

A BIOENERGIA SOB AS PERSPECTIVAS DA ECONOMIA CIRCULAR: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

RESUMO

As energias renováveis (ER) tem sido um tema de pesquisa crescente, pois apresenta como opção adequada e segura à transição energética, dentre as fontes de ER destaca-se a bioenergia de origem florestal que é uma fonte de energia limpa. Buscando cobrir a necessidade de compreender quais são os principais autores e revistas mais relevantes na área da bioenergia florestal no contexto da economia circular, bem como, quais são os principais temas dessas pesquisas, para pontenciar o conhecimento acadêmico e fortalecer as pesquisas científicas. Foi realizada uma revisão sistemática adotadas técnicas da bibliometria na plataforma *Scopus* e *Web of Science*, entre os anos de 1945 a 2020, após a obtenção destes dados foram manipulados por meio dos softwares RStudio, Bibliometrix, Vosview e Excel, onde foram os instrumentos bibliométricos para seleção e classificação dos artigos. Os principais resultados mostraram que os primeiros estudos de alto impacto (≥ 1) iniciaram em 2003, com aumento significativo das publicações durante 2018 a 2020, sendo os Estados Unidos, o país com maior contribuição, representando 16% das publicações. A Itália foi a que se destacou na quantidade de publicações na Europa, com um total de 6 artigos. Os periódicos mais significativos da amostra foram o *Energies*, *Energy e Sustainability*, com 5 artigos cada, em seguida a *Journal of cleaner production*, com 4 publicações, posteriormente a *Forests e Scandinavian journal of forest research*, com 3 publicações cada. A produção de bioenergia à base de madeira e seus derivados é um tema oportuno de amplo interesse, a bioenergia florestal apresenta uma opção adequada e segura à transição energética.

Palavras chave: Biomassa Florestal; Bibliometria e Mercado Florestal.

BIOENERGY FROM THE PERSPECTIVES OF THE CIRCULAR ECONOMY: A SYSTEMATIC REVIEW

ABSTRACT

Renewable energies (ER) have been a growing research theme, as it presents as an appropriate and safe option for the energy transition, among the sources of ER stands out the bioenergy of forest origin that is a source of clean energy. Seeking to cover the need to understand which are the main authors and journals most relevant in the area of forest bioenergy in the context of circular economy, as well as, what are the main themes of these researches, to enhance academic knowledge and strengthen scientific research. A systematic review adopted techniques of bibliometry in the Scopus and Web of Science platform, between the years 1945 and 2020, after obtaining these data were manipulated through the software RStudio, Bibliometrix, Vosview and Excel, where were the bibliometric instruments for selection and classification of articles. The main results showed that the first high-impact studies (≥ 1) began in 2003, with a significant increase in publications during 2018 to 2020, with the United States being the country with the highest contribution, representing 16% of publications. Italy stood out in the number of publications in Europe, with a total of 6 articles. The most significant journals in the sample were *Energies*, *Energy and Sustainability*, with 5 articles each, followed by the *Journal of cleaner production*, with 4 publications, later *forests and Scandinavian journal of forest research*, with 3 publications each. The production of bioenergy based on wood and its derivatives is a timely theme of broad interest, forest bioenergy presents an appropriate and safe option for the energy transition.

Keywords: Forest Biomass; Bibliometrics and Forest Market.

1. INTRODUÇÃO

A bioenergia é uma fonte de energia limpa que está em crescimento na sociedade moderna e no contexto da economia circular. Amparada por políticas internacionais e pelo aumento do custo dos combustíveis fósseis, a bioenergia está se tornando cada vez mais comum no combate as mudanças climáticas (RIDING *et al.*, 2015). A *Food and Agriculture Organization* – FAO, registrou mais de 9 bilhões de toneladas de culturas florestais produzidas em 2017, e mais de 5 bilhões de metros cúbicos de produtos florestais (madeira e placas, excluindo papel e celulose) (FAO, 2019). O setor de bioenergia apresenta um potencial único, para enfrentar os desafios na agricultura, geração de energia e no descarte de resíduos florestais. Através do desenvolvimento de tecnologias para redução de resíduos sólidos, com soluções de berço ao túmulo dos produtos, os ganhos econômicos e ambientais do setor da bioenergia colaboram com a economia circular e o desenvolvimento sustentável (RIDING *et al.*, 2015).

As revisões sistemáticas podem orientar a prática de pesquisas, com base em uma coleta de dados pelo pesquisador. O escopo da revisão sistemática é fornecer um processo altamente estruturado de revisão das evidências existentes, o número de revisões sistemáticas publicadas na literatura está aumentando em um ritmo constante (BASTIAN *et al.*, 2010). Existem diversos estudos de revisão sistemática que qualificam a biomassa florestal na produção de energia, com o objetivo de mitigar as mudanças climáticas, contudo ainda é necessário estabelecer um referencial teórico de quais são os principais autores e revistas que estão publicando sobre esta temática.

Nas últimas décadas, muitas publicações revisadas por pares enfocaram a bioenergia, frequentemente considerada uma parte fundamental da solução para os desafios globais (mudança climática e degradação ambiental). Existem estudos recentes de revisão sistemática, que valida a técnica da bibliometria na avaliação da bioenergia no contexto da economia circular e seu impacto no mercado florestal, tais estudos tem importância na tentativa de contribuir com o avanço científico e compreensão do desenvolvimento de reaproveitamento energético. A exemplo dos trabalhos de Manniello *et al.* (2020), Sirous *et al.* (2020), da Cruz Tarelho & Dias Martins (2020), Acevedo *et al.* (2020), Kairyte *et al.* (2020), Riding *et al.* (2015) Sherwood, (2020) & Vlachokostas *et al.* (2020) os quais afirmam que o setor de bioenergia tem potencial na formação de uma economia circular e que existe uma demanda do mercado em produtos florestais para fins energéticos. Os estudos de Alavi-Borazjani *et al.* (2020), Raphael Asada *et al.* (2020), Ferreira-Santos *et al.* (2020) & Vlachokostas *et al.* (2020) evidenciam que este potencial do mercado florestal, contém melhorias ambientais e a difusão de tecnologias verdes.

Na tentativa de contribuir com o avanço intelectual e compreensão do tema, bem como, diante da relevância científica sobre o desenvolvimento da bioenergia no contexto da economia circular e da dispersão conceitual sobre os produtos florestais para fins energéticos, este estudo investigou a produção científica sobre bioenergia de base florestal, aplicando uma análise bibliométrica, com o objetivo de analisar as principais publicações referentes a economia circular no mercado bioenergético, além de apurar os principais autores e as principais lacunas encontradas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Seleção dos documentos para análise

A análise e as buscas neste presente estudo foram realizadas em etapas, para melhor compreensão, que são descritas a seguir e está enraizado na técnica bibliométrica, no qual, analisa de modo estatístico a produção científica (publicações). A bibliometria e seu

estabelecimento como ferramenta matemática para dimensionamento da produção científica, visa quantificar a comunicação da escrita científica, contendo várias etapas no processo de análises (DOMINGUES *et al.*, 2018; REIS, 2015) Este trabalho não abordará as biomassas oriundas dos biocombustíveis líquidos (etanol, biodiesel animal, vegetal e de algas).

As etapas da bibliometria adotadas nesta pesquisa são adaptadas a partir de Tranfield *et al.* (2003) e apresentam informações obtidas a partir do software *RStudio* como a ferramenta Bibliometrix, Vosview e dados no Excel, que permite ponderar o número do artigo pelo fator de impacto (FI), um dos instrumentos bibliométricos existentes, e tem como objetivo aferir a produção científica dos autores, a qualidade das publicações, à respectiva revista para identificar a relevância do artigo (GARFIELD, 1999; ARIA & CUCCURULLO, 2017; DOMINGUES *et al.*, 2018). O Quadro 1 apresenta as etapas de busca na pesquisa e seleção dos artigos. Uma revisão detalhada e sistemática da literatura científica pode contribuir para o desenvolvimento de uma base de conhecimento útil, para gerar intelecto sobre as áreas de estudo e para apontar novas oportunidades de pesquisa. Adiante descreve-se as etapas que foram utilizadas no estudo.

Etapa 1: Definição de palavras-chave.

Assim, utilizando-se o banco de dados da *Scopus* e *Web of Science* (WoS) em 2020, foram realizadas duas pesquisas contemplando o tema de energia florestal (termos relacionados) e economia circular (termos relacionados). A primeira pesquisa, tinha como termos de sequência de pesquisa relacionados com mercado florestal, biomassa (e seus sinônimos), a fim de não perder conteúdos relevantes. A busca foi conduzida pelo “título” e “título” em WoS e no Scopus. Na segunda pesquisa, tinha como termos de sequência de pesquisa relacionados com economia circular (e seus sinônimos) a fim de não perder conteúdos relevantes. A busca foi conduzida pelo “título” e “tópico” em WoS e no Scopus.

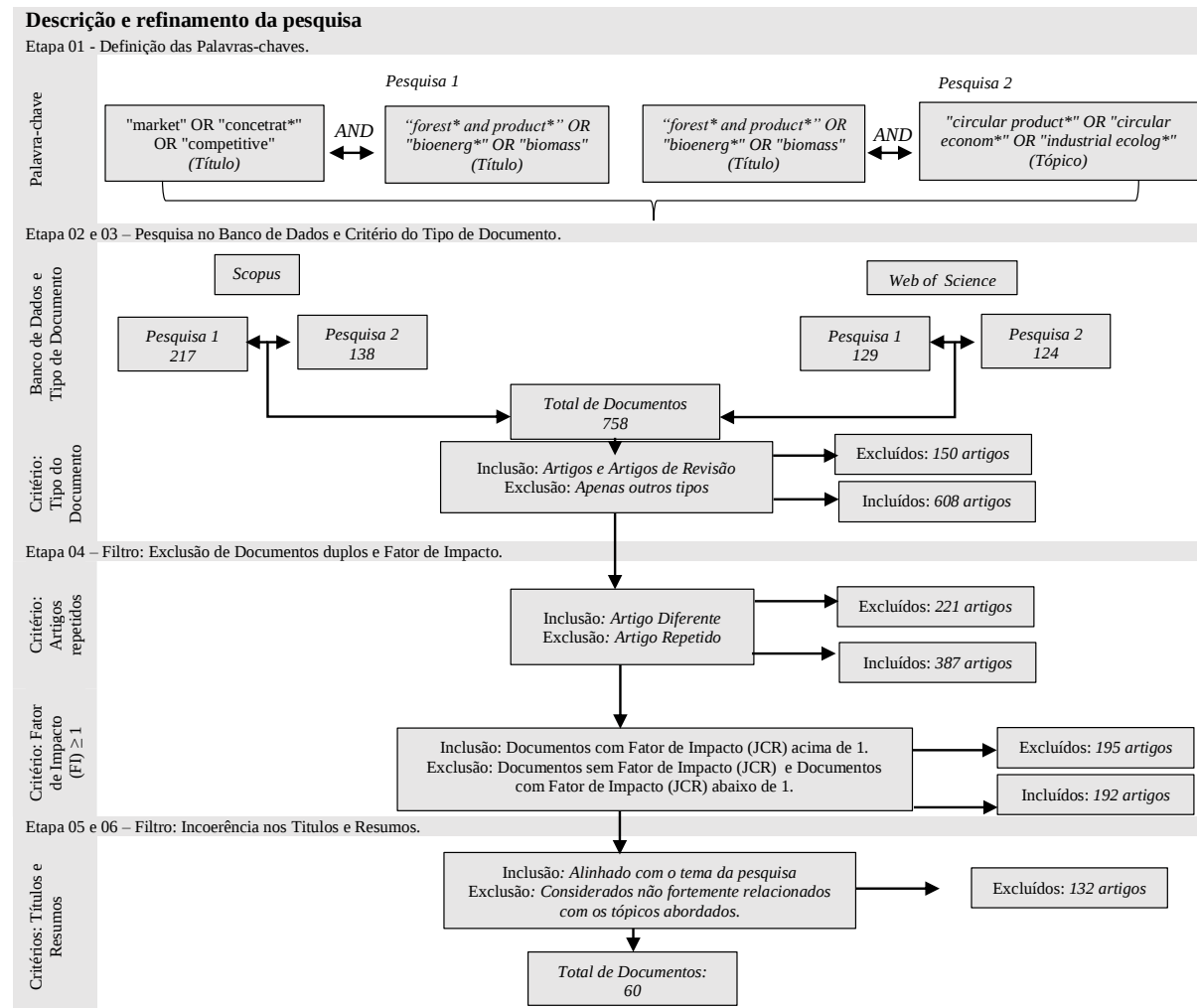
Etapa 2 e 3: Pesquisa no banco de dados e Critério de documento

Foram pesquisados artigos nas bases de dados Scopus e Web of Science, durante o período (1945-2020). O conjunto das palavras-chave utilizadas na pesquisa foi usando símbolos de truncção e operadores booleanos, tanto na primeira pesquisa como na segunda pesquisa, como segue: palavras-chaves da primeira pesquisa: ("market" OR "concentrat*" OR "competitive") AND ("forest* and product*" OR "bioenerg*" OR "biomass"). Palavras-chaves da segunda pesquisa: ("forest* and product*" OR "bioenerg*" OR "biomass") AND ("circular product*" OR "circular econom*" OR "industrial ecolog*"). Após a busca nas bases de dados, obteve-se um total de 758 artigos (conforme observado no Quadro 1). Vários critérios foram determinados e utilizados na pesquisa. Os critérios de inclusão ou exclusão estavam relacionados ao conteúdo do documento e ao fator de impacto da revista.

Etapa 4: Exclusão de Documentos duplos e Fator de Impacto (<1).

Os artigos foram selecionados e examinado a partir do software *RStudio* com a ferramenta bibliometria, no qual identificou os arquivos duplicados. Após a análise de arquivos duplicados gerou-se uma planilha com informações relevantes dos artigos. Ferramenta que auxilia na escolha do fator de impacto da revista e às questões relevantes, estabelecendo uma série de critérios e técnicas de classificação, nos quais foram aplicadas, a fim de que os estudos relevantes e mais impactantes fossem totalmente alinhados, uma vez que a avaliação de todos os documentos encontrados seria impraticável em tempo hábil. Subsequente, artigos duplicados foram excluídos e artigos com fator de impacto menor que 1. Dos 608 artigos, 192 permaneceram.

Quadro 1. Definição e refinamento da amostragem da revisão sistemática de literatura do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular.



Fonte: Adaptado de Bezerra *et al.* (2020).

Etapa 5 e 6: Títulos e Resumos

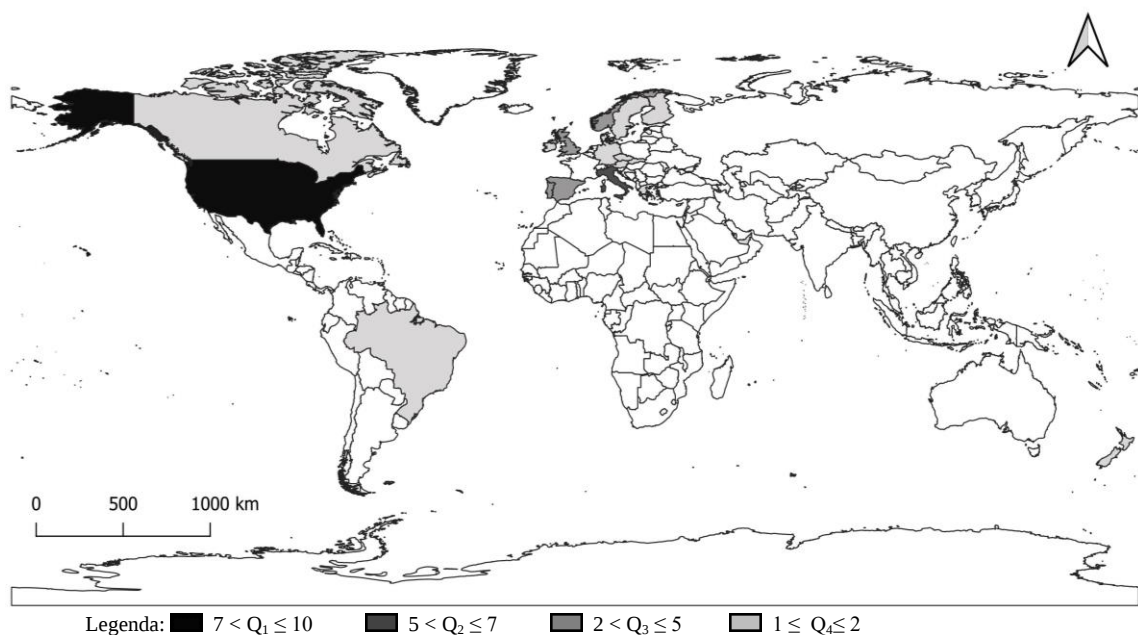
Após leitura do título, uma vez que havia estudos que não se enquadravam nesta pesquisa, como também foi aplicada uma leitura dos resumos. Após a leitura dos resumos, os demais estudos que não foram encontrados vinculados aos tópicos de interesse deste estudo foram excluídos, portanto, 60 artigos permaneceram. Durante a leitura dos artigos selecionados, se o artigo não abordasse os temas de interesse deste estudo, ele foi excluído. Não obstante na seção de resultados deste artigo, as análises realizadas foram baseadas nos conjuntos de documentos identificados como pesquisas de alto impacto, dado os métodos e abordagens utilizados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta a distribuição espacial dos países, por quartis, das publicações ao longo do período de 2003 a 2020. Foram encontradas 60 publicações distribuídas em 20 países. O Q₁ composto por Estados Unidos, registrou a maior quantidade de trabalhos, com 10 publicações, representando 17% das publicações. A Itália apresentou uma relevante quantidade de publicações na Europa, integrando isoladamente o Q₂ com a produção de 6 artigos. Noruega,

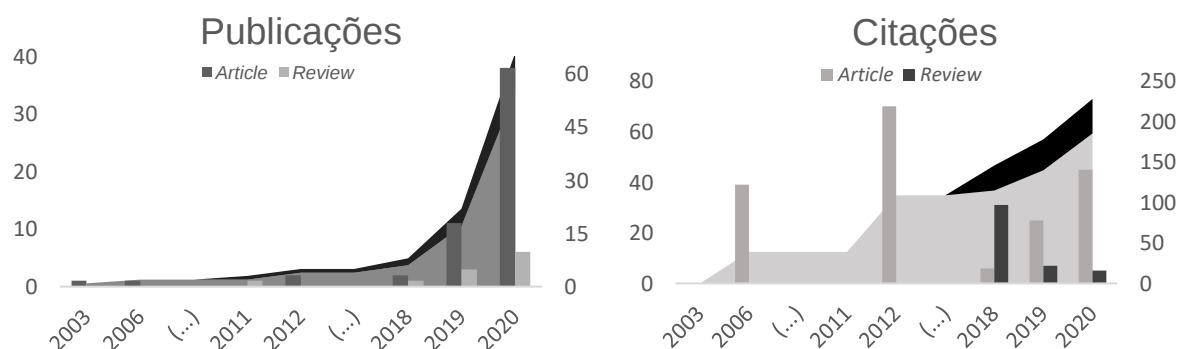
Espanha, Portugal, Reino Unido, Finlândia, Grécia, Irlanda e Suécia, que integram o Q3 com 21 publicações. Por fim, o Q4 formado pelos demais países com 1 publicação cada. É importante destacar que houve estudos nos quais não tiveram países específicos em suas pesquisas, mas blocos econômicos (união europeia), os quais não fizeram parte dos quartis. O bloco econômico contou com 10 publicações. Por fim, 4 publicações que não fazem referência nem a países nem a blocos econômicos. A Figura 2 apresenta a evolução das publicações e das citações (Artigos e Artigos de Revisão) do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo, anual e acumulado, no período de 2003 a 2020. O primeiro artigo da amostra é datado do ano de 2003, este não teve citação entre os artigos da seleção, tal artigo estudou e discutiu os custos de diferentes tecnologias para fornecimento de energia, e expressou quais custos seriam necessários na mitigação de CO₂.

Figura 1. Distribuição espacial dos países, por quartis, das publicações do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo, no período de 2003 a 2020.



Fonte: Os autores (2020).

Figura 2. Evolução das publicações e das citações (Artigos e Artigos de Revisão) do mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo no período de 2003 a 2020.



Fontes: Os autores (2020).

Em 2006, o artigo que apresentou um modelo comercial e de mercado para projetar o uso de bioenergia, baseada em combustíveis florestais e subprodutos da indústria florestal, na Noruega para três cenários dos preços futuros de eletricidade e petróleo. Os impactos sobre a silvicultura e as indústrias florestais dos diferentes cenários de preços de energia também foram estudados. A vantagem da metodologia sugerida é que ela permite avaliações do potencial econômico da bioenergia, levando em consideração a competição por matérias-primas, a demanda específica de calor de várias regiões, inter-regional e internacional do mercado energético (FOLSLAND BOLKESJØ; TRØMBORG; SOLBERG, 2006). Essa concepção permeia os objetivos dos trabalhos selecionados.

A partir de 2018 foi verificado um paulatino crescimento na quantidade de publicações, atingindo um maior pico no ano de 2020 com 43 publicações de artigos que somaram 50 citações. O interesse por alcançar as metas e acordos globais com o objetivo de reduzir o aquecimento global e a difusão do conhecimento de novas tecnologias que colaborem para redução das emissões de GEE aprovado em 2015 e oficializado em 2016, podem ter impulsionados tais publicações nos anos de 2018 a 2020. Para a entrada em vigor do acordo, que irá substituir a partir de 2020, o atual Protocolo de Kyoto, 55 países que representam 55% das emissões de gases de efeito estufa precisavam ratificá-lo. Isso aconteceu em 4 de novembro de 2016. Até junho de 2017, 195 países assinaram o acordo, e 147 destes, entre eles o Brasil, o ratificaram.

A Tabela 1 apresenta a classificação dos periódicos de maior impacto, classificado pela maior quantidade de publicação, organizados com as citações, no período de 2003 a 2020. Os principais periódicos da amostra foram o *Energies*, *Energy* e *Sustainability*, com 5 artigos cada e 14 citações somando as três revistas, em seguida aparece a *Journal of cleaner production*, com 4 publicações. A *Forests* e *Scandinavian journal of forest research*, com 3 publicações cada. A *Forest science* apesar conter apenas 2 artigos foi que teve maior impacto médio de citações por artigo, que foi de 28.

Tabela 1. Classificação dos periódicos de maior impacto, organizado em ordem decrescente em quantidade de publicação, no período de 2003 a 2020.

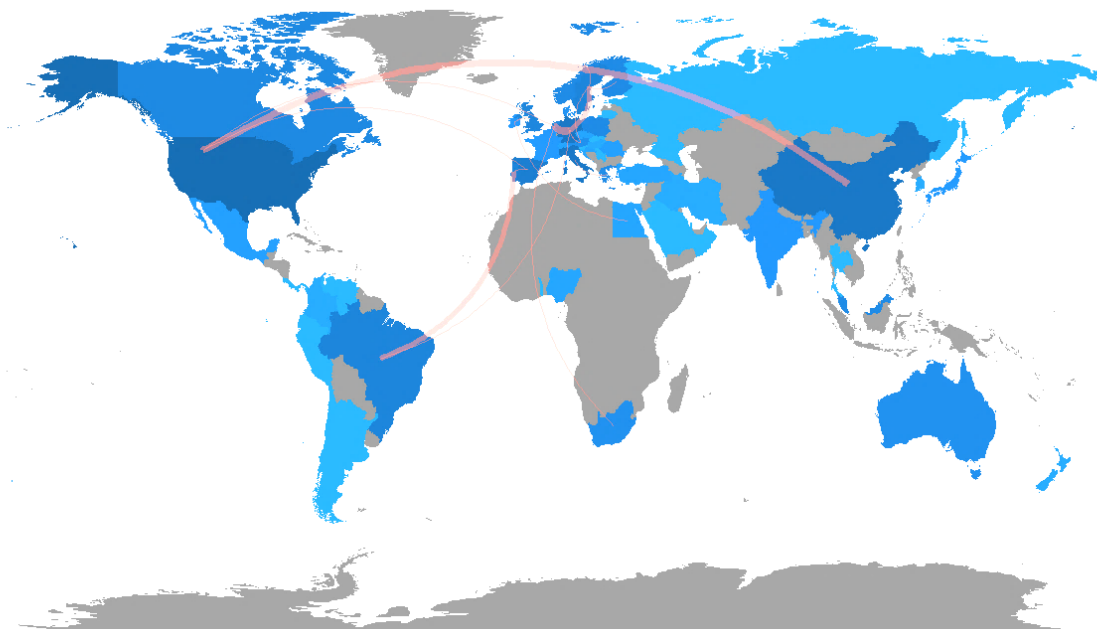
Revista	Quantidade	Citações
<i>Energies</i>	5	1
<i>Energy</i>	5	4
<i>Sustainability</i>	5	9
<i>Journal of cleaner production</i>	4	35
<i>Forests</i>	3	2
<i>Scandinavian journal of forest research</i>	3	42
<i>Agronomy-basel</i>	2	1
<i>Energy policy</i>	2	8
<i>Forest science</i>	2	56
<i>Journal of industrial ecology</i>	2	5
<i>Renewable energy</i>	2	5
<i>Agribusiness</i>	1	0
<i>Agroforestry systems</i>	1	19
Outras revistas	23	32
Total	60	219

Fonte: Os autores (2020).

O Brasil e Alemanha são os países que mais interagem em pesquisas com outros países, Brasil tem interações com Portugal (3) e Alemanha (2). É possível inferir que essas interações evidência de forma direta suas relações nas publicações e indireta os interesses de mercado

entre os países. Considerou para esta análise no mínimo 2 frequências de interações entre os países, representado na Figura 3. Os países têm como escopo principal, tópicos relacionados a mercado mundial, bioenergia e economia circular em seu escopo científico. O que indica que existe interesse dos países em práticas sustentáveis e políticas que proporcionem uma economia circular no setor bioenergético. Os mapas visuais de co-ocorrência foram construídos auxiliados pela ferramenta de software VOSviewer, baseado em dados de texto, considerando títulos e resumos, utilizando o método de contagem completa do VOSviewer com um número mínimo de ocorrências de 43 termos, utilizando os 60 artigos de alto fator de impacto, que formam o objeto de análise.

Figura 3. Distribuição espacial dos países, que colaboram entre si nas publicações de mercado bioenergético sob perspectivas da economia circular no mundo.



Fonte: Os autores (2020).

Entre as 60 publicações, alguns artigos apresentaram grande abrangência e contemplaram mais de um cluster temático, as principais observações foram para: custos, resíduos florestais e sistemas florestais em 2016. Bioenergia, biomassa, emissões de carbono e resíduos estiveram presente nas publicações em 2018 e em 2020 verificou-se uma maior ocorrência das palavras-chave como: economia circular, biomassa florestal, bioeconomia, emissões de carbono e mudança climática. A maior representatividade dessas palavras-chave pode inferir a relevância atual da comunidade científica discutir sobre estas temáticas.

O mercado energético está mudando rapidamente. As fontes derivadas de combustíveis fósseis, como carvão mineral, petróleo e gás natural tem reduzido seu espaço na matriz energética mundial e as projeções para um mercado sustentável tem ganhado cada vez mais visibilidade (SHERWOOD, 2020). A implantação da bioeconomia tornou-se mais difundida desde de 2015 como estratégia de mercados e políticas de sustentabilidade (DUQUE-ACEVEDO *et al.*, 2020). Para Vlachokostas *et al.* (2020) existe uma forte ligação entre a bioeconomia, economia circular e bioenergia. O conceito de economia circular tem o princípio de reutilizar, renovar e reciclar o produtos em materia-prima (MANNIELLO *et al.*, 2020; SHERWOOD, 2020). Afirma Holzinger (2020) que a economia circular define-se como um modelo de produção e consumo no qual existe materiais e produtos que são usados,

principalmente para Portugal, Irlanda, Reino Unido, Itália e França. Em 2010, a demanda na UE por pellets de madeira aumentou 7%, onde América do Norte dobrou seu volume de exportação para a Europa nos últimos dois anos (JEFFERS *et al.*, 2013).

Tabela 2. Categorização dos principais produtos florestais para fins energéticos abortados nos artigos em análise.

Categoria de produto florestal para fins energéticos			
Biomassa Florestal		Propriedades	Autores
Lasca de Madeira	Madeira que foi reduzida a pequenos pedaços, adequada para produção de fibras, para uso como combustível, ou para outros fins. Exclui lascas de madeira feitas diretamente na floresta a partir de madeira redonda.	Alto teor umidade; Baixo teor de poder calorífico, em comparação aos outros produtos; Baixa densidade a granel em comparação aos outros produtos; Combustível renovável neutro em carbono.	Abasian <i>et al.</i> (2019); Ahmadi <i>et al.</i> (2020); Altman <i>et al.</i> (2013); George Barjoveanu <i>et al.</i> (2020); Bryngemark (2020); Buonocore <i>et al.</i> (2019); Bywater <i>et al.</i> (1994); Chudy <i>et al.</i> (2019); Costa <i>et al.</i> (2020); Ericsson <i>et al.</i> (2004); Halaj & Brodrechtova (2018); Hänninen <i>et al.</i> (2018); Havlickova <i>et al.</i> (2011); Matthias Jordan <i>et al.</i> (2019); Lybæk (2008); Modolo <i>et al.</i> (2018); Moiseyev <i>et al.</i> (2013); Moliner <i>et al.</i> (2020); Nunes & Matias (2020); Olofsson & Borjesson (2018).
Lenha (madeira em tora)	Toda madeira derrubada ou de outra forma colhida e removida. Madeira obtida a partir de remoções, ou seja, as quantidades retiradas das florestas e das árvores fora da floresta, incluindo madeira recuperada de perdas naturais, derrubadas e madeireiras.	Madeira removida com ou sem casca, incluindo madeira removida em sua forma redonda, Aproximadamente ao quadrado ou em outra forma (por exemplo, galhos, raízes, tocos e brocas (onde estas são colhidas) e madeira que é aproximadamente moldada ou pontuda.	Asada <i>et al.</i> (2020); Dorning <i>et al.</i> (2015); Folsland Bolkesjø <i>et al.</i> (2006); Gustavsson & Madlener (2003); Jiang <i>et al.</i> (2019); Jiehong Kong <i>et al.</i> (2015); Nepal <i>et al.</i> (2019); Calliope Panoutsou (2016).
Carvão Vegetal	Madeira carbonizada (combustão parcial) ou aplicação de calor de fontes externas. Inclui carvão vegetal usado como combustível ou para outros usos, por exemplo, como agente de redução na metalurgia ou como meio de absorção ou filtração.	Baixa umidade; Alto teor de poder calorífico; Combustível Renovável; Baixos requisitos de processamento.	Nunes e Matias (2020); Asada <i>et al.</i> (2020); Dorning <i>et al.</i> (2015); Bianco & Porisiensi (2016); Delgado-Garcia <i>et al.</i> (2016); Morana <i>et al.</i> (2017).
Resíduos Florestais	Provenientes de operações de desbaste e da derrubada final, principalmente topos e galhos, de vegetação rasteira.	Alto teor de umidade; Teor moderada de poder calorífico; Densidade a granel moderada; Combustível renovável neutro em carbono; Requer quebra, secagem e adensamento quando for preciso.	Ericsson <i>et al.</i> (2004); Palmieri <i>et al.</i> (2020); Paredes-Sanchez <i>et al.</i> (2018); Tauro <i>et al.</i> (2018); Torreiro <i>et al.</i> (2020).
Agglomerados	Briquetes, pellets e aglomerações produzidas diretamente por compressão, com diâmetro não superior a 25 mm e comprimento não superior a 100 mm.	Teor moderado de umidade; Teor moderada de poder calorífico; Densidade a granel moderada; Combustível renovável neutro em carbono; Requer quebra e adensamento.	Dorning <i>et al.</i> (2015); Ericsson <i>et al.</i> (2004); Hänninen <i>et al.</i> (2018); Jeffers <i>et al.</i> (2013); Wei Jiang <i>et al.</i> (2019); Jordan <i>et al.</i> (2019); Lee (2017); Modolo <i>et al.</i> (2018); Moiseyev <i>et al.</i> (2013); Molina-Moreno <i>et al.</i> (2018); Moliner <i>et al.</i> (2020); Moreno <i>et al.</i> (2020); Nunes & Matias, (2020); Panoutsou (2016); Paredes-Sánchez <i>et al.</i> (2019); Sherwood (2020); Sirous <i>et al.</i> (2020), da Cruz Tarelho, & Martins (2020); Spampinato <i>et al.</i> (2019); Susaeta & Lal, (2018); Yarima Torreiro <i>et al.</i> (2020); Toscano <i>et al.</i> (2019).

Fonte: Os autores (2020).

No que diz respeito aos combustíveis sólidos, especialmente aqueles com potencial para substituir o carvão, várias opções surgiram, como pellets de madeira, que são produtos obtidos a partir da secagem, moagem e posterior adensamento de partículas de biomassa em agregados cilíndricos de diâmetro e comprimento variável (NUNES & MATIAS, 2020). A produção anual de pellets de madeira como combustível, ultrapassou mais de 30 MT, no mercado europeu (FAO, 2019). Além disso, Flak (2020) apresentou as altas oportunidades em empresas de bioenergia da Áustria, Itália e Espanha, onde deve-se ao fato de que tais empresas têm uma ampla variedade de ferramentas e soluções para o mercado de produtos florestais para fins

energéticos. Jiang *et al.* (2019) mostram que a exportação de pellets de madeira para o Reino Unido é crescente e que as empresas de energia do Reino Unido estão usando pellets de madeira importadas da região sul dos Estados Unidos para gerar eletricidade e cumprir a meta nacional onde 15% da energia deveria ser de fontes renováveis.

Há tecnologias de conversão de biomassa que pode ser usado, por exemplo, bioquímico (conversão enzimática, fermentação, digestão anaeróbica), termoquímica (combustão, gaseificação, pirólise, liquefação hidrotérmica) (CASSON MORENO *et al.*, 2020), dentre os estudos pesquisados houve uma frequência nas tecnologias: pirólise, gaseificação e combustão. A torrefação foi abordado apenas no estudo de Nunes & Matias (2020) que apresentou as vantagens da torrefação associadas as outras tecnologias. Torreiro *et al.* (2020) avaliaram o potencial da biomassa das podas florestais e de videiras, uma vez que eles não estão sendo valorizados e têm uma alta disponibilidade, ou seja, agregando valor ao que seria destinado ao aterro, o que contribui para o desenvolvimento da economia circular. Para Nunes & Matias (2020) é evidente o seu potencial quando convertida em combustível, capaz de repor o combustível fóssil dependendo do processo de conversão utilizado (Quadro 2).

Quadro 1. Principais tecnologias apresentadas na literatura e suas vantagens e desvantagens.

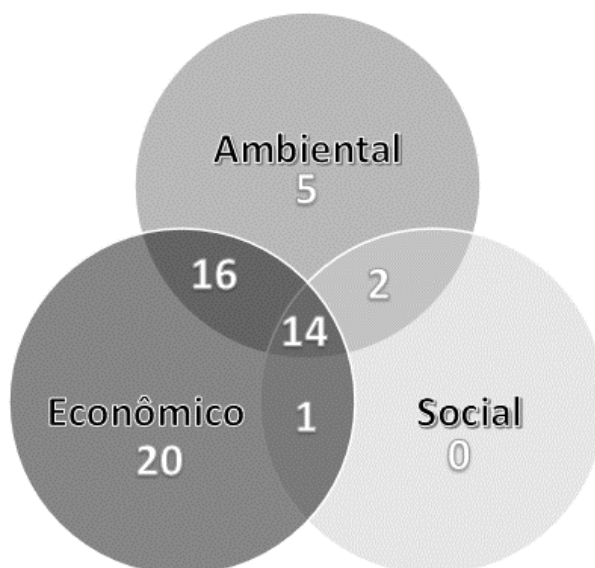
TECNOLOGIA BIOENERGÉTICA		VANTAGENS	DESVANTAGES	AUTORES
TORREFAÇÃO	É um processo de conversão termoquímica que tem a capacidade de padronizar as propriedades da biomassa, tornando-as mais consistentes.	Eliminação de compostos orgânicos voláteis e redução da umidade, contribuindo para o aumento do teor de carbono fixo; Tecnologia de pré-tratamento; Aumento da densidade energética.	Eleva os níveis de processamento; Encarece os custos da matéria prima (biomassa).	Nunes & Matias (2020).
PIRÓLISE	Processo no qual aquece a biomassa em ambiente fechado, na ausência ou presença de quantidades controladas de oxigênio, a temperaturas acima de 300 °C.	Podem ser convertidos em bio-óleo, biochar (para melhoramento no manejo do solo); Baixa pegada de carbono.	Gás de baixo poder calorífico. Encarecem o processo, no tratamento de purificação dos gases produzidos.	Abasian <i>et al.</i> (2019); Ahmadi <i>et al.</i> (2020); Moreno <i>et al.</i> (2020); Halaj & Brodrechtova (2018); Lee (2017); Moliner <i>et al.</i> (2020); Vaskalis <i>et al.</i> (2019); Zabaniotou (2018).
GASEIFICAÇÃO	É o processo de reação termoquímica entre o carbono e hidrocarbonetos em baixas taxas de oxigênio, ocorrendo em temperaturas de 400 a 900 °C.	Tecnologia disponível para micro e médias escalas devido às altas relações de aquecimento e eficiências globais; Um gás de alto poder calorífico; Considerada a maneira mais eficiente para obter hidrogênio a partir de biomassa; Tecnologia de baixo emissão de CO ₂ .	Processo de tratamento lento; Encarece os custos da produção.	Ahmadi <i>et al.</i> (2020); Moreno <i>et al.</i> (2020); Costa <i>et al.</i> (2020); Acevedo <i>et al.</i> (2020); Ericsson <i>et al.</i> , (2004); Guest <i>et al.</i> (2011); Gustavsson & Madlener (2003); Jordan <i>et al.</i> (2019); Moliner <i>et al.</i> (2020); Riding <i>et al.</i> (2015); Sherwood (2020); Torreiro <i>et al.</i> (2020); Vaskalis <i>et al.</i> (2019).
COMBUSTÃO	Processo de oxidação de determinado combustível, na presença de oxigênio, e que objetiva a geração de energia na forma de calor.	Diferentes tipos de substâncias ou materiais podem ser empregados na combustão, incluindo combustíveis fósseis, resíduos ou biomassa.	Produção de Gases (dióxido de carbono e água); Pode ser significativamente menos eficiente do que a gaseificação.	Abasian <i>et al.</i> (2019); Ahmadi <i>et al.</i> (2020); Barjoveanu <i>et al.</i> (2020); Buonocore <i>et al.</i> (2019); Moreno <i>et al.</i> (2020); Chudy <i>et al.</i> (2019); Costa <i>et al.</i> (2020); Acevedo <i>et al.</i> (2020); Ericsson <i>et al.</i> (2004); Bolkesjø <i>et al.</i> (2006); Halaj & Brodrechtova (2018); Hänninen <i>et al.</i> (2018); Jeffers <i>et al.</i> (2013); Jordan <i>et al.</i> (2019); Jürgens <i>et al.</i> (2006); Lybæk (2008); Mertens <i>et al.</i> (2016); Modolo <i>et al.</i> (2018); Moreno <i>et al.</i> (2018); Moliner <i>et al.</i> (2020); Nepal <i>et al.</i> (2019); Sanchez <i>et al.</i> (2019); Rendeiro <i>et al.</i> (2011); Riding <i>et al.</i> (2015); Sheldon (2020); Sirous <i>et al.</i> (2020), da Cruz Tarelho, & Martins (2020); Sosa <i>et al.</i> (2015); Terrones-Saeta <i>et al.</i> (2020); Toscano <i>et al.</i> (2019); Vaskalis <i>et al.</i> (2019); Vlachokostas <i>et al.</i> (2020); Zabaniotou (2018).

Fonte: Os autores (2020).

A combinação da pirólise para geração de energia renovável e produção de biochar oferece uma estratégia muito atraente para reduzir as emissões de gases de efeito estufa. São produzidos produtos líquidos e sólidos, mas a proporção de cada um pode ser variada dependendo das condições de reação (ZABANIOTOU, 2018). Já a gaseificação apresentou vantagens notáveis em relação à combustão, e deve ser destaque no futuro para os formuladores de políticas na busca de tecnologias limpas (MOLINER *et al.*, 2020). O planejamento e o gerenciamento das tecnologias de bioenergia devem ser baseados na avaliação dos aspectos ambientais, ecológicos e socioeconômicos (BUONOCORE *et al.*, 2019). Os tratamentos termoquímicos com baixa pegada de carbono, são formas potenciais de melhorar a capacidade de recursos e aumentar a eficiência, reduzindo a geração de resíduos, e otimizando a reutilização e reciclagem na produção de biocombustíveis (VASKALIS *et al.*, 2019).

A mudança climática é um conjunto de fenômenos que têm impacto direto nas atividades cotidianas, destacando as mudanças que afeta o ciclo de crescimento das culturas agrícolas e florestais (NUNES & MATIAS, 2020). De todas as medidas necessárias para mitigar as mudanças climáticas, o uso de fontes de energias renováveis são alternativas ao uso de combustíveis fósseis e emergem para auxiliar na mitigação do aquecimento global (BITONTO *et al.*, 2020; MOLINA-MORENO *et al.*, 2018). As emissões de gases que contribuem para o aquecimento global podem ser reduzida em até em 50% até 2050, se houver crescimento no uso de biomassa e resíduos para obtenção de energia (DUQUE-ACEVEDO *et al.*, 2020). A Figura 5 apresenta o diagrama de Venn dos eixos da sustentabilidade beneficiados diretamente pelos estudos, relacionando a bioenergia no contexto da econômica circular. Os estudos beneficiam os eixos: econômicos, ambientais, porém não houve estudos específicos abordando apenas a questão social.

Figura 5. Diagrama de Venn dos eixos da sustentabilidade beneficiados diretamente pelos estudos.



Fonte: Os autores (2020).

Obteve-se no eixo econômico 51 artigos, que tratam ações de prospecção de políticas públicas para desenvolvimento tecnológico e viabilidade econômica do setor bioenergético. O eixo ambiental contou com 37 artigos, nos quais mostraram a importância de manter um ambiente (solo, ar) equilibrado na produção de bioenergia, bem como, sua importância na redução da emissão de carbono como vantagem ambiental. Por conseguinte, 17 artigos

abordaram a questão social de forma indireta, porém, não houve estudos específicos sob a temática social. Os artigos disseminam desenvolvimento com práticas ecológicas, sustentáveis e de inovação a exemplo de Rendeiro *et al.* (2011) que analisaram a viabilidade do uso da biomassa resultante de resíduos, para a geração de energia elétrica em usinas termelétricas e adicioná-las ao sistema elétrico, considerando questões econômicas, regulatórias e de mercado. Existem algumas limitações em relação à pesquisa e seleção de artigos relacionados a EC, apenas dois bancos de dados foram adotados. Utilizamos critérios de exclusão e inclusão. Isso pode ter levado à perda de conteúdo. A respeito do processo de torrefação muitos estudos recentes vêm sendo desenvolvidos, principalmente em termos de controle e estabilidade. No entanto, ainda não pode ser considerado como uma tecnologia madura, por isso ainda é necessário um grande investimento em P&D.

4. CONCLUSÃO

Os Estados Unidos, registrou a maior quantidade de trabalhos, com 10 publicações, representando 16% das publicações. A Itália foi a que se destacou na quantidade de publicações na Europa, com um total de 6 artigos. As publicações e citações dos artigos da amostra foram datados a partir de 2003. Atingiu um maior pico no ano de 2020 com 43 publicações.

Os periódicos mais significativos da amostra foram o *Energies*, *Energy* e *Sustainability*, com 5 artigos cada, em seguida a *Journal of cleaner production*, com 4 publicações, posteriormente a *Forests* e *Scandinavian journal of forest research*, com 3 publicações cada. Os Países composto por China e USA, registraram a maior quantidade de interação entre si nas publicações de trabalhos, com 4 publicações. O Brasil e Alemanha foram os países que mais compartilharam informações com outros países.

As principais palavras-chave encontradas no contexto da bioenergia sob a perspectiva da economia circular foram: resíduos florestais, emissões de carbono, bioeconomia e mudança climática, além da bioenergia e economia circular.

Os principais produtos florestais para fins energéticos abordados nos artigos foram lenha de madeira, lenha (madeira em tora), carvão vegetal, resíduos florestais e aglomerados. A maior parte dos artigos abordaram como tecnologias atraentes na produção de bioenergia a pirólise, gaseificação e combustão, sendo a torrefação ainda incipiente em estudos.

Os eixos da sustentabilidade beneficiados diretamente pelos estudos foram o eixo econômico e ambiental, não houve estudos específicos sob a temática social. Através do panorama geral, a produção de bioenergia à base de madeira e seus derivados é um tema oportuno de amplo interesse, representa uma opção adequada e segura à transição energética, no entanto, requer muitas adaptações no processo de produção, consumo e legislação.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

ABASIAN, F.; RÖNNQVIST, M.; OUHIMMOU, M. Forest bioenergy network design under market uncertainty. *Energy*, v. 188, 2019.

AHMADI, L.; KANNANGARA, M.; BENSEBAA, F. Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle

perspective. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 37, 2020.

ALAVI-BORAZJANI, S. A.; CAPELA, I.; TARELHO, L. A. C. Valorization of biomass ash in biogas technology: Opportunities and challenges. *Energy Reports*, v. 6, p. 472–476, 2020.

ALTMAN, I. *et al.* Market Development of Biomass Industries. *Agribusiness*, v. 29, n. 4, p. 486–496, 2013.

ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.

ASADA, R. *et al.* Bioeconomic transition?: Projecting consumption-based biomass and fossil material flows to 2050. *Journal Of Industrial Ecology*.

BARJOVEANU, G. *et al.* Life cycle assessment of polyphenols extraction processes from waste biomass. *Scientific reports*, v. 10, n. 1, 2020a.

BEZERRA, M. C. DA C.; GOHR, C. F.; MORIOKA, S. N. Organizational capabilities towards corporate sustainability benefits: A systematic literature review and an integrative framework proposal. *Journal of Cleaner Production*, v. 247, 2020.

BIANCO, L.; PORISIENSI, S. From linear to circular economy in Ferriere Nord: Ladle slag and Biomass case studies [Trasformazione da lineare a circolare del processo EAF. Esperienza in Ferriere Nord SpA: Il caso della scoria siviera e dei carboni]. *Metallurgia Italiana*, v. 108, n. 10, p. 1–26, 2016.

BRYNGEMARK, E. Bioenergy versus forest conservation: a partial equilibrium analysis of the Swedish forest raw materials market. *Scandinavian Journal of Forest Research*, v. 35, n. 7, p. 367–382, 2020.

BUONOCORE, E. *et al.* Indicators of environmental performance to assess wood-based bioenergy production: A case study in Northern Italy. *Journal of Cleaner Production*, v. 221, n. 2019, p. 242–248, 2019.

BYWATER, I.; SCOTT, K.; ARNOUX, L. COMPETITIVE POWER-GENERATION FROM BIOMASS. *Renewable energy*, v. 5, n. 5–8, p. 849–851, 1994.

CASSON MORENO, V. *et al.* Techno-economic and environmental sustainability of biomass waste conversion based on thermocatalytic reforming. *Waste Management*, v. 101, p. 106–115, 2020.

CHUDY, R. P. *et al.* Effects on forest products markets of second-generation biofuel production based on biomass from boreal forests: a case study from Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, v. 34, n. 3, p. 218–227, 2019.

COSTA, M. *et al.* The “INNOVARE” project: Innovative plants for distributed poly-generation by residual biomass. *Energies*, v. 13, n. 15, 2020.

DELGADO-GARCIA, R. *et al.* Desarrollo, construcción y pruebas de una cocina-calentador de bajo costo y alta eficiencia energética para biomasa de reducido poder calorífico. *Dyna (Spain)*, v. 83, n. 199, p. 183–190, 2016.

DOMINGUES, M. A. *et al.* Mapeamento da ciência com o pacote R Bibliometrix: Uma aplicação no estudo de empreendedorismo acadêmico. *Anais do 9th ISTI - International Symposium on Technological Innovation*, v. Vol.9/n.1, p. 287–294, 2018.

DUQUE-ACEVEDO, M. *et al.* The Management of Agricultural Waste Biomass in the Framework of Circular Economy and Bioeconomy: An Opportunity for Greenhouse Agriculture in Southeast Spain. *AGRONOMY-BASEL*, v. 10, n. 4, 2020a.

ERICSSON, K. *et al.* Bioenergy policy and market development in Finland and Sweden. *Energy policy*, v. 32, n. 15, p. 1707–1721, 2004.

FAO. FOREST PRODUCTS DEFINITIONS General terms FAOSTAT-Forestry JOINT FOREST SECTOR QUESTIONNAIRE Item code Item Code Definition. 1994.

FERREIRA-SANTOS, P. *et al.* Green and Sustainable Valorization of Bioactive Phenolic Compounds from Pinus By-Products. *Molecules*, v. 25, n. 12, jun. 2020.

FLAK, J. Technologies for Sustainable Biomass Supply-Overview of Market Offering.

Agronomy-basel, v. 10, n. 6, jun. 2020.

FOLSLAND BOLKESJØ, T.; TRØMBORG, E.; SOLBERG, B. Bioenergy from the forest sector: Economic potential and interactions with timber and forest products markets in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, v. 21, n. 2, p. 175–185, 2006a.

GUEST, G. *et al.* Life cycle assessment of biomass-based combined heat and power plants: Centralized versus decentralized deployment strategies. *Journal of Industrial Ecology*, v. 15, n. 6, p. 908–921, 2011b.

GARFIELD, E. Journal impact factor: a brief review. *CMAJ*. 1999; 161(8):979-80.

GUSTAVSSON, L.; MADLENER, R. CO₂ mitigation costs of large-scale bioenergy technologies in competitive electricity markets. *Energy*, v. 28, n. 14, p. 1405–1425, nov. 2003.

HALAJ, D.; BRODRECHTOVA, Y. Marketing decision making in the forest biomass market: The case of Austria, Finland and Slovakia. *Forest Policy and Economics*, v. 97, p. 201–209, 2018.

HÄNNINEN, R. *et al.* Complexity of Assessing Future Forest Bioenergy Markets—Review of Bioenergy Potential Estimates in the European Union. *Current Forestry Reports*, v. 4, n. 1, p. 13–22, 2018.

HAVLICKOVA, K. *et al.* Modelling of biomass prices for bio-energy market in the Czech Republic. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 19, n. 9, p. 1946–1956, 2011.

HOLZINGER, H. The Circular Economy in the European Union.

JEFFERS, R. F.; JACOBSON, J. J.; SEARCY, E. M. Dynamic analysis of policy drivers for bioenergy commodity markets. *Energy Policy*, v. 52, p. 249–263, 2013.

JIANG, W. *et al.* The impact of the biomass crop assistance program on the united states forest products market: An application of the global forest products model. *Forests*, v. 10, n. 3, 2019a.

JORDAN, M. *et al.* Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach. *Energy*, v. 189, 2019a.

JÜRGENS, I.; SCHLAMADINGER, B.; GOMEZ, P. Bioenergy and the CDM in the emerging market for carbon credits. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 11, n. 5–6, p. 1051–1081, 2006.

KAIRYTE, A. *et al.* Fire suppression and thermal behavior of biobased rigid polyurethane foam filled with biomass incineration waste ash. *Polymers*, v. 12, n. 3, 2020.

KONG, J.; RÖNNQVIST, M.; FRISK, M. Using mixed integer programming models to synchronously determine production levels and market prices in an integrated market for roundwood and forest biomass. *Annals of Operations Research*, v. 232, n. 1, p. 179–199, 2015a.

LEE, D. H. Econometric assessment of bioenergy development. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 42, n. 45, p. 27701–27717, 2017.

LYBÆK, R. Discovering market opportunities for future CDM projects in Asia based on biomass combined heat and power production and supply of district heating. *Energy for Sustainable Development*, v. 12, n. 2, p. 34–48, 2008.

MANNIELLO, C. *et al.* Planning the Flows of Residual Biomass Produced by Wineries for the Preservation of the Rural Landscape. *Sustainability*, v. 12, n. 3, 2020.

MERTENS, A. *et al.* Context Matters-Using an Agent-Based Model to Investigate the Influence of Market Context on the Supply of Local Biomass for Anaerobic Digestion. *Bioenergy RESEARCH*, v. 9, n. 1, p. 132–145, mar. 2016.

MODOLO, R. C. E. *et al.* Fly ash from biomass combustion as replacement raw material and its influence on the mortars durability. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 20, n. 2, p. 1006–1015, 2018a.

MOISEYEV, A.; SOLBERG, B.; KALLIO, A. M. I. Wood biomass use for energy in Europe under different assumptions of coal, gas and CO₂ emission prices and market conditions. *Journal of Forest Economics*, v. 19, n. 4, p. 432–449, 2013.

MOLINA-MORENO, V. *et al.* The use of led technology and biomass to power public lighting

in a local context: The case of baeza (Spain). *Energies*, v. 11, n. 7, 2018a.

MOLINER, C.; MARCHELLI, F.; ARATO, E. Current status of energy production from solid biomass in North-West Italy. *Energies*, v. 13, n. 17, 2020a.

MORANA, A. *et al.* Development of an energy biorefinery model for chestnut (*Castanea sativa* Mill.) shells. *Energies*, v. 10, n. 10, p. 1–14, 2017.

MORENO, V. C. *et al.* Techno-economic and environmental sustainability of biomass waste conversion based on thermocatalytic reforming. *Waste management*, v. 101, p. 106–115, jan. 2020.

NEPAL, P. *et al.* Projected Market Competition for Wood Biomass between Traditional Products and Energy: A Simulated Interaction of US Regional, National, and Global Forest Product Markets. *Forest Science*, v. 65, n. 1, p. 14–26, 2019.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O. Biomass torrefaction as a key driver for the sustainable development and decarbonization of energy production. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 3, p. 1–9, 2020a.

OLOFSSON, J.; BORJESSON, P. Residual biomass as resource - Life-cycle environmental impact of wastes in circular resource systems. *Journal of cleaner production*, v. 196, p. 997–1006, 2018.

PALMIERI, N. *et al.* Circular Economy Model: Insights from a Case Study in South Italy. *Sustainability*, v. 12, n. 8, 2020.

PANOUTSOU, C. The role of sustainable biomass in the heat market sector for EU27. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 5, n. 4, p. 430–450, 2016.

PAREDES-SANCHEZ, J. P. *et al.* Energy utilization for distributed thermal production in rural areas: A case study of a self-sustaining system in Spain. *Energy conversion and management*, v. 174, p. 1014–1023, 2018.

PAREDES-SANCHEZ, J. P. *et al.* Evolution and perspectives of the bioenergy applications in Spain. *Journal of cleaner production*, v. 213, p. 553–568, mar. 2019.

REIS, F. C. M. A. Universidade Federal De Minas Gerais Escola De Ciência Da Informação Programa De Pós-Graduação Em Ciência Da Informação. 2015.

RENDEIRO, G. *et al.* Analysis on the feasibility of biomass power plants adding to the electric power system - Economic, regulatory and market aspects - State of Para, Brazil. *Renewable energy*, v. 36, n. 6, p. 1678–1684, jun. 2011.

RIDING, M. J. *et al.* Harmonising conflicts between science, regulation, perception and environmental impact: The case of soil conditioners from bioenergy. *Environment International*, v. 75, p. 52–67, 2015a.

SHELDON, R. A. Biocatalysis and biomass conversion: Enabling a circular economy: Biocatalysis and Biomass Conversion. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 378, n. 2176, 2020.

SIROUS, R. *et al.* Mixed biomass pelleting potential for Portugal, step forward to circular use of biomass residues. *Energy reports*, v. 6, n. 1, p. 940–945, 2020.

SOSA, A. *et al.* Managing the moisture content of wood biomass for the optimisation of Ireland's transport supply strategy to bioenergy markets and competing industries. *Energy*, v. 86, p. 354–368, 2015.

SHERWOOD, J. The significance of biomass in a circular economy. *Bioresource Technology*, v. 300, 2020.

SUSAETA, A. *et al.* Economics of intercropping loblolly pine and switchgrass for bioenergy markets in the southeastern United States. *Agroforestry Systems*, v. 86, n. 2, p. 287–298, 2012.

SUSAETA, A.; LAL, P. Impacts of climate change and bioenergy markets on the profitability of slash pine pulpwood production in the Southeastern United States. *Forests*, v. 9, n. 10, 2018.

- TAURO, R. *et al.* The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable & sustainable energy reviews*, v. 82, n. 1, p. 380–389, 2018.
- TERRONES-SAETA, J. M. *et al.* Study of the incorporation of biomass bottom ashes in ceramic materials for the manufacture of bricks and evaluation of their leachates. *Materials*, v. 13, n. 9, 2020.
- TORREIRO, Y. *et al.* The Role of Energy Valuation of Agroforestry Biomass on the Circular Economy. *Energies*, v. 13, n. 10, 2020a.
- TOSCANO, G. *et al.* Engineered solid biofuel from herbaceous biomass mixed with inorganic additives. *Fuel*, v. 256, nov. 2019.
- TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review* Introduction: the need for an evidence- informed approach. *British Journal of Management*, v. 14, p. 207–222, 2003.
- VASKALIS, I. *et al.* Towards Circular Economy Solutions for The Management of Rice Processing Residues to Bioenergy via Gasification. *Sustainability*, v. 11, n. 22, nov. 2019.
- VLACHOKOSTAS, C. *et al.* Decision Support System to Implement Units of Alternative Biowaste Treatment for Producing Bioenergy and Boosting Local Bioeconomy. *Energies*, v. 13, n. 9, 2020.
- ZABANIOTOU, A. Redesigning a bioenergy sector in EU in the transition to circular waste-based Bioeconomy-A multidisciplinary review. *Journal of cleaner production*, v. 177, p. 197–206, mar. 2018.