

Produção de biochar a partir da pirólise de biomassa: perspectivas e experiências brasileiras

O aumento contínuo na produção de resíduos sólidos por diferentes setores econômicos tem resultado em demanda crescente por práticas sustentáveis de gerenciamento desses resíduos. No Brasil, acrescenta-se a isso, a meta (não alcançada) de eliminação de todos os lixões até final de 2014 estabelecida pela lei Política Nacional dos Resíduos Sólidos de 2010. A grande quantidade de resíduos de origem agroflorestal gerados no país revela o grande potencial de implementação de unidades termoquímicas de pirólise para conversão desses resíduos em produtos com valor agregado (bio-óleo, gás pirolítico e biocarvão), sobretudo se houver ambiente favorável com a implantação de política de precificação desses produtos. Com relação ao biocarvão de origem pirolítica, também conhecido como biochar, diferentes instituições brasileiras conduzem pesquisas com foco, por exemplo, na variação de composição das matérias-primas, condições experimentais, variáveis de processo pirolítico, e propriedades do biocarvão produzido. Os estudos apontam para grande versatilidade e potencial de aplicação do biochar. O uso de processos pirolíticos para produção de bio-óleo, gás pirolítico e biocarvão, como estratégia de diversificação da matriz energética vem de encontro à necessidade de substituição gradativa dos derivados de petróleo por recursos energéticos renováveis; no tocante ao biocarvão, acrescenta-se o seu potencial de aplicação como condicionador de solo e sequestro de carbono como estratégia de mitigação da emissão de gases do efeito estufa. Faz-necessário promover a cooperação entre empreendedores que invistam na produção de biocarvão pirolítico (principalmente a partir de resíduos agroflorestais), organismos de certificação e gestores públicos para inserção do produto no mercado brasileiro, contribuindo assim, para a transição do modelo de economia linear para circular. O presente artigo aborda questões relacionadas à pirólise, com foco em resíduos de biomassa agroflorestal como matéria-prima, no biocarvão como um dos produtos da pirólise que apresenta potencial adicional de aplicações em tecnologias ambientais e apresenta experiências brasileiras. A partir deste estudo, ressalta-se a necessidade de escalonamento, com foco nas aplicações do biochar de relevância ambiental que no Brasil ainda são conduzidos principalmente em escala laboratorial e piloto.

Palavras-chave: Biomassa; Pirólise; Biochar; Experiências brasileiras; Economia Circular.

Biochar production through pyrolysis of biomass: perspectives and Brazilian experiences

The continuous increase in solid waste generation by different economic sectors has resulted in a growing demand for sustainable waste management practices. In Brazil, this demand has increased due to the goal (not achieved) of eliminating all waste dumps by the end of 2014 established by the National Policy on Solid Waste Law of 2010. The large amount of agroforestry residues generated in the country reveals the great potential for implementing pyrolysis units to convert these residues into value-added products (bio-oil, pyrolytic gas and biochar), especially if there is a favorable environment with the implementation of a pricing policy for these products. With regard to biochar of pyrolytic origin, different Brazilian institutions conduct research focusing, for example, on variation in the composition of raw materials, experimental conditions, pyrolytic process variables, and properties of the biochar produced. Studies point to great versatility and potential for biochar applications. The use of pyrolytic processes to produce bio-oil, pyrolytic gas and biochar, as a strategy for diversifying the energy matrix, meets the need for the gradual replacement of petroleum derivatives by renewable energy resources; with regard to biochar, its potential application as a soil conditioner and carbon sequestration is added as a strategy for mitigating the emission of greenhouse gases. It is necessary to promote cooperation between entrepreneurs who invest in the production of pyrolytic biochar (mainly from agroforestry residues), certification bodies and public managers for the insertion of the product in the Brazilian market, thus contributing to the transition from the linear economy model to Circular. This article addresses issues related to pyrolysis, focusing on agroforestry biomass residues as a raw material, on biochar as one of the pyrolysis products that has potential to be used in environmental technologies, and presents Brazilian experiments. From this study, the need for scaling up is highlighted, with a focus on biochar applications of environmental relevance, which in Brazil are still conducted mainly in laboratory and pilot scales.

Keywords: Biomass; Pyrolysis; Biochar; Brazilian experiences; Circular Economy.


Topic: Engenharia da Sustentabilidade e Meio Ambiente

Received: 03/08/2021

Approved: 26/08/2021

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Renato Rocha Batista 
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7771280806504852>
<http://orcid.org/0000-0001-8919-6801>
renatorochabatista@gmail.com

Marcia Marques Gomes 
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/7937368027614414>
<http://orcid.org/0000-0002-7920-8001>
marciamarques@eng.uerj.br



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0028

Referencing this:

BATISTA, R. R.; GOMES, M. M.. Produção de biochar a partir da pirólise de biomassa: perspectivas e experiências brasileiras. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.8, p.321-339, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0028>

INTRODUÇÃO

A fertilidade de algumas áreas de solo no território da Amazônia, denominada de “Terras Pretas Arqueológicas” (TPA’s) ou “Terras Pretas de Índio” (TPI) (SOUSA et al., 2020), tem intrigado inúmeros pesquisadores pois grande parte dos solos geralmente são ácidos, com baixa capacidade de troca de cátions, o que limita a produtividade dos sistemas agrícolas (SILVA et al., 2021). Evidências recentes indicam que as TPI, áreas de solos com coloração escura contendo maiores quantidades de nutrientes nitrogênio, fósforo (GLASER, 2007) e teores de carbono orgânico total (COT); são decorrentes de atividades humanas pretéritas dos antigos assentamentos indígenas (SILVA et al., 2021). Acredita-se que esses povos adicionavam material orgânico, residuais de biocarvão posterior à realização de queima, além de resíduos de artefatos durante as práticas de manejo de solos (GLASER, 2007; GISI et al., 2014).

Com o objetivo de mimetizar (simular) as porções de solo antrópico da Amazônia de elevada estabilidade (TPI), o processo de pirólise tem sido aplicado como rota tecnológica para produção de biocarvão termoquímico (TPI sintéticas) com similaridades de propriedades físico-químicas em relação às das TPI da Amazônia (PANDEY et al., 2021), devido ao interesse crescente pelas TPI sintéticas para aplicações agronômicas (PANDEY et al., 2021). O material carbonáceo pirogênico (PCM), ou TPI sintética, proveniente da pirólise de biomassas de origem vegetal e animal, é uma estrutura carbonácea amorfa estável com elevado teor de carbono em base mássica, sendo reconhecida como biochar quando é produzida para aplicações agronômicas e de sequestro de carbono mediante aplicação em solo (AHMAD et al., 2014).

O alcance da neutralidade de carbono até 2050 exigirá a implantação de tecnologias de emissão negativa de compostos do carbono, e para atender essa meta, a implementação da técnica de pirólise tende a ser promissora (MIKULA et al., 2020). Reduzir emissões de gases do efeito estufa simultaneamente à produção de bioenergia tem sido amplamente investigado por pesquisadores (LI et al., 2017) e nesse contexto, sistemas pirolíticos com ênfase na produção de biochar parecem oferecer maior efeito de mitigação climática do que outros sistemas de bioenergia (HAMMOND et al., 2011) pois em termos de geração de energia, a implementação de sistemas pirolíticos evitam liberação de gases de efeito estufa (GEE), a exemplo do CO₂, por MWh de energia em valores no range 1,4-1,9 tCO₂e/MWh, valor esse maior comparado com a média de emissões evitadas de 0,05-0,30 tCO₂e/MWh para outros sistemas de bioenergia, conforme resultados de estudo realizado no Reino Unido (HAMMOND et al., 2011). Dentre os resultados publicados que evidenciaram a pirólise como plataforma de tecnologia de emissões negativas valem destacar: (GAUNT et al., 2008; YANG et al., 2016; MONLAU et al., 2016; LI et al., 2017; BRASSARD et al., 2018; LI et al., 2019; GANGULY et al., 2020; CHENG et al., 2020).

A biomassa residual, de pouco ou nenhum valor econômico e que se encontra disposta inadequadamente, é matéria-prima adequada para a técnica de pirólise (MUKOME et al., 2013; ROY et al., 2017), como por exemplo: resíduos agrícolas, florestais e herbáceas (XIAO et al., 2017). A enorme disponibilidade mundialmente desses resíduos (NOR et al., 2013), e em particular no Brasil (BONASSA et al., 2018) devido a extensa reserva de recursos de biomassa, permite projeção otimista de equilibrar a demanda

total de energia primária até 2030, em consideração ao ramo bioenergia, e em função disso possibilitar o reconhecimento do Brasil como grande exportador de recursos de biomassa para diversos interessados em atividades de valoração energética (WELFLE, 2017), a exemplo da técnica de pirólise. Quanto aos resíduos sólidos urbanos (RSU), pelo fato de ainda serem um dos principais problemas dos grandes centros urbanos, no Brasil por exemplo, atualmente apenas 59,5% dos resíduos produzidos são destinados para aterros sanitários, e são predominantemente matéria orgânica (VIEIRA et al., 2021).

As práticas de economia circular (“*grow-make-use-restore*”) visam o reciclo dos fluxos de materiais e energia para aumentar os ganhos ambientais e evitar custos (BARROS et al., 2020), por exemplo ao minimizar o conteúdo de material biodegradável que iria ser encaminhado para aterros sanitários. As distintas fontes de material biodegradável, a exemplo dos resíduos agrícolas, florestais e fração orgânica de resíduos sólidos municipais, devem ser considerados para o fechamento do ciclo ao longo de toda a cadeia que envolve etapas de geração e uso de biomassa (TEIGISEROVA et al., 2020) conforme ilustrado na Figura 1. A implementação da técnica de pirólise para geração de recursos renováveis energéticos (bio-óleo e gás de pirólise) além de material carbonáceo pirogênico (PCM) representa eficiente solução de gestão de resíduos (MATRAPAZI et al., 2020), de acordo com preceitos da economia circular, pelos seguintes motivos: o processo de pirólise é tecnologia de emissão negativa de gases do efeito estufa (por exemplo CO₂) e a respectiva aplicação de biochars em solo para sequestro de carbono (MATRAPAZI et al., 2020). Além da aplicação para sequestro de carbono, as aplicações do biocarvão em solo (LIMA et al., 2020) possibilitam reciclar macronutrientes dentro de sistemas agrícolas (MIRABELLA et al., 2014) além da perspectiva de inserção gradual, na cadeia de consumo, dos recursos energéticos advindos do processo de pirólise (gás de pirólise e biocombustível líquido) (SCHAFFER et al., 2019) conforme ilustrado na Figura 1.

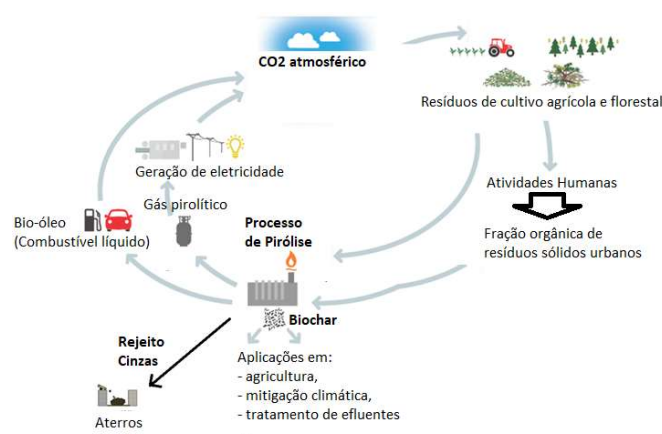


Figura 1: Ilustração da pirólise como estratégia alternativa de gestão de resíduos: produção de biochar, bio-óleo e gás pirolítico e inclusão desses produtos no ciclo. Fonte: Adaptado de (ANDERSON et al., 2016; CHEW et al., 2021).

Em vista da agricultura ser um dos setores de maior contribuição para as emissões de gases do efeito estufa no planeta, e em particular no Brasil faz-se necessária a implementação de práticas de economia circular, com aproveitamento dos resíduos gerados (BARROS et al., 2020). É nesse contexto que se justifica o presente estudo sobre a importância da inserção da tecnologia de pirólise para valoração de resíduos orgânicos, como tecnologia complementar às práticas de gestão de resíduos sólidos no Brasil, a exemplo da

compostagem e biodigestão anaeróbica. No caso da pirólise, além de reduzir emissões de gases de efeito estufa; a aplicação do material carbonáceo pirogênico na agricultura para condicionamento de solos e/ou sequestro de carbono é um excelente exemplo de práticas de economia circular.

O objetivo do presente trabalho é apresentar os principais mecanismos envolvidos na degradação térmica por pirólise, os produtos gerados a partir do processamento pirolítico de biomassa, evidenciando os principais modelos de reatores utilizados para produzir biocarvão que possa ser classificado como biochar. Além disso, é apresentado um conjunto de experiências recentes no Brasil com foco na produção e caracterização do biochar, identificando perspectivas promissoras de aplicação em tecnologias ambientais.

METODOLOGIA

A revisão de literatura com ênfase em investigar principais resultados da aplicação de pirólise para produção de biocarvão pirogênico (biochar) foi elaborada por meio da análise de trabalhos científicos obtidos mediante à busca de palavras-chave em diferentes plataformas de dados de pesquisa, como por exemplo “SCOPUS” e “ScienceDirect”. Trabalhos publicados em periódicos indexados desde 2015 foram considerados no levantamento (Tabela 3) dos principais resultados provenientes de cada estudo brasileiro de produção de biochar. As principais informações coletadas para cada estudo foram: tipo de biomassa, estado da federação para desenvolvimento da pesquisa além dos principais resultados e respectivos tipos de aplicações. Assumiu-se que desde 2015 ainda não há formalmente institucionalizado no Brasil o reconhecimento da relevância de se estabelecer mercado do Biochar (e respectivas tecnologias de produção relacionadas), em referência a estudo realizado por Rittl et al. (2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Processo de degradação térmica do tipo pirólise em base seca

A tecnologia de pirólise, processo de decomposição termoquímico em condições operacionais sob ausência de oxigênio (O₂) no meio reacional ou pelo menos quase-ausência, ocorre em faixa de temperatura de 400-1200°C (TRIPATHI et al., 2016). Instantes iniciais a partir do início do fornecimento de aquecimento para a unidade de pirólise, dá-se início a fase de secagem da biomassa até temperatura $\leq 200^{\circ}\text{C}$ (LI et al., 2020) com evaporação de água retida na biomassa (L'ORANGE et al., 2012) e simultaneamente, tem-se a formação de fase gasosa constituída de compostos orgânicos de baixa temperatura de volatilização (ácidos orgânicos e gás CO₂) além de vapor de água (NEVES et al., 2011).

A partir do valor de temperatura próximo de 200°C, fenômenos complexos relacionados à degradação termoquímica envolvem reações químicas de desidratação, “cracking”, polimerização, oxidação, dentre outras reações distintas, de forma paralela e/ou consecutivas; que por sua vez se subdividem nas etapas de pirólise primária e secundária (NEVES et al., 2011) que não serão detalhadas no escopo do presente trabalho. A taxa de perda de massa da biomassa durante o processamento é influenciada pela proporção dos componentes químicos estruturais (celulose, hemicelulose e lignina) bem como conteúdo de espécies

minerais presentes na constituição da biomassa (Na, K, Ca e Mg) (WANNAPEERA et al., 2008). Menor conteúdo (%m/m) de lignina e elevado conteúdo de celulose (%m/m) tende a implicar em maior taxa de perda de massa da biomassa durante a degradação térmica; enquanto biomassa com elevado teor de lignina (% m/m) relativamente ao teor de celulose tende a apresentar menor taxa de perda de massa (WANNAPEERA et al., 2008).

Devido à ocorrência de transferência de calor e massa entre as fases sólida e gasosa (em formação) durante o processo de carbonização contínuo (JALALIFAR et al., 2018) simultaneamente à ocorrência das reações químicas, a fase gasosa em formação interage com fase sólida residual, de modo a ocorrer deposição de parte dos compostos orgânicos voláteis (NEVES et al., 2011). Na temperatura final de pirólise, duas correntes de produtos são formadas na saída do reator: fase gasosa constituída de: H₂, CO, H₂O, N₂, benzeno e tolueno (BRIDGWATER, 2012; MOHAN et al., 2006) além da fase sólida carbonácea porosa (biocarvão) juntamente com cinzas (TRIPATHI et al., 2016). Com relação à fase sólida, a caracterização e respectiva reatividade do biocarvão em formação ocorre por meio das seguintes etapas consecutivas e/ou paralelas (MORIN et al., 2016): (a) Desenvolvimento de estrutura porosa desordenada com presença de poros e vesículas nos biocarvões primários com emissão de compostos voláteis; (b) Redução do conteúdo de hidrogênio e oxigênio, bem como de compostos orgânicos oxigenados (hidroxil e carbonil), simultaneamente ao aumento da aromaticidade; (c) Aumento relativo do teor de anéis aromáticos, sendo que no material carbonáceo remanescente a estrutura é predominantemente gráfica. Tais etapas podem ser simplificadas (LI et al., 2016), conforme Quadro 1, em função das dificuldades de propor o detalhamento das inúmeras reações químicas complexas (paralelas e/ou simultâneas) bem como os respectivos compostos formados (VELDEN et al., 2010).

Quadro 1: Etapas simplificadas de transformação da biomassa durante processo pirolítico.

Etapa 1: Biomassa bruta → umidade + resíduos que não reagiram
Etapa 2: Resíduos não-reagidos → voláteis + gás de pirólise + biocarvão primário
Etapa 3: Biocarvão primário → voláteis + gás de pirólise + biocarvão secundário

Diversos estudos que investigaram influência de distintas variáveis (relativas à composição de biomassa e do processo de pirólise) na produção de biochar, evidenciaram a influência predominante da temperatura, seguida do tipo de biomassa avaliado (LI et al., 2019) em relação às seguintes propriedades: área superficial, porosidade, teor de grupos funcionais e estabilidade. Há estudos que evidenciam a influência simultânea da temperatura (T) e do tempo de residência da fase vapor (VRT) (WEBER et al., 2018) em relação a essas propriedades citadas, além de inúmeras outras propriedades também. Para o escopo do presente artigo, a análise e discussão das interações entre as distintas variáveis de processo pirolítico e de composição química da biomassa não serão consideradas.

Os particulados de biocarvão são coletados após separação gás - sólido, em equipamento do tipo ciclone (VELDEN et al., 2010). A fração gasosa da saída do reator é destinada à unidade de troca térmica para operação de resfriamento e condensação, por meio da qual parte das biomoléculas voláteis, a exemplo dos compostos polares e de alto peso molecular, recondensam formando fase líquida (PATWARDHAN et al.,

2011) além de água pirolítica em conjunto com parte da água proveniente da biomassa feedstock processada (VELDEN et al., 2010), enquanto outra parte, principalmente os não-condensáveis, constituirá a fração de gás pirolítico. Após etapa de resfriamento e condensação da fase vapor na saída do reator, a distribuição dos é descrita assim: **Fase gasosa (gás pirolítico)**: Composta predominantemente pelos gases não condensáveis (LEE et al., 2013), predominantemente por compostos voláteis de baixo peso molecular, além de não-condensáveis, que tendem a permanecer no estado gasoso (CHEN et al., 2018). Os principais constituintes são: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) além de hidrocarbonetos de cadeia carbônica curta como metano (CH₄), etano e etileno e pequena quantidade de outros gases como o propano, amônia, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre e álcoois de cadeia carbônica curta (KAN et al., 2016); **Fase líquida (bio-óleo)**: Formada após a condensação de parte dos vapores liberados das etapas de pirólise primária e secundária (SAIDUR et al., 2011) é uma mistura líquida multicomponente de coloração marrom-escuro, que se subdivide em duas fases. A fase não-aquosa, formada por alcatrões orgânicos (“tars”), é representada por moléculas orgânicas como por exemplo: ácidos, álcoois, cetonas, aldeídos, fenóis, ésteres, açúcares, furanos, alcenos, compostos nitrogenados além de diversos grupos oxigenados (ZHANG et al., 2013; FIELD et al., 2013). A fase aquosa é proveniente do conteúdo de umidade inicial da biomassa de partida e de moléculas de água formadas das reações de desidratação de celulose e hemicelulose bem como de reações entre produtos intermediários (MOHAN et al., 2006); **Fase sólida (material carbonáceo pirogênico ou biocarvão pirolítico)**: Constituída pelo subproduto sólido carbonáceo e cinzas (NEVES et al., 2011; SAIDUR et al., 2011), é obtida após a temperatura final de processo ser alcançada. O residual de biocarvão consiste em matriz porosa rica em carbono, além da presença de hidrogênio, oxigênio e inorgânicos (MORIN et al., 2016). Contém substâncias orgânicas dispersas através da estrutura de sólido poroso, devido a condensação de parte dos compostos orgânicos voláteis da fase vapor dentro do reator (MUHAMMAD et al., 2015).

Classificação dos tipos de pirólise quanto ao ajuste das condições operacionais

A operação do processo pirolítico pode ser categorizada sob os termos: lenta, rápida e “flash”, para um tipo de biomassa específica, a depender da magnitude das variáveis de processo de maior influência para ocorrência do processo: temperatura (T), taxa de aquecimento (HR) e tempo de residência da fase vapor (VRT) (KAN et al., 2016; KUPPUSAMY et al., 2016; LAIRD et al., 2009; MOTASEMI et al., 2013; ZHANG et al., 2017). Outros parâmetros também são relevantes, a depender do tipo de condição reacional e/ou tipo de reator utilizado, como por exemplo: pressão, presença de catalisador (VARMA et al., 2017), tipo de atmosfera reacional (se há ausência de oxigênio (ou quase-ausência) ou condição de vácuo), presença de mistura monóxido de carbono (CO) e vapor de água (LI et al., 2019; TRIPATHI et al., 2016), além de taxa de fluxo de gás fluidizante inerte (TRIPATHI et al., 2016).

De acordo com metodologia de síntese de dados de extenso levantamento bibliográfico realizado por TRIPATHI et al. (2016), as diferenças entre as categorias de pirólise podem ser descritas conforme a seguir: **Pirólise lenta**: ocorre sob variação de temperatura de 300-500 °C, mediante taxa de aquecimento de

5-20 °C/min num tempo de residência variando entre 5-30 min (SINGH et al., 2015). Em função do elevado tempo de residência da fase vapor (VRT) os rendimentos em base mássica (%m/m) das frações dos produtos tendem a ser aproximadamente iguais: 35% para biocarvão; 30% para bio-óleo e 35% para gás pirolítico (ZHANG et al., 2019);

Pirólise rápida: ocorre sob valores de temperatura em torno de 500 °C, mediante taxa de aquecimento de aproximadamente 50 °C/min, em tempo de residência menor do que 5 s (SINGH et al., 2015). O ajuste das variáveis de processo ocorre com maiores especificidades de preparo da carga de entrada de biomassa no reator pois o diâmetro representativo de partícula de biomassa deve ser menor ou igual a valores medidos contidos na faixa 0.26 mm ou na faixa 5-50 mm, a depender do tipo de configuração de equipamento reator usado (MOHAN et al., 2006). O teor de umidade da biomassa deve ser menor do que 10% (MOHAN et al., 2006). Conhecida como técnica termoquímica orientada à produção de bio-óleo (ZHANG et al., 2019), o maior rendimento de bio-óleo em base mássica é favorecido por conta da rápida retirada do biocarvão do reator seguido do rápido resfriamento da fase gasosa após a saída do reator, em equipamento condensador, o que perfaz com que máximo conteúdo de vapores voláteis tende a ser condensado (QI et al., 2007). A rápida eliminação de vapores voláteis para a supressão de reações do mecanismo de pirólise secundária (KAN et al., 2016) perfaz com que a distribuição de rendimento dos produtos em base mássica, após etapa de arrefecimento da corrente gasosa de produtos (ZHANG et al., 2020) seja em torno de: 60-75% bio-óleo, 10-20% de gases não condensáveis e 15-25% de biocarvão (BRIDGWATER, 2003).

Pirólise “Flash”: Trata-se de caso particular da pirólise rápida, que ocorre sob variação de temperatura de 300-1000 °C em taxa de aquecimento muito maior do que 50°C/min, durante tempo de residência menor do que 2 s (MOHAN et al., 2006). Para o escopo desse artigo, a categoria “Flash” não será considerada, até porque as categorias de pirólise lenta e rápida são as principais mencionadas na literatura, pois os respectivos biocarvões dessas categorias têm elenco de propriedades físico-químicas que permitem o reconhecimento como biochar (ALLER et al., 2017). Para análise comparativa entre as categorias de pirólise lenta e rápida, valem ressaltar as principais vantagens e desvantagens mencionadas no Quadro 2.

Quadro 2: Vantagens e Desvantagens das categorias de pirólise Lenta e Rápida em relação à produção de biochar.

Categoria de Pirólise	Vantagens	Desvantagens
Lenta	Tecnologia consolidada comercialmente (KUPPUSAMY et al., 2016); Não há restrição quanto ao tipo de biomassa e condição de pré-tratamento necessária para preparo da carga de entrada no reator (KUPPUSAMY et al., 2016); Elevado rendimento em base mássica de produção de biocarvão (LI et al., 2020).	Maior tempo de processo (SRT: escala de minutos a horas) (LI et al., 2020); Demanda de parte da carga de biomassa para gerar parte da energia usada para manter processo autossustentável (KUPPUSAMY et al., 2016).
Rápida	Baixo tempo de residência da fase vapor, o que implica em baixo tempo operacional de processo (KUPPUSAMY et al., 2016); Sistema de fluxo contínuo (KUPPUSAMY et al., 2016); Maximizar produção de bio-óleo (KUPPUSAMY et al., 2016).	Restrição quanto ao preparo da carga de entrada no reator, pois etapa de pré-tratamento é indispensável (KUPPUSAMY et al., 2016); A caracterização do biocarvão tende a ter baixo valor de área superficial específica (LI et al., 2020).

O favorecimento do ajuste de parâmetros (por exemplo T, HR e VRT) para produção de maior

rendimento de bio-óleo tende a ocorrer quando se almeja maiores benefícios de aplicação para a indústria química da produção de substâncias químicas de alto valor comercial, o que permite melhor retorno econômico; enquanto o favorecimento do ajuste de parâmetros para favorecer elevado rendimento de biocarvão, tende a ocorrer quando se objetiva maiores benefícios direcionados ao setor agrícola (KONG et al., 2014; ROY et al., 2017).

Tipos de reatores pirolíticos

Tradicionalmente, as tecnologias de carbonização têm sido aplicadas em tradicionais fornos de carbonização (“*earth-mound kiln*”), a exemplo dos fornos de carvoaria em formato de colmeia (“*Brazilian beehive kiln*”) (BUSTAMANTE-GARCÍA et al., 2013). O fato da operação em fornos do tipo colmeia ser considerada ineficiente e poluidora devido a emissão de gases sem tratamento, como por exemplo metano, monóxido de carbono e particulados (PEREIRA et al., 2017), a tecnologia que sucedeu os fornos de colmeia foi a tecnologia de fornos de retorta (“*Retort kilns*”), pois nesse tipo de técnica a recirculação de gases efluentes da carbonização e respectiva combustão de grande parte dos compostos de carbono dentro do próprio volume de controle reacional tende a minimizar a emissão de gases nocivos (SPARREVIK et al., 2015).

Inúmeros estudos de implementação da pirólise em distintos países, em escala de bancada ou piloto, tem sido realizados sob as categorias lenta e rápida, mediante distintos tipos de reatores pirolíticos, desde equipamentos mais simples e de baixo custo (normalmente destinados à categoria de pirólise lenta) até equipamentos mais modernos, complexos e de maior custo, que por sua vez tendem a ser destinados a categoria de pirólise rápida, conforme levantamento bibliográfico mencionado no Quadro 3 para os seguintes reatores: forno de retorta, forno mufla, forno rotativo, reator de leito fixo, reator helicoidal, reator tipo parafuso, forno tubular, reator de leito fluidizado circulante, reator de leito fluidizado borbulhante e reator ablativo; sendo que detalhes de aspectos construtivos dos distintos equipamentos não são considerados no presente estudo.

A especificação do tipo de configuração de reator a ser usado para pirólise rápida ocorre em função das particularidades inerentes à carga de biomassa a ser inserida no reator (KAN et al., 2016), como por exemplo o teor de umidade da biomassa ser menor que 10%, independente da configuração de reator (AZZI et al., 2019; MOHAN et al., 2006) e requisito da faixa de valores do diâmetro de partícula (D_p) depender do tipo de modelo de reator empregado, conforme a seguir: $D_p < 2\text{mm}$ para reator de leito fluidizado borbulhante, $D_p < 6\text{ mm}$ (reator de leito fluidizado circulante), $D_p: 5\text{-}50\text{ mm}$ (Forno aquecido, reator do tipo helicoidal e reator à vácuo), $D_p < 0.2\text{-}6\text{ mm}$ (reator de cone rotativo) e $D_p < 20\text{ mm}$ (reator ablativo) (MOHAN et al., 2006).

Quadro 3: Configurações de reatores pirolíticos para produzir biocarvão (produto alvo ou coproduto).

Tipo de reator	Categoria de pirólise	Autor(es)
Forno de retorta	Lenta	ADAM, 2009; KLAVINA et al., 2016; KANOUE et al., 2018; SPARREVIK et al., 2015
Forno mufla	Lenta	JEONG et al., 2016; LIAO et al., 2016; PENG et al., 2011; PANG et al., 2018; SONG et al., 2019
Forno rotativo	Lenta	BABLER et al., 2017; CONTO et al., 2016; MIKULA et al., 2020; SILVESTRE et al., 2018;

Reator de leito fixo	Lenta	SANGINÉS et al., 2015; SANTANA et al., 2020; VILELA et al., 2014
	Rápida	ATES et al., 2013; AYSU et al., 2014; BISWAS et al., 2017; DEMIRAL et al., 2006; MANYÀ et al., 2007; MIKULA et al., 2020; ONAY et al., 2004; RONSSE et al., 2013; AYSU, 2015; KUMAR et al., 2010; ONAY et al., 2004; PÜTÜN et al., 2005; ZHANG et al., 2016; WANNAPEERA et al., 2008
Reator helicoidal	Rápida	BROWN et al., 2012; BRASSARD et al., 2017; PUY et al., 2011
	Lenta	NAM et al., 2015
Reator tipo parafuso	Lenta	MANDAL et al., 2019; QIN et al., 2020; SHI et al., 2019
	Rápida	FUNKE et al., 2018; KAPOOR et al., 2017
Forno tubular	Lenta	ABBAS et al., 2018; SHAABAN et al., 2014; WU et al., 2012
	Rápida	PANG et al., 2018
Reator de leito fluidizado circulante	Rápida	ALVAREZ et al., 2014; JUNG et al., 2012; MORIN et al., 2016; NAM et al., 2015; SHEN et al., 2009
Reator de leito fluidizado borbulhante	Rápida	BOATENG et al., 2010; JUNG et al., 2008; JALALIFAR et al., 2018; MULLEN et al., 2010; XU et al., 2011; WU et al., 2016
Reator ablativo	Rápida	KHUENKAE0 et al., 2020 ; ZUBENKO et al., 2018

Experiências brasileiras

A abundância de recursos agrícolas e agroflorestais torna o Brasil um país atraente para o desenvolvimento de pesquisas e implementação de processo pirolítico, como estratégia de gestão de resíduos (em escala comercial), pelos seguintes motivos: a agricultura é um dos setores que contribui fortemente para as emissões de gases de efeito estufa (BARROS et al., 2020); o setor agroindustrial brasileiro produz grande quantidade de resíduos e subprodutos que podem ser utilizados como matéria prima e fontes de energia, até porque todo ano cerca de 330 milhões de toneladas métricas de resíduos são gerados no país (VIRMOND et al., 2012).

Pesquisas brasileiras sobre condições de processamento pirolítico de biomassa para produção de biochar têm tido como foco aplicações, tais como o manejo de resíduos agrícolas; condicionamento dos solos com aplicação de biochar para produção de alimentos; desaceleração das mudanças climáticas via sequestro de carbono e; necessidade de redução das emissões de carbono para mitigação do efeito estufa (RITTLL et al., 2015). No Brasil ainda não existe um conjunto de diretrizes para produção sustentável de biochar e aplicações com base nos requisitos estabelecidos por organismos como o *International Biochar Institute* (IBI) e o *European Biochar Certificate* (EBC), pelo fato de ainda não existir mercado nesse segmento que possa garantir segurança aos investimentos por parte dos empreendedores e, como consequência, mercado garantido em termos de aplicações (RITTLL et al., 2015). Ainda que exista abundância de fontes de biomassa no país e o cenário seja promissor para o estabelecimento de ambiente favorável para práticas de economia circular, poucos estudos de pirólise têm sido conduzidos no Brasil usando resíduos de biomassa, como por exemplo os mencionados no Quadro 4.

Quadro 4: Estudos por grupos brasileiros sobre a produção e caracterização de biocarvões e usos em potencial.

Biomassa	Parte anatômica	Configuração do reator utilizado	Principais resultados de aplicação em função de caracterização físico-química	Local	Autor(es)
Eucaliptus	Resíduo de colheita	Reator de bancada	Aplicação do biochar como condicionador de solos devido a biomassa residual eucalipto ter baixo teor de cinzas, elevado conteúdo de carbono fixo e de carbono elementar, além de elevado valor calorífico	Curitiba (PR)	(DOUMER et al., 2015)
Eucaliptus	Casca	Forno mufla	Biocarvão de estabilidade química para ser aplicada em solos. Apresenta baixa tendência a lixiviação, e mesmo em solos ácidos retém íons	Viçosa (MG)	(FIGUEREDO et al., 2017)
Eucaliptus	Pedaços	Forno de metal	Confiabilidade na aplicação para	Santo Antonio de	(RESENDE et

	de tronco	cilíndrico industrial	condicionamento de solo. Houve aumento da concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) nas amostras de solo em estudo, entretanto os valores obtidos foram menores do que os de estudos prévios, e menores do que duas ordens de grandeza do valor máximo estabelecidos por diretrizes brasileiras (8100 ng/g solo) e europeias (3000 ng/g solo). Após 6 anos de aplicação de biochar em solos (16000 kg/alqueire), não há risco de acúmulo de PAH em solos, o que contribui para a definição de quantidade de biochar adequada bem como a frequência de aplicação	Goiás (GO)	al., 2018)
Madeira da Floresta Savana	Pedaços de tronco	forno de tijolos circular tradicional	Confiabilidade na aplicação para condicionamento de solo. Houve aumento da concentração de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH) nas amostras de solo em estudo, entretanto os valores obtidos foram menores do que os de estudos prévios, e menores do que duas ordens de grandeza do valor máximo estabelecidos por diretrizes brasileiras (8100 ng/g solo) e europeias (3000 ng/g solo). Após 6 anos de aplicação de biochar em solos (16000 kg/alqueire), não há risco de acúmulo de PAH em solos, o que contribui para a definição de quantidade de biochar adequada bem como a frequência de aplicação	Nova Xavantina (MT)	(RESENDE et al., 2018)
Café	Grãos	Reator em batelada de leito fixo	Biochar obtido com 34% de rendimento, apresentou caracterização adequada para ser usado como biocombustível sólido (valor calorífico de 31.59 MJ / kg maior do que da biomassa original) e também para aplicação do tipo adsorção após etapa de ativação. O carvão ativado desse biochar foi considerado promissor como adsorvente para remoção de corantes orgânicos de efluentes industriais	Duque de Caxias (RJ) e Niterói (RJ)	(FIGUEIREDO et al., 2017)
Coco	Pericarpo	Reator de bancada	Aplicação do biochar como condicionador de solos devido a biomassa residual eucalipto ter baixo teor de cinzas, elevado conteúdo de carbono fixo e de carbono elementar, além de elevado valor calorífico	Curitiba (PR)	(DOUMER et al., 2015)
Cana de açúcar	Bagaço	Reator de bancada	Aplicação do biochar como condicionador de solos devido a biomassa residual eucalipto ter baixo teor de cinzas, elevado conteúdo de carbono fixo e de carbono elementar, além de elevado valor calorífico	Curitiba (PR)	(DOUMER et al., 2015)
Mamona	Farinha	Reator de bancada	Biochar com elevado teor de grupos alifáticos. Recomendado para aplicação do tipo condicionamento de solos.	Curitiba (PR)	(DOUMER et al., 2015)
Mamona	Semente	Forno tubular em escala de bancada	Biochar da semente de mamona considerado adsorvente de baixo custo para tratamento de água contaminada com corante azul de metileno	Rio de Janeiro (RJ)	(SILVA et al., 2021)
Aguapé	Planta	Reator de bancada	Biochar com elevado teor de grupos alifáticos. Recomendado para aplicação do tipo condicionamento de solos.	Curitiba (PR)	(DOUMER et al., 2015)
Açaí	Sementes	Forno mufla	A produção de biochar evita disposição inadequada de resíduos do açaí. Para aplicação agrônômica: Temperatura de processo de 600 °C e tempo de residência da fase vapor de 60 min	Belém (PA)	(SATO et al., 2019)
Açaí	Sementes	Forno artesanal	O biochar da semente de açaí se mostrou adequado para aplicação de condicionamento de solos. Produção de biochar representa solução sustentável para manejo de resíduos de açaí na região amazônica.	Belém (PA)	(SATO et al., 2020)
Laranja	Cascas	Forno mufla	Biochar da casca de laranja apresentou teor de macro e micronutrientes em proporções benéficas para solos e plantas. Outro tipo de aplicação é como aglutinador na adsorção de poluentes	Curitiba (PR)	(LIMA et al., 2020)

Lodo de esgoto	Fração orgânica	Forno mufla	Biochar de lodo de esgoto evidenciou elevado teor de nutrientes que podem ser biodisponíveis e podem contribuir para a fertilidade do solo, apesar da presença de contaminantes metálicos (Cd, Cr, Ni and Pb) (> 20% massa total)	Viçosa (MG)	(FIGUEREDO et al., 2017)
Lodo de esgoto	Fração orgânica	Forno mufla	Biochar de lodo de esgoto apresentou teor de macro e micronutrientes em proporções benéficas para solos e plantas. Outro tipo de aplicação é como aglutinador na adsorção de poluentes	Curitiba (PR)	(LIMA et al., 2020)

Embora o Brasil esteja engajado na produção de biocombustíveis líquidos há décadas e tenha desenvolvido capacidade de produção suficiente (ULLAH et al., 2015), a exemplo do Proálcool, a burocracia ainda limita as oportunidades comerciais no setor de bioenergia, o que não é diferente em relação a investir em Pesquisa e Desenvolvimento de processos termoquímicos, a exemplo da pirólise, principalmente se o ajuste de operação enfatizar a produção de biochar, que tradicionalmente tem valor de mercado muito menor do que o do bio-óleo (ROY et al., 2017). Quando o biocarvão, coproduzido com combustível líquido, puder ser vendido como um condicionador de solos com potencial de sequestro de compostos do carbono, a receita adicional gerada ocorrerá apenas quando os preços do biocombustível (ex: bio-óleo) forem relativamente baixos (CAMPBELL et al., 2018). Ainda assim, a perspectiva de inserção do biochar no mercado brasileiro é positiva, particularmente como estratégia na gestão de resíduos de origem agroflorestal, desde que a vontade política esteja presente para divulgação dos benefícios. Os resultados científicos apresentados, ainda que na sua maior parte, em escala de bancada e piloto são muito promissores. A importância de incentivar o mercado e precificação de biochars baseia-se na expectativa de que segundo a *International Biochar Initiative* (IBI) até 2050, 80% de todos os resíduos de cultivos agrícolas e florestais poderão ser destinados à geração de bioenergia (bio-óleo e gás pirolítico) e biocarvão para usos como condicionador de solo e sequestro de carbono no solo (KOŁODYŃSKA et al., 2012).

A adoção da tecnologia de pirólise como estratégia de mitigação de gases do efeito estufa e a aplicação do biochar em solos para sequestro de carbono representam dois efeitos de mitigação climática cumulativos que justificam novos estudos em Pesquisa & Desenvolvimento para viabilizar comercialmente scale-up dos resultados já existentes em escala de laboratório em diversos estados brasileiros.

Embora resultados de pesquisas recentes evidenciem as vantagens da pirólise (ex: redução de resíduos biodegradáveis que originalmente iriam para “lixões” ou aterros sanitários; geração de biocombustíveis; aplicação do biocarvão como material adsorvente no tratamento de efluentes; condicionamento de solos e sequestro de carbono, com mitigação da emissão de gases efeito estufa), não se pode deixar de mencionar os principais desafios da implementação da pirólise no território brasileiro, que por sua vez, também existem quando da aplicação da torrefação, processo de carbonização em ausência de oxigênio sob temperatura $\leq 300^{\circ}\text{C}$, na cadeia de produção de combustíveis sólidos carbonáceos a partir de biomassa lignocelulósicas (SILVA et al., 2018), sendo tais desafios de natureza: Logística: Adequação do suprimento e da infraestrutura necessária da cadeia produtiva completa para obtenção do produto (por exemplo o biochar); Técnica: Consolidação do setor de base industrial para a produção e instalação de plantas de tratamento térmico de biomassa; Político-Administrativa: Necessidade da elaboração de plano

governamental efetivo para regular a inserção da biomassa como recurso para fins energéticos.

Lacunas científicas e aplicação de biochars na agricultura brasileira

Uma lacuna ainda existente, em termos de conhecimento para alavancar a inserção do biocarvão no mercado de tecnologias sustentáveis refere-se à necessidade de uma melhor e mais bem definida associação entre características inerentes ao biocarvão - resultado das características da matéria-prima (biomassa) e processos pirolíticos aplicados - e o potencial para diferentes aplicações desse material (HU et al., 2021). Como consequência, para o setor agrícola, por exemplo, são necessárias mais evidências científicas apontando similaridades entre solos TPI e biochars produzidos, pois a partir desse referencial, o monitoramento de solos originalmente inférteis que se transformaram em férteis com a adição de biochar seja possível a curto/longo prazo mediante o registro de informações que permitam análise da mudança de propriedades físico-químicas do biochar artificial, como por exemplo as dependências entre a estabilidade e as propriedades físico-químicas do biochar, num determinado tipo de solo em estudo (SCHAFFER et al., 2019). Diante disso, mais esforços devem ser feitos em aplicações ambientais reais “*in situ*” e em grande escala, para que se reduza a incerteza do impacto ambiental (HU et al., 2021).

É relevante a necessidade do envolvimento dos agricultores em pesquisas participativas com os pesquisadores, para que se possa ajustar a pesquisa às suas necessidades ainda que em cada estado tenha aspectos geográficos e sazonais muito distintos, pois mediante reconhecimento dos aspectos positivos e negativos da adoção do biochar a tomada de decisões seja segura (LATAWIEC et al., 2017). Isso se justifica pois o biochar pode ser contaminado durante a etapa de pirólise secundária, principalmente; por condensação dos vapores de pirólise, portanto é de se esperar que compostos considerados tóxicos para as atividades de cultivo agrícola como hidrocarbonetos policíclico aromáticos (PAH) possam ser lixiviados (RESENDE et al., 2018), embora possa não estar claro quais compostos específicos são responsáveis por essa toxicidade quando aplicados ao solo (BUSS et al., 2014). O reconhecimento da possível interação entre a determinação da biomassa adequada, condições de pirólise, limite de conteúdo de PAH permitido na superfície do biochar e respectiva resiliência do solo quanto aquela concentração de PAH ainda não foi estabelecida (RESENDE et al., 2018).

Para além de resultados científicos em laboratórios e em escala de campo, para perspectiva promissora de mercado de biochar as considerações socioeconômicas devem ser incorporadas na pesquisa (LATAWIEC et al., 2017), até por que o discurso acerca das tecnologias de produção e aplicação de biochars ainda não foi formalmente institucionalizado no Brasil (RITTL et al., 2015), mesmo porque para aceitação e investimento da parte do agricultor a mensuração do custo é fator crucial para se decidir pela adoção de biochar como meio condicionador de solo por exemplo.

CONCLUSÕES

Incentivar a implementação em escala comercial de processos pirolíticos configura-se em estratégia promissora para o Brasil no contexto de práticas de economia circular, desde que ampla divulgação dos

benefícios do biochar seja realizada, mediante plano de política de precificação de biochars para motivar empreendedores e agricultores, principalmente. As oportunidades e vantagens são inúmeras, não apenas no setor agrícola, mas também em aplicações no saneamento, conforme experiências prévias sugerem. Além disso, a substituição gradativa de derivados petroquímicos por bio-óleo e gás de pirólise, permite diversificar a matriz energética no setor de fontes renováveis. Reconhecer a implementação da pirólise como prática de economia circular, em vista de comprovação técnica como tecnologia de emissão negativa de gases do efeito estufa, justifica a necessidade de maior investimento para o estabelecimento de uma cadeia produtiva de biocarvão, desde que se estabeleça uma política de investimento em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para as etapas de seleção dos resíduos de biomassa mais adequados, escolha de pré-tratamento e ajuste da tecnologia de pirólise, adequadas a características geográficas e sazonalidade em diferentes regiões brasileiras. Uma vez que a aplicação de biochar, por si só, não é suficiente para mitigação de gases do efeito estufa de forma expressiva, vale a pena enfatizar a importância de estudos futuros para propor tecnologias híbridas de mitigação envolvendo aplicação de biochar, para que práticas de economia circular favoreçam o aumento da produtividade da cultura agrícola de forma sustentável, dentre inúmeros outros benefícios relacionados.

REFERÊNCIAS

- ADAM, J. C.. Improved and more environmentally friendly charcoal production system using a low-cost retort-kiln (Eco-charcoal). **Renewable Energy**, v.34, n.8, p.1923-1925, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.009>
- ABBAS, Q.; LIU, G.; YOUSAF, B.; ALI, M. U.; ULLAH, H.; MUNIR, M. A. M.; LIU, R.. Contrasting effects of operating conditions and biomass particle size on bulk characteristics and surface chemistry of rice husk derived-biochars. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.134, p.281-292, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.06.018>
- AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A. U.; LIM, J. E.; ZHANG, M.; BOLAN, N.; MOHAN, D.; VITHANAGE, M.; LEE, S. S.; OK, Y. S.. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. **Chemosphere**, v.99, p.19-23, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.071>
- ALLER, D.; BAKSHI, S.; LAIRD, D. A.. Modified method for proximate analysis of biochars. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.124, p.335-342, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.01.012>
- ALVAREZ, J.; LOPEZ, G.; AMUTIO, M.; BILBAO, J.; OLAZAR, M.. Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Fuel**, v.128, p.162-169, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.02.074>
- AZZI, E. S.; KARLTUN, E.; SUNDBERG, C.. Prospective Life Cycle Assessment of Large-Scale Biochar Production and Use for Negative Emissions in Stockholm. **Environmental Science & Technology**, v.53, n.14, p.8466-8476, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1021/acs.est.9b01615>
- ANDERSON, N.; MITCHELL, D.. Forest Operations and Woody Biomass Logistics to Improve Efficiency, Value, and Sustainability. **Bioenergy Research**, v.9, p.518-533, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12155-016-9735-1>
- ATES, F.; UN, U. T.. Production of char from hornbeam sawdust and its performance evaluation in the dye removal. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.103, p.159-166, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.01.021>
- AYSU, T.. Catalytic pyrolysis of *Eremurus spectabilis* for bio-oil production in a fixed-bed reactor: Effects of pyrolysis parameters on product yields and character. **Fuel Processing Technology**, v.129, p.24-38, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.08.014>
- AYSU, T.; KÜÇÜK, M. M.. Biomass pyrolysis in a fixed-bed reactor: Effects of pyrolysis parameters on product yields and characterization of products. **Energy**, v.64, p.1002-1025, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.053>
- BABLER, M. U.; PHOUNGLAMCHEIK, A.; AMOVIC, M.; LJUNGGREN, R.; ENGVALL, K.. Modeling and pilot plant runs of slow biomass pyrolysis in a rotary kiln. **Applied Energy**, v.207, p.123-133, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.034>
- BARROS, M. V.; SALVADOR, R.; FRANCISCO, A. C.; PIEKARSKI, C. M.. Mapping of research lines on circular economy practices in agriculture: From waste to energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.131, p.109958, 2020. DOI: 10.1016/j.rser.2020.109958.
- BISWAS, B.; PANDEY, N.; BISHT, Y.; SINGH, R.; KUMAR, J.; BHASKAR, T.. Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. **Bioresource Technology**, v.237, p.57-63, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.046>

- BOATENG, A. A.; MULLEN, C. A.; GOLDBERG, N. M.; HICKS, K. B.; DEVINE, T. E.; LIMA, I. M.; MCMURTREY, J. E.. Sustainable Production of Bioenergy and Biochar from the Straw of High-Biomass Soybean Lines via Fast Pyrolysis. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v.29,n.2, p.175-183, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1002/ep.10446>
- BONASSA, G.; SCHNEIDER, L. T.; CANEVER, V. B.; CREMONEZ, P. A.; FRIGO, E. P.; DIETER, J.; TELEKEN, J. G.. Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, p.2365-2378, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.075>
- BRASSARD, P.; GODBOUT, S.; PELLETIER, F.; RAGHAVAN, V.; PALACIOS, J. H.. Pyrolysis of switchgrass in an auger reactor for biochar production: A greenhouse gas and energy impacts assessment. **Biomass and Bioenergy**, v.116, p.99-105, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.06.007>
- BRASSARD, P.; GODBOUT, S.; RAGHAVAN, V.. Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production: A review. **Biosystems Engineering**, v.161, p.80-92, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.06.020>
- BRIDGWATER, A. V.. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, v.91, n.2-3, p.87-102, 2003. DOI: [http://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](http://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
- BRIDGWATER, A. V.. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v.38, p.68-94, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- BROWN, J. N.; BROWN, R. C.. Process optimization of an auger pyrolyzer with heat carrier using response surface methodology. **Bioresource Technology**, v.38, n.1, p.405-414, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.117>
- BUSS, W.; MAŠEK, O.. Mobile organic compounds in biochar - A potential source of contamination - Phytotoxic effects on cress seed (*Lepidium sativum*) germination. **Journal of Environmental Management**, v.137, p.111-119, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.045>
- BUSTAMANTE-GARCÍA, V.; CARRILLO-PARRA, A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, H.; RAMÍREZ-LOZANO, R. G.; CORRAL-RIVAS, J. J.; GARZA-OCAÑAS, F.. Evaluation of a charcoal production process from forest residues of *Quercus sideroxylla* Humb., & Bonpl. in a Brazilian beehive kiln. **Industrial Crops and Products**, v.42, p.169-174, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.04.034>
- CAMPBELL, R. M.; ANDERSON, N. M.; DAUGAARD, D. E.; NAUGHTON, H. T.. Financial viability of biofuel and biochar production from forest biomass in the face of market price volatility and uncertainty. **Applied Energy**, v.230, p.330-343, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.085>
- CHEN, D.; GAO, A.; MA, Z.; FEI, D.; CHANG, Y.; SHEN, C.. In-depth study of rice husk torrefaction: Characterization of solid, liquid and gaseous products, oxygen migration and energy yield. **Bioresource Technology**, v.253, p.148-153, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.009>
- CHENG, F.; LUO, H.; COLOSI, L. M.. Slow pyrolysis as a platform for negative emissions technology: An integration of machine learning models, life cycle assessment, and economic analysis. **Energy Conversion and Management**, v.223, p.113258, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113258>
- CHEW, K. W.; CHIA, S. R.; CHIA, W. Y.; CHEAH, W. Y.; MUNAWAROH, H. S. H.; ONG, W.-J.. Abatement of hazardous materials and biomass waste via pyrolysis and co-pyrolysis for environmental sustainability and circular economy. **Environmental Pollution**, v.278, p.116836, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116836>
- CONTO, D. D.; SILVESTRE, W. P.; BALDASSO, C.; GODINHO, M.. Performance of rotary kiln reactor for the elephant grass pyrolysis. **Bioresource Technology**, v.218, p.153-160, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.082>
- DEMIRAL, I.; SENSÖZ, S.. Fixed-Bed Pyrolysis of Hazelnut (*Corylus Avellana* L.) Bagasse : Influence of Pyrolysis Parameters on Product Yields. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v.28, p.1149-1158, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1080/009083190966126>
- DOUMER, M. E.; ARÍZAGA, G. G. C.; SILVA, D. A.; YAMAMOTO, C. I.; NOVOTNY, E. H.; SANTOS, J. M.; SANTOS, L. O.; JR, A. W.; ANDRADE, J. B.; MANGRICH, A. S.. Slow pyrolysis of different Brazilian waste biomasses as sources of soil conditioners and energy, and for environmental protection. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.113, p.434-443, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.03.006>
- FIELD, J. L.; KESKE, C. M. H.; BIRCH, G. L.; DEFOORT, M. W.; COTRUFO, M. F.. Distributed biochar and bioenergy coproduction: A regionally specific case study of environmental benefits and economic impacts. **Global Change Biology Bioenergy**, v.5, p.177-191, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1111/gcbb.12032>
- FIGUEIREDO, M. K.-K.; CALDAS, K. N. C.; NASCIMENTO, B. P.; SCHROEDER, P.; ROMEIRO, G. A.. Use of biochar obtained from coffee grounds as adsorbent of dyes and solid biofuel. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.21, p.92-103, 2017. DOI: <http://doi.org/10.5902/2236117029742>
- FIGUEREDO, N. A.; COSTA, L. M.; MELO, L. C. A.; SIEBENEICHLER, E. A.. Characterization of biochars from different sources and evaluation of release of nutrients and contaminants. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, n.3, p.395-403, 2017. DOI: <http://doi.org/10.5935/1806-6690.20170046>
- FUNKE, A.; DEMUS, T.; WILLMS, T.; SCHENKE, L.; ECHTERHOF, T.; NIEBEL, A.; PFEIFER, H.; DAHMEN, N.. Application of fast pyrolysis char in an electric arc furnace. **Fuel Processing Technology**, v.174, p.61-68, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.013>
- GANGULY, A.; MARTIN, I. M.; BROWN, R. C.; WRIGHT, M. M.. Application of Hydroprocessing, Fermentation, and Anaerobic Digestion in a Carbon-Negative Pyrolysis Refinery. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v.44, n.8, p.16413-16421, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c03905>

- GAUNT, J. L.; LEHMANN, J.. Energy Balance and Emissions Associated with Biochar Sequestration and Pyrolysis Bioenergy Production. **Environmental Science and Technology**, v.42, n.11, p.4152-4158, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1021/es071361i>
- GISI, S. D.; PETTA, L.; WENDLAND, C.. History and technology of Terra Preta sanitation. **Sustainability**, v.6, n.3, p.1328-1345, 2014. DOI: <http://doi.org/10.3390/su6031328>
- GLASER, B.. Prehistorically modified soils of central Amazonia: A model for sustainable agriculture in the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v.362, p.187-196, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1098/rstb.2006.1978>
- GWENZI, W.; CHAUKURA, N.; MUKOME, F. N. D.; MACHADO, S.; NYAMASOKA, B.. Biochar production and applications in sub-Saharan Africa: Opportunities, constraints, risks and uncertainties. **Journal of Environmental Management**, v.150, p.250-261, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.11.027>.
- HAMMOND, J.; SHACKLEY, S.; SOHI, S.; BROWNSORT, P.. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK. **Energy Policy**, v.39, n.5, p.2646-2655, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.02.033>
- HU, Q.; JUNG, J.; CHEN, D.; LEONG, K.; SONG, S.; LI, F.; MOHAN, B. C.; YAO, Z.; PRABHAKAR, A. K.; LIN, X. H.; LIM, E. Y.; ZHANG, L.; SOURADEEP, G.; OK, Y. S.; KUA, H. W.; LI, S. F. Y.; TAN, H. T. W.; DAI, Y.; TONG, Y. W.; PENG, Y.; JOSEPH, S.; WANG, C.-H.. Biochar industry to circular economy. **Science of The Total Environment**, v.757, p.143820, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143820>
- JALALIFAR, S.; ABBASSI, R.; GARANIYA, V.; HAWBOLDT, K.; GHIJI, M.. Parametric analysis of pyrolysis process on the product yields in a bubbling fluidized bed reactor. **Fuel**, v.234, p.616-625, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.07.070>.
- JEONG, C. Y.; DODLA, S. K.; WANG, J. J.. Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products. **Chemosphere**, v.142, p.4-13, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.05.084>
- JUNG, S.-H.; KIM, S.-J.; KIM, J.-S.. Characteristics of products from fast pyrolysis of fractions of waste square timber and ordinary plywood using a fluidized bed reactor. **Bioresource Technology**, v.114, p.670-676, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.044>
- JUNG, S.-H.; KANG, B.-S.; KIM, J.-S.. Production of bio-oil from rice straw and bamboo sawdust under various reaction conditions in a fast pyrolysis plant equipped with a fluidized bed and a char separation system. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.82, n.2, p.240-247, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.04.001>
- KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J.. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.57, p.1126-1140, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.185>
- KAPOOR, L.; BOSE, D.; MEKALA, A.. Biomass pyrolysis in a twin-screw reactor to produce green fuels. **Biofuels**, v.11, p.101-107, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1080/17597269.2017.1345360>
- KANOOU, B. M. D.; ALLAIRE, S. E.; MUNSON, A. D.. Quality of Biochars Made from Eucalyptus Tree Bark and Corn cob Using a Pilot-Scale Retort Kiln. **Waste and Biomass Valorization**, v.9, n.6, p.899-909, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12649-017-9884-2>
- KHUENKAE0, N.; TIPPAYAWONG, N.. Production and characterization of bio-oil and biochar from ablative pyrolysis of lignocellulosic biomass residues. **Chemical Engineering Communications**, v.207, n.2, p.153-160, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1080/00986445.2019.1574769>
- KLAVINA, K.; KLAVINS, J.; VEIDENBERGS, I.; BLUMBERGA, D.. Charcoal Production in a Continuous Operation Retort. Experimental Data Processing. **Energy Procedia**, v.95, p.208-215, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.09.051>
- KOŁODYŃSKA, D.; WNETRZAK, R.; LEAHY, J. J.; HAYES, M. H. B.; KWAPIŃSKI, W.; HUBICKI, Z.. Kinetic and adsorptive characterization of biochar in metal ions removal. **Chemical Engineering Journal**, v.197, p.295-305, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.025>
- KONG, S.-H.; LOH, S.-K.; BACHMANN, R. T.; RAHIM, S. A.; SALIMON, J.. Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.39, p.729 - 739, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.107>
- KUMAR, G.; PANDA, A. K.; SINGH, R. K.. Optimization of process for the production of bio-oil from eucalyptus wood. **Journal of Fuel Chemistry and Technology**, v.38, n.2, p.162-167, 2010. DOI: [http://doi.org/10.1016/S1872-5813\(10\)60028-X](http://doi.org/10.1016/S1872-5813(10)60028-X)
- KUPPUSAMY, S.; THAVAMANI, P.; MEGHARAJ, M.; VENKATESWARLU, K.; NAIDU, R.. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions. **Environment International**, v.87, p.1-12, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envint.2015.10.018>
- L'ORANGE, C.; DEFOORT, M.; WILLSON, B.. Influence of testing parameters on biomass stove performance and development of an improved testing protocol. **Energy for Sustainable Development**, v.16, n.1, p.3-12, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.esd.2011.10.008>
- LAIRD, D. A.; BROWN, R. C.; AMONETTE, J. E.; LEHMANN, J.. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.3, n.5, p.547-562, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1002/bbb.169>
- LATAWIEC, A. E.; KRÓLCZYK, J. B.; KUBÓN, M.; SZWEDZIAK, K.; DROSIK, A.; POLAŃCZYK, E.; GROTKIEWICZ, K.; STRASSBURG, B. B. N.. Willingness to Adopt Biochar in Agriculture: The producer's Perspective. **Sustainability**, v.9, n.4, p.655, 2017. DOI: <http://doi.org/10.3390/su9040655>
- LEE, Y.; EUM, P.-R.-B.; RYU, C.; PARK, Y.-K.; JUNG, J.-H.;

HYUN, S.. Characteristics of biochar produced from slow pyrolysis of Geodae-Uksae 1. **Bioresource Technology**, v.130, p.345-350, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.012>

LI, R.; ZENG, K.; SORIA, J.; MAZZA, G.; GAUTHIER, D.; RODRIGUEZ, R.; FLAMANT, G.. Product distribution from solar pyrolysis of agricultural and forestry biomass residues. **Renewable Energy**, v.89, p.27-35, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2015.11.071>

LIAO, N.; LI, Q.; ZHANG, W.; ZHOU, G.; MA, L.; MIN, W.; YE, J.; HOU, Z.. Effects of biochar on soil microbial community composition and activity in drip-irrigated desert soil. **European Journal of Soil Biology**, v.72, p.27-34, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2015.12.008>

LI, W.; DANG, Q.; BROWN, R. C.; LAIRD, D.; WRIGHT, M. M.. The impacts of biomass properties on pyrolysis yields, economic and environmental performance of the pyrolysis-bioenergy-biochar platform to carbon negative energy. **Bioresource Technology**, v.241, p.959-968, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.049>

LI, W.; AMIN, F. R.; FU, Y.; ZHANG, H.; HE, Y.; HUANG, Y.; LIU, G.; CHEN, C.. Effects of Temperature, Heating Rate, Residence Time, Reaction Atmosphere, and Pressure on Biochar Properties. **Journal of Biobased Materials and Bioenergy**, v.13, p.1-10, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1166/jbmb.2019.1789>

LI, W.; DUMORTIER, J.; DOKOOHAKI, H.; MIGUEZ, F. E.; BROWN, R.C.; LAIRD, D.; WRIGHT, M. M.. Regional techno-economic and life-cycle analysis of the pyrolysis-bioenergy-biochar platform for carbon-negative energy. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.13, n.6, p.1428-1438, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1002/bbb.2043>

LI, S.; HARRIS, S.; ANANDHI, A.; CHEN, G.. Predicting biochar properties and functions based on feedstock and pyrolysis temperature : A review and data syntheses. **Journal of Cleaner Production**, v.215, p.890-902, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.106>

LI, Y.; XING, B.; DING, Y.; HAN, X.; WANG, S.. A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v.312, p.123614, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614>

LIMA, L. F.; MONTEIRO, V. R. C.; BARQUILHA, C. E. R.; BRAGA, M. C. B.. Produção de biocarvão a partir de lodo de esgoto e de cascas de laranja. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.24, p.1-15, 2020. DOI: <http://doi.org/10.5902/2236117062692>

MANYÀ, J. J.; RUIZ, J.; ARAUZO, J.. Some peculiarities of conventional pyrolysis of several agricultural residues in a packed bed reactor. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v.46, n.26, p.9061-9070, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1021/ie070811c>

MANDAL, S.; HAYDARY, J.; BHATTACHARYA, T. K.; TANNA, H. R.; HUSAR, J.; HAZ, A.. Valorization of Pine Needles by Thermal Conversion to Solid, Liquid and Gaseous Fuels in a Screw Reactor. **Waste and Biomass Valorization**, v.10, n° 12, p.3587-3599, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12649->

[018-0386-7](http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.106)

MATRAPAZI, V. K.; ZABANIOTOU, A.. Experimental and feasibility study of spent coffee grounds upscaling via pyrolysis towards proposing an eco-social innovation circular economy solution. **Science of the Total Environment**, v.718, p.137316, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137316>.

MIKULA, K.; SOJA, G.; SEGURA, C.; BERG, A.; PFEIFER, C.. Carbon Sequestration in Support of the “4 per 1000” Initiative Using Compost and Stable Biochar from Hazelnut Shells and Sunflower Husks. **Processes**, v.8, n.7, p.764, 2020. DOI: <http://doi.org/10.3390/pr8070764>

MIRABELLA, N.; CASTELLANI, V.; SALA, S.. Current options for the valorization of food manufacturing waste: A review. **Journal of Cleaner Production**, v.65, p.28-41, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>

MOHAN, D.; JR, C. U. P.; STEELE, P. H.. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy & Fuels**, v.20, n.3, p.848-889, 2006. DOI: <http://doi.org/10.1021/ef0502397>

MONLAU, F.; FRANCAVILLA, M.; SAMBUSITI, C.; ANTONIOU, N.; SOLHY, A.; LIBUTTI, A.; ZABANIOTOU, A.; BARAKAT, A.; MONTELEONE, M.. Toward a functional integration of anaerobic digestion and pyrolysis for a sustainable resource management. Comparison between solid-digestate and its derived pyrochar as soil amendment. **Applied Energy**, v.169, p.652-662, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.084>

MORIN, M.; PÉCATE, S.; HÉMATI, M.; KARA, Y.. Pyrolysis of biomass in a batch fluidized bed reactor : Effect of the pyrolysis conditions and the nature of the biomass on the physicochemical properties and the reactivity of char. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.122, p.511-523, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.10.002>

MOTASEMI, F.; AFZAL, M. T.. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.28, p.317-330, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.008>

MUHAMMAD, C.; ONWUNDILI, J. A.; WILLIAMS, P. T.. Catalytic pyrolysis of waste plastic from electrical and electronic equipment. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.113, p.332-339, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2015.02.016>

MUKOME, F. N. D.; ZHANG, X.; SILVA, L. C. R.; SIX, J.; PARIKH, S. J.. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.61, p.2196-2204, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1021/jf3049142>

MULLEN, C. A.; BOATENG, A. A.; GOLDBERG, N. M.; LIMA, I. M.; LAIRD, D. A.; HICKS, K. B.. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. **Biomass and Bioenergy**, v.34, p.67-74, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.012>

NAM, H.; CAPAREDA, S. C.; ASHWATH, N.; KONGKASAWAN, J.. Experimental investigation of pyrolysis of rice straw using bench-scale auger, batch and fluidized bed reactors. **Energy**,

- v.93, p.2384-2394, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.028>
- NEVES, D.; THUNMAN, H.; MATOS, A.; TARELHO, L.; GÓMEZ-BAREA, A.. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. **Progress in Energy and Combustion Science**, v.37, n.5, p.611-630, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.peccs.2011.01.001>.
- NOR, N. M.; LAU, CHUNG, L.; LEE; TEONG, K.; MOHAMED, A. R.. Synthesis of activated carbon from lignocellulosic biomass and its applications in air pollution control — a review. **Biochemical Pharmacology**, v.1, n.4, p.658-666, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jece.2013.09.017>
- ONAY, O.; KOÇKAR, O. M.. Fixed-bed pyrolysis of rapeseed (*Brassica napus* L.). **Biomass and Bioenergy**, v.26, n.3, p.289-299, 2004. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00123-5](http://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00123-5)
- PANDEY, S. D.; MENDONÇA, F. G.; RODRIGUES, M. N.; FARIA, B. P. Z.; CAMPOS, J. L. E.; NORONHA, I. F. P. C.; VIEIRA, S. S.; SANTOS, N. A. V.; FERNANDES, L. A.; SAMPAIO, R. A.; COLEN, F.; MAGRIOTIS, Z. M.; JORIO, A.. Structural and elemental analysis of biochars in the search of a synthetic path to mimetize anthropic Amazon soils. **Journal of Environmental Management**, v.279, p.111685, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111685>
- PANG, C. H.; LESTER, E.; WU, T.. Influence of lignocellulose and plant cell walls on biomass char morphology and combustion reactivity. **Biomass and Bioenergy**, v.119, p.480-491, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.10.011>
- PATWARDHAN, P. R.; DALLUGE, D. L.; SHANKS, B. H.; BROWN, R. C.. Distinguishing primary and secondary reactions of cellulose pyrolysis. **Bioresour. Technol.**, v.102, n.8, p.5265-5269, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.02.018>.
- PENG, X.; YE, L. L.; WANG, C. H.; ZHOU, H.; SUN, B.. Temperature- and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China. **Soil and Tillage Research**, v.112, n.2, p.159-166, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.still.2011.01.002>
- PEREIRA, E. G.; MARTINS, M. A.; PECENKA, R.; CARNEIRO, A. C. O.. Pyrolysis gases burners: Sustainability for integrated production of charcoal, heat and electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.75, p.592-600, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.028>
- PÜTÜN, A. E.; ÖZBAY, N.; ÖNAL, E. P.; PÜTÜN, E.. Fixed-bed pyrolysis of cotton stalk for liquid and solid products. **Fuel Processing Technology**, v.86, n.11, p.1207-1219, 2005. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.12.006>
- PUY, N.; MURILLO, R.; NAVARRO, M. V.; LÓPEZ, J. M.; RIERADEVALL, J.; FOWLER, G.; ARANGUREN, I.; GARCÍA, T.; BARTROLÍ, J.; MASTRAL, A. M.. Valorisation of forestry waste by pyrolysis in an auger reactor. **Waste Management**, v.31, n.6, p.1339-1349, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.020>
- QI, Z.; JIE, C.; TIEJUN, W.; YING, X.. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. **Energy Conversion and Management**, v.48, n.1, p.87-92, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.05.010>
- QIN, L.; SHAO, Y.; HOU, Z.; JIANG, E.. Effect of temperature on the physicochemical characteristics of pine nut shell pyrolysis products in a screw reactor. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v.42, p.2831-2843, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1080/15567036.2019.1618993>
- RESENDE, M. F.; BRASIL, T. F.; MADARI, B. E.; NETTO, A. D. P.; NOVOTNY, E. H.. Polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar amended soils: Long-term experiments in Brazilian tropical areas. **Chemosphere**, v.200, p.641-648, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.139>
- RITTL, T. F.; ARTS, B.; KUYPER, T. W.. Biochar: An emerging policy arrangement in Brazil? **Environmental Science and Policy**, v.51, p.45-55, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.010>
- RONSE, F.; HECKE, S. V.; DICKINSON, D.; PRINS, W.. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: Influence of feedstock type and pyrolysis conditions. **Global Change Biology Bioenergy**, v.5, n.2, p.104-115, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1111/gcbb.12018>
- ROY, P.; DIAS, G.. Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.77, p.59-69, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.136>
- SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DERMIBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MEKHILEF, S.. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n.5, p.2262-2289, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- SANGINÉS, P.; DOMÍNGUEZ, M. P.; SÁNCHEZ, F.; MIGUEL, G. S.. Slow pyrolysis of olive stones in a rotary kiln: Chemical and energy characterization of solid, gas, and condensable products. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v.7, n.4, p.043103, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1063/1.4923442>
- SANTANA, K. V. R.; APOLÔNIO, F. C. S. O.; WISNIEWSKI, A.. Valorization of cattle manure by thermoconversion process in a rotary kiln reactor to produce environmentally friendly products. **BioEnergy Research**, v.13, p.605-617, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1007/s12155-019-10047-0>
- SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F.. Biochar from Acai agroindustry waste: Study of pyrolysis conditions. **Waste Management**, v.96, p.158-167, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.07.022>
- SATO, M. K.; LIMA, H. V.; COSTA, A. N.; RODRIGUES, S.; MOONEY, S.J.; CLARKE, M.; PEDROSO, A. J. S.; MAIA, C. M. B. F.. Biochar as a sustainable alternative to açai waste disposal in Amazon, Brazil. **Process Safety and Environmental Protection**, v.139, p.36-46, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.psep.2020.04.001>
- SCHAFFER, S.; PRÖLL, T.; AFIF, R. A.; PFEIFER, C.. A mass- and energy balance-based process modelling study for the

pyrolysis of cotton stalks with char utilization for sustainable soil enhancement and carbon storage. **Biomass and Bioenergy**, v.120, p.281-290, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.019>

SHAABAN, A.; SE, S-M.; DIMIN, M. F.; JUOI, J. M.; HUSIN, M. H. M.; MITAN, N. M. M.. Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.107, p.31-39, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.01.021>

SHEN, J.; WANG, X.-S.; GARCIA-PEREZ, M.; MOURANT, D.; RHODES, M. J.; LI, C.-Z.. Effects of particle size on the fast pyrolysis of oil mallee woody biomass. **Fuel**, v.88, n.10, p.1810-1817, 2009. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.001>

SHI, X.; RONSSE, F.; NACHENIUS, R.; PIETERS, J. G.. 3D Eulerian-Eulerian modeling of a screw reactor for biomass thermochemical conversion. Part 2: Slow pyrolysis for char production. **Renewable Energy**, v.143, p.1477-1487, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.088>

SINGH, R.; BABU, J. N.; KUMAR, R.; SRIVASTAVA, P.; SINGH, P.; RAGHUBANSHI, A. S.. Multifaceted application of crop residue biochar as a tool for sustainable agriculture: An ecological perspective. **Ecological Engineering**, v.77, p.324-347, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.011>

SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; CARVALHO, A. G.; CÂNDIDO, W. L.. Biomass torrefaction for energy purposes - Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, p.2426-2432, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.095>

SILVA, L. S.; REIS, I. M. S.; SOUSA, M. A.; PIMENTEL, M. L.; REBELLATO, L.; SILVA, S. S.; SILVA, U. S. C.. Disponibilidade de fósforo em sítios de terra preta arqueológica em Oriximiná, Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.1, p.23-30, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0003>

SILVA, R. V. S.; GONÇALVES, A. D.; VINHAL, J. O.; CASSELLA, R. J.; SANTOS, R. C.; SASSO, M. A. D.; PEIXOTO, B. S.; BORBA-SANTOS, L. P.; ROZENTAL, S.; AZEVEDO, D. A.; ROMEIRO, G. A.. Bioproducts from the pyrolysis of castor seed cake: Basic dye adsorption capacity of biochar and antifungal activity of the aqueous phase. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.9, n.1, p.104825, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104825>

SILVESTRE, W. P.; GALAFASSI, P. L.; FERREIRA, S. D.; GODINHO, M.; PAULETTI, G. F.; BALDASSO, C.. Fodder radish seed cake biochar for soil amendment. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, p.25143-25154, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11356-018-2571-4>

SONG, X.-Y.; PAN, G.-X.; BAI, Y.-W.; LIANG, F.; XING, J.-J.; GAO, J.; SHI, F.-N.. Preparation and electrochemical properties of biochar from pyrolysis of pomelo peel via different methods. **Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures**, v.27, n.5, p.453-458, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/1536383X.2019.1597858>

SOUSA, M. A.; REIS, I. M. S.; ALMADA, A. P.; ROSSI, C. Q.; PEREIRA, M. G.; PINTO, L. A. S. R.; SILVA, C. F.; SANTOS, O. A. Q.. Frações da matéria orgânica em agregados em áreas de terra preta arqueológica, Pará, Brasil. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.11, n.7, p.16-23, 2020. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.007.0002>

SPARREVIK, M.; ADAM, C.; MARTINSEN, V.; JUBAEDAH, CORNELISSEN, G.. Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved "retort" kilns. **Biomass and Bioenergy**, v.72, p.65-73, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.11.016>

TEIGISEROVA, D. A.; HAMELIN, L.; THOMSEN, M.. Towards transparent valorization of food surplus, waste and loss: Clarifying definitions, food waste hierarchy, and role in the circular economy. **Science of the Total Environment**, v.706, p.136033, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136033>

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P.. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.55, p.467-481, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>

ULLAH, K.; SHARMA, V. K.; DHINGRA, S.; BRACCIO, G.; AHMAD, M.; SOFIA, S.. Assessing the lignocellulosic biomass resources potential in developing countries: A critical review. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v.51, p.682-698, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.044>

VARMA, A. K.; MONDAL, P.. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. **Industrial Crops & Products**, v.95, p.704-717, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.039>

VELDEN, M. V.; BAEYENS, J.; BREMS, A.; JANSSENS, B.; DEWIL, R.. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. **Renewable Energy**, v.35, n.1, p.232-242, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.renene.2009.04.019>

VIEIRA, L. C.; CANDIANI, G.. Potencial energético de resíduos sólidos urbanos na Região do Grande ABC Paulista. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.12, n.2, p.328-342, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.002.0030>

VILELA, A. O.; LORA, E. S.; QUINTERO, Q.R.; VICINTIN, R. A.; SOUZA, T. P. S. A new technology for the combined production of charcoal and electricity through cogeneration. **Biomass and Bioenergy**, v.69, p.222-240, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.06.019>

VIRMOND, E.; SENA, R. F. D.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C. A.; MOREIRA, R. F. P. M.; JOSÉ, H. J.. Characterisation of agroindustrial solid residues as biofuels and potential application in thermochemical processes. **Waste Management**, v.32, n.10, p.1952-1961, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.05.014>

- WANNAPEERA, J.; WORASUWANNARAK, N.; PIPATMANOMAI, S.. Product yields and characteristics of rice husk, rice straw and corncob during fast pyrolysis in a drop-tube/fixed-bed reactor. **Songklanakarin Journal Science and Technology**, v.30, n.3, p.393-404, 2008.
- WEBER, K.; QUICKER, P.. Properties of biochar. **Fuel**, v.217, p.240-261, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>
- WELFLE, A.. Balancing growing global bioenergy resource demands - Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. **Biomass and Bioenergy**, v.105, p.83-95, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.06.011>
- WU, S.-R.; CHANG, C.-C.; CHANG, Y.-H.; WAN, H.-P.. Comparison of oil-tea shell and Douglas-fir sawdust for the production of bio-oils and chars in a fluidized-bed fast pyrolysis system. **Fuel**, v.175, p.57-63, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.02.008>
- WU, W.; YANG, M.; FENG, Q.; MCGROUTHER, K.; WANG, H.; LU, H.; CHEN, Y. Chemical characterization of rice straw-derived biochar for soil amendment. **Biomass and Bioenergy**, v.47, p.268-276, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.034>
- XIAO, R.; AWASTHI, M. K.; LI, R.; PARK, J.; PENSKY, S. M.; WANG, Q.; WANG, J. J.; ZHANG, Z.. Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: A review. **Bioresource Technology**, v.246, p.203-213, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.090>
- XU, R.; FERRANTE, L.; BRIENS, C.; BERRUTI, F.. Bio-oil production by flash pyrolysis of sugarcane residues and post treatments of the aqueous phase. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v.91, n.1, p.263-272, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.03.001>
- YANG, Q.; HAN, F.; CHEN, Y.; YANG, H.; CHEN, H.. Greenhouse gas emissions of a biomass-based pyrolysis plant in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.53, p.1580-1590, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.049>
- ZHANG, L.; LIU, R.; YIN, R.; MEI, Y.. Upgrading of bio-oil from biomass fast pyrolysis in China: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.24, p.66-72, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.027>
- ZHANG, S.; XIONG, Y.. Washing pretreatment with light bio-oil and its effect on pyrolysis products of bio-oil and biochar. **RSC Advances**, v.6, p.5270-5277, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1039/C5RA22350D>
- ZHANG, Y.; CHEN, P.; LIU, S.; PENG, P.; MIN, M.; CHENG, Y.; ANDERSON, E.; ZHOU, N.; FAN, L.; LIU, C.; CHEN, G.; LIU, Y.; LEI, H.; LI, B.; RUAN, R.. Effects of feedstock characteristics on microwave-assisted pyrolysis - A review. **Bioresource Technology**, v.230, p.143-151, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.01.046>
- ZHANG, Z.; ZHU, Z.; SHEN, B.; LIU, L.. Insights into Biochar and Hydrochar Production and Applications: A Review. **Energy**, v.171, p.581-598, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.035>
- ZHANG, X.; ZHANG, P.; YUAN, X.; LI, Y.; HAN, L.. Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar. **Bioresource Technology**, v.296, p.122318, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122318>
- ZUBENKO, V.; EPIK, A.; ANTONENKO, V.. Development and optimization of fast ablative pyrolysis technology in Ukraine. **Energetika**, v.64, n.1, p.1-10, 2018. DOI: <http://doi.org/10.6001/energetika.v64i1.3723>

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.