

Tecnologias para a economia circular na agropecuária

Diego Durante Muhl^{1,*}  & Letícia de Oliveira^{2,**} 

¹Centro de Estudos e Pesquisa em Agronegócio (CEPAN), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Avenida Bento Gonçalves, 7712, Agronomia, 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.

*Autor para correspondência: E-mail: diegomihl@live.com

²Departamento de Economia e Relações Internacionais (DERI), Faculdade de Ciências Econômicas (FCE) e Centro de Estudos e Pesquisa em Agronegócios (CEPAN), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Avenida Bento Gonçalves, 7712, Agronomia, 91540-000, Porto Alegre, RS, Brasil.

**Autor para correspondência: leticiaoliveira@ufrgs.br

Recebido em 16.XII.2021

Aceito em 14.II.2022

DOI 10.21826/2446-82312022v77e2022008

RESUMO – Resíduos são um problema na agricultura, porém, existe a possibilidade de agregar valor com o gerenciamento desses resíduos. A literatura explora o potencial das tecnologias de tratamento de resíduos agrícolas, mas, é preciso sistematizar o conhecimento sobre o assunto. Faz-se necessário entender quais soluções estão se desenvolvendo e quais tecnologias estão mais consolidadas para motivar o desenvolvimento dessas soluções. Assim, este estudo tem como objetivo apresentar uma visão panorâmica das pesquisas em tecnologias de tratamento de resíduos agrícolas. O método adotado foi a análise bibliométrica. Mostramos quais tecnologias estão mais consolidadas na comunidade científica. Várias soluções biológicas e térmicas foram encontradas. Metais pesados, contaminantes químicos e biológicos são as principais preocupações nos processos de tratamento. A digestão anaeróbica e a compostagem são as tecnologias mais exploradas na comunidade científica. As outras tecnologias são microalgas, pirólise, algas, biorrefinarias, combustão, incineração, gaseificação, co-digestão anaeróbia, carbonização hidrotérmica, vermicompostagem, processo de biossíntese, digestão anaeróbia seca e fotobiorreatores. Esse artigo sistematiza e consolida o conhecimento sobre as tecnologias que podem ser aplicadas para o gerenciamento de resíduos agrícolas, isso é importante para a consolidação do campo de pesquisa e desenvolvimento estratégico dessas soluções. A adoção das tecnologias é um passo importante em direção a um modelo de economia circular.

Palavras-chave: agricultura, bioeconomia, digestão anaeróbica, economia circular, pecuária

ABSTRACT – **Technologies for the circular economy in agriculture.** Waste is a problem in agriculture, however, there is the possibility of adding value to the management of this waste. The literature explores the potential of agricultural waste treatment technologies, but, it is necessary to systematize the knowledge on the subject. It is necessary to understand which solutions are being developed and which technologies are more consolidated to motivate the development of these solutions. Thus, this study aims to present a panoramic view of research in agricultural waste treatment technologies. The method adopted was bibliometric analysis. We show which technologies are more consolidated in the scientific community. Several biological and thermal solutions were found. Heavy metals, chemical and biological contaminants are major concerns in treatment processes. Anaerobic digestion and composting are the technologies most explored in the scientific community. Other technologies are microalgae, pyrolysis, algae, biorefineries, combustion, incineration, gasification, anaerobic co-digestion, hydrothermal carbonization, vermicomposting, biosynthesis process, dry anaerobic digestion and photobioreactors. This article systematizes and consolidates the knowledge about the technologies that can be applied to the management of agricultural residues, which is important for the consolidation of the field of research and strategic development of these solutions. The adoption of technologies is a significant step towards a circular economy model.

Keywords: agriculture, anaerobic digestion, bioeconomics, circular economy, livestock

Uma versão preliminar deste artigo foi apresentada no IX CIENAGRO Simpósio da Ciência do Agronegócio – “O agronegócio da biodiversidade”, promovido pelo Centro de Estudos e Pesquisas em Agronegócios (Cepan/UFRGS) e realizado entre nos dias 7 e 8 de outubro de 2021, de forma virtual.

INTRODUÇÃO

Dentro da discussão sobre a adoção de um modelo econômico mais sustentável está a agropecuária. Os resíduos das atividades agropecuárias são uma preocupação pelo impacto ambiental que podem causar. Nesse sentido algumas tecnologias estão se desenvolvendo para agregar valor aos resíduos, produzir energia e materiais alternativos ou simplesmente resolver os problemas ambientais (Diacono *et al.* 2019, Duque-Acevedo *et al.* 2020, Khoshnevisan *et al.* 2021, Maghanaki *et al.* 2013, Palermo *et al.* 2014).

Muitos estudos abordam o tema sob diferentes enfoques, seja na perspectiva da economia circular ou do sequestro de carbono, por exemplo (Donner *et al.* 2020, Ghisellini *et al.* 2016, Hua *et al.* 2014). Nesses diferentes enfoques existem também diferentes tecnologias para tratamento dos resíduos da agropecuária (Duque-Acevedo *et al.* 2020, Gogate & Pandit 2004, Gontard *et al.* 2018, Khoshnevisan *et al.* 2021). Algumas tecnologias se aplicam a grandes plantas como biorrefinarias e outras se aplicam a pequenas escalas de produção e podem ser implementadas até mesmo em pequenas propriedades rurais (Khoshnevisan *et al.* 2021, Palallo *et al.* 2018, Parralejo *et al.* 2019).

Atualmente existem diversas frentes de pesquisa em todo o mundo abordando temas relacionados a bioeconomia, economia circular e valorização de resíduos das atividades agrícolas. Diversas soluções estão sendo estudadas e desenvolvidas por diferentes pesquisadores, em diferentes locais do mundo, mas com o mesmo objetivo de agregar valor aos resíduos para promover modelos de bioeconomia e economia circular (González-Castaño *et al.* 2021, Khoshnevisan *et al.* 2021; Sharma *et al.* 2021). Enquanto isso o conhecimento sobre essa temática permanece fragmentado.

Assim existe a necessidade de sistematizar o conhecimento dessa área. É interessante desenvolver uma abordagem multidisciplinar e integrada desse tema. No mesmo sentido é preciso determinar tecnologias que poderão ser usadas como variável de controle para estudos futuros. É importante estabelecer referências que sirvam de comparação de custos e eficiência para novas tecnologias que estão surgindo e o primeiro passo é determinar quais soluções existem atualmente.

Nessa perspectiva o propósito desse artigo é apresentar um panorama do conhecimento sobre as tecnologias de tratamento de resíduos na agropecuária. Apresentamos as tecnologias mais consolidadas no meio científico que podem ser usadas para a valorização de resíduos das atividades agropecuárias.

MATERIAL E MÉTODO

O método consistiu numa análise bibliométrica. Foram usadas técnicas quantitativas para explorar os padrões de comunicação, tendências e redes que ocorrem na literatura abordada (Haddow 2018, Navrotsky & Patsei 2021). A identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos artigos se baseou nas orientações do protocolo PRISMA – *Preferred*

Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (Galvão *et al.* 2015, Page *et al.* 2021).

A chave de pesquisa foi definida para representar os termos agricultura ou agropecuária, resíduos e valorização. Mas, para ampliar o escopo da busca foram adicionadas mais duas palavras-chave sinônimos para cada um desses termos. Assim a chave de pesquisa utilizada foi: ((*agriculture OR farming OR husbandry*) AND (*residu* OR scraps OR waste*) AND (*recovery OR “value generation” OR “circular economy”*)). A ordem de pesquisa considerou a ocorrência desses termos nos títulos, resumo e palavras-chave dos estudos.

Essa ordem de pesquisa na base *Scopus* retornou 2949 documentos. Com o interesse de enfatizar a discussão atual a busca foi limitada aos últimos 5 anos, ou seja, a busca considerou os estudos publicados a partir de janeiro de 2016, restaram 1527 documentos. Para padronizar as informações e manter o padrão de qualidade os resultados foram limitados a artigos completos, assim restaram 1117 artigos recuperados da base *Scopus*.

A mesma chave de pesquisa foi usada na coleção principal da base *Web Of Science* e retornou 2082 documentos, limitando a busca para os últimos 5 anos restaram 1263 documentos. Desses 999 documentos eram artigos completos que foram recuperados da base *Web Of Science*. Por fim a chave de pesquisa foi aplicada na base de dados *Scielo* e retornou 35 resultados, limitado a busca para os últimos 5 anos restaram 17 documentos, 16 desses documentos eram artigos completos revisados por pares que foram recuperados da base de dados *Scielo*.

Assim o total de 2132 artigos foram incluídos na biblioteca do gerenciador de referências *Zotero*. Havia 568 documentos duplicados. Os documentos duplicados foram removidos. Foi gerado um relatório contendo títulos resumos e metadados de 1564 artigos.

A elegibilidade dos artigos foi definida a partir da questão: Esse artigo trata de estratégias capazes de valorizar resíduos agropecuários? 385 artigos não tratavam de estratégias capazes de valorizar resíduos agropecuários. Assim, restaram 1179 artigos que foram incluídos nas análises com os softwares *SciMAT* e *VOSviewer*. As etapas do protocolo PRISMA estão detalhadamente representadas na Fig. 1.

O *SciMAT*¹ – *Science Mapping Analysis software Tool* é um software de código aberto desenvolvido para realizar análises de mapeamento científico sob uma estrutura longitudinal. O software incorpora métodos, algoritmos e medidas para todas as etapas do fluxo de trabalho de mapeamento científico, desde o pré-processamento até a visualização dos resultados. (Cobo *et al.* 2012, 2015).

O software *VosViewer*² é uma aplicação especialmente útil para criar redes entre conceitos, termos, palavras-chave,

1 O *SciMAT* (<https://sci2s.ugr.es/scimat/>) nasceu no grupo de pesquisa *Sci2s* da Universidade de Granada, Espanha.

2 O *VosViewer* (www.vosviewer.com) é uma ferramenta desenvolvida pelo Centro de Estudos de Ciência e Tecnologia da Universidade de Leiden na Holanda.

mineração de texto, contagem de palavras e coocorrência. Os mapas gerados por esse software se baseiam no método VOS – *visualization of similaritie*, ou seja, os objetos são ordenados num mapa de baixa dimensão de forma que a distância entre qualquer par de objetos reflete sua similaridade com a maior precisão possível (Van Eck & Waltman 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas informações gerais são importantes para contextualizar a amostra em análise. Ao final a estratégia adotada para a recuperação dos artigos retornou 1179

resultados. Esses documentos já foram citados 9049 vezes, uma média de 1809,80 citações por ano. Na Tab. 1 constam algumas informações gerais sobre o conjunto de documentos analisados.

Em média cada artigo foi citado 7,68 vezes. Cerca de 5 autores participaram na elaboração de cada artigo. O conjunto de artigos recuperado tem índice H 41, ou seja, 41 artigos receberam 41 ou mais citações (Hirsch 2007).

Para se ter uma noção geral dos conteúdos estudados e complementar essa análise podemos observar os documentos com maior número de citações. Os 10 principais documentos com o número de citações, primeiro autor, ano e revista da publicação são apresentados na Tab. 2.

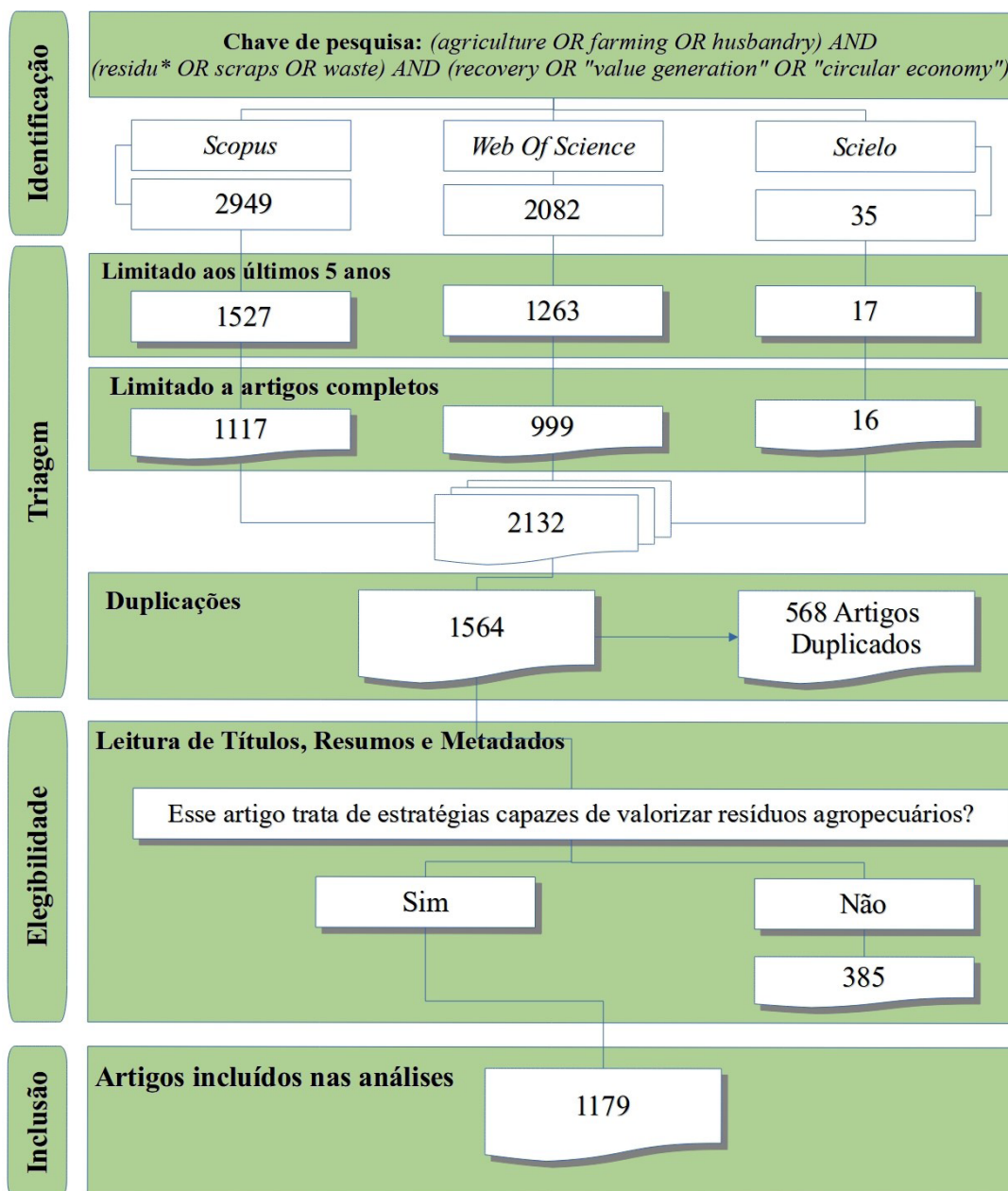


Figura 1. Etapas de acordo com o protocolo PRISMA. Fonte: autor 2021, adaptado de PRISMA statement

Tabela 1. Informações gerais do conjunto de artigos

Descrição	Resultados
Ano das publicações	5 Anos (2016 – 2021)
Documentos	1179
Citações	9049
Média de Citações por ano	1809,80
Média de Citações de Cada Artigo	7,68
Média de Autores por Artigo	5,04
Média Índice H	41

Tabela 2. Os 10 artigos mais citados com número de citações, primeiro autor, ano e revista da publicação

Citações	Título do Artigo	Autor/Ano	Revista
128	The presence of contaminations in sewage sludge “The current situation”	K. Fijalkowski <i>et al.</i> 2017	Journal of Environmental Management
121	A Review on Heavy Metal Ions and Dye Adsorption from Water by Agricultural Solid Waste Adsorbents	Afroze, S. & Sen, T. K. 2018	Water, Air, and Soil Pollution
108	Pyrolysis process of agricultural waste using CO ₂ for waste management, energy recovery, and biochar fabrication	Lee <i>et al.</i> 2017	Applied Energy
98	Removal of phosphate from aqueous solutions by adsorption onto Ca(OH) ₂ treated natural clinoptilolite	Mitrogiannis <i>et al.</i> 2017	Chemical Engineering Journal
91	From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook	Kirchmann <i>et al.</i> 2017	Ambio
90	Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture	P.J.A. Withers <i>et al.</i> 2018	Scientific Reports
89	Valorisation of agricultural waste with an adsorption/nanofiltration hybrid process: From materials to sustainable process design	Didaskalou <i>et al.</i> 2017	Green Chemistry
85	Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams	De Wilt <i>et al.</i> 2016	Journal of Hazardous Materials
79	Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: Mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems	Tampio <i>et al.</i> 2016	Journal of Cleaner Production
78	Mapping Industrial Symbiosis Development in Europe_ typologies of networks, characteristics, performance and contribution to the Circular Economy	Domenech <i>et al.</i> 2019	Resources, Conservation and Recycling

Os dois artigos mais citados abordam a problemática dos contaminantes. Os contaminantes presentes nos resíduos são um entrave para os processos de tratamento e valorização. Metais pesados, produtos químicos, nanopartículas, pesticidas, produtos de cuidados pessoais, produtos farmacêuticos, antibióticos e micro-organismos exigem cuidados especiais em processos de valorização de resíduos (Afroze & Sem 2018, Fijalkowski *et al.* 2017).

Entre os 10 artigos mais citados já é possível identificar alguns processos tecnológicos voltados ao tratamento e valorização de resíduos agropecuários. A pirólise e a digestão anaeróbica são processos comumente aplicados para o tratamento e valorização de resíduos que podem ser aplicados ao contexto da agropecuária (Lee *et al.* 2017, Tampio *et al.* 2016). Os processos de adsorção, nanofiltração, e o uso de algas aparecem como alternativas para a separação de gases, remoção de poluentes de águas, transformação e geração de nutrientes que podem ser reutilizados em outros processos. O uso dessas tecnologias

normalmente acompanha a digestão anaeróbica, a pirólise e outras estratégias (De Wilt *et al.* 2016, Didaskalou *et al.* 2017, Mitrogiannis *et al.* 2017).

Para se aprofundar na investigação dos conteúdos foi realizada uma análise longitudinal de palavras-chave com o software SciMAT. Para executar a análise os documentos foram divididos em seis períodos. Na Fig. 2, da esquerda para a direita cada coluna representa um ano. A primeira linha apresenta um mapa sobreposto das palavras-chave e nas linhas subsequentes o mapa de evolução dos conceitos (Cobo *et al.* 2012).

Na primeira linha, 1873 palavras foram consideradas para a análise no primeiro período, ou seja, o ano de 2016. Como mostra a seta de saída superior 1172 dessas palavras-chave não foram incluídas na análise do período seguinte, pois essas palavras deixaram de ser citadas, mas 701 palavras foram incluídas no próximo período, ou seja, em 2017. E assim sucessivamente para todos os períodos (Cobo *et al.* 2012).

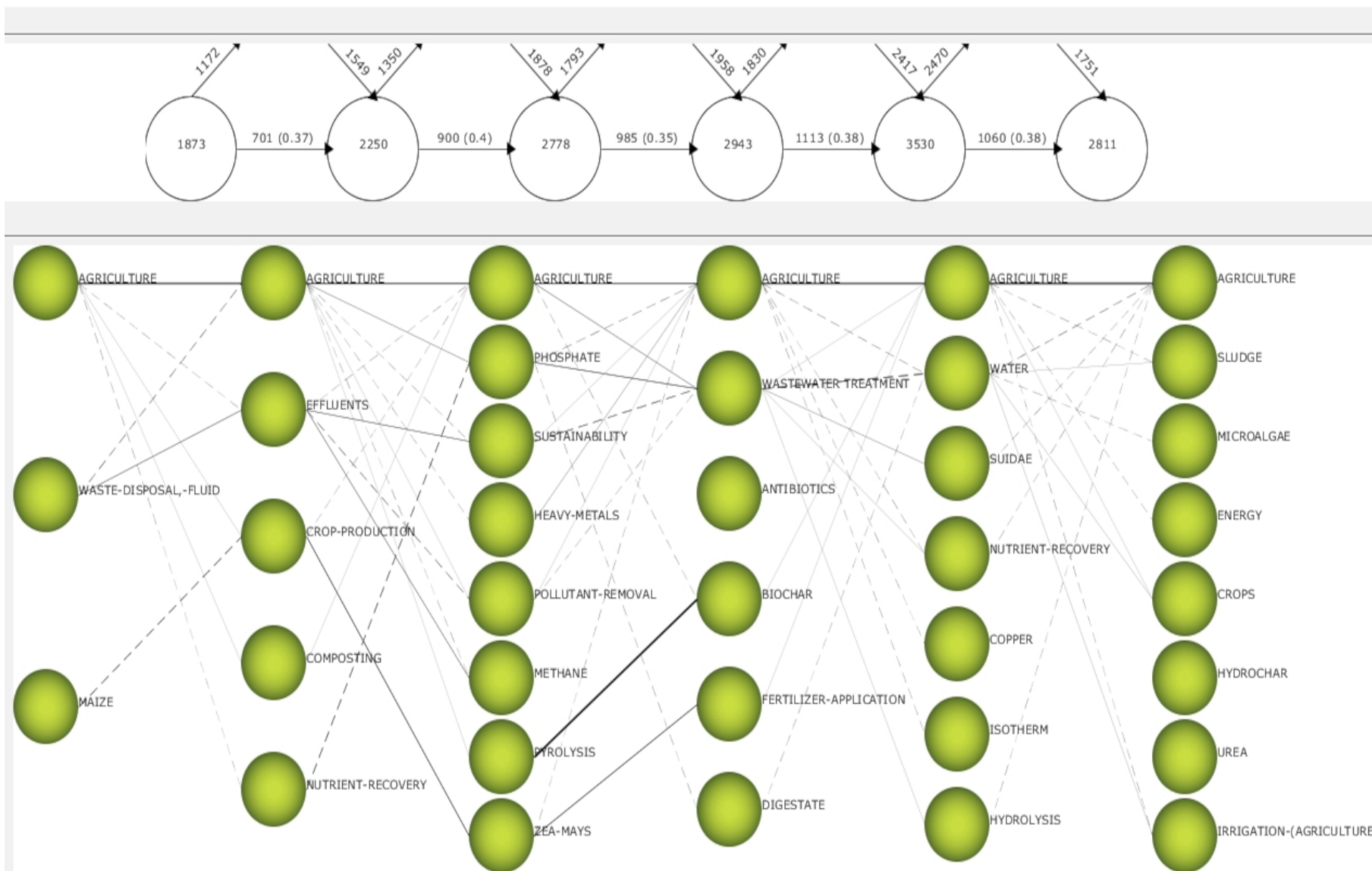


Figura 2. Análise longitudinal de coocorrência de palavras-chave.

No mapa de evolução dos conceitos o termo agricultura apareceu em todos os períodos como conceito dominante, ou seja, o termo agricultura é a palavra-chave que teve maior coocorrência em todos os períodos. A agricultura também apresentou uma relação direta com a maioria dos outros termos, como está representado pelas linhas conectando os conceitos. Os outros termos representam as principais preocupações relacionadas ao tratamento e valorização de resíduos agropecuários. Os resíduos líquidos, efluentes, o tratamento da água, a água e a lama apareceram diversas vezes na segunda linha, portanto esse é um dos temas mais estudados (Cobo *et al.* 2012 2015).

Algumas das tecnologias usadas para o tratamento e valorização de resíduos agropecuários aparecem na análise longitudinal. A compostagem, a pirólise, a digestão anaeróbica e as microalgas são soluções que podem ser utilizadas para o tratamento e valorização de resíduos agropecuários (Franchino *et al.* 2016, Jakubus 2020, Lee *et al.* 2017).

Seguindo na investigação e para efetivamente conseguir determinar quais são as tecnologias que podem ser aplicadas no tratamento, e valorização de resíduos agropecuários foi usado o recurso de contagem de ocorrência de palavra-chave do software VosViewer. Esse recurso conta o número de ocorrências de uma palavra-chave específica, uma palavra-chave com muitas ocorrências se refere a uma temática popular no meio de pesquisa (Van Eck & Waltman 2019). A Fig. 3 apresenta de acordo com o número de ocorrências quais são as soluções ou tecnologias mais estudadas com a intenção de valorizar resíduos agropecuários nos últimos 5 anos.

A seguir são apresentadas algumas noções gerais de cada uma dessas tecnologias. Os resultados são apresentados, brevemente caracterizados e discutidos a partir da literatura

científica. Termos sinônimos referentes a mesma solução foram agrupados para a discussão.

Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbica é uma prática antiga que possibilita o controle da poluição e a recuperação de energia. O termo planta de biogás também é usado se referindo a digestão anaeróbica. A degradação da matéria orgânica é realizada por microrganismos em condições anaeróbicas (sem oxigênio). Esse processo bioquímico é comum na degradação de materiais orgânicos na natureza em locais como pântanos. Bactérias e outros microrganismos trabalham em sinergia para produzir um processo que pode ser simplificado em quatro etapas denominadas hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Angelidaki *et al.* 2009, Khoshnevisan *et al.* 2021, Parra-Orobio *et al.* 2021).

Na hidrólise ocorre a reação química entre moléculas de água, carboidratos de alto peso molecular, gorduras e proteínas que geram polímeros por meio da ação enzimática de bactérias fermentativas. Na acidogênese os polímeros são convertidos em ácidos orgânicos, álcoois, gás hidrogênio e gás carbônico. Na acetogênese os ácidos graxos voláteis são convertidos em ácidos acéticos. Na metanogênese o ácido acético e o gás hidrogênio são transformados em gás carbônico e metano (Angelidaki *et al.* 2009, Postawa *et al.* 2021, Zhang *et al.* 2014).

Ao final do processo de digestão anaeróbica se obtém o biogás e o digestato. O biogás é composto majoritariamente por metano, um pouco de gás carbônico e uma quantidade pequena de outros gases, entre os quais está o sulfeto de hidrogênio (H₂S). O biogás é inflamável e pode ser usado diretamente como energia térmica, mas precisa ser purificado para ser usado em motores a combustão

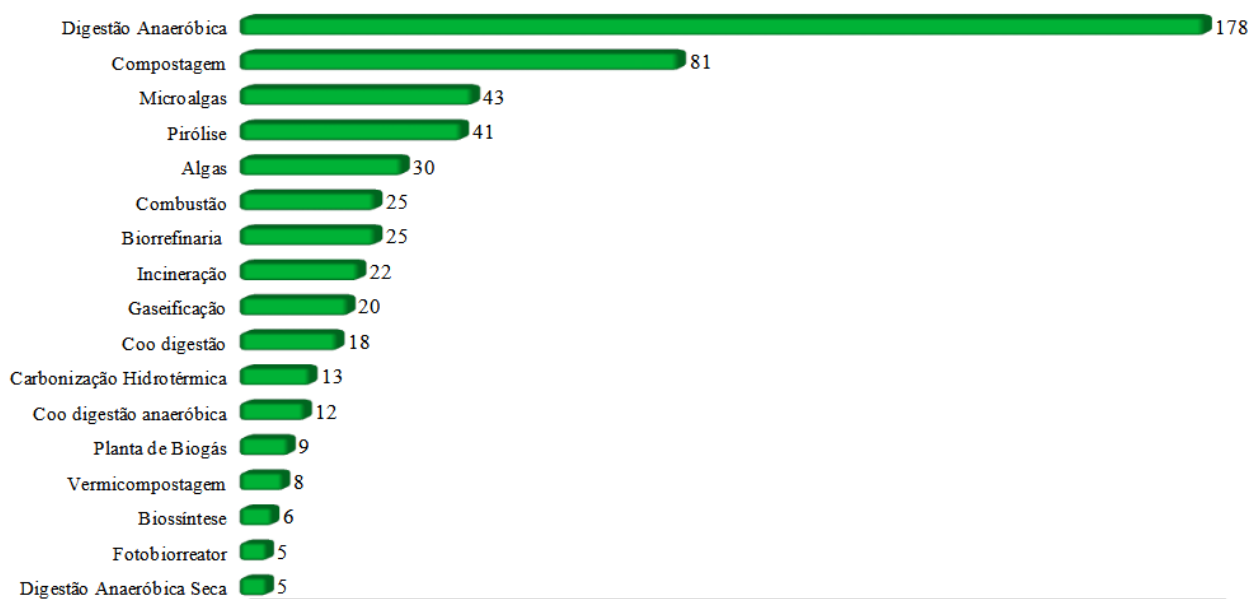


Figura 3. Tecnologias para a valorização de resíduos de acordo com o número de ocorrências de palavras-chave.

devido ao alto poder corrosivo do sulfeto de hidrogênio (Chowdhury 2021, Zhang *et al.* 2014).

O digestato tem grande potencial para aplicação como fertilizante agrícola devido ao alto teor de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). As características microbiológicas, parasitológicas, a fitotoxicidade e os riscos de contaminação são reduzidos com o processo de digestão anaeróbica completo. Ainda assim, o uso de digestato deve ser racional para evitar a contaminação do solo por metais pesados e a lixiviação de fósforo e nitrogênio (Parra-Orobio *et al.* 2021, Weiland 2010).

A coo digestão pode ser considerada um aperfeiçoamento da digestão anaeróbica. Trata-se da adição de diferentes tipos de biomassa para melhorar o desempenho do sistema. Diversos tipos de biomassa podem ser combinados. A coo digestão pode melhorar a qualidade e a quantidade de biogás produzido. A associação de diferentes tipos de biomassa pode produzir um digestato de melhor qualidade para a fertilização do solo, com maiores teores de fósforo e nitrogênio. Assim a viabilidade econômica de todo o sistema pode melhorar (Astill & Shumway 2016, Piekutin *et al.* 2021, Pintucci *et al.* 2017).

A digestão anaeróbica seca segue os mesmos princípios da digestão anaeróbica com a particularidade de trabalhar com biomassa seca. Esse processo pode ser vantajoso em alguns casos. Mas, a operacionalização da digestão anaeróbica seca exige equipamentos específicos. A produção de metano também sofre inibições relacionadas a temperatura e a concentração de amônia. No processo de digestão anaeróbica seca as concentrações de amônia são maiores e isso pode inibir a produção de metano (Deng *et al.* 2016, Huang *et al.* 2019, 2016).

Compostagem e vermicompostagem

Outra prática antiga de gerenciamento de materiais orgânicos é a compostagem. Esse processo também é comum na natureza, a decomposição de folhas, galhos de árvores e outros materiais comuns numa floresta são um exemplo de compostagem rudimentar. Mas, esse é um processo aeróbico de decomposição da matéria orgânica. Diversos materiais orgânicos podem ser processados juntos. A compostagem é promovida por diversas bactérias e fungos. Ao final de diversos processos biológicos e químicos promovidos por esses micro-organismos obtêm-se o composto orgânico (Pagans *et al.* 2006, Ryckeboer *et al.* 2003).

O composto orgânico é um material estável rico em nutrientes. Esse material pode ser usado como adubo em diversos cultivos. O processo de compostagem é um gerenciamento do material orgânico. A matéria orgânica é processada e reaproveitada. Determinados níveis de umidade, temperatura e a adição de alguns materiais específicos podem acelerar o processo de decomposição da matéria (Pinto *et al.* 2017, Wang *et al.* 2021).

Já a vermicompostagem utiliza agentes biológicos, normalmente minhocas, para acelerar e melhorar o

processo de compostagem. O cultivo de minhocas para a compostagem melhora os aspectos físico-químicos, aumenta as porcentagens de nitrogênio, fósforo e potássio e estabiliza a matéria orgânica. A vermicompostagem tem custo de instalação e operacionalização baixos, por isso é uma estratégia interessante para pequenas escalas. Pequenos pecuaristas podem agregar valor a resíduos e evitar a contaminação ambiental com essa técnica. Assim essa tecnologia pode ajudar muito na promoção da economia circular em pequenas propriedades (Borges *et al.* 2017, Liu *et al.* 2021, Singh *et al.* 2020).

Microalgas e algas

As microalgas são micro-organismos unicelulares que vivem em meios aquáticos doces ou salgados. Constatamos que o termo alga também é usado por diversos autores se referindo as microalgas (Sharma *et al.* 2021, Zou *et al.* 2021).

As microalgas podem ser usadas para recuperação de nutrientes em águas residuárias. Esses micro-organismos são capazes de realizar fotossíntese usando luz e gás carbônico. As microalgas crescem rapidamente e são capazes de se adaptar a diversos ambientes (Rajendran *et al.* 2018, Sobhi *et al.* 2019). Devido a sua capacidade de adaptação as microalgas podem ser cultivadas em águas residuais de laticínios, a partir de dejetos animais, entre outras possibilidades (Fica & Sims 2016, Rajendran *et al.* 2018, Sobhi *et al.* 2019).

A capacidade de fazer fotossíntese, fixar CO² e gerar lipídeos torna as microalgas uma alternativa para a geração de biocombustíveis. As microalgas podem ser usadas, inclusive, em um segundo processo de tratamento promovendo um ciclo de bioeconomia de recursos. Por exemplo, as microalgas podem ser cultivadas no digestato depois da produção de biogás pelo processo de digestão anaeróbica para a geração de biocombustíveis, no primeiro estágio é gerado o biogás e num segundo estágio pode se gerar um bio-óleo a partir dos lipídios da biomassa produzida pelas microalgas (Bohutskyi *et al.* 2016, Kim & Kim 2017, Uggetti *et al.* 2018).

Pirólise, combustão, incineração e carbonização hidrotérmica

A pirólise, a combustão, a incineração e a carbonização hidrotérmica são processos térmicos. Esses processos são realizados em reatores, caldeiras ou fogões. O calor gerado pode ser usado em diversas finalidades. Diferentes tipos de biomassa podem ser processados. Matérias-primas do setor agrícola e florestal podem ser processadas. Cavacos de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de girassol, cascas de castanha-do-pará, diversos resíduos agrícolas e urbanos podem ser usados nesses processos (Cardozo *et al.* 2016, Cavalaglio *et al.* 2020).

A pirólise é uma decomposição térmica. A estrutura molecular de resíduos pode ser transformada pela ação do calor (normalmente entre 300°C e 500°C) em ambiente

sem oxigênio ou com pouco oxigênio. A pirólise pode ser aplicada a gestão de resíduos agrícolas ou urbanos para a recuperação de energia e fabricação de biochar, bio-óleo e gases voláteis (Callegari *et al.* 2018, Lee *et al.* 2017).

O biochar é a biomassa resultante da pirólise. Essa biomassa pode ser aplicada para correção do solo (Figueiredo *et al.* 2020). Além do biochar a pirólise pode produzir biodiesel e o gás de síntese. Devido a essas características a pirólise se mostra uma alternativa interessante na promoção da sustentabilidade ambiental e economia circular (Callegari *et al.* 2018, Chew *et al.* 2021, Lee *et al.* 2017).

A combustão é realizada em caldeiras ou fogões. O calor liberado na reação pode ser usado em diversas finalidades. As cinzas do processo de combustão podem ser aplicadas como fertilizantes devido as concentrações de fósforo e fosfato, no entanto é preciso tomar cuidado com a presença de metais pesados e outros contaminantes (Bogush *et al.* 2018). O processo deve ser eficiente e as emissões de dióxido de carbono devem ser monitoradas (Cardozo *et al.* 2016).

A gaseificação é um processo térmico que normalmente ocorre entre 400°C a 900°C. Esse processo usa biomassa sólida ou líquida para produzir uma substância gasosa, também chamada de gás de síntese. Esse gás pode ser usado em motores de combustão interna, turbinas, para a geração de calor ou eletricidade. A gaseificação é um processo mais sofisticado que a combustão e a incineração. Mas, na Europa já existem propriedades rurais que adotam a tecnologia na escala das fazendas (Cardoso *et al.* 2019, Taupe *et al.* 2016).

A carbonização hidrotérmica converte a biomassa em um material semelhante ao carvão com maior teor de carbono. O grau de carbonização está relacionado à massa inicial, à temperatura ao tempo de reação e pressão. O processo acontece em 170-250 °C a uma pressão que mantém a saturação do processo. A biomassa nessas condições produz uma parte sólida, uma parte líquida e alguns gases. A carbonização hidrotérmica é capaz de produzir um hidrocarvão rico em fósforo. O fósforo pode ser extraído e usado como fertilizante agrícola e o restante do carvão pode ser usado como combustível sólido. (Oh & Yoon 2017, Oliver-Tomas *et al.* 2019).

Biossíntese e fotobiorreator

A biossíntese é um processo biológico realizado por organismos vivos. A biossíntese está relacionada com os processos anabólicos desses organismos. Organismos vivos podem produzir compostos químicos complexos a partir de elementos mais simples. Fungos e outros microrganismos cultivados são capazes de produzir enzimas como as lacases. Essas enzimas podem ser aplicadas em diversas finalidades, as lacases por exemplo, funcionam como biocatalizadores e essas substâncias podem ser usadas em cosméticos, medicamentos pois são capazes de realizar uma função específica num organismo vivo (Chebbi *et al.* 2021, Pinheiro *et al.* 2020).

Resíduos da fabricação de vinhos e do processamento de olivas podem ser usados no processo de biossíntese realizado por fungos e outros micro-organismos. Nesse processo biológico podem ser produzidos, por exemplo, glicolipídeos. Essas moléculas podem ser usadas na fabricação de bioprodutos na indústria de cosméticos, indústria de limpeza e outras aplicações (Chebbi *et al.* 2021).

O Fotobiorreator é uma estratégia para cultivar micro-organismos fototrópicos. O fotobiorreator utiliza uma fonte de luz para cultivar micro-organismos fototrópicos, como as microalgas ou algumas bactérias. Por exemplo, algumas cianobactérias fototrópicas são capazes de assimilar e armazenar glicogênio, cianoficina (polímero de aminoácido), polifosfatos e polihidroxialcanoatos. Essas substâncias podem ser aplicadas a produção de bioplásticos. Já as microalgas, cultivadas em fotobiorreatores, podem ser integradas ao sistema de digestão anaeróbica como estratégia para purificar o biogás, pois o processo de fotossíntese é capaz de fixar o CO₂ e liberar oxigênio. Por fim, a biomassa das microalgas pode ser usada em outras finalidades, como produção de bio-óleo ou no processo de coodigestão anaeróbica (Sepúlveda-Muñoz *et al.* 2020, Uggetti *et al.* 2018).

Biorrefinaria

A biorrefinaria é uma unidade industrial que pode usar diversos processos para a conversão de biomassa em combustível. Diversas biomassas podem ser processadas para a produção de biocombustíveis. Os dejetos animais e resíduos agrícolas são alternativas promissoras para auxiliar na substituição dos combustíveis fósseis (Bona *et al.* 2018, Rekleitis *et al.* 2020).

As biorrefinarias exigem aparato tecnológico especializado mas, permitem produzir produtos de alto valor agregado como o bioetanol, biometano, fertilizantes e outros materiais alternativos. Algumas biorrefinarias utilizam em conjunto diversos processos biológicos e térmicos que já foram descritos (Bona *et al.* 2018, Khonhnevisan *et al.* 2021, Rekleitis *et al.* 2020).

Soluções biológicas e térmicas

No geral existem soluções de natureza biológica e térmica. A partir dos resultados encontrados podemos classificar as tecnologias para valorização de resíduos em biológicas e térmicas, conforme a Tab. 3.

Alguns desses processos seguem princípios semelhantes e alguns dos termos usados se referem a mesma tecnologia como é o caso dos termos digestão anaeróbica e planta de biogás, conceitos que dizem respeito a mesma tecnologia biológica de tratamento de resíduos (Ai *et al.* 2020, Battista *et al.* 2019). Um processo com princípios semelhantes é aplicado na transformação de matéria seca originando o termo digestão anaeróbica seca (Abouelenien *et al.* 2016). A coo digestão e a coo digestão anaeróbica são o resultado de estratégias de melhoramento da digestão anaeróbica (Çaliskan & Azbar 2017, Kaszycki *et al.* 2021).

Tabela 3. Classificação das tecnologias para valorização de resíduos de acordo com sua natureza

Biológica	Térmica
Digestão Anaeróbica	Pirólise
Compostagem	Combustão
Microalgas	Incineração
Algas	Gaseificação
Coo digestão	Carbonização Hidrotérmica
Coo digestão anaeróbica	
Planta de Biogás	
Vermicompostagem	
Biossíntese	
Digestão Anaeróbica Seca	
Fotobiorreator	

Os processos térmicos usam calor, mas diferem quanto a temperatura, pressão, ausência ou presença de oxigênio e outras características. A pirólise, por exemplo, normalmente ocorre acima de 430°C na ausência de oxigênio (Akor *et al.* 2021, Lee *et al.* 2017). Além disso processos térmicos e biológicos podem ser aplicados juntos ou em etapas favorecendo a recuperação de nutrientes numa perspectiva de economia circular, como pode se observar em algumas biorrefinarias e estudos-piloto (Akor *et al.* 2021, Khoshnevisan *et al.* 2021, Uggetti *et al.* 2018).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com o número de ocorrência de palavras-chave a digestão anaeróbica, a compostagem e as microalgas são as soluções mais estudadas para a valorização de resíduos agropecuários. Os três processos são de natureza biológica, ou seja, aproveitam a ação de micro-organismos vivos e comuns na natureza para a transformação dos resíduos (Franchino *et al.* 2016, Jakubus 2020, Tampio *et al.* 2016).

As tecnologias para a valorização de resíduos agropecuários podem ser de natureza biológica ou térmica. Os processos biológicos podem ser aplicados em efluentes líquidos ou secos. Os processos térmicos trabalham com diferentes condições de temperatura e pressão. Os metais pesados, os contaminantes químicos e biológicos são uma grande preocupação nos processos de tratamento. As microalgas, os fungos e outros micro-organismos também podem ser aplicados como processos complementares para gerar novos subprodutos, purificar gases ou efluentes.

É preciso destacar que alguma solução ou tecnologia muito recente e pouco explorada na literatura científica pode não estar representada devido a estratégia metodológica adotada. A discussão desse artigo poderia ser muito mais extensa trazendo mais detalhes sobre cada uma das tecnologias apresentadas, mas devido ao grande número de tecnologias isso não seria possível para os limites de um artigo.

Estudos futuros podem comparar as diferentes tecnologias, apresentar as vantagens e desvantagens de

cada uma. Os estudos recentes mostram que um processo de aperfeiçoamento está em curso e existem muitas possibilidades para a valorização dos resíduos. É preciso aperfeiçoar as tecnologias para a realidade das atividades agrícolas, é preciso encontrar meios tecnológicos e modelos de negócio para popularizar, viabilizar e comercializar o uso dessas tecnologias. É fundamental definir como essas tecnologias se adaptam a diferentes realidades e quais fatores influenciam a adoção dessas tecnologias nas cadeias produtivas. A adoção dessas tecnologias é um passo fundamental em direção a um modelo de bioeconomia e economia circular.

Listamos as tecnologias mais estudadas mundialmente para a valorização de resíduos agropecuários. Estabelecemos um panorama entre as principais tecnologias que podem ser usadas para a gestão e valorização de resíduos agropecuários. Em estudos futuros as tecnologias aqui listadas poderão ser usadas como variável controle ou parâmetro de custos e eficiência tecnológica.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi desenvolvido com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Brasil, por meio da concessão de bolsa do processo n. 88887.486380 / 2020-00.

REFERÊNCIAS

- Abouelenien, F., Namba, Y., Nishio, N., Nakashimada, Y. 2016. Dry Co-Digestion of Poultry Manure with Agriculture Wastes. *Applied biochemistry and biotechnology*, New York 178(5): 932-946. DOI: 10.1007/s12010-015-1919-1
- Afroze, S. & SEN, T. K. 2018. A Review on Heavy Metal Ions and Dye Adsorption from Water by Agricultural Solid Waste Adsorbents. *Water, Air, and Soil Pollution* 229 (7), 225. DOI 10.1007/s11270-018-3869-z
- Ai, P., Jin K. D., Alengebawy, A., Elsayed, M., Meng, L., Chen, M.D., Ran, Y. 2020. Effect of application of different biogas fertilizer on eggplant production: Analysis of fertilizer value and risk assessment. *Environmental technology & innovation*, Netherlands 19, 101019. DOI: 10.1016/j.eti.2020.101019

- Akor, C. I., Osman, A.I., Farrell, C., McCallum, C.S., John Doran, W. 2021. Chemical Engineering Journal, Netherlands 406, 127039. DOI: 10.1016/j.cej.2020.127039
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J.L., Guwy, A.J., Kalyuzhnyi, S. Jenicek, P. Van Lier, J.B. 2009. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology* 59(5): 927–934. DOI: 10.2166/wst.2009.040
- Astill, G. M., shumway, C. R. 2016. Profits from pollutants: Economic feasibility of integrated anaerobic digester and nutrient management systems. *Journal of Environmental Management* 184: 353–362. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.10.012
- Battista, F., Frison, N., Bolzonella, D. Energy and nutrients' recovery in anaerobic digestion of agricultural biomass: An Italian perspective for future applications. *Energies*, Verona 12 (17), 3287. DOI: 10.3390/en12173287
- Bogush, A. A., Stegemann, J.A., Williams, R. Wood, I.G. 2018. Element speciation in UK biomass power plant residues based on composition, mineralogy, microstructure and leaching. *Fuel* 211:712–725. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.09.103
- Bohutskiy, P., Chow, S., Ketter, B., Fung Shek, C., Yacar, D. 2016. Phytoremediation of agriculture runoff by filamentous algae poly-culture for biomethane production, and nutrient recovery for secondary cultivation of lipid generating microalgae. *Bioresour Technol* 222 : 294–308. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.10.013
- Bona, D. Vecchiet, A. Pin, M., Fornasier, F., Mondini, C. Guzzon, R., Silvestri, S. The Biorefinery Concept Applied to Bioethanol and Biomethane Production from Manure. *Waste and biomass valorization* 9 (11): 2133–2143. DOI: 10.1007/s12649-017-9981-2
- Borges, Y., Alves, L., Bianchi, L., Espindola, J. C., Oliveira, J. M., Radetski, C. M., Somensi, C. A. 2017. Optimization of animal manure vermicomposting based on biomass production of earthworms and higher plants. *Journal of environmental science and health part b-pesticides food contaminants and agricultural wastes* 52 (11): 791–795. DOI: 10.1080/03601234.2017.1356162
- Callegari, A., Hlavinek, P., Capodaglio, A. G. 2018. Production of energy (biodiesel) and recovery of materials (biochar) from pyrolysis of urban waste sludge. *Revista Ambiente e Agua* 13 (2), e 2128 . DOI: 10.4136/ambi-agua.2128
- Cardoso, J., Silva, V., Eusebio, D., Trninić, M. R., Carvalho, T., Brito, P. 2019. Techno-economic analysis of olive pomace gasification for cogeneration applications in small facilities. *Thermal Science* 23 (5): 1487–1498. DOI: 10.2298/TSCI180726410C
- Cardozo, E., Erlich, C. Alejo, L. Fransson, T. H., Comparison of the thermal power availability of different agricultural residues using a residential boiler. *Biomass Conversion and Biorefinery* 6 (4): 435–447. DOI: 10.1007/s13399-016-0200-3
- Cavalaglio, G., Cotana, F., Nicolini, A., Coccia, V., Petrozzi, A. Formica, A., Bertini, A. 2020. Characterization of various biomass feedstock suitable for small-scale energy plants as preliminary activity of biocheaper project. *Sustainability (Switzerland)* 12 (16), 6687. DOI: 10.3390/su12166678
- Chebbi, A. Franzetti, A., Duarte Castro, F., Gomez Tovar, F. H., Tazzari, M., Sbaiffoni, S. Vaccari, M. 2021. Potentials of Winery and Olive Oil Residues for the Production of Rhamnolipids and Other Biosurfactants: A Step Towards Achieving a Circular Economy Model. *Waste and Biomass Valorization* 12 (8): 4733 – 4743 DOI: 10.1007/s12649-020-01315-8
- Chew, K. W. Chia, S. R., Chia, W. Y., Cheah, W. Y., Munawaroh, H. S. H., Ong, W. J. 2021. Abatement of hazardous materials and biomass waste via pyrolysis and co-pyrolysis for environmental sustainability and circular economy. *Environmental Pollution*, v. 278: 116836. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116836
- Chowdhury, T. H. 2021. Technical-economical analysis of anaerobic digestion process to produce clean energy. *Energy Reports* 7: 247–253. DOI: 10.1016/j.egy.2020.12.024
- Cobo, M. J. Martínez, M. A., Gutiérrez-Salcedo, M., Fujita, H., Herrera-Viedma, E. 2015. 25years at Knowledge-Based Systems: A bibliometric analysis. *Knowledge-Based Systems* 80: 3–13. DOI: 10.1016/j.knsys.2014.12.035
- Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., Herrera, F. 2012. SciMAT: A new science mapping analysis software tool. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, Granada 63 (8): 1609–1630. DOI: 10.1002/asi.22688
- Çalışkan, G., Azbar, N. 2017. Energy Recovery From Conventional Biogas Digester Effluent with a Novel Bioreactor Configuration. *Waste and Biomass Valorization*, Netherlands 8 (7): 2371–2381. DOI: 10.1007/s12649-016-9827-3
- De Wilt, A. Butkovskiy, A., Tuantet, K., Leal, L. H., Fernandes, T. V., Langenhoff, A., Zeeman, G. 2016. Micropollutant removal in an algal treatment system fed with source separated wastewater streams. *Journal of Hazardous Materials* 304: 84–92. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.10.033
- Deng, L., Chen, C., Zheng, D., Yang, H. N., Liu, Y., Chen, Z. A. 2016. Effect of temperature on continuous dry fermentation of swine manure. *Journal of environmental management* 177: 247–252. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.04.029
- Diacono, M., Persiani, A., Testani, E., Montemurro, F., Ciaccia, C. 2019. Recycling agricultural wastes and by-products in organic farming: Biofertilizer production, yield performance and carbon footprint analysis. *Sustainability (Switzerland)* 11 (14). DOI: 10.3390/su11143824
- Didaskalou, C., Buyuktiryaki, S., Kecili, R., Fonte, C. P., Szekeley, G. 2017. Valorisation of agricultural waste with an adsorption/nanofiltration hybrid process: From materials to sustainable process design. *Green Chemistry* 19 (13): 3116–3125. DOI: 10.1039/c7gc00912g
- Donner, M.; Gohier, R.; De vries, H. A new circular business model typology for creating value from agro-waste. *Science of The Total Environment* 716: 137065. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137065
- DUQUE-ACEVEDO, M., Belmonte-Ureña, L. J., Cortés-García, F. J., Camacho-Ferre, F. 2020. Agricultural waste: Review of the evolution, approaches and perspectives on alternative uses. *Global Ecology and Conservation* 22, e00902. DOI: 10.1016/j.gecco.2020.e00902
- Fica, Z.; Sims, R. 2016. Algae-based biofilm productivity utilizing dairy wastewater: effects of temperature and organic carbon concentration. *Journal of biological engineering* v. 10:18. DOI: 10.1186/s13036-016-0039-y
- Figueiredo, C. C. D., Wickert, E. G., Vieira Neves, H. C., Coser, T. R., Paz-Ferreiro, J. 2020. Sewage sludge biochar increases nitrogen fertilizer recovery: Evidence from a 15N tracer field study. *Soil Use and Management* 37 (4): 689:697. DOI: 10.1111/sum.12672
- Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., Kacprzak, M. J. 2017. The presence of contaminations in sewage sludge – The current situation. *Journal of Environmental Management* 203: 1126–1136. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.068
- Franchino, M., Tigini, V., Varese, G. C., Sartor, R. M., Bona. F. 2016. Microalgae treatment removes nutrients and reduces ecotoxicity of diluted piggery digestate. *Science of the total environment*, Amsterdam 569 : 40–45. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.06.100
- Galvão, T. F., Pansani, T. de S. A., Harrad, D. 2015. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. *Epidemiologia e Serviços de Saúde* 24: 335–342. DOI: 10.5123/S1679-49742015000200017
- Ghisellini, P., Cialani, C., Ulgiati, S. 2016. A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production* 114: 11–32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007
- Gogate, P. R., Pandit, A. B. 2004. A review of imperative technologies for wastewater treatment II: Hybrid methods. *Advances in Environmental Research* 8 (3–4): 553–597. DOI: 10.1016/S1093-0191(03)00031-5
- Gontard, N. Sonesson, U., Birkved, M., Majone, M., Bolzonella, D., Celli, A., Angellier-Coussy, H., Jang, G. H., Verniquet, A., Broeze, J., Schaer, B., Batista, A. P., Sebok A. 2018. A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 48 (6): 614–654. DOI: 10.1080/10643389.2018.1471957
- González-castaño, M., Kour, H., González-Arias, J., Baena-Moreno, M., Arellano-García, H. 2021. Promoting bioeconomy routes: From food waste to green biomethane. A profitability analysis based on a real case study in eastern Germany. *Journal of Environmental Management* 300, 112788. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113788

- Haddow, G 2018. Bibliometric research. *In: Research methods: information, systems, and contexts*. Cambridge, MA, United States: Chandos Publishing, an imprint of Elsevier, 2018. (Second edition). p. 241–266.
- Hirsch, J. E. 2007. Does the h index have predictive power? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Washington 104 (49): 19193–19198. DOI: 10.1073/pnas.0707962104
- Hua, K., Wang, D., Guo, X., Guo, Z. 2014. Carbon sequestration efficiency of organic amendments in a long-term experiment on a vertisol in huang-huai-hai plain, China. *Plos one* 9 (9), e108594. DOI: 10.1371/journal.pone.0108594
- Huang, H., He, L., Zhang, Z., Lei, Z., Liu, R., Zheng, W. 2019. Enhanced biogasification from ammonia-rich swine manure pretreated by ammonia fermentation and air stripping. *International Biodeterioration and Biodegradation* 140: 84–89. DOI: 10.1016/j.ibiod.2019.03.014
- Huang, W., Huang, W., Yuan, T., Zhao, Z., Cai, W., Zhang, Z., Lei, Z., Feng, C. 2016. Volatile fatty acids (VFAs) production from swine manure through short-term dry anaerobic digestion and its separation from nitrogen and phosphorus resources in the digestate. *Water Research* 90: 344–353. DOI: 10.1016/j.watres.2015.12.044
- Jakubus, M. A. 2020. Comparative study of composts prepared from various organic wastes based on biological and chemical parameters. *Agronomy*, Basel 10 (6), 869. DOI: 10.3390/agronomy10060869
- Kaszycski, P.; Głodniok, M.; Petryszak, P. 2021. Towards a bio-based circular economy in organic waste management and wastewater treatment – The Polish perspective. *New Biotechnology*, Amsterdã 61: 80–89. DOI: 10.1016/j.nbt.2020.11.005
- Khoshnevisan, B., Duan, N., Tsapekos, P., Awasthi, K., Liu, Z., Mohammadi, A., Angelidaki, I., Tsang, D. C. W., Zhang, Z., Pan, J., Ma, L., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Liu, H., 2021. A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability, challenges, and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Edinburgh 135, 110033. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110033
- Kim, J. Y., Kim, H. W., 2017. Photoautotrophic microalgae screening for tertiary treatment of livestock wastewater and bioresource recovery. *Water (Switzerland)* 9 (3), 192. DOI: 10.3390/w9030192
- Lee, J., Yang, X., Cho, S. H., Kim, J. K., Lee, S. S., Tsang, D. C. W., Ok, Y. S., Kwon, E. E., 2017. Pyrolysis process of agricultural waste using CO₂ for waste management, energy recovery, and biochar fabrication. *Applied Energy*, Amsterdam 185: 214–222. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.10.092
- Liu, X., Geng, B., Zhu, C. X., Li, L. F., Francis, F. 2021. An Improved Vermicomposting System Provides More Efficient Wastewater Use of Dairy Farms Using *Eisenia fetida*. *Agronomy-basel* 11 (5), 833. DOI: 10.3390/agronomy11050833
- Maghanaki, M. M., Ghoobadian, B., Najafi, G., Galogah, R. J. 2013. Potential of biogas production in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28: 702–714. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.021
- Mitrogiannis, D., Psychoyoy, M., Baziotis, I., Inglezakis, V. J., Koukoulas, N., Tsoukalas, N., Palles, D., Kamitsos, E., Oikonomou, G., Markou, G. 2017. Removal of phosphate from aqueous solutions by adsorption onto Ca(OH)₂ treated natural clinoptilolite. *Chemical Engineering Journal* 320: 510–522. DOI: 10.1016/j.cej.2017.03.063
- Navrotsky, Y.; Patsei, N. 2021. Zipf's Distribution Caching Application in Named Data Networks. *In: 2021 IEEE open conference of electrical, electronic and information sciences (eStream) 2021*. Proceedings, Anais [...]. DOI: 10.1109/eStream53087.2021.9431445
- Oh, S. Y., Yoon, Y. M. 2017. Energy recovery efficiency of poultry slaughterhouse sludge cake by hydrothermal carbonization. *Energies* 10 (11), 1876. DOI: 10.3390/en10111876
- Oliver-tomas, B. Hitzl, M., Owsianiak, M., Renz, M. 2019. Evaluation of hydrothermal carbonization in urban mining for the recovery of phosphorus from the organic fraction of municipal solid waste. *Resources, Conservation and Recycling* 147: 111–118. DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.04.023
- Pagans, E., Barrena, R., Font, X., Sánchez, A. 2006. Ammonia emissions from the composting of different organic wastes. Dependency on process temperature. *Chemosphere* 62 (9): 1534–1542. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.06.044
- Page M.J., McKenzie J.E., Bossuyt P.M., Boutron I., Hoffmann T.C., Mulrow C.D., Shamseer L., Tetzlaff J.M., Akl E.A., Brennan S.E., Chou R., Glanville J. 2021. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ* (71), 372. DOI: 10.1136/bmj.n71
- Palallo, F., Ardi, M., Yusuf, G. 2018. The Potency of Livestock Waste into Renewable Energy (Biogas) in Palipu District Tana Toraja Regency. *Journal of Physics: Conference Series* 1028: 012010. DOI: 10.1088/1742-6596/1028/1/012010
- Palermo, G. C.; D'Avignon, A. L. D. A.; Freitas, M. A. V. 2014. Reduction of emissions from Brazilian cattle raising and the generation of energy: Intensification and confinement potentials. *Energy Policy* 68: 28–38. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.01.041
- Parralajo, A. I. Royano, L., González, J. F., 2019. Small scale biogas production with animal excrement and agricultural residues. *Industrial Crops and Products* 131: 307–314. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.01.059
- Parra-orobio, B. A., Rotavisky-Sinisterra, M. P., Pérez-Vidal, A., Marmolejo-Rebellón, L. F., Torres-Lozada, P. Physicochemical, microbiological characterization and phytotoxicity of digestates produced on single-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste. *Sustainable Environment Research* 31 (11). DOI: 10.1186/s42834-021-00085-9
- Piekutin, J., Puchlik, M., Haczykowski, M., Dyczewska, K. 2021. The efficiency of the biogas plant operation depending on the substrate used. *Energies*, v. 14, n. 11, 2021. DOI: 10.3390/en14113157
- Pinheiro, V. E., Michelin, M., Vici, A. C., de Almeida, P. Z., Teixeira de Moraes Polizeli, M. L. 2020. *Trametes versicolor* laccase production using agricultural wastes: a comparative study in Erlenmeyer flasks, bioreactor and tray. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 43 (3): 507–514. DOI: 10.1007/s00449-019-02245-z
- Pinto, R.; Brito, L.; Coutinho, J. 2017. Organic production of horticultural crops with green manure, composted farmyard manure and organic fertiliser. *Biological agriculture & horticulture* 33 (4): 269–284. DOI: 10.1080/01448765.2017.1347521
- Pintucci, C. Carballa, M., Varga, S., Sarli, J., Peng, L. 2017. The ManureEcoMine pilot installation: Advanced integration of technologies for the management of organics and nutrients in livestock waste. *Water Science and Technology* 75 (6): 1281–1293. DOI: 10.2166/wst.2016.559
- Postawa, K., Szczygiel, J., Kulażyński, M. 2021. Innovations in anaerobic digestion: a model-based study. *Biotechnology for Biofuels* 14:19. DOI: 10.1186/s13068-020-01864-z
- Rajendran, A. Fox, T., Reis, C. R., Wilson, B., Hu, B. 2018. Deposition of manure nutrients in a novel mycoalgae biofilm for Nutrient management. *Biocatalysis and agricultural biotechnology* 14: 120–128. DOI: 10.1016/j.bcab.2018.02.014
- Rekleitis, G., Haralambous, K. J., Loizidou, M., Aravossis, K. 2020. Utilization of agricultural and livestock waste in anaerobic digestion (A.D): Applying the biorefinery concept in a circular economy. *Energies* 13 (17), 4428. DOI: 10.3390/en13174428
- Ryckeboer, J., Mergaert, J., Vaes, K., Klammer, S., De Clercq, D., Coosemans, J., Insam, H., Swings, J. 2003. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Annals of Microbiology* 53 (4): 349–410. WOS:000187783400001
- Sepúlveda-Muñoz, C. A., De Godos, I., Puyol, D., Muñoz, R. 2020. A systematic optimization of piggery wastewater treatment with purple phototrophic bacteria. *Chemosphere* 253: 126621. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.126621
- Sharma, G. K., Khan, S. A., Shrivastava, M., Bhattacharyya, R., Sharma, A., Gupta, D. K., Kishore, P., Gupta, N., 2021. Circular economy fertilization: Phycoremediated algal biomass as biofertilizers for sustainable crop production. *Journal of Environmental Management* 287: 112295. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112295
- Singh, A., Karmegam, N., Singh, G. S., Bhadauria, T., Chang, S. W., Awasthi, M. K., Sudhakar, S., Arunachalam, K. D., Biruntha, M. Ravindran, B. 2020. Earthworms and vermicompost: an eco-friendly approach for repaying nature's debt. *Environmental geochemistry and health* 42 (6): 1617–1642. DOI: 10.1007/s10653-019-00510-4

- sobhi, M., Guo, J. Cui, X., Sun, H., Li, B., Aboagye, D., Shah, G. M., Dong, R. 2019. A promising strategy for nutrient recovery using heterotrophic indigenous microflora from liquid biogas digestate. *Science of the Total Environment* 690: 492–501. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.487
- Tampio, E., Martinen, S., Rintala, J. 2016. Liquid fertilizer products from anaerobic digestion of food waste: Mass, nutrient and energy balance of four digestate liquid treatment systems. *Journal of Cleaner Production*, Amsterdam 125: 22–32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.03.127
- Taupe, N. C., Lynch, D., Wnetrzak, R., Kwapinska, M., Kwapinski, W., Leahy, J. J. 2016. Updraft gasification of poultry litter at farm-scale – A case study. *Waste Management* 50: 324–333. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.02.036
- Uggetti, E. García, J., Álvarez, J. A., García-Galán, M. J. 2018. Start-up of a microalgae-based treatment system within the biorefinery concept: From wastewater to bioproducts. *Water Science and Technology* 78 (1): 114–124. DOI: 10.2166/wst.2018.195
- Van eck, N. J.; Waltman, L. 2019. VOSviewer Manual. Universiteit Leiden, Leiden. Disponível em: https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.13.pdf. Acessado em 27. 9. 2021.
- Wang, S.-P. Wang, L., Sun, Z. Y., Wang, S. T., Shen, C. H., Tang, Y. Q., Kida, K. 2021. Biochar addition reduces nitrogen loss and accelerates composting process by affecting the core microbial community during distilled grain waste composting. *Bioresource Technology* 337: 125492. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125492
- Weiland, P. 2010. Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology* 85 (4): 849–860. DOI: 10.1007/s00253-009-2246-7
- ZHANG, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T. 2014. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38: 383–392. DOI: 10.1016/j.rser.2014.05.038
- Zou, Y., Zeng, Q., Li, H., Liu, H., Lu, Q. 2021 Emerging technologies of algae-based wastewater remediation for bio-fertilizer production: a promising pathway to sustainable agriculture. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 96 (3): 551–563. DOI: 10.1002/jctb.6602