

# ANÁLISE DOS PRÉ-TRATAMENTOS DE RESÍDUOS VEGETAIS NA PRODUÇÃO DE METANO EM REATORES DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

**Arthur Ribeiro Torrecilhas (Universidade Norte do Paraná - UNOPAR)**

Arthurribeirotorrecilhas@gmail.com

**Marcio Ronald Sella (Universidade Norte do Paraná - UNOPAR)**

sellamr@hotmail.com

**Flávio Augusto Carraro (Universidade Norte do Paraná - UNOPAR)**

flavio.carraro@hotmail.com

**Juliana Alberton Frias (Universidade Norte do Paraná - UNOPAR)**

juliana.frias@hotmail.com

**Ana Carla Viotti (Universidade Norte do Paraná - UNOPAR)**

anacarlaviotti@gmail.com



*A digestão anaeróbica de resíduos vegetais oferece uma excelente oportunidade para converter grandes recursos biológicos em energia renovável, como é o caso da conversão destes resíduos em biogás, com foco em altos teores de metano. Entretanto, estes resíduos vegetais apresentam uma estrutura de difícil biodegradabilidade por conta do elevado teor de lignina em suas estruturas, mantendo o material intracelular protegido da degradação por meio dos microorganismos da digestão anaeróbia. A capacidade de degradar substratos ricos em lignina pode ser realizada por meio de diversos tipos de pré-tratamentos, entre eles, os mais usuais, o pré-tratamento físico, químico e biológico. No entanto, ainda existem vários desafios que devem ser superados para a digestão eficiente da biomassa lignocelulósica com foco na maior produção de metano no processo de biodigestão, visando a eficiência energética. Um destes desafios é a não geração de subprodutos tóxicos ao meio biológico anaeróbio. Outro, é a ampliação no conhecimento de novas tecnologias e combinação destas, viabilizando o processo de biodigestão, tanto financeiramente quanto eficientemente falando. Este artigo de revisão destaca o estado atual da digestão de biomassa lignocelulósica e discute seus desafios. Para tal, foi necessário realizar uma extensa pesquisa em diferentes fontes bibliográficas, pesquisadores e revistas sobre a biodigestão anaeróbia e materiais lignocelulósicos para uso na biodigestão anaeróbia com foco na produção de metano. Além deste contexto, o artigo também discute as futuras necessidades de pesquisa da digestão de biomassa lignocelulósica, e sua importância no contexto*

*sustentável e na busca pela melhoria de um processo de maior eficiência energética.*

*Palavras-chave: Biodigestão anaeróbia; Resíduos vegetais; Lignina; Produção de metano; eficiência energética.*

## 1. Introdução

A digestão anaeróbia (DA) faz parte de um processo bioquímico complexo, nele ocorre o tratamento de substratos orgânicos como, por exemplo, esgotos e efluentes industriais, adubos residuários e demais substratos sólidos (cultivos energéticos, resíduos agrícolas e alimentares). A DA recebeu maior atenção nos últimos anos pois, nesse período, esse processo teve uma elevada expansão. Esse processo envolve a estabilização da matéria orgânica complexa por um conjunto de microrganismos que, durante o processo, promovem como subproduto um gás com elevado potencial energético, o biogás, uma fonte de energia renovável capaz de substituir a fonte de energia fóssil (ANGELIDAKI et al., 2009).

Muitas pesquisas foram realizadas para verificação de melhores operabilidades no processo de DA, sempre visando a maior e melhor produção de metano no biogás (AMON et al., 2007).

Entre estas pesquisas, encontra-se a utilização de resíduos de poda vegetal, ricos em carbonos, mantendo o equilíbrio da relação C:N – Carbono: Nitrogênio, essa, fundamental para um excelente processo de biodegradação da matéria em vias anaeróbias. Estes resíduos são co-tratados juntamente com restos de alimentos, entretanto, os resíduos vegetais possuem uma proteção em sua composição que dificulta a penetração dos microrganismos anaeróbios na matéria orgânica do resíduo, complicando a degradação e consumo deste substrato (MATA-ALVAREZ, 2011).

Este trabalho consiste em uma pesquisa bibliográfica com foco na análise exploratória de resultados obtidos por experimentos relativos à produção de metano e tratamento de resíduos vegetais em processos de biodigestão anaeróbia. As buscas foram realizadas no banco de dados bibliográficos Scencedirect e Portal periódicos CAPES. Foram selecionados artigos publicados entre 2007 e 2018, com exceção de alguns autores essenciais para o complemento deste trabalho que tiveram suas produções fora do período selecionado na metodologia, baseando-se no método descrito por Gerhardt e Silveira (2009).

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar uma pesquisa bibliográfica com foco no pré-tratamento destes resíduos de poda vegetal visando a melhor produção de metano. E ainda, buscar o pré-tratamento de resíduos vegetais mais eficiente para o processo da digestão anaeróbia.

## 2. Referências bibliográficas

### 2.1. O biogás, o processo de digestão anaeróbia e suas reações bioquímicas

O biogás é o produto gerado pela degradação da biomassa sob condições anaeróbias, podendo existir, basicamente, três categorias de biomassa: (1) substratos de origem agrícola, como esterco líquido, resíduos alimentares e resíduos de colheitas; (2) resíduos municipais, como o lixo orgânico coletado e separado, restos de alimentos vencidos ou rejeitados; (3) e também a biomassa proveniente de resíduos industriais, como a glicerina, subprodutos industriais de alimentos ou resíduos de separadores de gordura. A digestão da parcela orgânica do substrato é convertida em biogás por bactérias contidas no interior de digestores herméticos (GOMEZ, 2013).

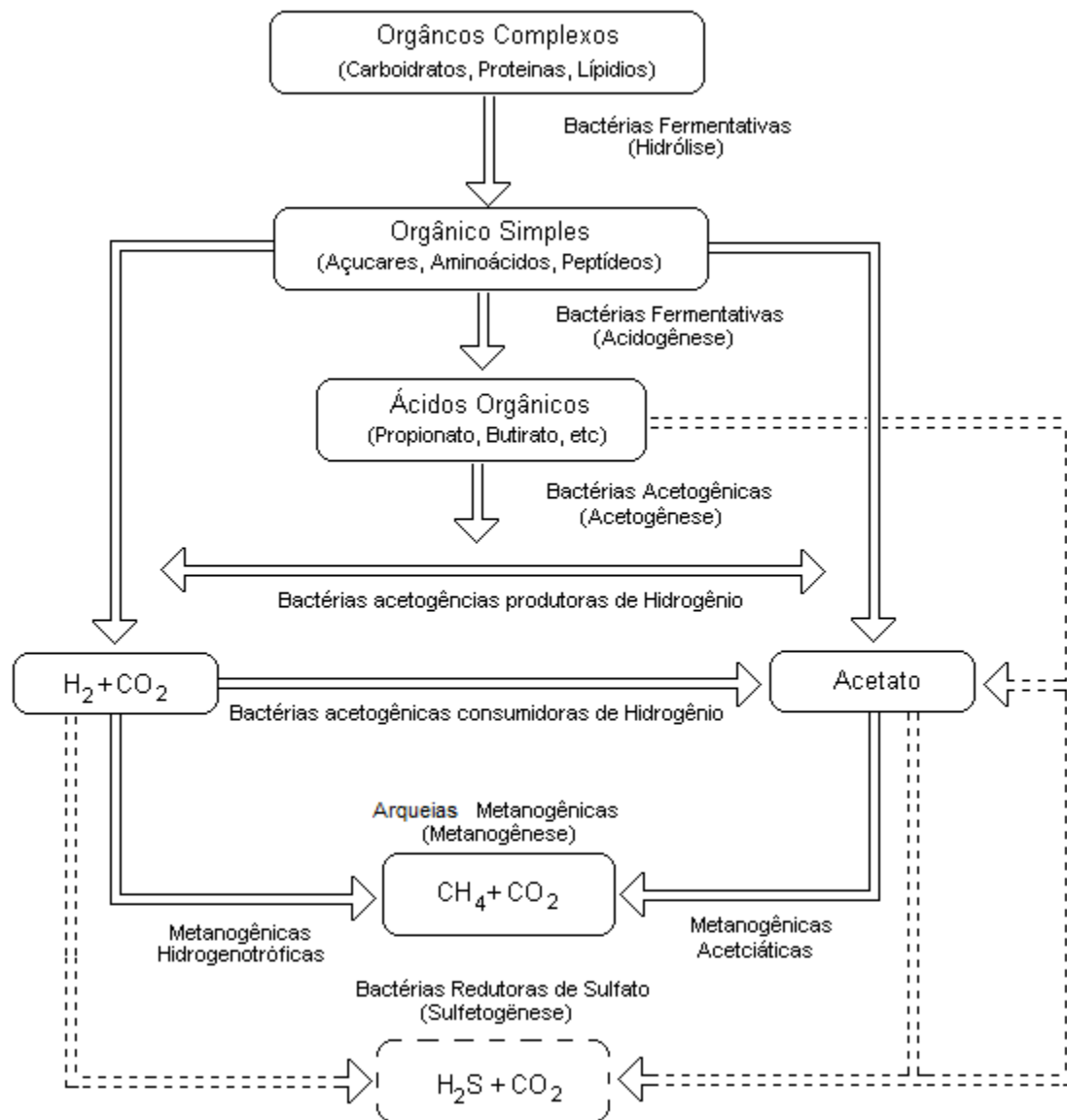
O processo de degradação anaeróbica é um sistema altamente complexo e dinâmico, onde envolvem-se, intimamente, aspectos microbiológicos, bioquímicos e físico-químicos. As etapas de Biodigestão envolvem quatro principais etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (ANGELIDAKI et al., 2009).

Na hidrólise, carboidratos, lipídios e/ou proteínas complexas de alto peso molecular, são degradados em polímeros solúveis por meio da ação enzimática de bactérias fermentativas hidrolíticas. Uma vez hidrolisados, estes materiais ficam disponíveis para serem transportados ao interior das bactérias fermentativas, onde, por meio da fermentação da matéria orgânica, serão convertidos em hidrogênio ou formiato, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), piruvato, ácido graxo volátil e outros produtos orgânicos tais como etanol, cetonas ou ácido láctico. Essa etapa é intitulada de acidogênese (ANGELIDAKI et al., 2009; MATA-ALVAREZ, 2011).

Na terceira etapa, a acetogênese, os produtos da acidogênese sofrem oxidação, sendo convertidos em ácidos acéticos, hidrogênio e CO<sub>2</sub> pelas bactérias acetogênicas. Frequentemente, os três primeiros passos da digestão anaeróbia são agrupados como fermentação ácida (ANGELIDAKI et al., 2009; MATA-ALVAREZ, 2011). Posteriormente, na metanogênese, encontram-se dois grupos de Archaeas, as hidrogenotróficas (consumidoras de hidrogênio) e as acetoclásticas (consumidoras de acetato), as Archaeas são responsáveis pela conversão do acetato e do hidrogênio em CH<sub>4</sub> (MATA-ALVAREZ, 2011).

Toda estabilidade deste processo depende do equilíbrio crítico existente entre o crescimento harmonioso dos principais grupos metabólicos de bactérias e Archaeas. O modelo pode ser simplificado conforme a Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma das etapas da digestão anaeróbia



Fonte: Chernicharo (1997)

É evidente que o processo anaeróbio funciona bem, desde que cada classe subsequente de organismos processe a matéria orgânica tão rápido quanto é produzida, ou seja, um acúmulo de substrato pode resultar em sobrecarga dos organismos, comprometendo todo o processo de biodigestão anaeróbia.

## 2.2. Composição do biogás

O biogás é composto principalmente por CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, a produção e a qualidade do gás estão diretamente relacionadas à quantidade e às características do tipo e concentração de matéria

orgânica a ser digerida, população dos organismos presentes no reator e das condições físico-químicas do digestor (temperatura, agitação, alcalinidade e pH) (CONSTANT et al., 1989).

Para Mata-alvarez (2011) o biogás é composto por aproximadamente 65% de CH<sub>4</sub> e 35% de CO<sub>2</sub>. Enquanto que Constant et al. (1989) afirma que, geralmente, o biogás é composto por 60 a 65% de CH<sub>4</sub>, 35 a 40% de CO<sub>2</sub> e outros gases que em sua minoria constituem de sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), nitrogênio (N<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>) e traços de oxigênio (O<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), amônia (NH<sub>3</sub>) e outros compostos orgânicos voláteis.

Rosa et al. (2018), em sua pesquisa que buscou analisar o potencial energético dos subprodutos (lodo e biogás) de um reator UASB em escala real, verificou a composição média do biogás produzido pelo reator, chegando a valores médios de 78,2% de CH<sub>4</sub>, 6,7% de CO<sub>2</sub>, e 15,1% de certa mistura de outros gases constituintes do tratamento.

### 2.3. Substrato

O substrato é a principal fonte de matéria orgânica utilizada para a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia. As principais fontes de substratos para a biodigestão anaeróbia são resíduos agrícolas, resíduos industriais e urbanos.

Substratos urbanos são a fração orgânica dos resíduos domésticos e comerciais, como por exemplo restos alimentares, resíduos de jardinagem, resíduos de escritório, entre outros. Os resíduos orgânicos recolhidos e selecionados são, muitas vezes, co-digeridos com estrume animal e/ou lodos de digestores anaeróbios. O volume de resíduos domésticos gerados na sociedade cresce cada vez mais, indicando uma fonte de potencial elevado para processos anaeróbios. Além de que estes resíduos, quando utilizados no processo de digestão anaeróbia, não competem pelo uso de terra, quando comparado aos aterros sanitários, assim acabam por não gerar impactos negativos sobre a sustentabilidade (RUTZ et al., 2011).

Indústrias de alimentos e bebidas, forragens, processamento de peixe, leite, amido, açúcar, produtos farmacêuticos, bioquímicos e cosméticos, papel e celulose, e até mesmo matadouros, acabam, por sua vez, gerando subprodutos, resíduos e desperdícios no decorrer do processamento da matéria-prima. Dentre estes resíduos industriais, existem diversos com potencial de geração de metano e, em sua grande maioria, são ricos em lipídios, proteínas ou açúcares. Muitos resíduos orgânicos industriais são co-digeridos com esterco animal, aumentando, assim, a produção de metano e uma melhor estabilidade no processo de digestão anaeróbia (BIOSANTECH et al., 2013).

## 2.4. Resíduo vegetal

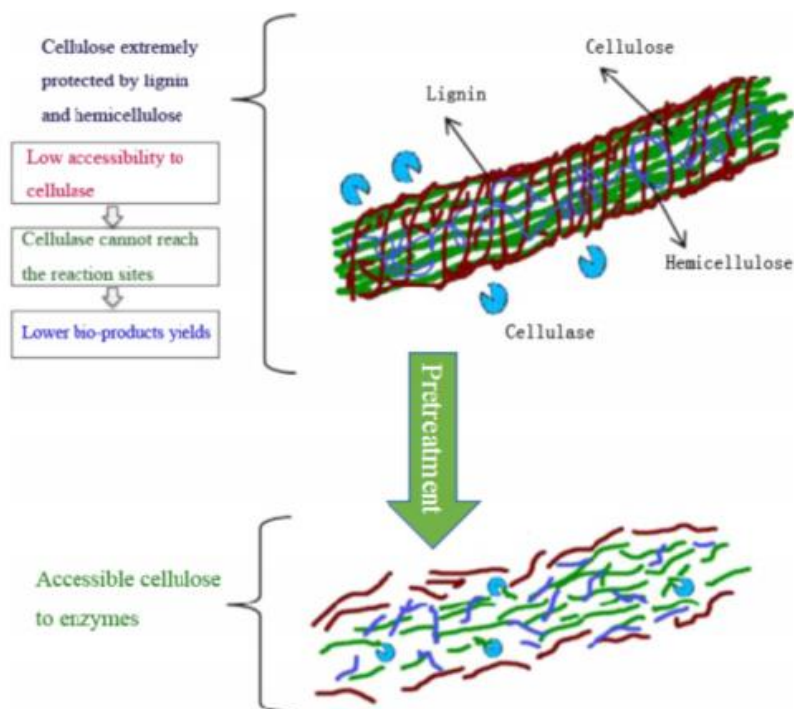
Muitos pesquisadores estão realizando experimentos e estudos com o uso de materiais lignocelulósicos, ou seja, os resíduos vegetais ou de podas vegetais. Entre as fontes renováveis de energia, a biomassa lignocelulosa é reconhecida como a maior e mais sustentável fonte de energia em todo o mundo. Na natureza, a biomassa lignocelulosa é uma fonte orgânica abundante, incluindo resíduos agrícolas e culturas energéticas. Existe uma quantidade considerável de resíduos lignocelulósicos que se acumulam a partir de atividades agrícolas, florestais e outras atividades da humanidade, que contêm grandes quantidades de energia (ZHANG et al., 2010).

Porém, as estruturas destes vegetais são ricas em lignina, compondo as paredes celulares secundárias das plantas como a principal barreira para a conversão da biomassa em biogás (ZHANG et al., 2010).

### 2.4.1. Pré-tratamento de resíduos vegetais

O pré-tratamento dos resíduos vegetais tem como principal foco a quebra da parede estrutural do vegetal, conhecida como lignina, conforme pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 – Estrutura vegetal antes e após pré-tratamento para quebra da lignina



Fonte: Tian et al. (2018)

Como observado na imagem, a quebra da lignina por meio de um pré-tratamento do vegetal facilita o acesso dos microrganismos responsáveis pela degradação do material orgânico do resíduo vegetal, aumentando, assim, os teores de metano na composição do biogás gerado (TIAN et al., 2018).

#### **2.4.2. Pré-tratamentos físicos**

Um dos tratamentos físicos mais utilizados é a redução do tamanho, grau ou cristais do resíduo vegetal. Pesquisas realizadas por Ghaffar e Fan (2013) apontam que ocorreu uma significativa redução nos teores de lignina ao realizarem a trituração da palha de trigo (64% de remoção). Portanto, os pré-tratamentos físicos podem aumentar a área acessível da biomassa lignocelulósica. No entanto, o subproduto de materiais tóxicos é geralmente insignificante no progresso do pré-tratamento, o que é uma vantagem importante do método de pré-tratamento físico.

Após a moagem por moinho, os materiais de palha de trigo são reduzidos e, conseqüentemente, têm sua área de superfície específica aumentada. A disponibilidade de celulase pode ser aumentada e a hidrólise da celulase pode ser mais completa. Além disso, a tecnologia de moagem de moinho pode tornar a estrutura de lignina solta, de modo que a estrutura e área do vegetal fique mais acessível à biodegradação. No entanto, o moinho é um método de pré-tratamento mecânico de alto consumo de energia, o que aumenta os custos de produção significativamente (COIMBRA, 2016).

#### **2.4.3. Pré-tratamentos químicos**

Os métodos químicos são extremamente eficazes na destruição do composto lignocelulósicos. No entanto, a produção de produtos tóxicos, a perda de alguns compostos orgânicos e o alto custo do pré-tratamento são desvantagens comuns (AMON et al., 2007). Existem dois tipos principais de tratamentos químicos, os que ocorrem por vias ácidas e os por vias alcalinas.

Sobre o pré-tratamento químico da palha de trigo, a tecnologia de pré-tratamento ácido não é um método novo, entretanto os estudos sobre esse método ainda são realizados. Sabe-se que o efeito do pré-tratamento, quando combinado com outros pré-tratamentos, proporciona uma maior eficiência na remoção do material lignocelulósico (TIAN et al., 2018).

Os ácidos podem ser aplicados para pré-tratamento de matéria-prima lignocelulósica, em estudos realizados por Tian et al. (2018), a lignina de partícula vegetais, após tratamento com bases ácidas, foi reduzida em até 70%.

Nos experimentos de Brodeur et al. (2011), a palha de trigo foi moída e adicionada ao reator de pré-tratamento, onde aproximadamente 90% da lignina foi quebrada. Vale ressaltar que neste



modelo, foi empregado dois tipos de tratamento, o físico devido a trituração dos resíduos e o químico.

Tian et. al. (2018) ressalta que no processo de degradação ácida da lignina pode ocorrer a geração de subprodutos tóxicos para as células do processo de biodigestão anaeróbia.

Por outro lado, existe também o pré-tratamento por meio alcalino, onde uma das principais vantagens dessa metodologia é a remoção eficiente da lignina, bem como a sua capacidade de aumentar a área das superfícies expostas. Entretanto, com um longo tempo de pré-tratamento ocorre a formação de sais, estes são relatadas como as desvantagens dos métodos de pré-tratamento alcalino (LI, KIM e NGHIEM, 2010).

Hidróxido de sódio e carbonato de sódio (sais) são as principais soluções alcalinas utilizadas para aplicação do pré-tratamento. Os efeitos do pré-tratamento da palha de trigo após o pré-tratamento com hidróxido de sódio foram estudados. A concentração ótima de tratamento alcalino da palha de trigo foi determinada e os principais componentes dos produtos de degradação foram analisados. A palha de trigo tratada com diferentes concentrações de hidróxido de sódio foi hidrolisada com eficiência, removendo altos teores de lignina e não gerando nenhum subproduto tóxico para o processo de biodigestão. Estudos apontam a redução de lignina em até 97%, entretanto este processo deve ser observado, pois altas concentrações de sais em reatores de biodigestão podem influenciar negativamente na produção de metano (KUMAR, 2008).

#### **2.4.4. Pré-tratamentos orgânicos**

Os métodos de pré-tratamento orgânicos podem eficientemente remover a ação de barreira dos materiais vegetais. No entanto, os principais problemas foram a recuperação dos microrganismos utilizados nestes processo, os enormes custos (em alguns casos), bem como a dificuldade de operação deste pré-tratamento podem ser considerados como desvantagens. Os métodos de pré-tratamento de soluções orgânicas podem reduzir as ligações internas da lignina em até 60% (BENSAH e MENSAH, 2013).

Foi observado que fatores como a temperatura de reação, tempo e concentração de soluções são os principais parâmetros que afetam o processo de pré-tratamento. Soluções orgânicas como metanol, glicerol, acetona e etileno foram usadas para pré-tratar a palha de trigo (BENSAH e MENSAH, 2013).

## 2.5. Resultados de remoção para os pré-tratamento de resíduos vegetais

Como resultado observado nos estudos analisados verifica-se na tabela da Figura 3, as informações de remoção de lignina conforme os trabalhos pesquisados.

Figura 3 – Resultados do pré-tratamento de resíduos vegetais e seus efeitos no processo da DA

Método utilizado	Resíduo vegetal	Remoção de lignina	Gerou subprodutos	Autor
Físico	Palha de trigo	64%	sim, porém insignificante para o processo de DA	Ghaffar e Fan (2013)
Químico - Acido	Palha de trigo	70%	Sim, agressivo para o processo de DA	Tian et al. (2018)
Físico e Químico	Palha de trigo	90%	Sim, agressivo para o processo de DA	Brodeur et. al., (2011)
Químico - Alcalino	Palha de trigo	97%	Sim, sais que podem prejudicar o processo de DA	Kumar (2008)
Orgânicos	Palha de trigo	60%	Não	Mensah (2013)

Fonte: os autores (2019)

Assim, nota-se que o processo de remoção mais eficiente é por meio físico e químico, porém a geração de subprodutos tóxicos ao processo de biodigestão pode acabar prejudicando a operação de reatores.

## 2.6. Produção de metano com o uso de resíduos vegetais pré-tratados

O emprego da palha de trigo no processo de biodigestão anaeróbia é retratado por diversos autores, por ser um resíduo muito comum entre os resíduos vegetais. Por estas razões, tem-se como referência os resultados destes estudos com relação aos elevados teores de metano no processo de biodigestão anaeróbia.

Ghaffar e Fan (2013) compararam seus resultados com o de outros autores que utilizaram apenas resíduos orgânicos sem a adição de resíduos vegetais. Os resultados quanto a produção de metano foram 15% maiores quando empregados os resíduos de poda vegetal, e 45% maior quando realizado o pré-tratamento físico nestes resíduos vegetais.

Kumar (2008) buscou comparar seu experimento com a produção de metano de resíduos de um restaurante. Foi observado que no processo de biodigestão com resíduos vegetais pré-tratados com meios básicos de tratamento, onde foi empregado altas taxas de sódio, acabou prejudicando o processo de biodigestão anaeróbia, nestas condições, seu experimento com altas taxas de sódio produziu 20% menos metano que estudos sobre produção de metano com uso de resíduos

orgânicos oriundos de restaurantes. Isso foi explicado devido à alta taxa de sódio em seu tratamento.

Corrigindo esta situação, Kumar (2008) aplicou um novo pré-tratamento em seu resíduo vegetal, desta vez com baixo teor de sódio, resultando em uma remoção de lignina 12% menor que no primeiro tratamento, obtendo resultados de 85,36% de remoção de lignina. Desta vez, quando aplicado no processo de biodigestão, obteve resultados satisfatórios, chegando em 55% a mais de teores de metano quando comparado com a utilização de substratos apenas de resíduos de restaurantes no processo de DA.

Bensah e Mensah (2013) não compararam seus resultados com outros trabalhos, porém quando comparado com os de Kumar (2008) obteve 24% menos produção de metano, e quando comparado com Ghaffar e Fan (2013) sua produção foi de 15% a mais de metano.

Melhores resultados foram obtidos com a pesquisa de Brodeur et al. (2011), com o emprego da adição de mais de um tratamento, porém seu sistema não durou muito tempo, pois o reator sofreu perda da biomassa microbiana devido ao elevado grau de toxicidade pelo processo de pré-tratamento.

### **2.7. Demais processos de pré-tratamentos observados**

Existem outros tipos de tratamentos dos quais não foram abordados nesta pesquisa devida a dificuldade de encontrar resultados na literatura, principalmente relacionados com a co-digestão de resíduos vegetais com resíduos alimentares, e resíduos do tipo palha de trigo.

Existem outros pré-tratamentos com técnicas mais avançadas que ainda necessitam de maiores estudos para sua aplicabilidade, como por exemplo o uso de líquidos iônicos, uso de microrganismos próprios para rompimento de cadeias de vegetais lignocelulósicos e o emprego de diferentes tipos de fungos, como por exemplo, fungos brancos e marrons.

### **3. Conclusão**

A conversão de materiais vegetais tais como a palha de trigo em produtos da biodigestão é altamente eficaz, desde que sejam aplicados métodos eficazes de pré-tratamento nestes resíduos. O surgimento de novas técnicas de pré-tratamento de resíduos vegetais tem apresentado um elevado crescimento no meio acadêmico, porém é fundamental o cuidado com a formação de subprodutos gerados após o pré-tratamentos, pois os mesmos podem afetar a biodigestão.

Fato estes que apresentam a necessidade de combinar diferentes estratégias de pré-tratamento como é o caso do uso do pré-tratamento físico com a sequência de um pré-tratamento químico com base alcalina.

A exploração eficiente de materiais de palha de trigo e outros vegetais, como biocombustível, pode atender às demandas por fontes de energia à medida que o desenvolvimento econômico cresce e, da mesma forma, fornece uma estratégia objetiva para a conservação ambiental e o crescimento sustentável.

Mais pesquisas e métodos efetivos de pré-tratamento devem ser realizados com relação a quebra de lignina para processos de biodigestão anaeróbia e sua contribuição para a degradação dos materiais de palha de trigo.

## REFERÊNCIAS

AMON, T., AMON, B., KRYVORUCHKO, V., ZOLLITSCH, W., MAYER, K., GRUBER, L., 2007. Biogas production from maize and dairy cattle manure—Influence of biomass composition on the methane yield. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 173–82.

ANGELIDAKI, I. et al. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Science & Technology*, [s.l.], v. 59, n. 5, p.927-934, mar. 2009. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2009.040>.

BRODEUR G, YAU E, BADAL K, COLLIER J, RAMACHANDRAN KB, RAMAKRISHNAN S. Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: a review. *Enzym Res* 2011;2011:17.

BIOSANTECH, Teodorita Al Seadi et al. Biomass resources for biogas production. *The Biogas Handbook*, [s.l.], p.19-51, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857097415.1.19>.

BENSAH EC, MENSAH M. Chemical pretreatment methods for the production of cellulosic ethanol: technologies and innovations. *Int J Chem Eng* 2013;2013:21.

CHERNICHARO, Carlos Augusto Lemos. *Reatores Anaeróbios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMF, 1997. Volume 5, 2ª ed. 588 p.

COIMBRA MC, DUQUE A, SAÉZ F, MANZANARES P, GARCIA-CRUZ CH, BALLESTEROS M. SUGAR production from wheat straw biomass by alkaline extrusion and enzymatic hydrolysis. *Renew Energy* 2016;86:1060–8.

CONSTANT, M. et al. *Biogas end-use in the European Community*. Barking, Uk: Elsevier Science Publishers, 1989. 345 p.

GHAFFAR SH, FAN M. Structural analysis for lignin characteristics in biomass straw. *Biomass- Bioenergy* 2013;57:264–79.

GOMEZ, Claudius da Costa. Biogas as an energy option: an overview. *The Biogas Handbook*, [s.l.], p.1-16, 2013. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1533/9780857097415.1>.

KUMAR R, SINGH S, SINGH O. Bioconversion of lignocellulosic biomass: biochemical and molecular perspectives. *J Ind Microbiol Biotechnol* 2008;35:377–91.

LI X, KIM TH, NGHIEM NP. Bioethanol production from corn stover using aqueous ammonia pretreatment and two-phase simultaneous saccharification and fermentation (TPSSF). *Bioresour Technol* 2010;101:5910–6.

Métodos de pesquisa / [organizado por] Tatiana Engel Gerhardt e Denise Tolfo Silveira; coordenado pela Universidade Aberta do Brasil – UAB/UFRGS e pelo Curso de Graduação Tecnológica – Planejamento e Gestão para o Desenvolvimento Rural da SEAD/UFRGS. – Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

MATA-ALVAREZ, J.. Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. Department Of Chemical Engineering Of Barcelona, Barcelona, Spain: Iwa Publishing, 2011. 323 p.

ROSA, A.p. et al. Assessing the potential of renewable energy sources (biogas and sludge) in a full-scale UASB-based treatment plant. *Renewable Energy*, [s.l.], v. 124, p.21-26, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.025>.

RUTZ D, et al. Organic waste for biogas production in urban areas. *Proceedings of 19th European Biomass Conference and Exhibition*, Berlin, Germany, 2125–2131, 2011. DOI:10.5071/19thEUBCE2011-VP3.4.27.

TIAN, Shuang-qi; ZHAO, Ren-yong; CHEN, Zhi-cheng. Review of the pretreatment and bioconversion of lignocellulosic biomass from wheat straw materials. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, [s.l.], v. 91, p.483-489, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.113>.

ZHANG L, XU CC, CHAMPAGNE P. Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass. *Energy Convers Manag* 2010;51(5):969–82.