



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS
CAMPUS PALMAS
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA AGRONÔMICA**

HÉLLIA CRISTINNE DA MOTA REIS MARTINS

**PRODUÇÃO DE INSUMO AGRÍCOLA (BIOCHAR) A PARTIR DO TRATAMENTO
TÉRMICO DA MISTURA DE CASCA DE ARROZ E CAMA DE GADO**

**PALMAS - TO
2025**

HÉLLIA CRISTINNE DA MOTA REIS MARTINS

**PRODUÇÃO DE INSUMO AGRÍCOLA (BIOCHAR) A PARTIR DO TRATAMENTO
TÉRMICO DA MISTURA DE CASCA DE ARROZ E CAMA DE GADO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do título
de Bacharel no Curso Superior de Engenharia
Agrônômica do Instituto Federal do Tocantins,
Campus Palmas.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

PALMAS - TO

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas do Instituto Federal do Tocantins

M379p Martins, Héliia Cristinne da Mota Reis
Produção de insumo agrícola (biochar) a partir do tratamento
térmico da mistura de casca de arroz e cama de gado / Héliia
Cristinne da Mota Reis Martins. – Palmas, TO, 2025.
50 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins,
Campus Palmas, Palmas, TO, 2025.

Orientador: Dr. Marcelo Mendes Pedroza

1. Casca de arroz. 2. Cama de gado. 3. Biochar. I. Pedroza,
Marcelo Mendes. II. Título.

CDD 630

A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio, deste documento é autorizada para fins
de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica do IFTO com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a).



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS
CAMPUS PALMAS - TO
COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÔNOMICA

HÉLLIA CRISTINNE DA MOTA REIS MARTINS

PRODUÇÃO DE INSUMO AGRÍCOLA (BIOCHAR) A PARTIR DO TRATAMENTO TÉRMICO DE MISTURA DE CASCA DE ARROZ E CAMA DE GADO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior Bacharelado em Engenharia Agrônômica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins - *Campus* Palmas - TO, como exigência à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Aprovado em: 17 de dezembro de 2025

BANCA AVALIADORA

Prof. Dr. Marcelo Mendes Pedroza
IFTO - Campus Palmas - TO.

Profa. Dra. Cheila Cristina Naves Barbiero
IFTO - Campus Palmas - TO.

Profa. Dra. Cláudia da Silva Aguiar Rezende
IFTO - Campus Palmas - TO.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Mendes Pedroza, Servidor**, em 17/12/2025, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cheila Cristina Naves Barbiero, Servidora**, em 17/12/2025, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudia da Silva Aguiar Rezende, Servidora**, em 17/12/2025, às 16:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.iftto.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3011457** e o código CRC **11567510**.



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TOCANTINS

Campus Palmas 310 Sul, Av. LO 5, s/n, esquina com a Avenida NS 10 - Plano Diretor Sul — CEP 77021-090 Palmas/TO - portal.iftto.edu.br — reitoria@iftto.edu.br

AGRADECIMENTOS

Este trabalho representa não apenas o encerramento de um ciclo acadêmico, mas também o reflexo do apoio, do carinho e do incentivo de pessoas muito especiais ao longo dessa jornada.

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora, por iluminarem meu caminho e me fortalecerem nos momentos de maior dificuldade. Se hoje chego à conclusão desta graduação, é pela graça divina que me sustentou em cada etapa.

Aos meus pais, Domingos Martins de Almeida e Valderice da Mota Reis, expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo e por não medirem esforços para que este momento se tornasse possível. À minha irmã, Ana Beatriz, que sempre esteve ao meu lado, acompanhando e motivando cada passo. Aos demais familiares, que mesmo distantes, acreditaram no meu potencial e torceram pela minha vitória, deixo meu sincero agradecimento.

Ao meu namorado, Washington, agradeço pelo amor, carinho, paciência e pela presença constante. Seu apoio e dedicação foram fundamentais; sem você, este trabalho certamente não teria tomado a forma que tomou.

Registro também minha gratidão ao meu orientador, Marcelo Pedroza, cuja experiência, paciência e comprometimento foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo. Suas orientações contribuíram significativamente para a qualidade e a consistência desta pesquisa.

Aos amigos e colegas que compartilharam comigo desafios, aprendizados e conquistas, em especial Manu e Emily, deixo meu muito obrigada pela parceria e apoio ao longo dessa caminhada.

Por fim, a todos que, de alguma maneira, contribuíram com palavras, gestos, ideias ou simplesmente com sua presença, manifesto minha eterna gratidão.

RESUMO

Durante o processo de beneficiamento do arroz, a casca se destaca como o principal resíduo gerado, representando aproximadamente 22% da massa do grão ainda em casca. Paralelamente, a pecuária configura-se como uma das atividades mais relevantes do setor agropecuário e, ao longo do século XX, passou por um processo de intensificação que resultou no aumento expressivo da produção de resíduos orgânicos, sobretudo dejetos bovinos. Diante do elevado volume de resíduos provenientes tanto da rizicultura quanto da bovinocultura, torna-se imprescindível o desenvolvimento de alternativas ambientalmente sustentáveis para seu reaproveitamento. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo utilizar a casca de arroz e a cama de gado, geralmente descartadas de maneira inadequada, para a produção de biochar, um insumo agrícola obtido por meio do processo de pirólise. Para isso, a mistura das duas biomassas foi caracterizada por meio de análises imediatas, contemplando: teor de umidade (0,28%), material volátil (14,29%), cinzas (84,05%) e carbono fixo (1,38%). Em seguida, a degradação térmica dessa mistura foi conduzida em um reator de leito fixo, nas temperaturas de 500 e 600 °C, por um período de 30 minutos e à taxa de aquecimento de 30 °C/min. Após a produção do biochar, procedeu-se à sua caracterização sob os mesmos parâmetros aplicados à biomassa inicial. Os rendimentos de biochar obtidos nas pirólises a 500 °C e 600 °C foram de 57,97% e 55,71%, respectivamente. Considerando a ampla disponibilidade dessas biomassas, sua conversão em biochar apresenta-se como uma estratégia eficiente para reduzir o impacto ambiental decorrente do descarte inadequado, além de agregar valor ao material, promovendo seu uso de forma racional e sustentável.

Palavras-chave: Casca de arroz. Cama de gado. Biochar. Pirólise.

ABSTRACT

During the rice processing, the husk stands out as the main residue generated, representing approximately 22% of the grain mass while still in its husk. In parallel, livestock farming is one of the most relevant activities in the agricultural sector and, throughout the 20th century, underwent a process of intensification that resulted in a significant increase in the production of organic waste, especially bovine manure. Given the high volume of waste from both rice farming and cattle farming, the development of environmentally sustainable alternatives for its reuse becomes essential. In this context, the present study aims to use rice husk and cattle litter, generally discarded improperly, for the production of biochar, an agricultural input obtained through the pyrolysis process. To this end, the mixture of the two biomasses was characterized through proximate analyses, including: moisture content (0.28%), volatile matter (14.29%), ash (84.05%), and fixed carbon (1.38%). Subsequently, the thermal degradation of this mixture was conducted in a fixed-bed reactor at temperatures of 500 and 600 °C for a period of 30 minutes and at a heating rate of 30 °C/min. After biochar production, it was characterized using the same parameters applied to the initial biomass. The biochar yields obtained in the pyrolysis at 500 °C and 600 °C were 57.97% and 55.71%, respectively. Considering the wide availability of these biomasses, their conversion into biochar presents itself as an efficient strategy to reduce the environmental impact resulting from improper disposal, in addition to adding value to the material, promoting its rational and sustainable use.

Keywords: Rice husk. Livestock bedding. Biochar. Pyrolysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diferentes tipos e variantes do processo de pirólise.....	20
Tabela 2 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa	34
Tabela 3 - Rendimento do biochar 500 °C e 600 °C	35
Tabela 4 - Comparativo entre os rendimentos de biochar 500 °C e 600 °C	36
Tabela 5 - Análise do biochar.....	37
Tabela 6 - Comparativo entre trabalhos de biochars	38
Tabela 7 - Elementos químicos determinados em amostra de Blend da casca de arroz e cama de gado in natura e do biochar a 500 °C	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Região de implantação de arroz no Brasil	15
Figura 2 - Morfologia da planta de arroz	16
Figura 3 - Estrutura do grão de arroz	17
Figura 4 - Diagrama de atividades que serão desenvolvidas	23
Figura 5 - Mistura da casca de arroz com cama de gado	24
Figura 6 - Estufa modelo TE - 393.....	25
Figura 7 - Dessecador	26
Figura 8 - Forno mufla	27
Figura 9 - Reator termoelétrico utilizado no processo de pirólise	29
Figura 10 - Autoclave vertical.....	30
Figura 11 - Equipamentos envolvidos no processo de pirólise	31

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Problema de pesquisa	12
1.2 Justificativa	12
1.3 Objetivos	14
1.3.1 <i>Objetivo Geral</i>	14
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Casca de arroz	14
2.1.1 <i>História</i>	14
2.1.2 <i>Aspectos botânicos</i>	15
2.1.3 <i>Beneficiamento do arroz (casca de arroz)</i>	18
2.2 Cama de gado	19
2.3 PROCESSO DE PIRÓLISE	20
2.4 Biochar como condicionador de solo	21
3. ABORDAGEM METODOLÓGICA	23
3.1 COLETA DO MATERIAL	24
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	24
3.2.1 Umidade	25
3.2.2 Teor de cinzas	26
3.2.3 Material Volátil	27
3.2.4 Teor de carbono fixo	28
3.2.5 Determinação de elementos químicos	28
3.3 PIRÓLISE DA BIOMASSA	28
3.3.1 BALANÇO DE MASSA	31
3.4 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR	32
3.4.1 Umidade	32
3.4.2 Material volátil	32
3.4.3 Teor de cinzas	32
3.4.4 Teor de carbono fixo	32
3.4.5 Determinação de elementos químicos	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	33
4.1.1 <i>Análise imediata</i>	33

4.2 RENDIMENTO DO BIOCHAR	35
4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR.....	36
4.4 ELEMENTOS QUÍMICOS CARACTERIZADOS EM AMOSTRA	39
5. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

O arroz é um dos cereais mais consumidos mundialmente. De acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2020), são produzidas anualmente cerca de 499 milhões de toneladas de arroz no mundo. No Brasil, o estado do Rio Grande do Sul (RS) destaca-se como o maior produtor, sendo responsável por aproximadamente 70% da produção nacional nos anos de 2024 e 2025 (CONAB, 2025).

Durante o beneficiamento do arroz, um dos principais resíduos gerados é a casca de arroz (CA), que corresponde a cerca de 22% da massa do grão em casca (Kaniapan et al., 2022). Esse subproduto, apesar de abundante, apresenta características que dificultam seu aproveitamento eficiente, como superfície rígida, baixo valor nutricional, alto teor de silício e alta resistência à decomposição por microrganismos do solo (Zou e Yang, 2019). Como alternativa de descarte, muitos produtores recorrem à queima da casca em áreas abertas, prática que acarreta perdas de carbono e nutrientes essenciais, além da emissão de gases de efeito estufa (Matin; Syafrudin; Suherman, 2023).

Paralelamente, a pecuária também representa uma importante atividade agropecuária, que cresceu significativamente no século XX devido ao aumento populacional e à mudança nos hábitos alimentares da sociedade (Godfray et al., 2018). Essa intensificação resultou em um elevado volume de resíduos orgânicos, principalmente dejetos bovinos, que muitas vezes são armazenados inadequadamente a céu aberto, gerando sérios impactos ambientais (Torres, 2021). Um único bovino, por exemplo, pode gerar em média 28 kg de dejetos por dia (Yil-maz et al., 2019). Esses resíduos, que incluem fezes, urina, água e materiais de cama e ração, compõem o que é conhecido como cama de gado (He et al., 2016).

Apesar dos desafios relacionados ao manejo, o esterco bovino possui fácil disponibilidade, baixo custo e é uma rica fonte de matéria orgânica e nutrientes, especialmente nitrogênio, sendo amplamente utilizado na adubação orgânica (Torres, 2021).

Diante da geração expressiva de resíduos agroindustriais, tanto da rizicultura quanto da bovinocultura, surge a necessidade de alternativas sustentáveis para seu reaproveitamento. Nesse contexto, destaca-se a pirólise, um processo de tratamento térmico realizado na ausência ou limitação de oxigênio, que promove a decomposição

de materiais orgânicos (Wang et al., 2017a). Esse processo permite a conversão de resíduos potencialmente poluentes em um insumo de valor agregado: o biocarvão, ou biochar, o qual pode ser utilizado na agricultura como condicionador de solo, promovendo melhorias sustentáveis na qualidade do solo (Torres, 2021). Entre os benefícios proporcionados pela aplicação de biochar no solo, destacam-se o aumento da fertilidade, a melhoria no desenvolvimento das plantas, o aprimoramento da capacidade de troca catiônica, a maior retenção de água, além do enriquecimento em nutrientes e da elevação do pH do solo (Cantoni et al., 2019).

1.1 Problema de pesquisa

O grande volume de casca de arroz, juntamente com a grande quantidade de cama de gado pode acarretar sérios impactos ambientais, quando a disposição final é realizada de forma inadequada. Diante desse contexto, faz-se necessária a busca por diferentes escolhas para a disposição final ou aproveitamento da grande quantidade de resíduos orgânicos resultantes das atividades agropecuárias, sem impactar o ambiente. Perante o exposto, essa investigação científica tem como objetivo aproveitar a casca de arroz e a cama de gado para a produção de biochar, empregando vapor de água aquecido durante a carbonização do material *in natura*, transformando esse passivo ambiental em material de valor agregado.

1.2 Justificativa

Nos últimos anos, a agricultura em escala global tem lidado com obstáculos significativos decorrentes da elevação nos custos dos fertilizantes químicos. Conflitos geopolíticos, especialmente em áreas responsáveis pela produção de matérias-primas fundamentais, têm gerado instabilidade na cadeia de suprimentos, resultando em aumentos expressivos nos preços desses insumos (Gwenzi et al., 2018).

De acordo com Knijnenburg et al. (2024), observou-se nos últimos anos um crescimento nos custos de alimentos e combustíveis, o que pode desencadear uma crise alimentar. Tal cenário afeta, sobretudo, populações em situação de maior vulnerabilidade, já fragilizadas tanto pelos efeitos das mudanças climáticas quanto pelos conflitos armados. Embora parte do aumento se deva ao conflito na Ucrânia, os preços de alimentos, combustíveis e fertilizantes já haviam atingido níveis elevados no final de 2021. Vale ressaltar que, desde o final de maio de 2020, o custo dos fertilizantes

aumentou aproximadamente 199%. A produção de alimentos é impactada pela crise global de fertilizantes, além das mudanças climáticas e dos conflitos geopolíticos. Sendo a Rússia um dos principais exportadores de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), o conflito com a Ucrânia resultou na diminuição da disponibilidade desses insumos em diversos países, agravando a crise alimentar (Gómez et al. 2023).

Considerando esse cenário, observa-se um aumento na busca por alternativas mais sustentáveis e acessíveis, tanto por agricultores quanto por pesquisadores, para o desenvolvimento e a aplicação de biofertilizantes. Os dejetos orgânicos provenientes das atividades agropecuárias têm se tornado cada vez mais relevantes como matéria-prima para a produção de fertilizantes naturais (Duarte et al., 2020).

Tendo em vista essa realidade, o aproveitamento da casca de arroz e da cama de gado para produção de biochar surge como uma solução inovadora e ambientalmente adequada. A transformação de resíduos orgânicos em biochar (biocarvão) ocorre por meio da pirólise, um processo de decomposição térmica da biomassa realizado em ambiente com ausência ou baixa concentração de oxigênio. Como produto dessa reação, obtém-se um material com elevado teor de carbono, alta estabilidade química e propriedades benéficas à qualidade do solo (Marciniczyk e Oleszczuk, 2022; Sehar et al., 2018).

O uso do biochar como insumo agrícola tem se destacado por proporcionar diversos benefícios ao solo. Entre os principais efeitos positivos estão: a melhoria da capacidade de troca catiônica, o aumento do pH do solo, a melhoria na retenção hídrica e a maior eficiência na adsorção de nutrientes. Pesquisas desenvolvidas na última década indicam que essas características do biocarvão contribuíram para um crescimento de até 50% na produtividade agrícola, além de promoverem um aumento de 30% no desenvolvimento radicular e de 45% na formação de brotos. Também foram observadas melhorias na absorção de nutrientes, na capacidade do solo de reter água e contaminantes, bem como uma redução aproximada de 20% na demanda por fertilizantes químicos (Simbolon et al., 2023).

Diante disso, destaca-se que a grande importância dessa investigação científica está associada aos aspectos de ordem ambiental, com a disposição final sustentável da casca de arroz e da cama de gado, como também ao aspecto econômico, com a questão da geração de um novo material, o biochar enriquecido de nutrientes, representando como alternativa à substituição dos fertilizantes convencionais no

mercado agrícola. Somado a isso, vale aqui destacar que o biocarvão vem se destacando na comercialização de créditos de carbono como modelo de negócio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Transformar a casca de arroz e a cama de gado, através do tratamento térmico, em insumo agrícola (biochar) enriquecido de nutrientes.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar a casca de arroz e a cama de gado in natura;
- Efetuar a pirólise da mistura da casca de arroz com a cama de gado em reator de leito fixo para a produção de biochar;
- Efetuar a caracterização química do biochar obtido no processo;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Casca de arroz

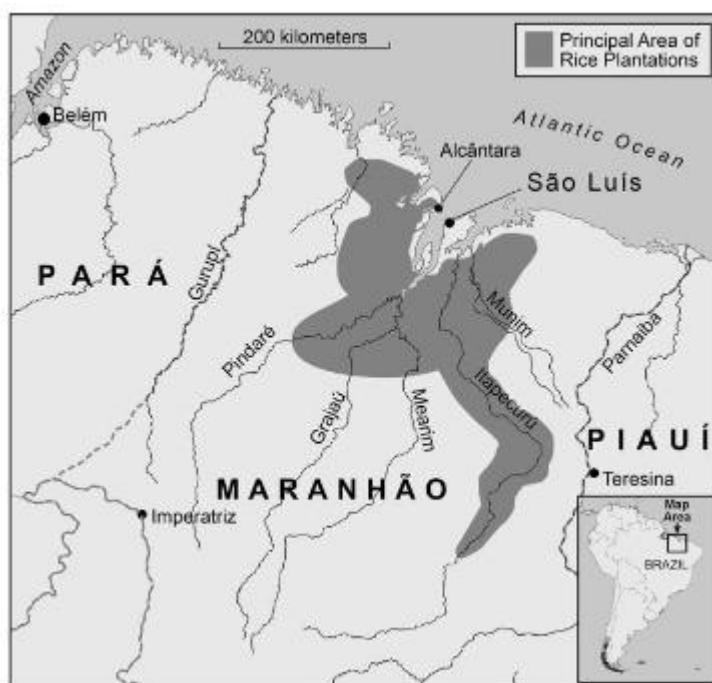
2.1.1 História

A trajetória do arroz exerce um papel importante na evolução das sociedades, nas práticas agrícolas, nas trocas comerciais de alimentos e na construção de hábitos e padrões alimentares. Sua disseminação pelo planeta ocorreu em grande parte através da diáspora africana (Castro et al., 2021).

Ao chegar às Américas, o saber agrícola dos povos escravizados passou a influenciar os modos de cultivo, inclusive de outras culturas. O arroz, que inicialmente servia de alimento para quem estava a bordo dos navios negreiros, acabou sendo incorporado ao comércio europeu. No começo, seu consumo era mais comum entre países de tradição católica, geralmente acompanhado de peixe ou utilizado em refeições sem carne às sextas-feiras e durante a quaresma. Posteriormente, seu uso se expandiu por toda a Europa, tornando-se não apenas um item alimentar, mas também uma matéria-prima importante para a fabricação de cerveja e papel (Carney, 2017).

Também no Brasil surgiram plantações de arroz ao longo do século XVIII. Por volta da metade desse período, Portugal buscou reduzir sua dependência das importações vindas da Carolina do Sul. Durante o governo de Pombal, iniciou-se a implantação de lavouras de arroz no Maranhão, no Pará e no Amapá com destaque especial para o Maranhão (Figura 1). Essa área amazônica, além de estar geograficamente mais próxima de Portugal do que a colônia inglesa da Carolina, possuía solos úmidos que favoreciam o cultivo do cereal.

Figura 1 – Região de implantação do arroz no Brasil

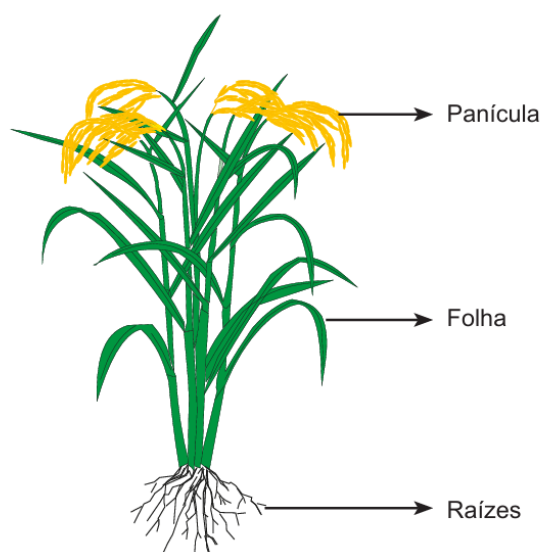


Fonte: Carney (2017).

2.1.2 Aspectos botânicos

A espécie *Oryza sativa* pertence ao grupo das monocotiledôneas da família Poaceae. Trata-se de uma planta de ciclo anual, classificada como C3, naturalmente adaptada a ambientes alagados, embora também apresente bom desenvolvimento em áreas drenadas ou de terras altas (Castro et al., 2021). A planta é composta por raízes, colmos, folhas e panículas (Figura 2).

Figura 2 - Morfologia da planta de arroz



Fonte: Sebastião José de Araújo (2021).

O sistema radicular do arroz é composto principalmente por raízes adventícias, de natureza fibrosa e bastante ramificadas, além dos pelos radiculares. A partir dessas raízes desenvolvem-se várias hastes constituídas por uma sequência de nós e entrenós, sendo que cada nó sustenta uma folha e uma gema. O número de perfilhos produzidos pelos colmos cilíndricos tende a ser maior em solos mais férteis e quando há maior espaçamento entre as plantas (Castro et al., 2021).

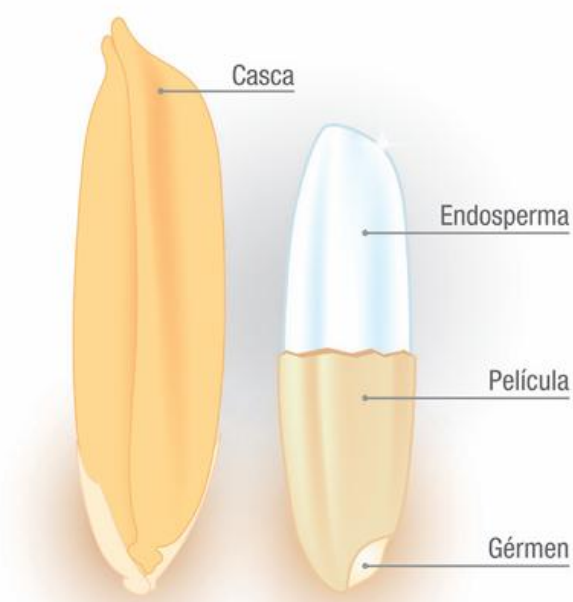
As folhas do arroz aparecem de forma alternada ao longo do colmo, desenvolvendo-se a partir de gemas localizadas nos nós. A parte da folha que recobre o colmo é chamada de bainha. Do colmo principal podem surgir entre oito e quatorze folhas, dependendo do ciclo da cultivar. A última folha que se forma em cada colmo é conhecida como folha-bandeira. Os genótipos apresentam variações quanto ao comprimento, largura, ângulo de inserção, presença de pelos e coloração das folhas, características importantes para a identificação varietal (Castro et al., 2021).

A inflorescência do arroz, conhecida como panícula, situa-se acima do último entrenó do colmo, formando um ângulo com a folha-bandeira. A panícula é constituída por um ráquis central que apresenta nós, dos quais partem ramificações primárias. Essas, por sua vez, originam ramificações secundárias onde se desenvolvem as espiguetas. Cada espiguetas é formada por dois pares de brácteas, ou glumas. As glumas superiores são chamadas de pálea e lema, e em seu interior encontra-se a flor propriamente dita, composta por um pistilo e seis estames (Castro et al., 2021).

O desenvolvimento do arroz é composto por três etapas fundamentais: a fase vegetativa, a reprodutiva e a de maturação. A duração de cada uma delas varia conforme a cultivar utilizada, o período de semeadura, a região onde é cultivado e as condições de fertilidade do solo, situando-se geralmente entre 90 e 140 dias para a maior parte das variedades (Castro et al., 2021).

O grão de arroz é formado por diversos tecidos que diferem em composição, estrutura e função (Juliano; Tũaño, 2019), cada qual desempenhando um papel particular. De modo geral, o grão é constituído pela casca, por uma camada de proteção que envolve a semente, além do endosperma e do gérmen (Figura 3).

Figura 3 - Estrutura do grão de arroz



Fonte: Adaptado pelos autores de Vieira e Rabelo (2006); Juliano e Tũaño (2019).

A casca do arroz, composta por duas folhas modificadas a lema e a pálea, que representa cerca de 20% do peso do grão. Ela protege a cariopse, funcionando como barreira contra a infestação por insetos durante o armazenamento e também contra a ação de fungos (Juliano; Tũaño, 2019).

A camada protetora ou película do arroz é constituída por várias camadas: tegumento, pericarpo e aleurona, que corresponde a aproximadamente 5% a 8% da massa do arroz integral. O tegumento deriva das camadas celulares dos integumentos ovulares, enquanto o pericarpo se origina da parede do ovário (Silva; Corrêa, 2008).

O endosperma é composto pela camada de aleurona e pelo endosperma amiláceo, onde estão armazenadas as substâncias de reserva essenciais para a germinação da semente. Os carboidratos constituem a principal fração do arroz, e o endosperma representa a maior parte do grão integral, correspondendo a 85% a 90% de sua massa (Juliano; Tuaño, 2019).

O embrião do arroz, cujo nome deriva do latim germen, que significa “broto”, é uma estrutura pequena situada na base do grão. Ele é responsável pelo processo de germinação, apresenta elevado teor de lipídios e proteínas, e corresponde a cerca de 3% da massa do grão integral (Walter et al., 2008).

2.1.3 Beneficiamento do arroz (casca de arroz)

A casca de arroz, subproduto gerado durante o processo de descascamento do grão, foi por muitos anos descartada em aterros ou diretamente no ambiente, ocasionando diversos impactos ambientais negativos. Com o aumento das exigências relacionadas à sustentabilidade e o crescimento dos custos energéticos, várias indústrias do setor arrozeiro passaram a utilizá-la como fonte alternativa de energia (Carvalho; Bassinello, 2006).

De acordo com informações disponibilizadas pela Reserva Nobre (2025), esse resíduo agrícola possui características estruturais que favorecem seu uso em diferentes segmentos produtivos, especialmente por ser rica em lignocelulose e sílica.

Na indústria contemporânea de beneficiamento do arroz, a casca tem sido amplamente empregada como fonte energética para a secagem dos grãos e para a geração de eletricidade (Coltro et al., 2017 ; Lucca et al., 2017), esse aproveitamento demanda baixa infraestrutura logística e contribui para a redução do consumo de energia elétrica. Esse subproduto da rizicultura também vem sendo utilizado como matéria-prima para a produção de bio-óleo por meio da pirólise rápida (Zhang et al., 2018a). O estudo conduzido por Bharath et al. (2018) demonstra que a casca de arroz pode ser incorporada ao processo de combustão do carvão, resultando em melhorias em diversas métricas de desempenho, como a conversão total de carbono.

A casca de arroz não é aplicada apenas na geração de energia, mas também na produção de diversos materiais. Resíduos desse subproduto, associados a componentes de cortiça expandida e fragmentos de borracha de pneus, foram utilizados na elaboração de painéis compostos que apresentam desempenho térmico e

acústico superior, voltados para o setor da construção civil (António et al., 2018). O estudo conduzido por Padhi et al. (2018) indica que a incorporação de 10 a 15% de cinzas de casca de arroz em misturas de concreto é uma alternativa viável e recomendada para aplicações práticas em diferentes ramos da construção.

Constata-se que a casca de arroz configura uma biomassa altamente promissora, uma vez que apresenta propriedades favoráveis aos processos de conversão energética.

2.2 Cama de gado

O rebanho bovino brasileiro alcançou um total 238,1 milhões de animais em 2024 (IBGE, 2025), conjuntamente a isso, o Brasil ocupa a terceira posição entre os maiores produtores de leite do mundo, alcançando uma produção anual superior a 34 bilhões de litros (IBGE, 2023).

Nos sistemas intensivos de produção leiteira, a expressiva quantidade de resíduos gerados pelos animais, como fezes e urina, representa um importante desafio para os produtores. A emissão desses dejetos corresponde a cerca de 10% do peso vivo do animal, podendo variar, em média, entre 30 e 48 kg por vaca ao dia (Konzen; Alvarenga, 2021). Considerando um rebanho de 238,1 milhões de cabeças, que gera aproximadamente 39 kg de dejetos/dia/animal, é possível concluir que são descartadas, diariamente, mais de 9 bilhões de toneladas de excrementos em solo brasileiro.

Esse material vem sendo amplamente empregado como adubo em função de sua elevada concentração de matéria orgânica e nutrientes. Contudo, pode apresentar metais pesados e microrganismos patogênicos em sua composição. Dessa forma, o uso indiscriminado de esterco animal pode promover o acúmulo de metais pesados no solo, favorecer a eutrofização de corpos d'água superficiais e possibilitar a disseminação de patógenos para fontes hídricas e alimentos (Kumar; Park; Cho, 2013).

As tecnologias voltadas à conversão de resíduos em energia a partir da cama de gado, especialmente os processos termoquímicos com destaque para a pirólise, têm se mostrado alternativas promissoras e ambientalmente sustentáveis, ao possibilitarem a geração de combustíveis e outros produtos de alto valor agregado (Atienza-Martínez et al. 2020). Além disso, tais métodos contribuem para reduzir significativamente o volume de resíduos e eliminar agentes patogênicos (Atienza-Martínez et al. 2020). Contudo, alguns desafios persistem, como a necessidade de pré-tratamentos para

remoção de impurezas e as dificuldades operacionais associadas aos elevados teores de enxofre e de cinzas presentes no material (Ro, Cantrell & Hunt, 2010).

2.3 PROCESSO DE PIRÓLISE

A pirólise, termo de origem grega que significa ‘decomposição pelo calor’, corresponde ao processo de degradação térmica de materiais orgânicos. Nessa operação, a biomassa é submetida a temperaturas elevadas, geralmente entre 500 e 900 °C, em ambiente fechado e desprovido de oxigênio. A conversão pirolítica gera produtos nas fases sólida, líquida e gasosa, os quais podem ser destinados à produção de combustíveis, carvão ativado, carvão vegetal, biocarvão, entre outros materiais de interesse tecnológico (Silvério; Barbosa; Pilô-Veloso, 2008; Velmurugan, 2021).

A pirólise pode ser realizada em dois tipos: lenta e rápida, sendo ambas diferenciadas pelo tempo de residência e pela taxa de aquecimento aplicada ao material (Oni; Oziegbe; Olawole, 2019). A pirólise lenta tende a produzir maiores volumes de gás de síntese, enquanto a pirólise rápida resulta principalmente na formação de óleos e líquidos (Oni; Oziegbe; Olawole, 2019). O rendimento de biochar também varia conforme o processo: a pirólise lenta gera aproximadamente 36% de biochar, enquanto a pirólise rápida produz cerca de 17%, e a gaseificação, em torno de 12% (Uchimiya et al., 2011). As diferentes variantes do processo de pirólise, bem como suas condições operacionais e os principais produtos obtidos, encontram-se sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Diferentes tipos e variantes do processo de pirólise.

Variantes do processo	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura do processo (°C)	Produtos obtidos
Carbonização	Horas ou dia	muito baixa	400 à 450	Carvão vegetal
Convencional	5 à 30 min	baixa	até 600	Bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 à 5 s	média	500 à 550	Bio-óleo
Flash-líquido	menor que 1 s	alta	menor que 650	Bio-óleo
Flash-gás	menor que 1 s	alta	maior que 650	Gás combustível
Ultra-rápida	menor que 0,5 s	muito alta	1000	Produtos químicos e gás combustível
Vácuo	2 à 30 s	média	400	Bio-óleo
Metano-pirólise	menor que 10 s	alta	maior que 700	Produtos químicos
Hidro-pirólise	menor que 10 s	alta	maior que 500	Bio-óleo e produtos químicos

Fonte: Autor (2025), adaptado de Gómez (2002 *apud* Bridgwater, 1991).

A pirólise rápida, caracterizada por tempos de residência inferiores a 2 segundos, é comumente empregada para a obtenção de bio-óleo, alcançando cerca de 75% de rendimento. Por outro lado, as modalidades lentas ou intermediária, que mantêm a biomassa no reator por alguns minutos a várias horas, tendem a maximizar a geração de biochar, com produções variando entre 25% e 35% (Mohan et al., 2006). Já na gaseificação, a biomassa é submetida a temperaturas elevadas, acima de 700 °C, resultando na formação de uma mistura gasosa rica em monóxido de carbono e hidrogênio, conhecida como gás sintético ou syngas (Mohan et al., 2006; Ahmad et al., 2014).

Dessa forma, a definição das condições operacionais da pirólise depende diretamente do tipo de produto desejado ao final do processo. A pirólise lenta, que opera em temperaturas mais baixas (inferiores a 550 °C), com aquecimento gradual e longos tempos de residência, favorece a formação de biochar em maiores proporções (Joseph et al., 2010; Keiluweit et al., 2010; Gai et al., 2014). Em contraste, a pirólise rápida, conduzida sob altas taxas de aquecimento (acima de 550 °C) e curtos períodos de residência (Keiluweit et al., 2010; Downie et al., 2011), resulta predominantemente na produção de vapores (Lehmann; Joseph, 2009) e de combustíveis líquidos, que podem substituir óleos combustíveis utilizados em processos de aquecimento e geração energética (Wang et al., 2017).

2.4 Biochar como condicionador de solo

A qualidade do solo expressa sua capacidade de oferecer condições adequadas para a sustentação da vida vegetal e animal, assumindo papel essencial nos processos de nutrição, produção e no desenvolvimento dos ecossistemas terrestres (Doran et al., 1997).

Devido à necessidade de considerar um conjunto amplo de variáveis, a qualidade do solo não pode ser quantificada de forma direta; contudo, pode ser inferida por meio de indicadores específicos de qualidade do solo (Karlen; Stott, 1994; Karlen et al., 1997; Andrews et al., 2004). Do ponto de vista agronômico, indicadores adequados de qualidade do solo devem abranger seus atributos biológicos, físicos e químicos, assegurando condições favoráveis à interação solo-planta (Dionísio et al., 2016).

O biochar destaca-se como um insumo alternativo capaz de aprimorar a qualidade do solo. Trata-se de um material sólido e carbonáceo que contribui para elevar a fertilidade do solo, melhorar sua capacidade de retenção de água, adsorver moléculas de agrotóxicos e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (Ren et al., 2016).

Dentre os benefícios associados à aplicação de biochar, destacam-se o aumento da fertilidade do solo, a melhoria no estabelecimento das plantas, o incremento da capacidade de troca catiônica, a maior retenção de água, o acréscimo no teor de nutrientes e a elevação do pH do solo (Cantoni et al., 2019). O biochar também é capaz de modificar propriedades físicas do solo, como a densidade aparente, a porosidade, a capacidade de retenção de água e a condutividade hidráulica, em razão de sua elevada área superficial específica e de sua estrutura altamente porosa (Castellini et al., 2015).

Singh et al. (2018) demonstraram que a aplicação de biochar produzido a partir da casca de arroz em solo agrícola tropical, no cultivo de arroz em condições de sequeiro, resultou em uma maior disponibilidade de nutrientes para as plantas, em uma melhora na comunidade microbiana do solo e em aumento da produtividade das plantas. De forma semelhante, Munda et al. (2018), estudando a mesma cultura com o mesmo tipo de biochar, encontraram um enriquecimento do carbono orgânico total no solo entre 43 % e 169 %, além de um incremento de até 24 % no rendimento de grãos.

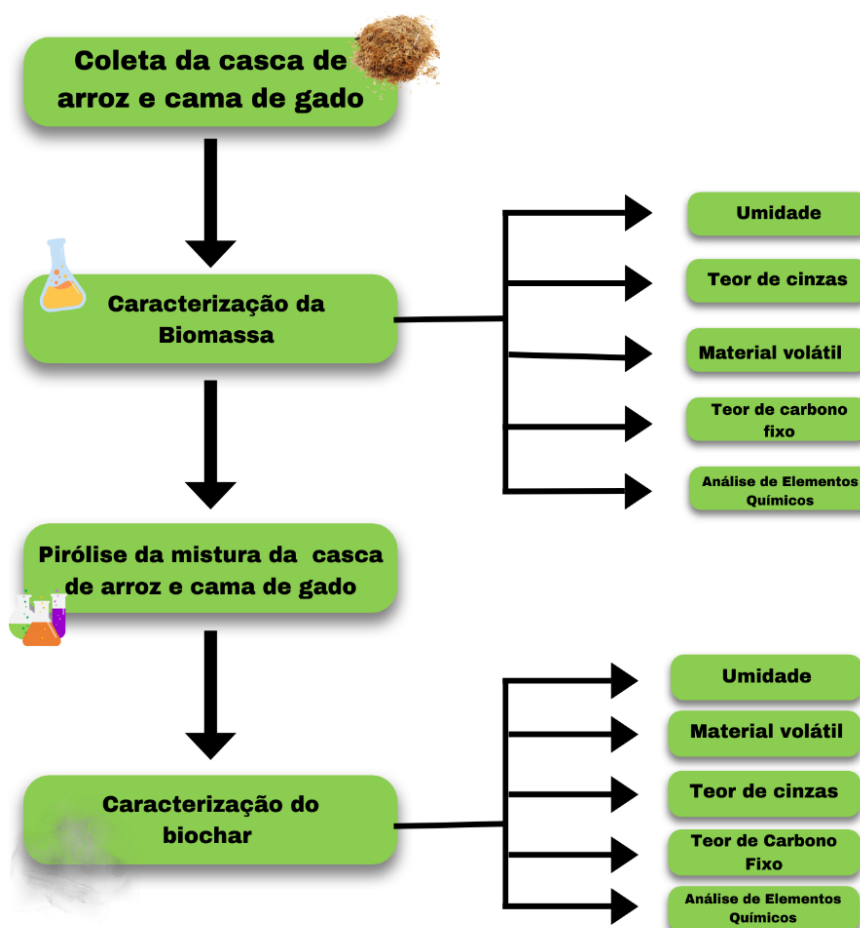
Ahmadi, Ghasemi e Sepasklah (2020) analisaram os efeitos do biochar derivado da casca de arroz em condições controladas de escoamento superficial e erosão do solo, utilizando séries sucessivas de chuvas simuladas. Os pesquisadores verificaram que a aplicação de 2 kg m^{-2} do material resultou em uma redução significativa do escoamento, na ordem de 16%, além de diminuir as perdas de solo em 45%, quando comparado ao tratamento sem biochar. Além disso, Lu, Sun e Zong (2014) identificaram que a incorporação do mesmo tipo de biochar promoveu expressivas melhorias na qualidade física do solo, evidenciadas pelo aumento da estabilidade dos agregados, pela ampliação da porosidade e pelo aprimoramento da capacidade de retenção de água.

Esses resultados reforçam o potencial do biochar produzido a partir da casca de arroz como um eficiente condicionador de solo, visto que sua aplicação contribui para a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do ambiente edáfico.

3. ABORDAGEM METODOLÓGICA

O presente estudo foi desenvolvido nas dependências do LARSEN (Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética) do Instituto Federal do Tocantins (IFTO), Campus Palmas. A metodologia utilizada nesta pesquisa foi baseada no diagrama esquemático da Figura 4, sendo destacadas as seguintes atividades experimentais: (a) coleta e caracterização de biomassa, (b) realização de ensaios de pirólise da mistura da casca de arroz com a cama de gado e (c) determinação da qualidade do biochar obtido.

Figura 4 - Diagrama de atividades que serão desenvolvidas



3.1 COLETA DO MATERIAL

A casca de arroz e a cama de gado (Figura 5) que foram utilizadas no estudo foram doadas pelo laboratório LARSEN (Laboratório de Inovação em Aproveitamento de Resíduos e Sustentabilidade Energética) do IFTO – Palmas. O material passou por secagem em estufa, a uma temperatura de 60 °C, conforme ilustrado na Figura 5, sendo em seguida transferido para os ensaios de pirólise.

Figura 5 - Mistura da casca de arroz com cama de gado



Fonte: Próprio autor (2025).

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Para caracterizar a biomassa estudada composta pela mistura de casca de arroz e cama de gado na proporção de 1:1 (kg/kg), foram realizados diversos ensaios com o objetivo de conhecer suas características, como teor de umidade, material volátil, teor de cinzas, análise térmica e teor de carbono fixo. Inicialmente, a cama de gado passou por um processo de secagem em estufa a 60 °C, visando remover qualquer excesso de umidade presente na biomassa.

3.2.1 Umidade

A determinação do teor de umidade do material seguiu os procedimentos estabelecidos pela Norma ASTM D3173-87. Para isso, cerca de 1 grama da amostra foi acondicionada em um cadinho de porcelana, anotando-se previamente o peso inicial. Em seguida, o cadinho foi levado à estufa modelo TE - 393 (Figura 6), onde permaneceu por 1 hora sob temperatura controlada de 105 °C.

Figura 6 - Estufa modelo TE - 393



Fonte: Próprio autor (2024).

Após esse processo, o material foi retirado da estufa e colocado em um dessecador (Figura 7), onde permaneceu por 15 minutos. Decorrido esse período, a amostra foi novamente pesada. Com os valores obtidos, aplicou-se a Equação 1 para determinar o teor de umidade.

$$Umidade (\%) = \frac{(A-B)}{(C)} * 100$$

(Equação.1)

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra inicial;

B = peso do cadinho vazio + peso amostra pós-aquecimento na estufa;

C = peso da amostra inicial.

} (g)

Figura 7 - Dessecador



Fonte: Autor (2025).

3.2.2 Teor de cinzas

Seguindo as recomendações da Norma ASTM D3174-04 para a determinação do teor de cinzas da biomassa, uma amostra de 1 grama foi utilizada. Ela foi acondicionada em um cadinho de porcelana de massa previamente conhecida e, posteriormente, introduzida em um forno mufla (Figura 8), onde permaneceu por 1 hora a uma temperatura de 710 °C.

Figura 8 - Forno mufla



Fonte: Autor (2025).

Em seguida, o recipiente foi retirado do forno e transferido para um dessecador, onde permaneceu por 50 minutos para resfriamento. Após esse intervalo, procedeu-se à pesagem. O teor de cinzas foi calculado por meio da Equação 2:

$$\text{Teor de cinzas (\%)} = \frac{(A-B)}{(C)} * 100 \quad (\text{Equação.2})$$

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra inicial;	} (g)
B = peso do cadinho vazio + peso amostra pós-aquecimento em forno mufla;	
C = peso da amostra inicial.	

3.2.3 Material Volátil

A quantificação do material volátil presente na biomassa composta pela mistura de casca de arroz e cama de gado foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na Norma ASTM D3175-07. Para isso, a amostra foi submetida a aquecimento em forno mufla, à temperatura de 850 °C, por 7 minutos, em ambiente

isento de oxigênio. Ao final do processo, o teor de voláteis foi obtido mediante aplicação da Equação 3.

$$\text{Material Volátil (\%)} = \left(\frac{A-B}{C} \right) * 100 \quad (\text{Equação.3})$$

Onde:

A = peso do cadinho vazio + peso da amostra inicial;

B = peso do cadinho vazio + peso amostra pós aquecimento na estufa;

C = peso da amostra inicial.

} (g)

3.2.4 Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo presente na biomassa analisada foi determinado por diferença, conforme descrito na Equação 4:

$$\text{Teor de Carbono Fixo (\%)} = 100 - [\text{Umidade(\%)} + \text{Teor de cinzas(\%)} + \text{Material volátil(\%)}] \quad (\text{Equação.4})$$

3.2.5 Determinação de elementos químicos

A determinação dos elementos químicos foi realizada por meio de análise semiquantitativa por fluorescência de raios X (FRX). Para essa finalidade, utilizou-se um espectrômetro de fluorescência de raios X da marca PANalytical, modelo Epsilon 1, equipado com tubo de cobre (Cu K α), operando a uma corrente de 1,6 A.

3.3 PIRÓLISE DA BIOMASSA

Foram conduzidos dois processos de pirólise em temperaturas distintas, de 500 e 600 °C. Cada ensaio teve duração de 30 minutos, utilizando-se uma taxa de aquecimento de 30 °C por minuto.

O material destinado à pirólise foi previamente seco em estufa a 50 °C, colocado em uma barca metálica e, posteriormente, pesado em balança analítica. O mesmo processo de pesagem foi repetido com a barca vazia, permitindo determinar a massa

real do resíduo a ser pirolisado e calcular o rendimento final. Após essa etapa, o recipiente contendo a amostra foi acomodado no reator termoeletrico (Figura 9), sendo cuidadosamente centralizado para assegurar a estabilidade durante todo o procedimento.

Figura 9 - Reator termoeletrico utilizado no processo de pirólise



Fonte: Próprio autor (2025).

Antes do início da decomposição térmica, foi indispensável configurar o reator termoeletrico de acordo com os parâmetros necessários à pirólise, incluindo a temperatura de operação, a velocidade de aquecimento do material e o período em que a biomassa permaneceria no equipamento. Também foi ajustada a potência da autoclave vertical (Figura 10), responsável pela geração do vapor d'água empregado como gás de arraste durante o processo.

Figura 10 - Autoclave vertical



Fonte: Próprio autor (2025).

A Figura 11 mostra todos os aparelhos e equipamentos que foram utilizados no sistema de pirólise.

Figura 11 - Equipamentos envolvidos no processo de pirólise



Fonte: Próprio autor (2025).

3.3.1 BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa foi realizado com base no princípio da Conservação da Massa, formulado e consolidado por Antoine Lavoisier. Para isso, determinou-se a massa da biomassa inserida no reator e, posteriormente, a massa de biochar produzida ao final do processo. Com esses valores, efetuou-se o cálculo do balanço de massa conforme apresentado na Equação 5, bem como do rendimento, conforme indicado na Equação 6.

$$M_b = M_e - M_s \quad \text{(Equação. 5)}$$

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{M_b}{M_e} * 100 \quad \text{(Equação. 6)}$$

Onde:

Mb = massa do biochar;	}	(g)
Me = massa de entrada;		
Ms = massa de saída.		

3.4 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR

A caracterização do biochar gerado após o processo de pirólise seguiu procedimentos semelhantes aos aplicados à biomassa inicial, conforme os métodos descritos nas seções seguintes.

3.4.1 Umidade

O teor de umidade foi obtido conforme o procedimento descrito no item 3.2.1, atendendo às orientações estabelecidas pela norma ASTM D3173-87.

3.4.2 Material volátil

O teor de materiais voláteis foi determinado conforme o procedimento apresentado no item 3.2.3, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma ASTM D3175-07.

3.4.3 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado conforme o procedimento descrito no item 3.2.2, seguindo as recomendações da norma ASTM D3174-04.

3.4.4 Teor de carbono fixo

Conforme apresentado no item 3.2.4, a determinação do teor de carbono foi realizada seguindo a metodologia previamente descrita.

3.4.5 Determinação de elementos químicos

Conforme apresentado no item 3.2.5, a determinação dos elementos químicos foi realizada seguindo a metodologia previamente descrita.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

Para a caracterização da biomassa, foi conduzida a análise imediata, que compreende a determinação do teor de umidade, do material volátil, do teor de cinzas e do carbono fixo.

4.1.1 *Análise imediata*

À medida que o teor de umidade aumenta, maior será a quantidade de água a ser condensada, o que eleva a fração aquosa e reduz a eficiência energética do processo. Isso ocorre devido ao elevado calor específico da água, que exige mais energia para ser aquecida e evaporada (Fonseca et al., 2019).

Para que a biomassa apresente bom desempenho na combustão, recomenda-se que o teor de umidade seja inferior a 10%. Níveis muito altos de umidade, especialmente acima de 43%, tornam-se inadequados para utilização em caldeiras, pois reduzem o poder calorífico do material. Quanto maior a quantidade de água a ser evaporada, maior é a demanda de energia durante o processo, o que diminui a eficiência energética do combustível (Garcia et al., 2012).

Conforme observado por Shie et al., (2003), o teor de umidade exerce influência significativa no consumo de energia necessário para a secagem da biomassa. Dessa forma, a combinação de casca de arroz com cama de gado, que apresentou um teor de umidade de apenas 4,73% (Tabela 2), mostra-se uma biomassa adequada tanto para combustão quanto para aplicações em processos termoquímicos, como a pirólise.

Um teor reduzido de cinzas é preferível, já que valores elevados podem favorecer a formação de clínqueres e escórias, comprometendo o desempenho e a estabilidade do processo de pirólise (Ferreira et al., 2016). Nesse contexto, o teor de cinzas de 34,01% (Tabela 2) determinado para a mistura de casca de arroz com cama de gado é considerado elevado, o que limita sua eficiência energética e torna a biomassa menos adequada para processos termoquímicos com fins energéticos.

Entretanto, sob a perspectiva agrônômica, elevados teores de cinzas podem ser considerados vantajosos, uma vez que indicam maior concentração de minerais

inorgânicos, como cálcio, potássio, magnésio e fósforo, essenciais para a fertilidade do solo (Lehmann & Joseph, 2015; Novotny et al., 2015). Quando essa biomassa é convertida em biochar, esses minerais tendem a se concentrar na fração sólida, contribuindo para o aumento do pH do solo, da capacidade de troca catiônica e da disponibilidade de nutrientes para as plantas (Glaser et al., 2002; Agegnehu et al., 2017).

Dessa forma, embora o elevado teor de cinzas represente uma desvantagem para o uso energético da biomassa, ele pode ser considerado um atributo positivo quando o objetivo é a aplicação do material, especialmente do biochar, como condicionador de solo, reforçando seu potencial para uso agrícola e ambiental.

Segundo Chaves et al. (2013), valores elevados de carbono fixo estão diretamente associados a um maior potencial energético da biomassa. No entanto, o teor de carbono fixo obtido para a mistura de casca de arroz com cama de gado foi de apenas 9,83% (Tabela 2), o que indica um desempenho energético insatisfatório.

Conforme destacado por Vieira (2012), biomassa com elevado teor de materiais voláteis apresenta maior facilidade de ignição e combustão, já que quanto maior essa fração, mais rapidamente o carvão tende a queimar. No caso da mistura de casca de arroz com cama de gado, o teor volátil identificado foi de 51,43%.

Tabela 2 - Comparativo entre trabalhos de análise imediata da biomassa

Variável analítica	Biomassa desta pesquisa	Outros autores	
		Windeatt et al. (2014)^(a)	Vieira (2018)^(b)
Umidade (%)	4,73	5,70	8,50
Material volátil (%)	51,43	77,20	63,78
Teor de cinzas (%)	34,01	0,60	14,73
Carbono fixo (%)	9,83	22,80	12,99

^(a)Biomassa a partir da casca de coco;

^(b)Biomassa a partir da casca de arroz *in natura*.

Fonte: Próprio autor (2025).

4.2 RENDIMENTO DO BIOCHAR

Após a realização dos processos de pirólise, a massa do biochar obtida foi calculada pela diferença entre os pesos inicial e final do material, possibilitando a avaliação do rendimento, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Rendimento do biochar 500 °C e 600 °C

Massa (g)	Biochar (500 °C)	Biochar (600 °C)
Peso da biomassa	95,54	67,60
Peso do biochar	55,39	37,66
Rendimento (%)	57,97	55,71

Fonte: Próprio autor (2025).

Observa-se que a pirólise conduzida a 500 °C resultou na obtenção de 55,39 gramas de biochar, a partir de uma massa inicial de 95,54 gramas, o que corresponde a um rendimento de 57,97%. Já o processo realizado a 600 °C gerou 37,66 gramas de biochar, utilizando 67,60 gramas de biomassa de entrada, alcançando um rendimento de 55,71%.

Fundamentado na produção de biochar em temperatura de menor rendimento, que foi de 55,71% (na pirólise de 600°C), podemos considerar que se tratando de uma tonelada de biomassa, se obtém em torno de 557 kg de biochar. Levando em consideração os valores comerciais por massa do biochar, esse rendimento possibilitaria um ganho de R\$13.925,00, custando R\$ 25,00 por quilograma de biochar.

Os resultados encontrados são semelhantes aos relatados por (Windeatt et al., 2014), que realizaram pirólises de casca de coco em diferentes condições e obtiveram um rendimento médio de 50,35%. No presente estudo, a mistura de casca de arroz com cama de gado apresentou um aproveitamento médio de 56,84%, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo entre os rendimentos de biochar 500 °C e 600 °C

	Rendimento do biochar (%)	Outros autores	
		Windeatt <i>et al.</i> (2014) ^(a)	Vieira (2018) ^(b)
Rendimento médio entre as pirólises de 500 e 600 °C (%)	56,84	50,35	28,20

Fonte: Próprio autor (2025).

Como alternativa para aprimorar as propriedades físico-químicas da biomassa, a pirólise se mostra uma técnica eficiente. Nesse processo, forma-se principalmente um sólido conhecido como biochar (biomassa devolatilizada), que apresenta maior uniformidade, menor teor de umidade e um conteúdo energético superior ao da biomassa original (Liu et al., 2016).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DO BIOCHAR

Assim como feito na caracterização da biomassa, os biochars obtidos nas temperaturas de 500 °C e 600 °C passaram por análises imediatas, contemplando a verificação do teor de umidade, do teor de cinzas, do material volátil e do carbono fixo. Esses indicadores são fundamentais para determinar a qualidade do biochar e seu potencial de uso em diferentes aplicações.

Com os testes concluídos, foi possível obter os valores característicos do biochar produzido, conforme apresentados na Tabela 5 e de acordo com a metodologia adotada. Esses resultados permitiram comparar o desempenho com dados da literatura e avaliar a eficiência da pirólise na conversão da biomassa em biochar.

Tabela 5 - Análise do biochar

Variável analítica	Biochar 1 (500 °C)	Biochar 2 (600 °C)
Umidade (%)	1,18	0,31
Material volátil (%)	26,73	16,15
Cinzas (%)	45,77	61,99
Carbono fixo (%)	26,32	21,55

Fonte: Próprio autor (2025).

Verificou-se que o aumento da temperatura durante a pirólise levou à obtenção de um biochar com menor teor de umidade. De acordo com Garcia (2010), níveis elevados de umidade implicam maiores perdas energéticas e reduzem a eficiência do processo de secagem.

Para fins de análise comparativa, a Tabela 6 reúne os resultados obtidos neste estudo em relação a dados de outras pesquisas presentes na literatura. Os biochars utilizados como referência foram gerados por processos termoquímicos conduzidos entre 400 °C e 600 °C, empregando como matéria-prima casca de coco e casca de arroz *in natura*.

Tabela 6 - Comparativo entre trabalhos de biochars

Variável analítica	Biochar 1 (500 °C)	Biochar 2 (600 °C)	Outros autores	
			Windeatt et al. (2014)^(a)	Vieira (2018)^(b)
Umidade (%)	1,18	0,31	7,10	3,92
Material volátil (%)	26,73	16,15	8,10	16,54
Cinzas (%)	45,77	61,99	4,10	30,94
Carbono fixo (%)	26,32	21,55	91,90	48,60

^(a)Biochar produzido a partir da pirólise da casca de coco a 600°C

^(b)Biochar produzido a partir da pirólise da casca de arroz *in natura* a 400 °C.

Fonte: Próprio autor (2025).

Assim, os resultados da análise imediata dos biochars mostraram-se compatíveis com aqueles reportados na literatura, especialmente quando comparados ao estudo de Vieira (2018). Nesse trabalho, a biomassa utilizada proveniente de casca de arroz *in natura* apresentou valores de material volátil próximos aos encontrados neste estudo. Essa semelhança reforça a viabilidade do biochar produzido a partir da casca de arroz e evidencia seu potencial de aplicação em diferentes processos.

Ao comparar as biomassas provenientes da casca de coco (Windeatt et al., 2014) e da casca de arroz *in natura* (Vieira, 2018), nota-se que os biochars gerados apresentam baixo teor de voláteis, aproximadamente 12%. Esse comportamento era previsto, já que grande parte desses compostos é volatilizada durante a pirólise, especialmente quando realizada em temperaturas mais altas. A diminuição do teor de voláteis está diretamente associada a uma maior conversão da biomassa em carbono fixo, aspecto fundamental para a qualidade do biochar.

Segundo Farinhaque (1981), o teor de umidade não deve exceder 20%, pois materiais com valores elevados demandam uma quantidade maior de energia para iniciar o processo de combustão.

Dessa maneira, os resultados da análise imediata podem ser considerados satisfatórios, tanto quando comparados a pesquisas já publicadas quanto em relação às recomendações apresentadas por diferentes autores.

4.4 ELEMENTOS QUÍMICOS CARACTERIZADOS EM AMOSTRA

As diferenças observadas entre a biomassa *in natura* e o biochar produzido a 500 °C, apresentadas na Tabela 7, podem ser atribuídas aos processos físico-químicos que ocorrem durante a pirólise. O aumento da temperatura promove a remoção de água e de compostos voláteis, resultando na redução da massa do material e, consequentemente, na concentração relativa dos elementos minerais no biochar. Esse comportamento é evidenciado pelo aumento nos teores de elementos termicamente mais estáveis, como silício, potássio e cálcio, conforme observado nos resultados experimentais.

De acordo com Antal e Grønli (2003), durante a pirólise ocorre a devolatilização progressiva da biomassa, favorecendo o enriquecimento da fração mineral no material carbonizado. Resultados semelhantes também foram reportados por Lehmann e Joseph (2015), que destacam que elementos como Si, K e Ca tendem a permanecer concentrados no biochar em função de sua maior estabilidade térmica.

Tabela 7 - Elementos químicos determinados em amostra de Blend da casca de arroz e cama de gado *in natura* e do biochar a 500 °C

Elemento	Blend <i>in natura</i>	Biochar 500 °C
Al (%)	1,864	1,947
Si (%)	7,753	10,062
P (%)	0,851	0,910
S (%)	0,714	0,664
Cl (%)	1,165	0,966
K (%)	6,157	7,327
Ca (%)	3,704	4,134
Ti (%)	0,596	0,587
V (ppm)	185,8	140,7
Cr (ppm)	159,9	146,1
Mn (%)	0,136	0,176
Fe (%)	6,709	6,512
Ni (ppm)	89,3	51,9

Cu (ppm)	312,0	247,1
Zn (ppm)	570,0	559,7
Ga (ppm)	34,9	31,1
Ge (ppm)	411,8	242,0
Br (ppm)	54,9	36,1
Sr (ppm)	445,5	492,3
Y (ppm)	53,5	65,6
Zr (ppm)	496,3	686,7
Mo (ppm)	503,6	162,3
Eu (ppm)	453,8	505,5
Yb (ppm)	71,1	70,1
Ta (%)	1,788	1,830
Re (ppm)	871,8	521,0
Ir (ppm)	531,5	410,1
Au (%)	1,831	2,279
Pb (ppm)	41,9	40,8
Th (-)	–	33,6

Fonte: Próprio autor (2025).

Por outro lado, a Tabela 7 evidencia a redução das concentrações de elementos como vanádio, cromo, níquel e cobre no biochar a 500 °C. Esse comportamento pode estar associado à volatilização parcial desses elementos ou à reorganização da matriz sólida durante o tratamento térmico, fenômenos amplamente discutidos na literatura (Gaskin et al., 2008; Brewer et al., 2011). Essas alterações refletem as transformações estruturais e químicas promovidas pela elevação da temperatura, que influenciam a distribuição e a forma de ocorrência dos elementos no biochar.

Além disso, a pirólise promove a degradação da matéria orgânica e a formação de uma estrutura mais aromática e porosa, conferindo maior estabilidade química ao biochar. Segundo Keiluweit et al. (2010), o aumento da aromaticidade está diretamente relacionado à maior resistência do material à degradação e à sua maior persistência no solo. Assim, a combinação entre maior concentração mineral e estrutura estável,

evidenciada na tabela, indica que o biochar produzido a 500 °C apresenta características favoráveis para aplicação como condicionador de solo.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, a análise das amostras de biomassa avaliadas demonstrou desempenho satisfatório quando comparada às referências presentes na literatura. O método aplicado para a produção de biochar a partir da mistura de casca de arroz com cama de gado mostrou-se mais simples e de fácil execução em relação a outras técnicas disponíveis.

Dessa forma, os resultados deste estudo indicam que a combinação de casca de arroz e cama de gado apresenta elevado potencial de reaproveitamento por meio da conversão em biochar destinado ao uso agrícola, configurando uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável. Considerando a ampla disponibilidade dessas biomassas, sua transformação em biochar contribui para a mitigação do descarte inadequado e promove a agregação de valor ao material. Ademais, o emprego desse biochar como condicionador do solo reforça práticas de agricultura sustentável e amplia perspectivas de desenvolvimento econômico, o que torna essa estratégia ainda mais promissora.

No entanto, torna-se necessário aprofundar as investigações a fim de determinar as condições operacionais mais adequadas para maximizar o rendimento de biochar e elevar o teor de carbono fixo. Tais estudos complementares são essenciais para otimizar a eficiência do processo e aprimorar a qualidade do biochar obtido.

REFERÊNCIAS

AGEGNEHU, Getachew; SRIVASTAVA, A. K.; BIRD, Michael I. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. **Applied Soil Ecology: A Section of Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 119, p. 156–170, 2017.

AHMAD, Mahtab et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. **Chemosphere**, v. 99, p. 19–33, 2014.

AHMADI, Seyed Hamid; GHASEMI, Hasan; SEPASKHAH, Ali Reza. Rice husk biochar influences runoff features, soil loss, and hydrological behavior of a loamy soil in a series of successive simulated rainfall events. **Catena**, v. 192, n. 104587, p. 104587, 2020.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1945–1962, 2004.

ANTAL, Michael Jerry; GRØNLI, Morten. The art, science, and technology of charcoal production. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 42, n. 8, p. 1619–1640, 2003.

ANTÔNIO, Julieta et al. Application of rice husk in the development of new composite boards. **Construction and building materials**, v. 176, p. 432–439, 2018.

ATIENZA-MARTÍNEZ, María. Pirólise de esterco de gado leiteiro: evolução das características do carvão. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, [S.d.].

ASTM D3173-87. **Standard Method for Determination of Moisture Content in Biomass**, Society of Testing Materials International. West Conshohocken, 2003.

ASTM D3174-04. **Standard method for ash in the analysis sample of coal and coke**. West Conshohocken, 2004.

ASTM D3175-07. **Standard method for volatile matter in the analysis sample of coal**. West Conshohocken, 2007.

BABAEI, Azadeh; SHAYEGAN, Jalal; ROSHANI, Anis. Anaerobic slurry co-digestion of poultry manure and straw: effect of organic loading and temperature. **Journal of environmental health science & engineering**, v. 11, n. 1, p. 15, 2013.

BHARATH, M.; RAGHAVAN, V. Cogaseificação de casca de arroz indiana e carvão indiano com alto teor de cinzas em reator de gaseificação de leito fluidizado borbulhante. **Applied Thermal Engineering**, 2018.

BREWER, Catherine E. et al. Characterization of biochar from fast pyrolysis and gasification systems. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 28, n. 3, p. 386–396, 2009.

CANTONI, F. et al. Fitorremediação e biochar: uma alternativa para recuperação de áreas pós- mineração. **Habitats Urbanos e Rurais**, 2019.

CANTRELL, Keri B. Oportunidades de geração de bioenergia a partir de resíduos pecuários. **Bioresource technology**, [S.d.].

Casca de arroz – Reserva Nobre. Disponível em: <<https://reservanobrealimentos.com.br/casca-de-arroz/>>. Acesso em: 25 nov. 2025.

CASTELLINI, M. *et al.* Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a clay soil. **Soil & tillage research**, v. 154, p. 1–13, 2015.

CHAVES, Antonio et al. CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DA MADEIRA E CARVÃO VEGETAL DE CLONES DE *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 17, 2013.

COLTRO, L. Perfil ambiental da produção de arroz no Sul do Brasil: uma comparação entre sistemas de cultivo irrigados e com irrigação por gotejamento subterrâneo. **Journal of Cleaner Production**, 2017.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Safra – série histórica dos grãos. Portal de Informações Agropecuárias. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-graos.html>. Acesso em: 17 set. 2025.

Cultivo do milho: adubação orgânica. - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/487016/cultivo-do-milho-adubacao-organica>>. Acesso em: 29 nov. 2025.

DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, Instituto Brasileiro. **Produção Agropecuária.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/bovinos/br>>. Acesso em: 25 nov. 2025.

DE JESUS DUARTE, Sara et al. Biochar and sugar cane filter cake interaction on physical and hydrological soil properties under tropical field conditions. **Biochar**, v. 2, n. 2, p. 195–210, 2020.

DIONÍSIO, J. A. *et al.* **Guia Prático de Biologia do Solo, Paraná: Sociedade brasileira de ciências do solo.** Paraná: [S.n.].

DORAN, J. W. *et al.* Defining and assessing soil health and sustainable productivity. **Biological indicators of soil health**, p. 1–28, 1997.

DOWNIE, Adriana E. *et al.* Terra Preta Australis: Reassessing the carbon storage capacity of temperate soils. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 140, n. 1–2, p. 137–147, 2011.

DUARTE, S. J.; GLASER, B.; PANO, B. L. P.; CERRI, C. E. P. Biochar and sugar cane filter cake interaction on physical and hydrological soil properties under tropical field conditions. **Biochar**, v. 2, p. 195–210, 2020.

FARINHAQUE, Roberto. " Influência da umidade no poder calorífico da madeira de Bracatinga (*Mimosa scabrella*, Benth) e aspectos gerais de combustão. 1981.

FERREIRA, Juliana Ceccato *et al.* QUALIFICAÇÃO DA BIOMASSA EM POVOAMENTOS FLORESTAIS DE Pinus taeda. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 269, 2016.

FONSECA, Frederico Gomes *et al.* Moisture content as a design and operational parameter for fast pyrolysis. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 139, p. 73–86, 2019.

GAI, Xiapu *et al.* Effects of feedstock and pyrolysis temperature on biochar adsorption of ammonium and nitrate. **PloS one**, v. 9, n. 12, p. e113888, 2014.

GARCIA, D. P. **Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia dos Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010.

GARCÍA, Roberto *et al.* Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. **Bioresource technology**, v. 103, n. 1, p. 249–258, 2012.

GASKIN, J. W. Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar properties. **Bioresource Technology**, 2008.

G. SANTOS, M. L. *et al.* Adsorption of Congo red textile dye on pineapple activated charcoal. **Journal of applied research and technology**, v. 23, n. 1, p. 22–32, 2025.

GLASER, Bruno; LEHMANN, Johannes; ZECH, Wolfgang. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. **Biology and Fertility of Soils**, v. 35, n. 4, p. 219–230, 2002.

GODFRAY, H. Charles J. *et al.* Meat consumption, health, and the environment. **Science**, v. 361, n. 6399, p. eaam5324, 2018.

GÓMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, 2002.

GWENZI, W. *et al.* Synthesis and nutrient release patterns of a biochar-based N–P–K slow-release fertilizer. **International journal of environmental science and technology: IJEST**, v. 15, n. 2, p. 405–414, 2018.

HE, Zhongqi; PAGLIARI, Paulo H.; WALDRIP, Heidi M. Applied and environmental chemistry of animal manure: A review. **Pedosphere**, v. 26, n. 6, p. 779–816, 2016.

JOSEPH, S. D. *et al.* An investigation into biochar reactions in soil. *Pesquisa do Solo*. p. 501–515, 2010.

KANIAPAN, Sivabalan *et al.* A review of the sustainable utilization of rice residues for bioenergy conversion using different valorization techniques, their challenges, and techno-economic assessment. **International journal of environmental research and public health**, v. 19, n. 6, p. 3427, 2022.

KARLEN, D. L. *et al.* Soil Quality: A concept, definition, and framework for evaluation (A guest editorial). **Soil Science Society of America journal. Soil Science Society of America**, v. 61, n. 1, p. 4–10, 1997.

KARLEN, Douglas L.; STOTT, Diane E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. *In: SSSA Special Publications*. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 2015. p. 53–72.

KEILUWEIT, Marco *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar). **Environmental science & technology**, v. 44, n. 4, p. 1247–1253, 2010.

KNIJNENBURG, Jesper T. N. *et al.* Co-pyrolysis of biomass with magnesium and phosphorus: effect of magnesium content on phosphate release from biochar-based fertilizers. **Biomass conversion and biorefinery**, v. 14, n. 14, p. 15351–15361, 2024.

KUMAR, Ramasamy Rajesh; PARK, Bong Ju; CHO, Jae Young. Application and environmental risks of livestock manure. **Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry**, v. 56, n. 5, p. 497–503, 2013.

LEHMANN, Johannes; JOSEPH, Stephen (ORGS.). **Biochar for environmental management: Science, technology and implementation**. 2. ed. Londres, England: Routledge, 2021.

LIU, P. Bioresource Technology Effects of volatile - char interactions on char during pyrolysis of rice husk at mild temperatures. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 702–709, 2016.

LU, Sheng-Gao; SUN, Fang-Fang; ZONG, Yu-Tong. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). **Catena**, v. 114, p. 37–44, 2014.

LUCA, As. Indicadores de design para a valorização dos resíduos da construção civil, da indústria sucroalcooleira e da rizicultura no Maranhão. **Revista Gestão Industrial**, 2017.

MARCIŃCZYK, Marta; OLESZCZUK, Patryk. Biochar and engineered biochar as slow- and controlled-release fertilizers. **Journal of cleaner production**, v. 339, n. 130685, p. 130685, 2022.

MATIN, Hashfi Hawali Abdul; SYAFRUDIN, Syafrudin; SUHERMAN, Suherman. Rice husk waste: Impact on environmental health and potential as biogas. **Jurnal Kesehatan Masyarakat**, v. 18, n. 3, p. 431–436, 2023.

MOHAN, Dinesh; PITTMAN, Charles U., Jr; STEELE, Philip H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy & fuels: an American Chemical Society journal**, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006.

MUNDA, Sushmita *et al.* Dynamics of soil organic carbon mineralization and C fractions in paddy soil on application of rice husk biochar. **Biomass & bioenergy**, v. 115, p. 1–9, 2018.

NOVOTNY, E. H.; HAYES, M. H. B.; MADARI, B. E. Biochar: pyrogenic carbon for agricultural use - a critical review. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. p. 321–344, 2015.

ONI, Babalola Aisosa; OZIEGBE, Olubukola; OLAWOLE, Obembe O. Significance of biochar application to the environment and economy. **Annals of agricultural science**, v. 64, n. 2, p. 222–236, 2019.

PACHÓN GÓMEZ, Erica M. *et al.* Chicken litter: A waste or a source of chemicals? Fast pyrolysis and hydrothermal conversion as alternatives in the valorisation of poultry waste. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 169, n. 105796, p. 105796, 2023.

PADHI, R. S.; BB DEY, T. Influência da incorporação de cinzas de casca de arroz e agregados reciclados grossos de concreto nas propriedades do concreto. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 289–297, 2018.

PAZ, E. C. S. *et al.* Production and characterization of the solid product of coconut pyrolysis. **Biomass conversion and biorefinery**, 2021.

PEDROZA, M. M. *et al.* Production and application of activated carbon obtained from the thermochemical degradation of corn cob. **Journal of applied research and technology**, v. 21, n. 6, p. 952–964, 2023.

RO, Kyoung S.; CANTRELL, Keri B.; HUNT, Patrick G. High-temperature pyrolysis of blended animal manures for producing renewable energy and value-added biochar. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 20, p. 10125–10131, 2010.

SÁNCHEZ, M. E. *et al.* Effect of pyrolysis temperature on the composition of the oils obtained from sewage sludge. **Biomass & bioenergy**, v. 33, n. 6–7, p. 933–940, 2009.

SEHAR, Anum *et al.* Synthesis of biochar from sugarcane filter-cake and its impacts on physiological performance of lettuce (*Lettuce sativa*) grown on cadmium contaminated soil. **Arabian journal of geosciences**, v. 11, n. 20, 2018.

SHIE, Je-Lueng *et al.* Pyrolysis of oil sludge with additives of sodium and potassium compounds. **Resources, conservation, and recycling**, v. 39, n. 1, p. 51–64, 2003.

SILVÉRIO, Flaviano Oliveira; BARBOSA, Luiz Cláudio Almeida; PILÓ-VELOSO, Dorila. A pirólise como técnica analítica. **Química nova**, v. 31, n. 6, p. 1543–1552, 2008.

SIMBOLON, Luga Martin *et al.* Influence of the pyrolysis temperature on fresh and pelletised chicken litter with focus on sustainable production and utilisation of biochar. **Biomass conversion and biorefinery**, v. 14, n. 20, p. 26443–26457, 2024.

SINGH, Chhatarpal *et al.* The effect of rice husk biochar on soil nutrient status, microbial biomass and paddy productivity of nutrient poor agriculture soils. **Catena**, v. 171, p. 485–493, 2018.

TORRES, William Gleidson Alves. **Biocarvões de casca de arroz e de esterco bovino como condicionadores de solo para a produção do feijoeiro**. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/36399>>. Acesso em: 25 set. 2025.

UCHIMIYA, Minori *et al.* Influence of pyrolysis temperature on biochar property and function as a heavy metal sorbent in soil. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 59, n. 6, p. 2501–2510, 2011.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. *Foreign Agricultural Service*. Washington, DC: USDA, 2020. 25 p. (Circular Series – WAP 2-20).

VELMURUGAN, V. Review of research and development on pyrolysis process. **Materials today: proceedings**, v. 49, p. 3679–3686, 2022.

VIEIRA, Ana Carla. Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas. **Universidade Estadual do Oeste do Paraná**, 2012.

VIEIRA, Fábio Roberto. Estudo experimental da pirólise lenta da casca de arroz em reator de leito fixo. 2018.

WANG, Q. *et al.* Pyrolysis of biomass briquettes: Effect of pyrolysis temperature and phosphorus additives on the quality and combustion of biochar briquettes. **Combustível**, p. 488–496, 2017.

WANG, Yongsheng *et al.* Biochar amendment reduces paddy soil nitrogen leaching but increases net global warming potential in Ningxia irrigation, China. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1592, 2017.

WINDEATT, Jayne H. *et al.* Characteristics of biochars from crop residues: potential for carbon sequestration and soil amendment. **Journal of environmental management**, v. 146, p. 189–197, 2014.

ZOU, Yanping; YANG, Tiankui. Rice husk, rice husk ash and their applications. *In*: **Rice Bran and Rice Bran Oil**. [S.l.]: Elsevier, 2019. p. 207–246.