período de 2000 a 2023.

Figura 03: Rede bibliométrica de Citação de documentos no período de 2000 a 2023



Fonte: Própria (2024)

Vale ressaltar que esta rede bibliométrica mostra os resultados dos documentos mais citados sobre a temática estudada.

O Quadro 01 mostra o ranking dos cinco documentos com maior número de citações. O artigo mais citado foi o de Triolo et al. (2011) intitulado “*A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential*” publicado no periódico *Bioresource Technology*, com 335 citações. O artigo aborda uma revisão sobre a produção de biogás a partir de dejetos animais e a influência da matéria lignocelulósica na digestão anaeróbia desse resíduo, principalmente pela predominância da lignina devido consistir em resíduos de alimentos para animais onde os compostos de fácil degradação já tenham sido absorvidos pelos próprios animais e seus dejetos conter principalmente componentes de lenta degradabilidade.

Quadro 01: Top 5 de documentos mais citados no período de 2011 a 2018

Ranking	Título	Primeiro autor/ano	Número de citações	Periódico	DOI
1º	<i>A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during</i>	Triolo(2011)	335	Bioresource Technology	https://doi.org/10.1016/j.biortech.201

	<i>anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential</i>				1.07.026
2°	<i>Methane production through anaerobic digestion: Participation and digestion characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin</i>	Li (2018)	242	Applied Energy	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.055
3°	<i>Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates</i>	Li (2013)	225	Bioresource Technology	https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.063
4°	<i>Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse</i>	Bolado-rodríguez(2016)	211	Bioresource Technology	https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.11.047
5°	<i>Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste</i>	Edwiges (2018)	119	Waste Management	https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.030

Fonte: Própria (2024)

O segundo artigo mais citado foi “*Methane production through anaerobic digestion: Participation and digestion characteristics of cellulose, hemicellulose and lignin*” dos autores Li et al. (2018), publicado no periódico *Applied Energy*. O artigo explora o processo de digestão anaeróbia (AD), uma biotecnologia em que microrganismos convertem biomassa em biogás de metano (CH₄). Esse biogás pode ser utilizado como fonte renovável para gerar calor e eletricidade. Essa tecnologia é capaz de gerar bioenergia de forma econômica e reduzir a poluição ambiental, sendo cada vez mais implementada em diferentes setores para converter biomassa desperdiçada em bioenergia.

O terceiro artigo que se apresenta mais citado foi “*Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates*” que teve sua publicação na *Bioresource Technology* citado 225 vezes nos últimos 10 anos (2013-

2023). O arquivo teve por objetivo investigar a capacidade de produção de metano, a biodegradabilidade e as características cinéticas de uma ampla variedade de substratos orgânicos. O estudo utiliza um método unificado e simples para determinar esses parâmetros. Os resultados mostraram que matérias-primas que continham alta densidade energética e substratos facilmente degradáveis exibiram alto potencial de produção de metano e biodegradabilidade.

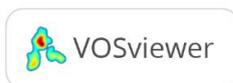
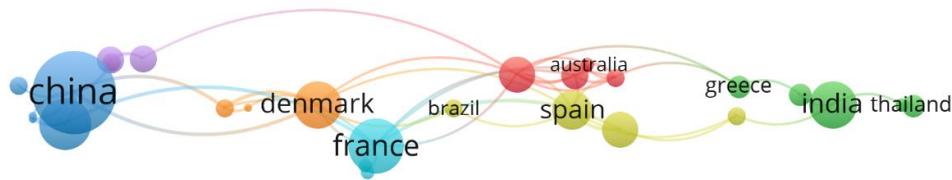
O quarto artigo mais citado foi o “*Effect of thermal, acid, alkaline and alkaline-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse*” tendo sua publicação no ano de 2016 na *Bioresource Technology* e sendo um total de 211 vezes citado. O estudo trata do efeito do pré-tratamento térmico, que tem sido aplicado para melhorar a digestão anaeróbia de diferentes substratos lignocelulósicos complexos de difícil degradação.

O quinto e não menos importante artigo que mais foi citado foi “*Influence of chemical composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste*” o artigo teve sua publicação no *Waste Management*, o estudo avaliou a composição química dos resíduos de frutas e hortaliças e sua influência na produção de metano. Neste estudo os resultados apresentados mostram que a lignina correlacionou-se de forma negativa com a produção de metano.

Análise bibliométrica de cooperação de coautoria de países

Dos 40 países que foram analisados, 28 possuem colaboração entre eles, como mostrado na Figura 04. O cluster (vermelho e verde) representado por 5 países; (azul e verde claro) por 4 países; (laranja, azul claro e roxo) com 3 países sendo representado em cada cor dos clusters respectivamente, totalizando 7 clusters nessa rede de países. O cluster com maior círculo foi a China (azul) representando o país com maior número de publicações de documentos (20 documentos).

Figura 04: Colaboração de co-autoria entre países no período de 2000 a 2023.

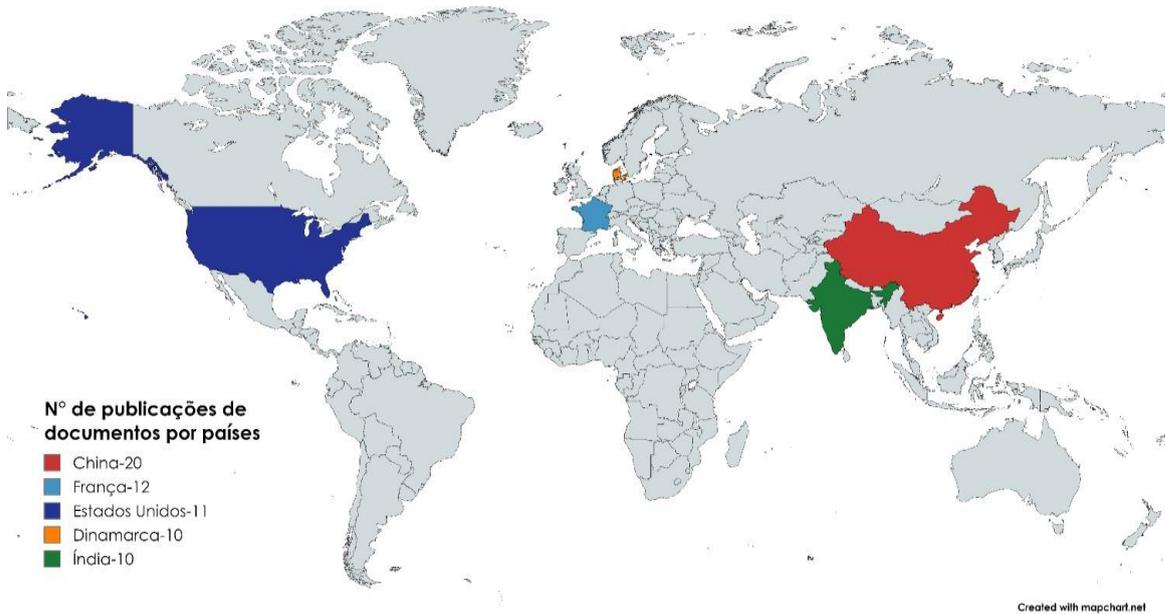


Fonte: Própria (2024)

A Figura 05 mostra a distribuição geográfica global de publicações de documentos mais citados. Os países que mais se destacaram com maior número de publicações foram: China, França, Estados Unidos, Dinamarca e Índia.

A China por ser um dos países mais populosos do mundo possui uma demanda crescente por energia e diante da vasta quantidade de resíduos gerados da agricultura demonstra uma valiosa fonte de produção de biogás sendo o país que mais aparece com maior número de documentos publicados, isso mostra que o país se apresenta como um dos mais interessados na temática analisada. A China está focada em aproveitar seus recursos naturais, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e contribuir para a sustentabilidade global. Ademais, é notório observar no mapa geográfico global, que países de continentes asiático e europeu se destacam com pesquisas e publicações de documentos que abordam a temática. O interesse pelo assunto surge em sua maioria por países produtores e/ou consumidores, sendo os dois maiores produtores agrícolas aparecendo entre os cinco países com mais estudos na área: China (20 publicações) e Estados Unidos (11 publicações). A presença destes países era esperada, devido a suas grandes produções e investimentos no setor da tecnologia.

Figura 05: Distribuição geográfica do número de publicações de documentos por países

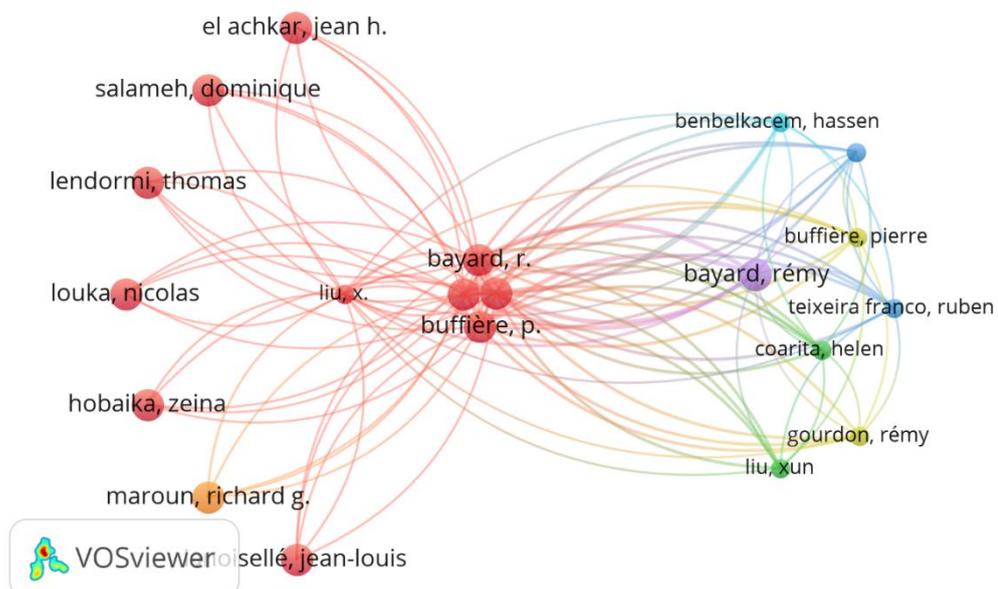


Fonte: Própria (2024)

Análise bibliométrica de Coautoria entre Autores

Dos 437 autores analisados, 324 atenderam a no mínimo 1 documento com no mínimo 10 citações como mostra na Figura 06. A rede bibliométrica mostra a coautoria dos autores com relação de citação entre eles, divididos em sete clusters. Na rede bibliométrica o tamanho dos círculos representa o número de citações dos autores no período analisado de 2004 a 2023. Destacando-se o cluster em vermelho com maior rede de colaboração de coautoria, contendo relação com a temática.

Figura 06: Rede de Coautoria entre autores



Fonte: Própria (2024)

No Tabela 01 está apresentado os principais autores e suas respectivas instituições. Destaca-se o número de documentos publicados pelos autores com a temática abordada.

Tabela 01: Principais autores e instituições

Autores	Nº de Documentos	Nº de Citações	País	Instituição
Kalamdhad, Ajay s.	5	191	Índia	Instituto Indiano de Tecnologia Guwahati
Chen, Dhang	3	488	China	Universidade de Tecnologia Química
Liu, Guangqing	3	488	China	Universidade de Tecnologia Química
Eskicioglu, Cigdem	3	189	Canadá	Universidade da Colúmbia Britânica Okanagan
Carrère, Hélène	3	162	França	INRAE
Lü, Fan	3	116	China	Universidade Tongji
Phoungthong, Khamphe	3	116	Tailândia	Universidade Príncipe de Songkla
Zheng, Wei	3	116	China	Universidade Tongji

Fonte: Própria (2024)

Vale destacar, que o autor com maior número de documentos publicados foi Kalamdhad, porém o autor com maior número de citações tendo sobre análise de coautoria indicado o Triolo (2011) como o principal autor.

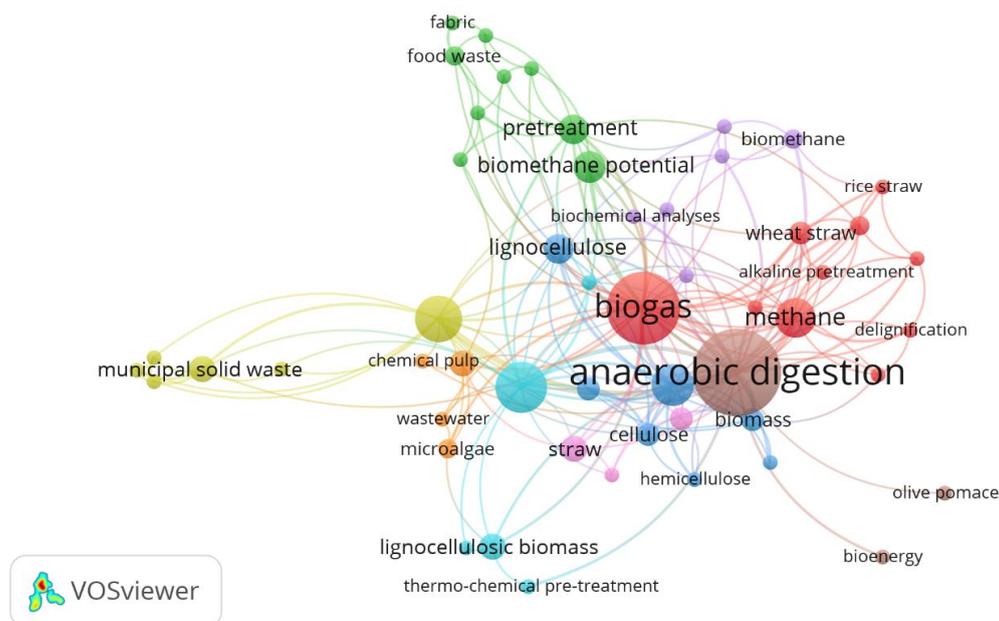
Durante o período de tempo selecionado do estudo, as publicações foram feitas por diversos pesquisadores e diferentes instituições acadêmicas, destacando-se a China com o maior número de pesquisadores e quantidade de artigos publicados por entidades independentes. E a França apresentou-se como o segundo país com maior número de documentos publicados.

Análise bibliométrica de coocorrência de palavras-chave

Para facilitar o encontro de documentos semelhantes, diante disso foram utilizadas ferramentas para classificação dos 106 documentos obtidos na base de dados da Scopus. Para tanto foram criadas conexões entre diferentes documentos, relacionando-os uns aos outros nos chamados “*Clusters*” obtidos através do software *Vosviewer*, estes são grupos que compartilham alguma semelhança, dessa forma é possível identificar as principais palavras-

chave e entender o caminho que as pesquisas vêm tomando com base nos assuntos que os artigos têm abordado com mais frequência. Estão representados na Figura 07 as conexões criadas dos assuntos e temas pesquisados, onde é possível diferenciar os clusters por cores e as palavras mais importantes por tamanho do círculo no qual se encontram na “Rede de Palavras-Chave”.

Figura 07: Rede bibliométrica de palavras-chave

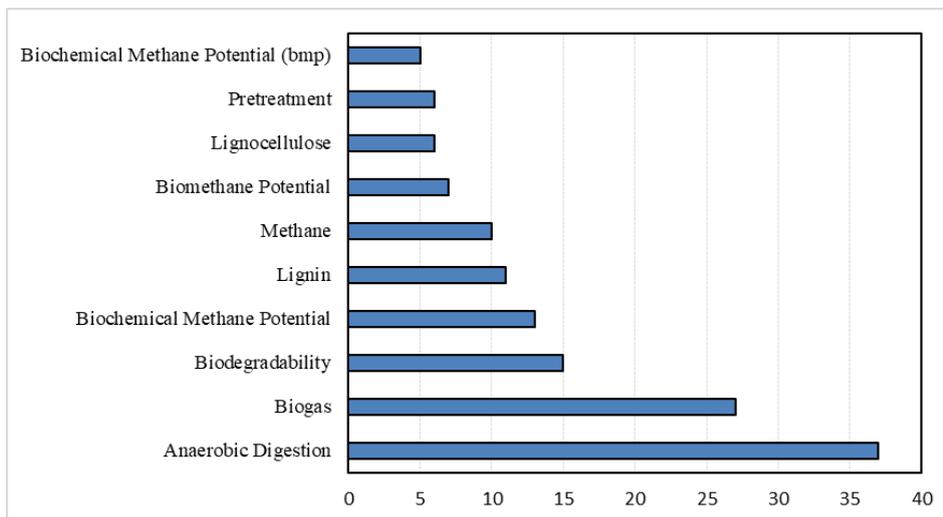


Fonte: Própria (2024)

O Cluster vermelho, é dedicado a área dos biocombustíveis, como é possível ver pela presença de palavras como “*Biogas, Methane e Biofuel*”, além dos biocombustíveis, também se encontram os métodos para sua geração, como “*Anaerobic Digestion e Biodegradability*” no Cluster marrom, caracterizando o cluster dedicado a energia derivada de biocombustíveis provenientes de processos biológicos. O Cluster Verde, onde se encontra a palavra “*Biomethane Potential*” não tão poderosa quanto as duas principais do cluster vermelho, mas sendo a principal a interligar os cluster verdes com os demais. O Cluster Verde, assemelha-se aos resíduos agroindustriais, e outros resíduos industriais biodegradáveis, pela presença de palavras como “*Anaerobic Biodegradability, Co-Digestion e Food Waste*”, caracterizando o cluster dos Resíduos Biodegradáveis. O Cluster Azul apresenta palavras relacionadas a geração de biomassa lignocelulósica, onde se encontra o produto final de maior interesse para este estudo, a Biomassa Lignocelulósica. Além disso, as palavras para o qual a maioria dos estudos fora direcionada, como “*Biodegradability, Cellulose, Hemicellulose e Lignin*”, caracterizando o Cluster de Biomassa. Contudo, sendo a

palavra “*anaerobic digestion*” com Cluster Marrom com maior força apresentando um total de 37 ocorrências, seguida pela palavra “Biogas” com 27 ocorrências representando as palavras-chaves com maior relevância com a temática abordada como mostra na Figura 08.

Figura 08: Ranking de 10 coocorrência de palavras chave



Fonte: Própria (2024)

CONCLUSÕES

Neste presente estudo, mostrou que o interesse na tecnologia de produção de biogás a partir de resíduos lignocelulósicos tem crescido nos últimos anos. Na análise bibliográfica alguns dos documentos destacaram que o uso de pré-tratamentos pode aprimorar o rendimento da produção de biogás. De maneira geral, a digestão anaeróbia, conforme empregada por alguns dos autores desse estudo, é uma prática que pode conciliar desenvolvimento econômico com sustentabilidade, ao recuperar energia a partir dos resíduos gerados em grande quantidade anualmente.

Na análise bibliométrica, dos 106 documentos obtidos na base de dados *Scopus*, todos tinham no mínimo uma citação, dentre esses os cinco documentos com maior número de citações foram Triolo et al. (2014), Li (2018), Li et al. (2013), Rodríguez (2016) e Edwiges (2018).

As pesquisas científicas sobre a temática se concentram em cerca de 28 países com relação de coautoria, destacando-se a China com 20 publicações que abordam a temática.

As palavras-chave com maior número de frequência para representar o tema central da pesquisa foram “*lignocellullosic*”, “*lignin*”, “*BMP*”, “*biochemical methane potential*” e “*biodegradable*”.

Diante dessa análise bibliométrica realizada, pode-se obter resultados satisfatórios que mostra a importância em pesquisas para o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos, sendo assim, espera-se que estudos relacionados a temática se apresente com crescimentos futuros revelando a importância do aproveitamento desses compostos gerados pela biodegradabilidade dos resíduos, como também, sua valorização na produção bioquímica de metano.

REFERÊNCIAS

- ARAVANI, V. P.; TSIGKOU, K.; PAPADAKIS, V. G.; KORNAROS, M. Biochemical Methane potential of most promising agricultural residues in Northern and Southern Greece. **Chemosphere**, v. 296, p. 133985, 2022.
- BOLADO-RODRÍGUEZ, SILVIA; TOQUERO, CRISTINA; MARTÍN-JUÁREZ, JUDIT; *et al.* Effect of 17ignnin, acid, 17ignnina17 and 17ignnina17-peroxide pretreatments on the biochemical methane potential and kinetics of the anaerobic digestion of wheat straw and sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 201, p. 182–190, 2016.
- CAVALCANTE, P. A. W.; COÊLHO, D. F., SILVA, C. F.; DE SOUZA ABUD, A. K.; SOUZA, R. R. Utilização de resíduos lignocelulósicos na produção de celulasas por *Aspergillus niger* em fermentação em estado sólido. **Scientia Plena**, v. 14, n. 6, 2018.
- EDWIGES, T.; FRARE, L.; MAYER, B.; LINS, L.; TRIOLO, J. M.; FLOTATS, X.; DE MENDONÇA COSTA, M. S. S. Influence of lignina composition on biochemical methane potential of fruit and vegetable waste. **Waste Management**, v. 71, p. 618–625, 2018.
- EL ACHKAR, J. H.; Anaerobic digestion of grape pomace: Biochemical characterization of the fractions and methane production in batch and continuous digesters. **Waste Management**, v.50, p. 275-282, 2016.
- GUERI, M. D.; DE SOUZA, S. N. M.; KUCZMAN, O. parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 1, p. 17, 2017.
- LUSTOSA, G.N.; MEDEIROS, I.H.B. Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos. **Monografia de Projeto Final**, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 72, 2014.
- LI, W.; KHALID, H.; ZHU, Z.; *et al.* Methane production through anaerobic digestion: Participation and digestion characteristics of lignina. **Applied Energy**, v. 226, p. 1219–1228, 2018.
- LI, Y.; ZHANG, R.; LIU, G.; *et al.* Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. **Bioresource Technology**, v. 149, p. 565–569, 2013.

LINS, L. P.; PADILHA, J. C.; FURTADO, A. C.; *et al.* O aproveitamento energético do biogás como ferramenta para os objetivos do desenvolvimento sustentável. **Interações (Campo Grande)**, p. 1275–1286, 2022.

PEREIRA, N. R. L.; ANJOS, F. E.; MAGNAGO, R. F. Lignocellulosic Residues of Banana Cultivation: A Review of the Cellulose Extraction Chemical Processes. **Revista Virtual de Química**, v. 11, n. 4, p. 1165–1179, 2019.

MENEZES, C. R.; BARRETO, A. R. Biodegradação de resíduos lignocelulósicos por fungos basidiomicetos: Caracterização dos resíduos e estudo do complexo enzimático fúngico. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, p. 1365-1391, 2015.

SEESATAT, A.; RATTANASUK, S.; BUNNAKIT, K.; *et al.* Biological degradation of rice straw with thermophilic lignocellulolytic bacterial isolates and biogas production from total broth by rumen microorganisms. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 104499, 2021.

SOUSA, O.; LUCAS, M. R.; ARANHA, J. Análise do potencial de Angola para a instalação de centrais termoelétricas a biomassa vegetal. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. spe, p. e277511, 2023.

SOUSA, A. L.; RIZZATTO, M. L. Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos: uma revisão. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 2, 2022.

SOUZA, O.; FEDERIZZI, M.; COELHO, B.; *et al.* Biodegradação de resíduos lignocelulósicos gerados na bananicultura e sua valorização para a produção de biogás. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 438–443, 2010.

TRIOLO, J. M.; SOMMER, S. G.; MØLLER, HENRIK B.; *et al.* A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 20, p. 9395–9402, 2011.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Text mining and visualization using VOSviewer. **arXiv preprint arXiv:1109.2058**, 2011.