

Universidade Federal Rural de Pernambuco
Bacharelado em Agronomia

Tássia Cristina da Silva

**Uso de metanálise para avaliação do potencial energético do
uso da biomassa residual da extração da fibra de sisal**

**Recife –PE
2022**

Tássia Cristina da Silva

Uso de metanálise para avaliação do potencial energético do uso da biomassa residual da extração da fibra de sisal

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Agronomia da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharela em Agronomia.

Orientadora: Prof. Dr^a. Ana Dolores Santiago Freitas

**Recife – PE
2022**

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Bacharelado em Agronomia

Tássia Cristina da Silva

Uso de metanálise para avaliação do potencial energético do uso da biomassa residual da extração da fibra de sisal

Trabalho de conclusão de curso aprovado em 26 de maio de 2022, pela bancaexaminadora constituída pelos seguintes membros:

Dr^a. Ana Dolores Santiago Freitas
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Orientadora

Dr^a. Bárbara Ribeiro Alves Alencar
Universidade Federal de Pernambuco
Membro da Banca Examinadora

Dr^a. Edilândia Farias Dantas
Universidade Federal de Pernambuco
Membro da Banca Examinadora

Recife – PE
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- D111u da Silva, Tássia Cristina
USO DE METANÁLISE PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO USO DA BIOMASSA
RESIDUAL DA EXTRAÇÃO DA FIBRA DE SISAL / Tássia Cristina da Silva. - 2022.
41 f. : il.
- Orientadora: Ana Dolores Santiago de Freitas.
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em
Agronomia, Recife, 2022.
1. Agave. 2. Sisal. 3. Energético. 4. Metanálise. 5. Biomassa. I. Freitas, Ana Dolores Santiago de, orient. II. Título

CDD 630

DEDICATÓRIA

Ao meu pai **Luiz Carlos da Silva**
e à minha mãe **Denise Barros**
Drapal da Silva.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais esse título acadêmico e a todas as bençãos a mim concedida

Agradeço a todas as pessoas que vieram antes de mim e abriraram muitos caminhos para que este trabalho fosse hoje possível.

Agradeço aos meus pais por todo o suporte emocional e financeiro nessa caminhada.

Agradeço aos familiares e amigos, que certamente têm enorme contribuição por eu ser quem sou hoje.

Agradeço a professora Ana Dolores Santiago Freitas por ter aceitado ser orientadora deste trabalho.

Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco e a todos os funcionários que me ajudaram até aqui.

“Nenhum pássaro pode voar sem abrir as asas”
(MARK NEPO, 2020).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção de sisal no Brasil em 2019.....	17
Figura 2: Produtos industrializados com sisal	18
Figura 3: Etapas da produção de sisal.....	22
Figura 4:Extensão territorial do semiárido brasileiro	24
Figura 5: Índice de desenvolvimento humano no semiárido brasileiro (2010)	25
Figura 6: Vias de aproveitamento energético da biomassa.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coleção ativa de germoplasma de sisal, da Embrapa Algodão	20
Tabela 2: Resíduos do processamento da fibra de Sisal	27
Tabela 3: Rendimento de produtos obtidos por diferentes tipos de pirólise.....	29
Tabela 4: Uso de diferentes biomassas na produção de biocarvão e sua aplicação na remediação de metais pesados	Erro! Indicador não definido.

RESUMO

O agave, também chamado de sisal, é uma planta com origem no México. No Brasil o sisal é cultivado para a extração de fibra vegetal contudo, apenas 5% do peso da planta é convertido em fibra. Os outros 95% são convertidos em resíduos lignocelulósicos. Esta biomassa residual não é aproveitada de forma eficiente ou econômica, sendo, geralmente, descartada próximo ao local de extração da fibra. Tendo isto em vista, o presente trabalho teve como objetivo reunir elementos que possam contribuir para o desenvolvimento sustentável da região semiárida por meio do fornecimento de informações sobre o aproveitamento energético do resíduo do sisal. Dos 48 artigos analisados foi possível observar que a biomassa residual de sisal apresenta as características das biomassas lignocelulósicas e que é possível converter esse material através da fermentação e pirólise em produtos de valor agregado como etanol (biocombustíveis) ou biocarvão.

Palavras-chave: Sisal, Agave sisalana, semiárido, biomassa, resíduo lignocelulosico

ABSTRACT

Agave, also called sisal, is a plant with origins in Mexico. In Brazil sisal is cultivated for the extraction of plant fiber; however, only 5% of the plant's weight is converted into fiber. The other 95% is converted into lignocellulosic residue. This residual biomass is not efficiently or economically utilized and is usually disposed of near the fiber extraction site. Considering this, the present work aimed to gather elements that can contribute to the sustainable development of the semi-arid region by providing information about the energy use of sisal residue. From the 48 papers analyzed it was possible to observe that sisal waste biomass possesses the characteristics of lignocellulosic biomass and that it is possible to convert this material through fermentation and pyrolysis into value-added products such as ethanol (biofuels) or biochar.

Keyword: Sisal, Agave sisalana, semiarid, biomass, lignocellulosic waste

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	METODOLOGIA.....	15
3.	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1.	AGAVE	16
3.1.1.	<i>Características do agave</i>	18
3.1.2.	<i>Produção do sisal</i>	19
3.1.3.	<i>Semiárido brasileiro</i>	23
3.1.4.	<i>Resíduos da produção do sisal</i>	26
3.2.	APROVEITAMENTO ENERGÉTICO	27
3.2.1.	<i>Pirólise.....</i>	28
3.2.1.1.	<i>Biocarvão</i>	29
3.2.2.	<i>Fermentação.....</i>	30
4.	DISCUSSÕES E RESULTADOS.....	33
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
ANEXO	Erro! Indicador não definido.	

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos da produção de sisal (*Agave sp.*) são uma fonte potencial para a produção de biocombustíveis no Brasil. O sisal é cultivado no Brasil para a produção de fibras, sendo a Bahia seu maior produtor, com aproximadamente 80 mil toneladas de fibras por ano (IBGE, 2020). O agave é cultivado na região semiárida brasileira por ser uma planta CAM, com baixa demanda hídrica, tolerante a secas e a alta irradiação solar. Estima-se que apenas 4% da massa total do agave são aproveitadas para a produção de fibras; ou seja, 96% são resíduos, que não são aproveitados de forma ecológica e economicamente correta.

O bagaço de sisal apresenta uma fração lignocelulósica que pode ser utilizada para a produção de biocombustíveis e bioadsorventes, na região semi-árida brasileira. A utilização de biomassa lignocelulósica, para a produção de etanol e outros biocombustíveis apresenta algumas limitações sobre a utilização de pré-tratamento, tipos de hidrólise e viabilidade na fermentação.

O biocarvão (frequentemente designado “*biochar*”) corresponde à fase sólida e é um material rico em carbono, produzido pela carbonização da biomassa em atmosfera limitada de oxigênio. Nos últimos anos, a utilização do biocarvão tem ganhado atenção dos pesquisadores no mundo, pelas suas características adsorтивas e seu baixo custo de produção. Através da decomposição térmica (pirólise) da matéria orgânica pelo aquecimento na ausência de oxigênio são geradas três fases: bio-óleo, biocarvão e gases. O rendimento de cada fase depende da composição química da biomassa utilizada e das variáveis empregadas no processo de pirólise, como temperatura e tempo de residência.

O presente trabalho revisa sobre os estudos realizados a respeito do resíduo de sisal e sua aplicação e conversão em produtos de valores agregados para a região semi-árida brasileira. O que poderia resultar em um maior desenvolvimento econômico e social, a partir da geração de emprego e renda, com a valorização da cadeia produtiva da biomassa de sisal.

2. METODOLOGIA

A presente pesquisa exploratória foi desenvolvida por meio de pesquisa bibliográfica realizada em artigos científicos, dissertações e teses localizados nas bases de dados online/portais de pesquisa: Scielo (Scientific Electronic Library Online), Science Direct e Google Acadêmico, publicados entre os anos de 2000 a 2022.

Foram utilizados as palavras de busca: biomassa, etanol, biocombustíveis, sisal, agave , biocarvão e biochar. Foram utilizados como base desse estudo 48 artigos que englobaram os termos de busca e dentro do período de análise.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Agave

O agave, também chamado de sisal, é uma planta com origem no México, na Península de Yukatan (DIAS *et al.*, 2015). Foi introduzida no Brasil no início do século passado, porém, o seu cultivo somente foi expandido em 1930, principalmente na Paraíba, na Bahia e no Rio Grande do Norte, por suas adaptações ao clima semiárido brasileiro. Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial da fibra de sisal e a Bahia é responsável por 90% desta produção (ANDRADE; ORNELAS; BRANDÃO, 2011).

O sisal pertence a classe Monocotiledônea, família *Agavaceae* e gênero *Agave*. O gênero *Agave* compreende aproximadamente, 300 espécies da América do Norte e América do sul. Suas folhas produzem a principal fibra dura existente entre as plantas e dentre estas espécies apenas duas se destacam com importância comercial para a produção de fibras duras, o *Agave sisalana* Perrine e o *Agave fourcroyde* Perrine (EMBRAPA, 2008).

O *Agave sisalana* tem mecanismo fotossintético facultativo tipo MAC (Metabolismo Ácido das Crassuláceas), no qual a assimilação do CO₂ ocorre durante a noite, pelo ciclo fotossintético C4 (PIMENTEL, 1998). O agave é considerado como MAC facultativo, pois apresenta o comportamento MAC via C4, em condições de falta de água, alta salinidade ou fotoperíodo ou termoperíodo elevados. Porém, em condições favoráveis, pode fotossintetizar pelo ciclo C3, que favorece maior produtividade de biomassa, embora com maior uso de água (OSMOND; HOLTUM, 1981).

O sisal requer clima quente e luminosidade intensa, é adaptado a regiões semiáridas, com resistência a estiagens prolongadas. Têm folhas carnosas, número reduzido de estômatos e epiderme cutinizada (CARDOSO, 2019). Estas são características adaptativas contra condições de aridez.

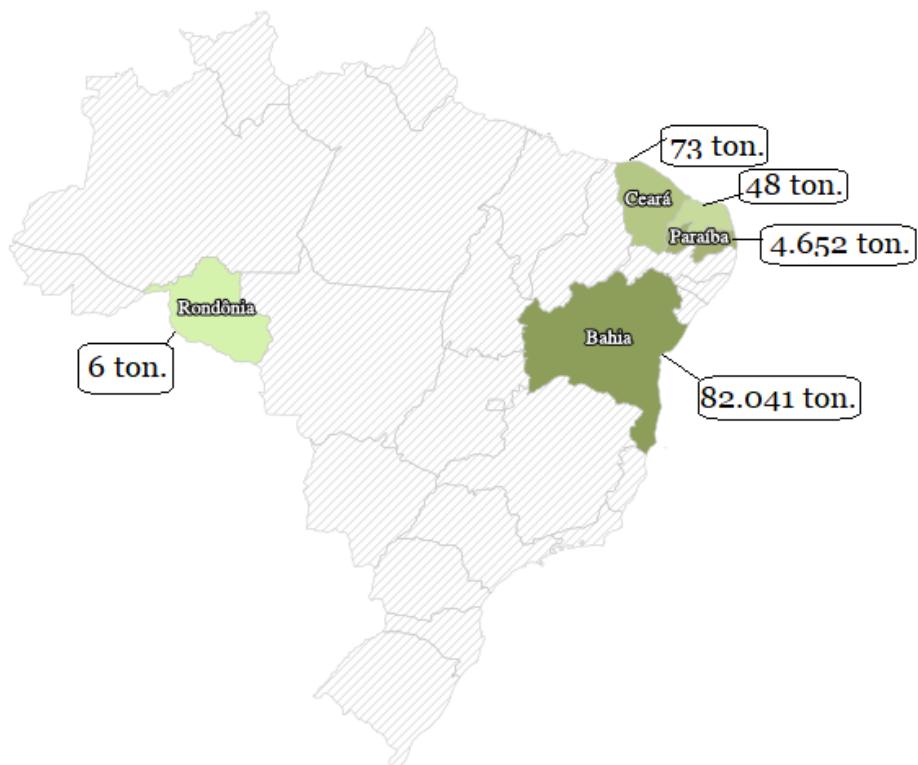
No Brasil, o agave é cultivado para a produção de fibra dura, que abastece 40% do mercado mundial (ANDRADE; ORNELAS; BRANDÃO, 2011). As fibras de sisal são obtidas da extração e beneficiamento de suas folhas. O interesse nas fibras naturais está a crescer por muitas razões, incluindo o seu potencial para substituir as fibras sintéticas e por apresentar menor custo de produção, com sustentabilidade.

As fibras naturais são materiais renováveis, menos abrasivas que as fibras artificiais, de baixa

densidade e alta deformabilidade, características vantajosas em relação às fibras sintéticas (MARINELLI *et al.*, 2008). Além disto, são biodegradáveis. Essa é uma das principais vantagens do uso das fibras de sisal para amarrar feno, já que podem ser consumidas pelos animais sem que lhes cause problemas, ao contrário das fibras sintéticas. Este é um nicho de mercado conseguido pelo sisal produzido no Brasil. Além destas vantagens ecológicas, as fibras naturais são uma fonte de renda para as populações rurais, em geral em locais com baixa renda per capita.

Segundo o IBGE (2019), o Brasil produziu 86.820,00 toneladas de fibra de sisal em cinco estados: Bahia, Paraíba, Ceará, Rio Grande do Norte e em Rondônia (**Figura 1**). Estima-se que 80% dessa produção sejam direcionadas ao mercado internacional, sendo a China e Portugal os maiores consumidores. Do sisal são obtidos como produtos principais: fibra, fios, cordas, cabos, cordéis e tapetes, chamados de complexo sisal. As exportações do complexo sisal totalizaram 59,4 mil toneladas, em 2020, sendo seu principal fio beneficiado o Balertwine.

Figura 1: Produção de sisal no Brasil em 2019



Fonte: Dados IBGE (2019)

A industrialização das fibras proporciona a produção de diversos produtos como: cordas,

barbantes, tapetes, sacos, bolsas, chapéus, vassouras, além de peças artesanais. Na indústria, são utilizadas na fabricação de pasta celulósica para a produção de papéis e outros produtos (papel Kraft, papel fino, cigarros, filtros, fraldas, entre outros) (EMBRAPA, 2008). Além destas aplicações, a fibra de sisal tem seu principal uso na fabricação de fios agrícolas (twnies), que são fios torcidos, com peso e comprimento uniforme tratados contra roedores, mofo e putrefação (**Figura 2**). O fio agrícola balertwine é utilizado para a amarração de fardos de feno de cereais na América do Norte e na Europa.

Figura 2: Produtos industrializados com sisal



Fonte: a) Sandália com salto de sisal(BELLECOMFORT STYLE, 2021); b) Tapete feito de corda de sisal(MANATAPETES, 2021); c) Fio agrícola Balertwine(AMAZON, 2021); d) Corda de sisal(SOLUÇÕES INDUSTRIAS, 2021);

3.1.1. Características do agave

O ciclo vegetativo do agave é de 8 a 10 anos. Seu sistema radicular é fibroso, fasciculado, em forma de tufo, que emerge da base e do pseudocaule (roseta). Apresenta dois tipos de raízes: as de fixação e as de absorção de nutrientes, sem raiz principal. As raízes do tipo fixadora tem diâmetro de 2 a 4 mm e possuem muitas ramificações, com crescimento horizontal de até 3 metros. Destas raízes surgem as raízes de absorção que tem a função de absorver água e nutrientes da solução do solo. As raízes do agave são superficiais e concentram-se na profundidade de até 10 a 25 cm da superfície do solo (EMBRAPA, 2008).

O agave não apresenta caule aéreo, seu pseudocaule suculento tem a propriedade de armazenar água e nutrientes em seu interior, e nele são inseridos as folhas e o broto terminal. As folhas são rígidas de forma linear lanceolada e com comprimento entre 120 a 160 cm. Sua epiderme é composta por uma cutícula cerosa, que repele a água facilmente. Nela encontram-se numerosos estômatos distribuídos de maneira contínua, realizando as trocas gasosas. As inserções das folhas no pseudocaule ocorrem em forma de espiral ascendente, formando

rosetas. O *Agave sisalana* produz entre 200 e 250 folhas durante o ciclo e cada folha contém de 1000 a 1200 fios de fibra (EMBRAPA, 2008; QUEIROGA *et al.*, 2021).

Para o cultivo do agave, os produtores têm a opção do agave comum (*Agave sisalana* Perrine) e 37 variedades (**Tabela 1**). As mais utilizadas são: *Agave comum*, o Híbrido 11648, cruzamento entre *Agave angustifolia* e o *Agave amaniensis*. Este híbrido tem algumas características vantajosas em relação ao agave comum; dentre elas, o número de folhas por planta, aproximadamente 600 folhas durante o ciclo produtivo, maior produtividade, tolerância à podridão do tronco e mais resistente a seca (EMBRAPA, 2008). Apesar dessas características mais favoráveis, a cultivar mais utilizada na Bahia e Paraíba é o agave comum.

A propagação do agave ocorre de forma assexuada através dos bulbos e rebentos da planta mãe (SUINAGA; SILVA; COUTINHO, 2006). Os rebentos nascem da base, e são rizomas subterrâneos emitidos pela planta. Já os bulbos são emitidos pela planta mãe ao final do ciclo de vida, no escapo floral (ANDRADE; ORNELAS; BRANDÃO, 2011). Na região semiárida do Brasil, o cultivo é realizado em sequeiro, ou seja, não há a utilização da irrigação e, por isto, o plantio é realizado antes do início da estação chuvosa.

3.1.2. Produção do sisal

De acordo com Suinaga et al. (2006), a colheita do agave ocorre, em média, após 36 meses do plantio, variando conforme a espécie de agave utilizada. O processo de colheita inicia-se com o corte periódico das folhas. Em média, são cortadas 55 folhas no primeiro corte do *A. sisalana* e nos cortes posteriores são colhidas aproximadamente 30 folhas. A colheita ocorre de forma manual, com auxílio de facas. Após a colheita restam, na planta, em média quatro folhas para dar seguimento à nova produção (EMBRAPA, 2008).

Após o corte, ocorre o transporte das folhas, em geral como uso de animais, principalmente jumentos, que carregam de 100 a 130 quilos de folhas de agave (EMBRAPA, 2008). Nesta etapa, são utilizados um jumento e um operador, sendo realizados 40 a 60 viagens por dia.

Tabela 1: Coleção ativa de germoplasma de sisal, da Embrapa Algodão

Acessos	Identificação	Acessos	Identificação
SS-01	Híbrido 11648 (<i>A.amaniensis</i> x <i>A.angustifolia</i>)	SS-20	Sisalana Tanzânia
SS-02	Híbrido 400 folhas	SS-21	Mutante Paraíba
SS-03	Cabinho	SS-22	IAC 0101
SS-04	IAC 034	SS-23	IAC 84193
SS-05	Híbrido RN	SS-24	Mutante Bahia
SS-06	Híbrido Quênia	SS-25	IAC 84003
SS-07	<i>Agave folcloydes</i>	SS-26	IAC 84051
SS-08	Sisal do tipo Tatuí	SS-27	IAC 00200
SS-09	Sisal com espinhos nas bordas	SS-28	IAC 0067
SS-10	Sisalana de Valente/BA	SS-29	IAC 84001/4
SS-11	Sisal Híbrido, Teixeira/PB	SS-30	IAC 84005
SS-12	Híbrido de Imaculada/PB	SS-31	IAC 0056
SS-13	Sisalana ornamental	SS-32	IAC 84001/2
SS-14	Tatuí 3	SS-33	IAC 84-019
SS-15	Tatuí 4	SS-34	IAC 840096
SS-16	Mutante 1	SS-35	IAC 0097
SS-17	Hoxa México	SS-36	IAC 0069
SS-18	Tatuí 1	SS-37	Híbrido de Itaporanga
SS-19	Tatuí 2		

Fonte: Embrapa Algodão

A operação pós-colheita é iniciada com o desfibramento do sisal, processo principal, pelo qual

são eliminadas a polpa e a mucilagem que evolvem a fibra, por raspagem mecânica (EMBRAPA, 2008). Na atualidade, os produtores podem utilizar dois tipos de máquinas, a “Máquina Paraibana” ou a “Máquina Modelo Cosibra”. A primeira é a mais utilizada, principalmente pelo seu preço e fácil manutenção. Porém, apresenta baixa capacidade operacional (até 200 kg de fibra seca, em turno de 10 horas por dia), desperdício entre 20 a 30% de fibra por folha e expõe os operadores a riscos de acidentes (QUEIROGA *et al.*, 2021).

Após a extração das fibras deve-se realizar a lavagem, imergindo as fibras em água limpa, pelo período de 8 a 12 horas, durante a noite. Depois da lavagem é realizada a secagem das fibras em varais, feitos de arame, durante 8 a 10 horas, em pleno sol, evitando deixar por períodos maiores, para não amarelar as fibras, o que reduz seu valor (ALVES, 2005). Posteriormente, é realizado o batimento, que consiste em remover o pó que envolve a fibra de sisal. Essa etapa processa-se em máquinas denominadas de batedeiras. São obtidos desse processo a fibra longa, a bucha e pó residual.

Após o batimento as fibras beneficiadas devem ser classificadas por tipo e classe, de acordo com os critérios definidos na Portaria nº 71 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Em sequência, são prensadas em fardos, identificados e pesados (BRASIL, 1983). As etapas de produção da fibra de sisal ocorrem de forma sequenciada e são realizadas a fim de obter fibras de melhor qualidade (**Figura 3**).

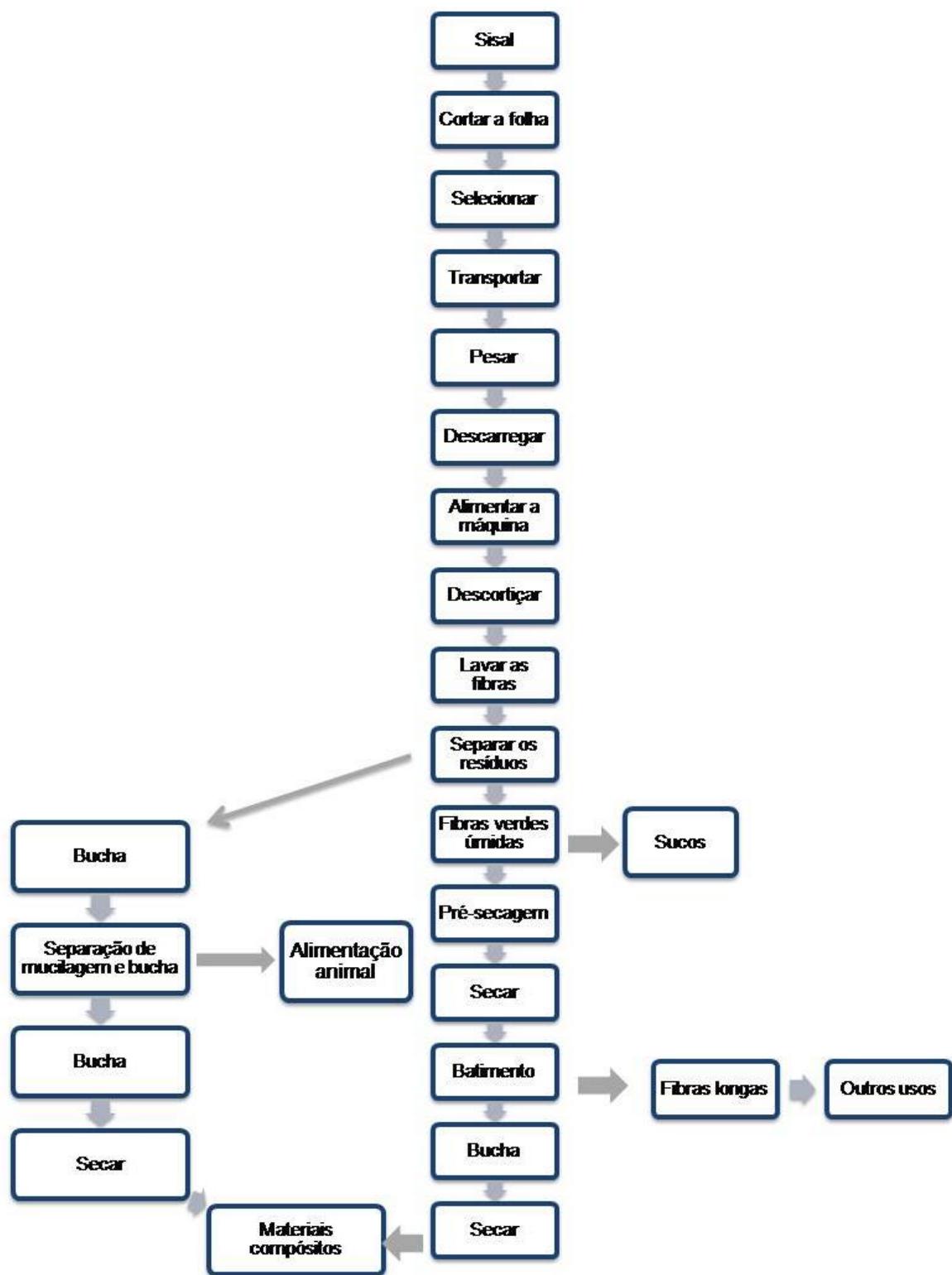
A produção da fibra sisal depende da capacidade produtiva da planta que geralmente produz durante 10 a 12 anos. O agricultor renova o campo quando há declínio na produção, substituindo-as por rebentos vigorosos localizados nas fileiras próximas. Porém, quando ocorre a emissão floral em mais de 70% das plantas é aconselhada à erradicação total do campo (EMBRAPA, 2008).

Na indústria, são realizados os processos de preparação dos fios, fiação e cordoaria. Na preparação dos fios as fibras são tratadas, coloridas, penteadas, emendadas e uniformizadas. Na fiação, ocorre a torção em máquinas fianeiras, dando origem aos fios de sisal. Na cordoaria, os fios são processados para a confecção de cordas em máquinas emboladeiras e cordoeiras (ANDRADE; ORNELAS; BRANDÃO, 2011).

O controle de qualidade é realizado em laboratório, em todas as etapas de produção, através de análises de gramatura, umidade, peso, resistência, entre outros. Após aprovados os lotes

são embalados e certificados.

Figura 3: Etapas da produção de sisal



Fonte: (QUEIROGA *et al.*, 2021)

3.1.3. Semiárido brasileiro

De acordo com a SUDENE (2017), caracterizam-se como semiáridas as áreas que apresentam precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e/ou percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano. Com essas características, 1.262 municípios brasileiros são classificados como zona semiárida, correspondendo a aproximadamente 982.566 Km², ou seja, 18,2% do território nacional (**Figura 4**).

O clima no semiárido brasileiro é classificado principalmente como BSh, clima semiárido quente com escassez de chuvas (250mm a 750 mm por ano), que têm grande irregularidade em sua distribuição. A insolação é forte, com índices elevados de evapotranspiração e temperatura média elevada. Uma pequena parte do semiárido é classificada como BSw, clima seco com chuvas no verão, com precipitação anual sempre inferior a 1000 mm (KOEPPEN, 1948).

Além do clima desfavorável, essa região apresenta longos períodos de seca que ocorrem de forma cíclica a cada 10 ou 12 anos. Este é um dos principais fatores que inviabilizam a agropecuária, pois, nestes períodos, o índice pluviométrico não ultrapassa 400 mm (CODES SISAL, 2010). Essas características favorecem a situação de pobreza e miséria da região.

Os municípios pertencentes a essa região têm Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) inferiores ao nacional, 0,755 (**Figura 5**), sendo classificados principalmente com índices baixos (<0,599) e muito baixos (<0,499). A região do semiárido tem sido caracterizada pelo êxodo rural, já há mais de um século.

A população do semiárido brasileiro é estimada em 22 milhões de habitantes. A indisponibilidade de cultivares agrícolas adaptadas as condições edafoclimáticas minimizam as chances de obtenção de uma renda mínima agrícola pelo menos equivalente ao salário mínimo oficial. Boa parte das culturas cultivadas é destinada à subsistência.

O cultivo do agave é realizado principalmente na região semiárida, por oferecer uma oportunidade econômica difícil de ser obtida com outras culturas, sendo fator de sobrevivência para a população rural e contribuindo para a fixação do homem no campo (CARDOSO, 2019).

A maior área produtora de sisal do Brasil é localizada na Bahia e é denominada “Território do

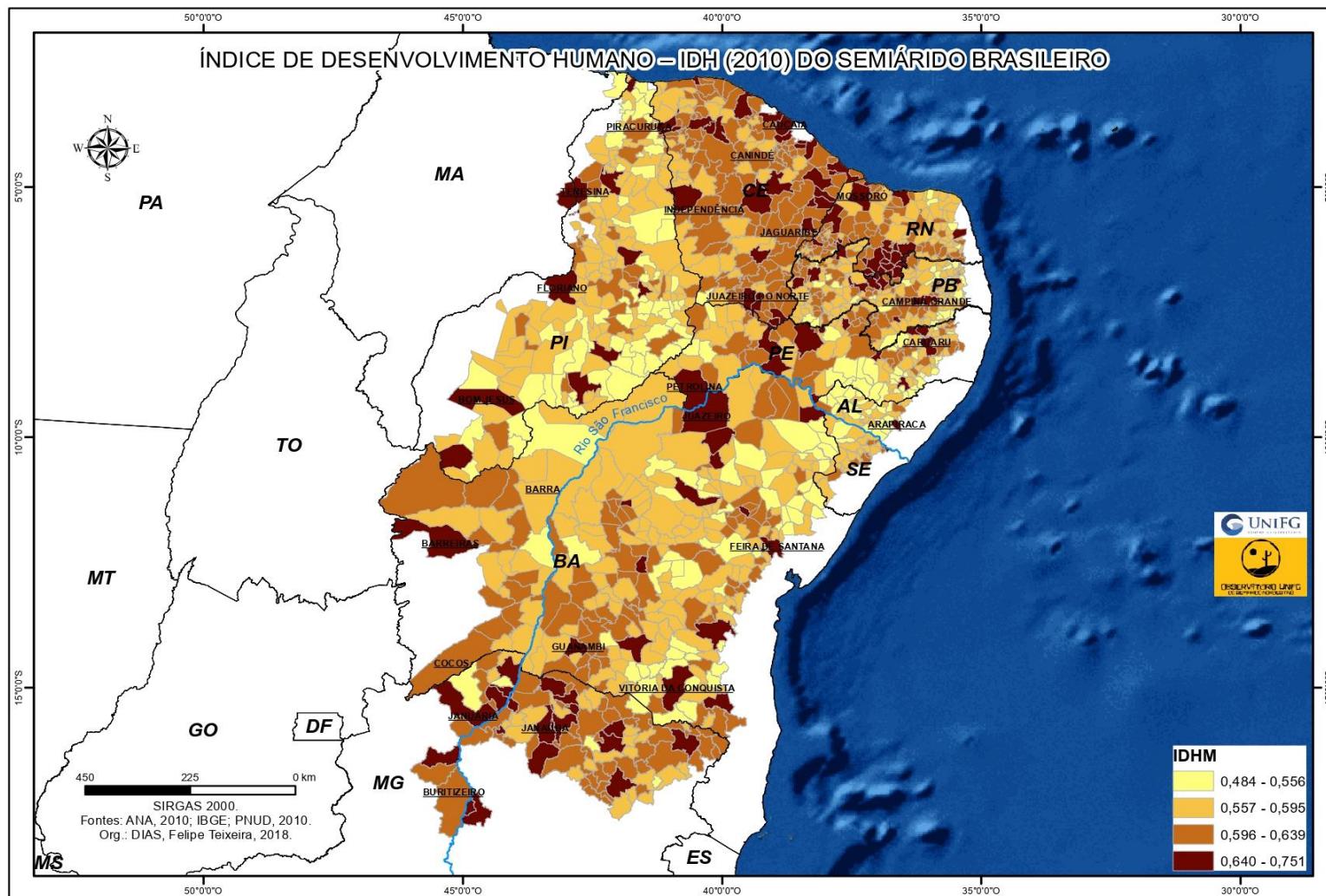
sisal”. O território do sisal tem 20.405,26 km² e é composto por 20 municípios: Araci, Barrocas, Biritinga, Candeal, Cansanção, Conceição do Coité, Ichu, Itiúba, Lamarão, Monte Santo, Nordestina, Queimadas, Quijingue, Retirolândia, Santaluz, São Domingos, Serrinha, Teofilândia, Tucano e Valente (IBGE, 2010). Segundo Queiroga et al. (2021), esta atividade gera 800 mil empregos, diretos e indiretos, além de gerar divisas.

Figura 4:Extensão territorial do semiárido brasileiro



Fonte: IBGE, 2018

Figura 5: Índice de desenvolvimento humano no semiárido brasileiro (2010)



Fonte: IBGE, 2010

3.1.4. Resíduos da produção do sisal

Embora o Brasil seja o maior produtor de sisal, os sistemas de produção e beneficiamento têm baixo índice de modernização (CANTALINO; TORRES; SILVA, 2015). Além disto, as folhas do agave têm baixo índice de aproveitamento para a extração de fibra, com rendimento de até 5% do seu peso. Os 95% restantes são resíduos da produção, com aproximadamente 15% de mucilagem ou polpa (constituído pela cutícula e por tecidos moles), 1% de bucha (fibras curtas) e 81% de suco (seiva clorofilada) (BUXTON; MUCK; HARRISON, 2003). Esta biomassa residual não é aproveitada de forma eficiente ou econômica, sendo, geralmente, descartada próximo ao local de extração da fibra

O termo “Biomassa” abrange uma ampla gama de produtos diferentes, embora todos sejam de origem orgânica (KAMPMAN *et al.*, 2010). Esses produtos podem ser resíduos florestais e agrícolas, resíduos verdes municipais, lodo de esgoto, bioassólidos, subprodutos de resíduos orgânicos e culturas energéticas, entre outros.

Resíduos agroindustriais são provenientes dos processos agrícolas e industriais, variando conforme a matéria-prima utilizada. Estima-se que no mundo 140 Giga toneladas de resíduos agroindustriais sejam produzidos e, no Brasil, aproximadamente 451 mega toneladas (VAZ JUNIOR, 2020). Assim como a biomassa do agave, a maior parte desses resíduos não é utilizada de forma eficiente.

As biomassas residuais, se depositadas de forma incorreta, apresentam risco para a saúde humana e potencial poluente de recursos hídricos, induzindo a eutrofização, e de solo, pelo estímulo à ação microbiótica e emissão de gases do efeito estufa (GEE), como o NO e o N₂O (TRIPATHI *et al.*, 2019).

Diversos estudos são realizados visando à utilização desses resíduos. Savastano et al. (1997) pesquisaram o uso de diversos resíduos agroindustriais e, principalmente, dos resíduos da produção de sisal, na construção civil. Na **tabela 2**, estão listados diferentes resíduos da produção de sisal e suas possibilidades de uso. Contudo, a utilização do bagaço do agave não foi analisada.

Tabela 2: Resíduos do processamento da fibra de Sisal

Fibra	Resíduos		
	Produto principal	Denominação	Aproveitamento
Sisal	Fibra verde antes da secagem	Bucha verde (após separação do bagaço)	Uso potencial para produção de celulose
	Fibra beneficiada	Refugo bucha	Reforço de gesso, produção de fios e celulose
	Fios	Bucha branca	Produção de celulose
	Cordas	Fibras curtas	Combustão e adubo
	Balertwine	Bucha (com tintura)	Reprocessamento
	Fio agrícola	Fibras curtas (com tintura)	Combustível
	Tapetes	Retalhos de fios	Uso potencial para produção de celulose

Fonte: Adaptação Savastano et al. (1997)

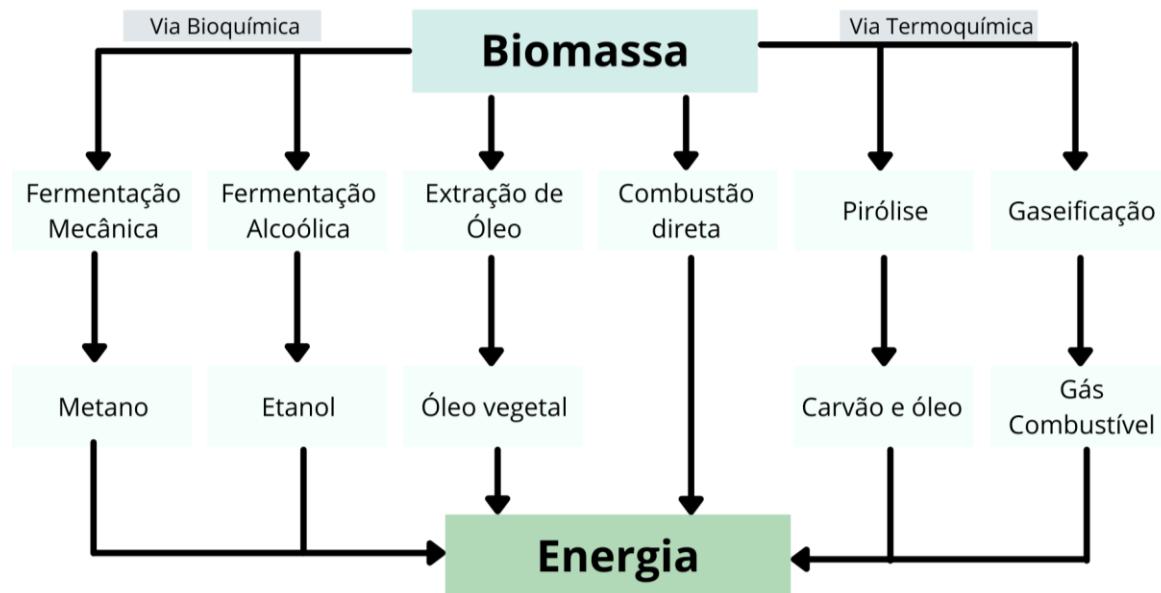
A biomassa lignocelulósica tem despertado interesse pela crescente produção agrícola e pela sua grande disponibilidade em diversos países. É uma fonte renovável e contínua de materiais biodegradáveis, com baixo custo (BEZAZI *et al.*, 2014). H9ML3H

3.2.Aproveitamento energético

A conversão da biomassa em combustíveis e produtos químicos ocorre através de processos bioquímicos e termoquímicos (**Figura 6**). Os processos bioquímicos são classificados em fermentação mecânica, fermentação alcoólica e extração, sendo a fermentação alcoólica a tecnologica mais praticada a nível industrial (NOVACANA, 2018). E os processos termoquímicos são classificados em pirólise, gaseificação e combustão, sendo a pirólise a

tecnologia mais promissora para a transformação/conversão da biomassa (KIM *et al.*, 2013). A pirólise caracterizada como processo simples e tempo de reação variável, tem a capacidade de transformar a biomassa volumosa e não homogênea na forma líquida (chamada de bio-óleo), sólida (biocarvão) e gasosa (BRIDGWATER, 2012).

Figura 6: Vias de aproveitamento energético da biomassa



Fonte: Adaptação Rodrigues *et al.* (2011)

3.2.1. Pirólise

A pirólise é um processo de termo conversão de biomassa que ocorre com limitação ou ausência de oxigênio e em altas temperaturas (250°C a 900°C). Com a pirólise são obtidos três produtos: bio-óleo (líquido), biocarvão (sólido), e os gases da pirólise (mistura de CO, CO₂, H₂ e CH₄), independentemente da biomassa utilizada (SILVEIRA; SALOMON; BARCELOS, 2018). Durante o processo, os componentes lignocelulósicos, como celulose, hemicelulose e lignina, passam por várias reações, tais como despolimerização, fragmentação e reticulação, em temperaturas específicas para resultar nos produtos de maior interesse industrial (YAASHIKAA *et al.*, 2020).

A temperatura e o tempo de residência de pirólise são definidos em função dos produtos desejados. A pirólise lenta, também chamada de carbonização, ocorre entre 250°C e 750°C, com duração de horas a dias e favorece a produção de biocarvão, enquanto a pirólise rápida ocorre de 500 °C a 1000°C, com duração em segundos, favorecendo a produção de bio-óleo (EMBRAPA, 2018).

A **Tabela 3** apresenta resumidamente alguns dos parâmetros das pirólises rápida e lenta, bem como os rendimentos aproximados em produtos.

Tabela 3: Rendimento de produtos obtidos por diferentes tipos de pirólise

Tipo de pirólise	Parâmetros	Produtos		
		Bio-óleo	Biocarvão	Gases
Rápida	T=~500°C e TR=~1s	75%	12%	13%
Intermediária	T=~500°C e TR=~10-30 s	50% em duas fases	25%	25%
Carbonização (Lenta)	T=~400°C e TR= horas ou dias	30%	35%	35%
Gaseificação	T=~750-900°C e TR=segundos	5%	10%	85%
Torrefação (Lenta)	T=~290°C e TR=~10-60 min.	Até 5%, se condensado	80%	20%

Fonte: Adaptação de (BRIDGWATER, 2012), T: temperatura; TR: tempo de residência.

As propriedades físicas e químicas assim como, o rendimento dos produtos, são afetadas pelo tipo de biomassa utilizada e pelos parâmetros aplicados (temperatura e tempo de permanência). A temperatura é a variável com maior interferência neste processo (WEI *et al.*, 2019).

3.2.1.1. Biocarvão

Biocarvão (frequentemente designado pelo nome inglês de “biochar”) é um material rico em carbono, que é produzido pela carbonização de resíduos de biomassa de baixo custo, em atmosfera limitada de oxigênio (LUO *et al.*, 2019; ONI *et al.*, 2019).

As propriedades únicas do biocarvão, como grande área de superfície, alta porosidade, diversos grupos funcionais, alta capacidade de troca catiônica e estabilidade, o tornam adequado para várias aplicações (YAASHIKAA *et al.*, 2020). A rapidez e facilidade de preparação, a natureza

ecológica, a reutilização e o alto custo-benefício são algumas vantagens do biocarvão. As técnicas termoquímicas comuns usadas para a produção de biocarvão incluem pirólise, carbonização hidrotérmica, gaseificação, carbonização rápida e torrefação (GAYATHRI; GOPINATH; KUMAR, 2021; HEMAVATHY *et al.*, 2020).

O carbono presente na biomassa é reutilizado totalmente no biocarvão, sendo a técnica de pirólise uma importante ferramenta no estoque de carbono de forma não gasosa. Este estoque contribui para a preservação do meio ambiente, uma vez que este carbono se originou do CO₂ atmosférico que foi imobilizado pela fotossíntese. Assim, reduz-se a concentração de um dos gases do efeito estufa (GEE). Além disto, a conversão de biomassa em biocarvão é uma técnica sustentável para o manejo de resíduos agroindustriais que são ricos em carbono (MCCARL *et al.*, 2008).

Embora o biocarvão seja totalmente feito de carbono e cinzas, a composição elementar e as características diferem com base no tipo de biomassa, condições de reação e tipo de reatores usados durante o processo de carbonização. Portanto, a aplicação e a eficiência do biocarvão, em vários campos, dependem do tipo de biomassa usada para a produção do biocarvão (YAASHIKAA *et al.*, 2020).

Muitos estudos têm sido realizados para o aproveitamento de resíduos das culturas para fins de mitigação de emissões de GEE (AWASTHI *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2019), melhoria do solo e dos cultivos (LATAWIEC *et al.*, 2019; PETTER *et al.*, 2016), tratamento de recursos hídricos por adsorção de poluentes (GAUTAM *et al.*, 2021; LUO *et al.*, 2021) e produção energética (XU *et al.*, 2019).

A determinação das características do biocarvão é fundamental para a sua utilização na remoção de poluentes e outras aplicações. Essas características indicam a capacidade de atuar como um adsorvente altamente eficiente na remoção da maioria dos poluentes (KIM *et al.*, 2012; LI, H. *et al.*, 2017). Normalmente, o biocarvão com área de superfície aumentada e alta porosidade possui alta propriedade de sorção. As técnicas de caracterização do biocarvão estão baseadas, principalmente, em análises de sua estrutura e de sua composição química, através da identificação de grupos funcionais de superfície e análise elementar (BREWER *et al.*, 2014).

3.2.2. Fermentação

Dentre as matérias-primas para a produção de etanol a cana de açúcar e o milho são as duas culturas mais utilizadas mundialmente. Porém, outras culturas como sorgo sacarino, trigo e beterraba açucareira são utilizadas por outros países como Canadá e europeus (NOVACANA,

2018). O Brasil utiliza como matéria-prima a cana de açúcar e é o segundo maior produtor de etanol do mundo, atrás apenas dos Estados Unidos que utilizam o milho como fonte de carboidratos (**Figura 7**).

Figura 7: Produção mundial de etanol 2020



Fonte: Adaptado de (VIDAL, 2020)

Em termos gerais, a conversão da matéria-prima em etanol (fermentação) é uma transformação gerada pela ação metabólica de microorganismos sobre a matéria orgânica utilizada. A fermentação pode ser conduzida por processos descontínuos, descontínuos-alimentados ou contínuos (BORZANI, 2001).

A levedura realiza a fermentação de açúcares para a produção de energia química necessária à sua sobrevivência, obtendo o etanol como um subproduto deste processo (AMORIM et al., 1996). Este processo de conversão só é possível através da fermentação de monossacarídeos como a D-glicose e D-frutose, pelas leveduras como, a mais utilizada, *Saccharomyces cerevisiae* (LOPES e BORGES, 2009).

Idependentemente do processo utilizado diversos estudos são realizados para o entendimento da melhor forma de extrair açúcares e fermentar esse material, para produtos de valor agregado como etanol, antibióticos, químicos, entre outros (GIUDICI et al., 2005).

Nos últimos anos, pesquisas foram e estão sendo realizadas para melhorar o processo de conversão das biomassas resíduais em etanol e reduzir o custo de produção. Contudo, cada

biomassa necessita ser estudada para verificar qual a melhor metodologia a ser empregada para o aumento do rendimento da fermentação e obtenção do produto de interesse (BASSO; ALVES, 1996).

A utilização de biomassa residual lignocélorosica em processos biotecnológicos, tem o potencial de tornar os processos mais econômicos e viáveis em diversas cadeias produtivas. Alguns setores da agroindústria, como por exemplo a de fibra de sisal, geram centenas de toneladas de resíduos que por sua vez, não apresentam aplicabilidade econômica ou ecologica. Fazendo desse material um grande poluidor de solos e geradores de gases do efeito estufa. Assim, estas biomassas residuais têm sido objeto de pesquisas quanto a alternativas de pré-tratamentos físicos, químicos e biológicos, que possibilite seu uso na produção de biocombustíveis (KRISTIANI et al., 2015).

Tendo isto em vista, o presente trabalho objetiva investigar a utilização da biomassa residual do agave para fins energéticos.

4. DISCUSSÕES E RESULTADOS

Biomassa lignocelulósica, que comumente se refere ao material vegetal constituído de lignina, celulose e hemicelulose, surgiu para ser uma promissora alternativa aos combustíveis fósseis e no fornecimento de uma energia limpa e sustentável. Na **tabela 4**, podemos observar a caracterização da biomassa de sisal.

Tabela 4: Caracterização do bagaço de sisal

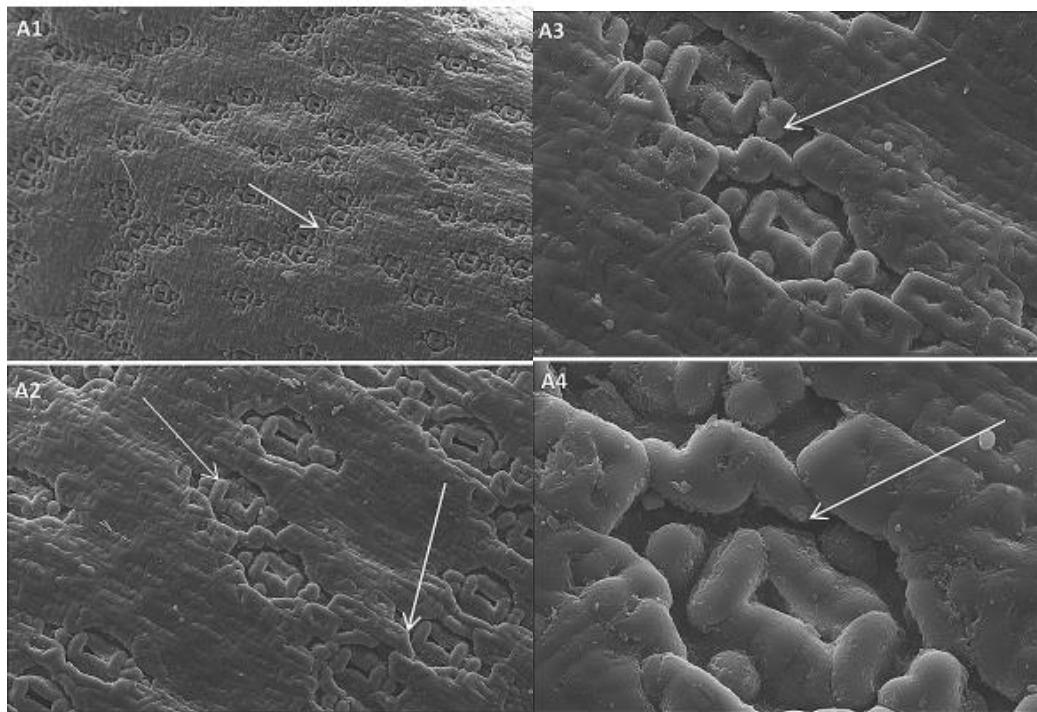
Componente	LIMA et al. (2013)	MEDEIROS et al. (2018)	MEDEIROS et al. (2020)	LI et al. (2021)
Umidade	3,8	12,21	8,55	-
Cinzas	2,1	-	8,62	-
Extrativos	8,5	-	10,24	-
Lignina	22,6	29,42	17,9	18,7
Hemicelulose	20,6	14,8	22,91	18,8
Celulose	27,6	18,28	28,72	43,6

- Valores não informados pelos autores

É possível observar que os valores de lignina neste resíduo é próximo aos valores de lignina de biomassas resíduais como o bagaço da cana de açúcar 22,9% (BIZZO et al., 2014) e a palha de milho 14,2% (WEISS; FARMER; SCHELL, 2010). É importante salientar que a lignina, apesar de não ser uma fração fermentável, a sua remoção é uma das etapas do processo denominado pré-tratamento. O que acarreta em maior valor gasto na industria e a depender da sua complexidade estrutural pode formar barreira física impedindo o processo de hidrolise ou seja, sendo necessário a utilização de maior carga enzimática para que ocorra a quebra da celulose em açúcares fermentáveis.

Os pré-tratamentos das biomassas lignocelulósicas é uma das etapas mais dispendiosas na industria de etanol de segunda geração. Nessas industrias os valores podem corresponder de 16 a 30% dos custos de produção (MOSIER et al., 2005; HUMBIRD et al., 2011). Na **figura 8**, podemos observar a estrutura do bagaço de sisal. Além do pré-tratamento a análise da cristalinidade das biomassas são testadas e conforme Medeiros et al. (2020) verificou que a cristalinidade do bagaço de sisal foi de 35,95% e quando comparado ao bagaço da cana de açúcar com 37,56% (XAVIER et al., 2018) apresentam estruturação semelhantes. É importante ressaltar que a cristalinidade da biomassa está relacionada diretamente com a quantidade e qualidade de celulose na matéria vegetal, ou seja, a celulose representa a fração cristalina no material analisado (CARVALHO et al., 2010).

Figura 8: Microscopia eletrônica de varredura bagaço de sisal



Fonte: (MEDEIROS *et al.*, 2020)

O pré-tratamento ácido foi o mais utilizado nos estudos analisados. O pré-tratamento alcalino não apresenta resposta favorável na liberação dos açúcares redutores (LI *et al.*, 2021). Isto é devido a natureza da biomassa residual de sisal. Sua caracterização mineral deve ser analisada afim de esclarecer se sua composição mineral influencia nos pré-tratamentos utilizados.

Na análise da fermentação foi observado que os estudos utilizaram apenas a *Saccharomyces cerevisiae*. Esta levedura é a mais utilizada na industria produtora de etanol contudo, outras leveduras podem ser empregadas, em busca de outros produtos ou leveduras resistentes a diversos fatores como a contaminação, altas concentrações de inibidores de fermentação (furfural, hidroximetilfurfural, ácido acético e outros) ou a melhor taxa de conversão dos açúcares em etanol (ALENCAR *et al.*, 2018).

Lima *et al.* (2013), encontrou em seu estudo a taxa de conversão de 92% dos açúcares redutores em etanol, o que é uma taxa excelente para a produção de álcool combustível. Em outro estudo utilizando bagaço da *Agave tequilana*, planta utilizada para a produção da bebida alcoólica tequila, encontrou a taxa de conversão de 85% (CASPETA *et al.*, 2014), valor próximo do bagaço de sisal. O que demonstra a aplicabilidade dessa biomassa residual para a produção de etanol no semiárido brasileiro.

Dentre os trabalhos analisados, não foi encontrado pesquisas sobre a conversão termoquímica do bagaço de sisal (*Agave sisalana*). Para essa análise foram utilizados os trabalhos sobre os bagaços com caracterização mais próxima a do bagaço de sisal (*Agave tequilana*, *Agave salmiana*, *Agave cupreata* e *Agave fourcroydes*).

A valorização de resíduos agro-industriais requer abordagens globais e integração de tecnologias adequadas de ambas as plataformas de biorefinaria, bioquímica e termoquímica. Esta tecnologia híbrida tem sido recentemente reconhecida como uma abordagem potencial para a valorização de diferentes biomassas matérias-primas no mundo inteiro, melhorando a conversão de carbono e a eficiência energética do processo global (RIOS-DEL TORO *et al.*, 2021).

Na Universidade de Yucatán no México, foram investigados a produção e caracterização do biocarvão do resíduo da *Agave cupreata* (LEÓN, 2017), utilizada para a produção de tequila. Foram determinadas as concentrações de lignina (17,81%), Holocelulose (65,48%), Cinzas (7,75%) e umidade (8,62%), composição muito semelhante ao sisal brasileiro (**Tabela 4**).

Neste mesmo estudo observou que a produção de biocarvão foi na menor temperatura empregada 400°C, com rendimento de 28%. Porém, neste estudo não verificou os grupos funcionais na superfície do biocarvão e nem sua capacidade adsorptiva.

Chávez-guerrero (2010), estudou a pirólise das folhas de *Agave salmiana* onde avaliou seu potencial como combustível sólido (biocarvão) e determinou que o poder calorífico do carvão vegetal era de 19,36 MJ/kg. A pirólise dos troncos Henequen (*Agave fourcroydes*) e obtiveram o bio-óleo como principal produto com um potencial calorífico de 20,57 MJ/kg (FONSECA *et al.*, 2014).

Fonseca et al. (2014), caracterizaram os resíduos agrícolas (caule verde, caule seco e varejão) do cultivo de henequen para obter informações sobre sua composição química e propriedades térmicas. Os resíduos foram pirolisados em um equipamento de forno tubular para avaliar seu uso potencial para a produção de bio-óleo. O maior rendimento de bio-óleo (50,33% em peso), o maior teor de celulose (29,55% em peso) e o maior teor de extratáveis (25,59% em peso) foram obtidos na amostra de caule verde.

Os estudos demonstram a aplicabilidade da biomassa residual de agave para a produção energética. Contudo, é necessário estudos com a biomassa residual de sisal no processo termoquímico. Além disso, mais trabalhos sobre a conversão bioquímica (fermentação) para a

obtenção de mais produtos de valor agregado. Visando seu uso na região semiárida brasileira a qual, apresenta limitações edafoclimáticas e não há produção de biocombustíveis. O uso dessa biomassa representa uma oportunidade ambiental e social para essa região.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O resíduo de sisal mostrou-se como matéria-prima potencialmente promissora para a produção de etanol de segunda geração no semiárido brasileiro. Sendo necessário averiguar qual a melhor metodologia a ser aplicada para a extração de açúcares fermentáveis e o melhor pré-tratamento a ser utilizado.

Sobre o biochar, embora não haja publicação sobre essa conversão utilizando o resíduo sólido é um promissor material para a aplicação como adsorvente quanto para aplicação em solos. É necessário por fim, estudos para averiguação com os biocarvões produzidos com resíduo da extração da fibra de sisal.

A biomassa residual da extração da fibra de sisal é um recurso do semiárido brasileiro e muito promissor para essa região. É possível aplicar diversas rotas e valorizar esse resíduo tanto como biocombustível quanto para adsorção ou melhoramento de solo. O sisal tem potencial para ser uma fonte importante na região semiárida nordestina, por ser uma planta CAM, facilmente adaptada às condições de baixa disponibilidade hídrica que prevalecem na região.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, Bárbara Ribeiro Alves *et al.* Enzymatic hydrolysis of cactus pear varieties with high solids loading for bioethanol production. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 250, n. October 2017, p. 273–280, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.042>
- ALVES, Maria Odete. **Diagnóstico socioeconômico do setor sisaleiro do Nordeste do Brasil**. Banco do Nordeste do Brasil. Fortaleza: [s. n.], 2005.
- AMAZON. [s. l.], 2021. Disponível em: https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/51x3yA2xxiL._AC_SY450_.jpg. Acesso em: 4 abr. 2021.
- AMORIM, H. V; BASSO, L. C.; ALVES, D. M. G. Processo de produção de álcool – controle e monitoramento. **FERMENTEC**, Piracicaba, 1996.
- ANDRADE, Robson; ORNELAS, Jackson; BRANDÃO, Weilton. Situação atual do sisal na Bahia e suas novas possibilidades de utilização e aproveitamento. **Revista Bahia Agrícola**, [s. l.], v. 9, n. 01, p. 14–19, 2011. Disponível em: http://www.seagri.ba.gov.br/sites/default/files/3_comunicacao01v9n1.pdf
- AWASTHI, Mukesh Kumar *et al.* Influence of bamboo biochar on mitigating greenhouse gas emissions and nitrogen loss during poultry manure composting. **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 303, n. February, p. 122952, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122952>
- BELLECOMFORT STYLE. [s. l.], 2021. Disponível em: https://www.bellecomfortstyle.com.br/86-thickbox_default/sandalia-anabela-feminina-renda-alto-salto-sisal.jpg. Acesso em: 4 abr. 2021.
- BEZAZI, A. *et al.* Novel extraction techniques, chemical and mechanical characterization of Agave Americana L. natural fibres. **Composites: Part B Engineering**, [s. l.], v. 66, p. 194–203, 2014.
- BORGES, M. T. M. R. Química Tecnológica Geral. Tecnologia Sucroalcooleira. Coleção UAB-UFSCar, São Carlos, 2009.
- BRASIL. **Portaria nº 71, de 16 de março de 1983**. Brasília, Brasil: Ministério da agricultura pecuária e abastecimento, 1983. p. 9.
- BREWER, Catherine E. *et al.* New approaches to measuring biochar density and porosity. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 66, p. 176–185, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059>
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 38, p. 68–94, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- BUXTON, D.R.; MUCK, R.E.; HARRISON, J.H. **Silage science and technology**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 2003.
- CANTALINO, Adalberto; TORRES, Ednildo Andrade; SILVA, Marcelo Santana. Sustainability of sisal cultivation in Brazil using co-products and wastes. **Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 7, n. June, p. 64–74, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jas.v7n7p64>
- CARDOSO, M.S. Panorama tecnológico de uso de resíduos do sisal. **SEMIOSSES: Inovação, Desenvolvimento e Sustentabilidade**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 13–23, 2019.
- CASPETA, Luis *et al.* Enzymatic hydrolysis at high-solids loadings for the conversion of agave bagasse to fuel ethanol. **Applied Energy**, [s. l.], v. 113, p. 277–286, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.036>
- CHÁVEZ-GUERRERO, L.; HINOJOSA, M. Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands. **Fuel**, [s. l.], v. 89, n. 12, p. 4049–4052, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.026>
- CODES SISAL, conselho regional de desenvolvimento rural sustentável da região sisaleira do estado da Bahia. **Plano territorial de desenvolvimento sustentável do sisal**. Bahia: Codes Sisal, 2010.
- DIAS, Acácia Batista *et al.* Potencial de indicação geográfica do sisal na Bahia. **Cadernos de Prospecção**, [s. l.], v. 8, p. 174–181, 2015.

- EMBRAPA. Cultivo do Sisal no Nordeste Brasileiro. **Circular Técnica**, [s. l.], v. 123, p. 1–24, 2008.
- EMBRAPA. Processos termoquímicos aplicados à biomassa florestal. **Circular Técnica**, [s. l.], v. 29, p. 38, 2018. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/189256/1/DOC-29-CNPAE.pdf>
- GAUTAM, Ravindra Kumar *et al.* Biochar for remediation of agrochemicals and synthetic organic dyes from environmental samples: a review. **Chemosphere**, [s. l.], v. 272, p. 129917, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129917>
- GAYATHRI, R.; GOPINATH, K. P.; KUMAR, P. Senthil. Adsorptive separation of toxic metals from aquatic environment using agro waste biochar: Application in electroplating industrial wastewater. **Chemosphere**, [s. l.], v. 262, p. 128031, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128031>
- GIUDICI, P.; SOLIERI, L.; PULVIRENTI, A.M.; CASSANELLI, S. Strategies and perspectives for genetic improvement of wine yeasts. **Applied Microbiology Biotechnology**, Oxford, v. 66, p. 622-628, 2005
- GUIDINI, C. Z.; MARQUEZ, L. D. S.; DE ALMEIDA SILVA, H.; DE RESENDE, M. M.; CARDOSO, V. L.; RIBEIRO, E. J. Alcoholic fermentation with flocculant *Saccharomyces cerevisiae* in fed-batch process. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 172, n. 3, p. 1623–1638, 2014.
- HEMAVATHY, R. V. *et al.* Adsorptive separation of Cu(II) ions from aqueous medium using thermally/chemically treated *Cassia fistula* based biochar. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 249, p. 119390, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119390>
- KAMPMAN, Bettina *et al.* **BUBE: Better use of biomass for energy - background report to the position paper of IEA RETD and IEA bioenergyIEA RETD and IEA Bioenergy**. [S. l.: s. n.], 2010.
- KIM, Kwang Ho *et al.* Comparison of physicochemical features of biooils and biochars produced from various woody biomasses by fast pyrolysis. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 50, p. 188–195, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.06.030>
- KIM, Kwang Ho *et al.* Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). **Bioresource Technology**, [s. l.], v. 118, p. 158–162, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.094>
- KRISTIANI, A. *et al.* Effect of Combining Chemical and Irradiation Pretreatment Process to Characteristic of Oil Palm's Empty Fruit Bunches as Raw Material for Second Generation Bioethanol. **Energy Procedia**, v. 68, p. 195–204, 2015.
- KOEPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra**. Mexico: DF: Fondo de Cultura Económica, 1948.
- LATAWIEC, Agnieszka E. *et al.* Biochar amendment improves degraded pasturelands in Brazil: environmental and cost-benefit analysis. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 1–12, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47647-x>
- LEÓN, NATALIA CAROLINA UC. **CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS DEL PROCESO DE PIRÓLISIS DE RESIDUOS LIGNOCÉLULÓSICOS DE AGAVE Y SU USO COMO FUENTE DE ENERGÍA**. 1–97 f. 2017. - Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., [s. l.], 2017.
- LI, Hongbo *et al.* Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. **Chemosphere**, [s. l.], v. 178, p. 466–478, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072>
- LI, Wenqian *et al.* Production and characterization of lignocellulosic fractions from sisal waste. **Industrial Crops and Products**, [s. l.], v. 160, n. July 2020, p. 113109, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.113109>
- LIMA, Clebson S.S. *et al.* Characterization of acid hydrolysis of sisal. **Applied Energy**, [s. l.], v. 102, p. 254–259, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.061>
- LOPES, C. H.; BORGES, M. T. M. R. Controle na fabricação de álcool. São Carlos, SP, Ed. UFSCar, 95 p., 2009.

- LUO, Kun *et al.* A critical review on the application of biochar in environmental pollution remediation: Role of persistent free radicals (PFRs). **Journal of Environmental Sciences (China)**, [s. l.], v. 108, p. 201–216, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.02.021>
- LUO, Kun *et al.* Enhanced ciprofloxacin removal by sludge-derived biochar: Effect of humic acid. **Chemosphere**, [s. l.], v. 231, p. 495–501, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.151>
- MANATAPETES. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://www.manatapetes.com.br/tapete-sisal-diamante-2-50x2-50/>. Acesso em: 4 abr. 2021.
- MARINELLI, Alessandra L. *et al.* Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 92–99, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0104-14282008000200005>
- MCCARL, Bruce A. *et al.* Economics of biochar production , utilisation and greenhouse gas offsets. In: , 2008, Newcastle upon Tyne, UK. **International biochar initiative conference**. Newcastle upon Tyne, UK: [s. n.], 2008.
- MEDEIROS, Lorena Lucena *et al.* Structural-chemical characterization and potential of sisal bagasse for the production of polyols of industrial interest. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 451–461, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s43153-020-00049-3>
- NOVACANA. Disponível em www.novacana.com/etanol/curiosidades. Acesso em 14/05/2022
- ONI, Babalola Aisosa; OZIEGBE, Olubukola; OLAWOLE, Obembe O. Significance of biochar application to the environment and economy. **Annals of Agricultural Sciences**, [s. l.], v. 64, n. 2, p. 222–236, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2019.12.006>
- OSMOND, C. B.; HOLTUM, J. A. M. **Crassulacean acid metabolism. in: Photosynthesis. The biochemistry of plants, a comprehensive treatise.** HATCH, M. D. e BOARDMAN, N. K. 2. ed. New York: Climate Change Biology, 1981.
- PETTER, F.A. *et al.* Biocarvão no solo: aspectos agronômicos e ambientais. In: , 2016. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 73–81.
- PIMENTEL, Carlos. **Metabolismo de carbono na agricultura tropical**. 1. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1998.
- QUEIROGA, V.P. *et al.* **Sisal (Agave sisalana, Perrine) tecnologias de palntio e utilização**. 1. ed. Campina Grande: A Barriguda, 2021.
- RIOS-DEL TORO, E. Emilia *et al.* Coupling the biochemical and thermochemical biorefinery platforms to enhance energy and product recovery from Agave tequilana bagasse. **Applied Energy**, [s. l.], v. 299, n. June, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117293>
- SILVEIRA, Alberto Jorge da Mota; SALOMON, Karina Ribeiro; BARCELOS, Karla Miranda. **Viabilidade técnica da pirólise da biomassa do coco: produção de bioóleo, biocarvão e biogás**. 62 f. 2018. - Universidade Federal de Alagoas, [s. l.], 2018.
- SOLUCOESINDUSTRIAIS. [S. l.], 2021. Disponível em: https://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_10274/cordasisal_02-36-08.jpg. Acesso em: 4 abr. 2021.
- SUDENE. **Resolução nº 107, de 27 de julho de 2017**Brasília: Superintendência do desenvolvimento do nordeste (SUDENE), 2017. p. 6–7.
- SUINAGA, Fábio Akiyoshi; SILVA, Odilon Reny Ribeiro Ferreira da; COUTINHO, Wirton Macedo. **Cultivo do Sisal**. [S. l.], 2006. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_sisal/arvore/CONT000fckhw71702wx5eo0a2ndx yvn8jmrq.html. Acesso em: 11 abr. 2021.
- TRIPATHI, Nimisha *et al.* Biomass waste utilisation in low-carbon products: harnessing a major potential resource. **Climate and Atmospheric Science**, [s. l.], v. 2, n. 1, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5>

VAZ JUNIOR, Silvio. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável.** 1^a edição. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2020.

VIDAL, Fatima. Produção E Mercado De Etanol. **Banco do Nordeste**, [s. l.], v. 5, p. 1–10, 2020. Disponível em: https://www.bnb.gov.br/documents/80223/6888601/2020_CDS_121.pdf/9ab6ae84-a1f1-2fa5-0c0f-837553f9879f

WEI, Jing *et al.* Assessing the effect of pyrolysis temperature on the molecular properties and copper sorption capacity of a halophyte biochar. **Environmental Pollution**, [s. l.], v. 251, p. 56–65, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.128>

XU, Deliang *et al.* Potencial energético do biocarvão de pirólise a partir da borra de café. **Chemosphere**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 48662–48670, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47647-x>

YAASHIKAA, P. R. *et al.* A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. **Biotechnology Reports**, [s. l.], v. 28, p. e00570, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>

ZHANG, Chen *et al.* Biochar for environmental management: Mitigating greenhouse gas emissions, contaminant treatment, and potential negative impacts. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 373, n. January, p. 902–922, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.139>