Evento Nacional enactus Brasil 2026
IV SIMPÓSIO NACIONAL EXTENSÃO
XI SNESEB
CAMPO GRANDE - MS
DE 21 À 24 DE JULHO DE 2025
UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL

VIABILIDADE DE PRODUÇÃO DE BIOCHAR MAGNÉTICO UTILIZANDO LAMA VERMELHA

Autor(a): Giovanna França dos Santos
Orientador(a): Prof. Dr. Maria Lúcia Pereira Antunes Silva

Resumo

A crescente geração de resíduos tem impulsionado alternativas sustentáveis de reaproveitamento, destacando-se a lama vermelha, resíduo alcalino do processo Bayer, e a biomassa de podas urbanas. A biomassa lignocelulósica pode ser convertida por pirólise em biochar, um material poroso com alta capacidade de adsorção e aplicação ambiental. Quando combinada com a lama vermelha, rica em ferro, é possível produzir biochar magnético, devido à formação de magnetita durante o tratamento térmico. Esse material apresenta potencial para remediação ambiental, com a vantagem de recuperação por campos magnéticos. Assim, essa integração promove o reaproveitamento de resíduos e gera um produto de alto valor tecnológico e ambiental.

Palavras-chave: biochar magnético; lama vermelha; biomassa vegetal; pirólise.

INTRODUÇÃO

A crescente geração de resíduos sólidos industriais e urbanos tem impulsionado pesquisas voltadas à valorização desses materiais, promovendo alternativas sustentáveis de reaproveitamento. Dentre esses resíduos, destaca-se a lama vermelha, um resíduo da indústria de beneficiamento da bauxita por meio do processo Bayer, usado na obtenção da alumina (Al_2O_3). Estima-se que para cada tonelada de alumina produzida, entre 1 e 2 toneladas de lama vermelha são geradas, resultando em sérios desafios ao seu armazenamento, podendo levar a riscos ambientais devido ao seu alto pH. (SOUZA, 2012 ; JESUS, 2011).

A biomassa vegetal oriunda de podas urbanas, composta principalmente por folhas, galhos e resíduos herbáceos, representa um material orgânico abundante e frequentemente subutilizado. Devido à sua composição lignocelulósica, esse tipo de resíduo é adequado a processos termoquímicos como a pirólise, que promove sua decomposição térmica em atmosfera inerte, resultando na formação de materiais carbonáceos, como o biochar. Chaib (2019) demonstrou a viabilidade dessa rota ao converter resíduos verdes de jardinagem em biochar, evidenciando que biomassa urbana pode ser valorizada de maneira eficiente e ambientalmente sustentável.

O produto sólido resultante da pirólise é o biochar, um material poroso e rico em carbono, reconhecido por sua capacidade de melhorar a qualidade do solo, aumentar a retenção de água, fixar carbono e adsorver poluentes (MAIA, 2010; LEHMANN et al., 2009). Quando combinado com materiais ricos em ferro, como a lama vermelha, o biochar pode ser funcionalizado para adquirir propriedades magnéticas, permitindo sua aplicação em

tecnologias de remediação ambiental que se beneficiam da recuperação e reutilização mediante campos magnéticos.

Estudos mostram que a lama vermelha pode ser magnetizada pela conversão de fases férricas em magnetita (Fe_3O_4), conferindo alta resposta magnética. Essa transformação, favorecida pela redução térmica na presença de biomassa, resulta em materiais magneticamente ativos com melhor desempenho na remoção de metais pesados e fácil recuperação em aplicações ambientais.

Dessa forma, a integração entre a biomassa residual urbana e a lama vermelha surge como uma estratégia promissora para a produção de biochar magnético, promovendo o reaproveitamento de dois resíduos distintos e o desenvolvimento de um material de alto valor ambiental e tecnológico.

REVISÃO DA LITERATURA

A lama vermelha é um resíduo insolúvel, altamente alcalino gerado durante o processo Bayer, método amplamente utilizado para a obtenção da alumina (Al2O3) a partir da bauxita (SILVA FILHO et al., 2007). A produção de alumina pelo processo Bayer gera grandes volumes de resíduo, sendo estimado que para cada tonelada de alumina produzida formam-se aproximadamente 1 a 2 toneladas de lama vermelha (LIRA, 2021). Esse resíduo apresenta coloração característica avermelhada devido à presença significativa de óxidos de ferro, especialmente a hematita (Fe2O3), além de conter outros componentes como óxidos de alumínio, silício, cálcio, sódio, titânio e traços de metais pesados (ANTUNES, 2012).

Uma das principais preocupações ambientais associadas à lama vermelha é seu alto pH, geralmente acima de 10, o que a torna uma substância fortemente cáustica. Esse fator, aliado ao grande volume produzido e à dificuldade de armazenamento seguro, faz da lama vermelha um dos principais desafios ambientais da indústria do alumínio (SILVA FILHO, 2007). O armazenamento inadequado pode levar à contaminação de solos, águas superficiais e subterrâneas, além de representar riscos à saúde humana e à biodiversidade local. Diante disso, a busca por alternativas de reaproveitamento sustentável do resíduo tem crescido nos últimos anos (JESUS, 2011).

Entre as aplicações mais estudadas para a lama vermelha destaca-se seu emprego como material adsorvente na remoção de poluentes presentes em efluentes líquidos, devido à sua elevada reatividade superficial e capacidade de interação com espécies metálicas, inorgânicas e orgânicas (SILVA et al., 2019). Após passar por tratamentos térmicos e químicos, a lama adquire propriedades físico-químicas adequadas para atuar na adsorção de compostos orgânicos e inorgânicos, como corantes têxteis. Em estudo realizado por Jesus (2011), foi demonstrado que a lama vermelha tratada apresentou elevada capacidade de adsorver o corante reativo azul 19, com resultados promissores para sua aplicação no tratamento de águas residuais industriais.

Uma alternativa inovadora e ambientalmente sustentável consiste na utilização da lama vermelha na síntese de materiais magneticamente ativos, por meio de sua combinação com biomassa vegetal durante processos termoquímicos. Nessa rota, os compostos carbonáceos oriundos da biomassa atuam como agentes redutores, promovendo a conversão das fases férricas presentes no resíduo em formas magneticamente responsivas, possibilitando a obtenção de adsorventes funcionais semelhantes a biochars magnéticos (WANG et al.,

2021). Esse biochar magnético pode ser utilizado em processos de adsorção de contaminantes e facilmente recuperado com o uso de ímãs, oferecendo vantagens operacionais e ambientais, além de representar uma forma eficaz de reaproveitamento de resíduos.

Além disso, a lama vermelha pode ser aproveitada como adição em materiais de construção e como corretivo de solos ácidos, aplicações viabilizadas por seu caráter alcalino e pela presença de minerais básicos em sua composição (SILVA FILHO et al., 2007). No entanto, essas aplicações ainda exigem precauções quanto à sua composição química, especialmente no que se refere à presença de elementos tóxicos e à necessidade de neutralização de sua alcalinidade antes do uso direto no meio ambiente.

Assim, a lama vermelha, que por muito tempo foi tratada apenas como um passivo ambiental, tem demonstrado potencial de reaproveitamento em diversas áreas, desde a engenharia ambiental até a agricultura e o setor industrial. A transformação desse resíduo em um insumo útil contribui não só para a redução de impactos ambientais, mas também para o avanço de tecnologias mais sustentáveis e circulares.

A biomassa é definida como qualquer material orgânico de origem vegetal ou animal que pode ser aproveitado para a geração de energia, abrangendo resíduos agrícolas e florestais, subprodutos agroindustriais, restos alimentares e dejetos de origem animal, os quais constituem importantes fontes renováveis para conversão energética (GOLDEMBERG, 2009). Por ser considerada uma fonte de energia renovável, a biomassa possui um ciclo de reposição relativamente curto, pois é continuamente produzida pela natureza por meio do crescimento de plantas e da decomposição de matéria orgânica (TRAZZI et al., 2018). Sua versatilidade permite que seja convertida em diversas formas de energia, como calor, eletricidade e biocombustíveis — incluindo etanol, biodiesel e biogás — por meio de processos como combustão direta, gaseificação, fermentação e digestão anaeróbica. A conversão termoquímica da biomassa, como a pirólise e gaseificação, é uma das formas mais utilizadas para a geração de energia e produção de subprodutos, como o biochar, que possui aplicações agronômicas e ambientai relevantes (SOARES et al., 2021).

O biochar, também conhecido como biocarvão, é um material sólido, poroso e rico em carbono, obtido pela pirólise de biomassa em ambiente com pouco ou nenhum oxigênio. Sua composição química é altamente variável, dependendo da matéria - prima utilizada e das condições do processo térmico, como temperatura e tempo de residência (TRAZZI et al., 2018). De maneira geral, o biochar apresenta características como alta estabilidade, pH alcalino, elevada capacidade de retenção de água, porosidade e grande área superficial, o que o torna um excelente condicionador de solo.

O interesse no uso do biochar cresceu significativamente nas últimas décadas, especialmente em áreas agrícolas e ambientais. Quando aplicado ao solo, ele pode melhorar sua estrutura física, aumentar a retenção de nutrientes e água, elevar o pH de solos ácidos e atuar como suporte para microorganismos benéficos (TRAZZI et al., 2018). Estudos indicam que o biochar também é capaz de contribuir com o sequestro de carbono atmosférico, sendo considerado um material de “carbono negativo”, ou seja, que pode reduzir a emissão de gases de efeito estufa.

Além de suas vantagens agronômicas, o biochar também tem sido explorado como componente e substrato para mudas florestais. Porém, seu uso nem sempre traz benefícios diretos ao crescimento inicial das plantas. No estudo de Soares et al. (2021), verificou-se que,

na produção de mudas de Sapindus saponaria, o aumento das proporções de biochar no substrato reduziu o crescimento em altura, volume radicular e massa seca, sugerindo que a aplicação precisa ser equilibrada e adaptada a cada espécie e contexto.

Outros estudos mostram efeitos positivos do uso de biochar no solo. Oliveira et al. (2023) verificaram que o biochar de torta de filtro melhorou o desenvolvimento fisiológico e morfológico de espécies do Cerrado, mesmo sem adubação, devido à sua porosidade, que aumenta a retenção de água e nutrientes e favorece o crescimento das plantas.

Dessa forma, o biochar apresenta múltiplas aplicações, atuando como condicionador de solo, corretivo de pH, suporte para atividade microbiana, além de demonstrar potencial na adsorção de contaminantes e na valorização sustentável de resíduos orgânicos (CHAIB, 2019). Seu uso, no entanto, requer adequação às características do solo, cultura e finalidade, uma vez que seus efeitos variam conforme a dose e o tipo de matéria - prima utilizada na pirólise.

METODOLOGIA

O resíduo de mineração lama vermelha utilizado neste trabalho foi coletado em uma lagoa de disposição da região, sendo obtida do processamento de bauxita de regiões do sudeste e centro oeste brasileiro.

A amostra utilizada apresenta uma coloração em um tom avermelhado alaranjado (FIGURA 1), por essa característica física, demonstra a diferença na concentração de ferro de cada resíduos (ANTUNES et al, 2012). As amostras usadas encontram-se secas, em forma de pó, e sendo assim demonstrando que passaram por um processo de preparo e secagem quando armazenadas. Para a caracterização dessas amostras foram avaliados o pH e condutividade elétrica como descrito no item 4.3 deste relatório.

FIGURA 1 - Lama Vermelha de Alumínio (2015)



Fonte: Autoria própria, 2025

A proposta inicial do projeto era trabalhar com biomassa de cana de açúcar ou resíduo de jardim, porém devido a dificuldade na obtenção do primeiro resíduo, optou-se por utilizar outra biomassa: resíduo de jardim uma vez que este era abundante no local.

O manuseio da biomassa utilizada consistiu na coleta de material proveniente das podas de jardim realizadas no Campus da UNESP Sorocaba (FIGURA 2). Esse material vegetal, composto majoritariamente por folhas, passou por um processo de triagem inicial, no qual as folhas foram separadas das partes (FIGURA 3) mais espessos e rígidos. Essa etapa teve como objetivo evitar que partes mais duras interferissem nas etapas posteriores do processamento.

FIGURA 2 – Resíduo de jardim coletado no Campus



Fonte: Autoria própria, 2025

FIGURA 3 – Material excluído no Processo de separação das folhas



Fonte: Autoria própria, 2025

Após essa seleção, o material separado foi acondicionado cuidadosamente em formas de alumínio (FIGURA 4), garantindo uma disposição que favorece a uniformidade no processo de secagem. Em seguida, as formas foram colocadas em uma estufa com temperatura controlada a 40 °C, permanecendo nesse ambiente por um período de dois dias. Esse procedimento teve como finalidade a completa remoção da umidade da biomassa, o que é fundamental para a eficácia das etapas seguintes.

FIGURA 4 - Biomassa separada



Fonte: Autoria própria, 2025

Após a secagem, o material vegetal passou por duas etapas de moagem. Na primeira (Moagem 1), realizada em liquidificador, ocorreu a trituração inicial, gerando uma biomassa grossa, com partículas maiores e menos uniformes. Em seguida, o material foi armazenado em potes esterilizados para preservar suas características e evitar contaminação.

A segunda moagem desse material (Moagem 2), foi realizada utilizando um moedor de café, equipamento escolhido por sua capacidade de promover uma moagem fina e homogênea e adequada, resultando em uma biomassa média para as etapas subsequentes da produção do biochar. Ao final desta etapa, o pó foi submetido à peneiração (Moagem 3) utilizando uma peneira com granulometria de 425 mm/ μm, com o objetivo de selecionar apenas as partículas mais finas, em que se obteve a biomassa fina, composta por partículas uniformemente reduzidas, adequadas para análises físico-químicas e garantindo a uniformidade necessária para o processo de pirólise.

Para avaliar quantitativamente o rendimento em cada etapa do preparo da biomassa, foi determinada a massa do material após cada fase do processo: após a secagem, após a Moagem 1 e após a Moagem 2. As massas foram medidas utilizando uma balança de precisão (Marconi-classe II). Essas

medidas foram feitas em triplicata para o cálculo de médias e desvios padrão. O rendimento (%) em cada etapa foi determinado utilizando-se a equação 1.

$$RENDIMENTO\ (\%)\ =\ (\frac{MASSA\ DA\ ETAPA}{MASSA\ INICIAL}) \star 100\ (\%)\ \ \text{(Equação 1)}$$

onde a MASSA INICIAL corresponde sempre à massa inicial da biomassa (resíduo de poda de jardim) separada no início do processo, enquanto a MASSA ETAPA representa a massa obtida após o processamento específico realizado.

A produção de biochar magnético foi realizada utilizando como matéria - prima a biomassa vegetal proveniente das podas de jardim moída como descrito no item 4.1.2 deste relatório optou-se por utilizar esse material sem o peneiramento, uma vez que após a moagem 2, praticamente nada ficava retido na peneira. o material final apresentou textura homogênea e suficientemente fina para a pirólise.

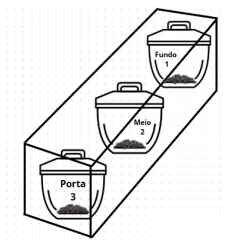
O preparo do biochar magnético foi realizado por meio da mistura direta de biomassa seca e triturada com a lama vermelha. A proporção utilizada foi de 5 g de biomassa para 5 g de lama vermelha, sendo que esta última foi preparada com uma concentração de 400 g/L, obtida pela dissolução de 40,5 g de lama vermelha em 100 mL de água destilada (a água destilada foi utilizada para garantir a pureza e evitar interferências nas reações). O cálculo da concentração da lama vermelha baseou-se na molaridade da solução de $FeCl_3$ (2,5 mol/L) e na massa molar do composto (162,2 g/mol). Para a preparação da solução, 40,5 g de lama vermelha foram dissolvidos em 100 mL de água destilada, o que resultou em uma concentração de 405,5 g/L.

Após a preparação da lama vermelha, a mistura foi cuidadosamente homogeneizada manualmente e deixada em repouso por duas horas. Esse tempo foi suficiente para permitir a adesão das partículas de lama vermelha às partículas vegetais da biomassa. Em seguida, a mistura foi transferida para uma estufa com circulação de ar a 80ºC, permanecendo por duas horas para remoção completa da umidade. O material seco foi então acondicionado em cadinhos de porcelana montados em pares (FIGURA 5), formando pequenos reatores fechados. Os reatores (FIGURA 5) utilizados no processo de pirólise a temperatura de 400ºC e 700ºC foram organizados em três posições distintas dentro da mufla, sendo elas: fundo (Reator 1), meio (Reator 2) e próximo à porta (Reator 3) (FIGURA 6). Essa disposição foi realizada com o objetivo de avaliar possíveis variações de temperatura ao longo da câmara de aquecimento. A organização das posições está ilustrada na Figura 6

FIGURA 5 - Reatores



FIGURA 6 - Reatores dentro da mufla



Fonte: Autoria própria, 2025

Para avaliar quantitativamente o rendimento do preparo do biochar magnético, foi determinada a massa da matéria prima, sendo a mistura da lama vermelha e biomassa. As massas foram medidas utilizando uma balança de precisão (Marconi-classe II). Essas medidas foram feitas em

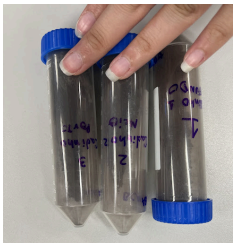
triplicata para o cálculo de médias e desvios padrão. O rendimento (%) em cada etapa foi determinado utilizando-se a equação 2.

$$RENDIMENTO\ (\%) = \left(\frac{MASSA\ DO\ REATOR}{MASSA\ DA\ MATÉRIA\ PRIMA}\right) \star 100\ (\%) \quad \text{(Equação 2)}$$

onde a MASSA DA MATÉRIA PRIMA corresponde sempre à mistura da biomassa (resíduo de poda de jardim) e lama vermelha separada no início do processo, enquanto a MASSA DO REATOR representa ao biochar magnético que foi pirolisado.

O biochar obtido foi armazenado em frascos de polipropileno (FIGURA 7) previamente esterilizados, sendo mantido à temperatura ambiente até as análises. Para a avaliação do magnetismo do material produzido, utilizou-se um ímã de neodímio (FIGURA 8), por ser um ímã de neodímio, capaz de detectar pequenas respostas magnéticas.

Figura 7 - Frascos de polipropileno



Fonte: Autoria própria, 2025

Figura 8 - Ímã Neodímio



Fonte: Autoria própria, 2025

As amostras de lama vermelha, biomassa (resíduo de jardim) em diferentes granulometrias como descrito no item 4.1.2 e o biochar de lama vermelha foram avaliadas quanto ao seu pH e condutividade. Para essas análises, foram preparadas soluções a partir de 2 g de cada material. Essas massas foram aferidas em uma balança analítica e foram transferidas para erlenmeyers contendo 50 mL de água destilada.

As amostras foram agitadas em mesa agitadora por um período de 15 a 20 minutos, garantindo a completa homogeneização das soluções antes da realização das medições. Em seguida, cada solução foi transferida para béqueres de 100 mL para a obtenção das leituras de pH, utilizando-se um pHmetro (Datalogger Ph-1900 Eletrodo Portátil) devidamente calibrado com soluções tampão de pH 7,00 e 10,00. Foram realizadas três medições para cada amostra, para se obter a média e desvio padrão das leituras.

Posteriormente, foi medida a condutividade elétrica das mesmas soluções, utilizando um condutivímetro (CD-860 da Instrutherm) calibrado, foram feitas três medidas para cada amostra.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Resíduo de jardim após o processo de moagem apresenta características que podem ser observadas nas figuras 9 e 10.

FIGURA 9 - Biomassa após Moagem 1

FIGURA 10 - Biomassa após Moagem 2



Fonte: Autoria própria, 2025



Fonte: Autoria própria, 2025

O cálculo do rendimento da biomassa foi avaliado para cada etapa da moagem (Moagem 1 e Moagem 2), utilizando-se a equação 1.

Como as análises foram realizadas em triplicata, as Tabelas 1 a 3 apresentam resultados de rendimento de um mesmo dia de processamento do resíduo de jardim e as Tabelas 4 a 6, de outro dia de processamento.

Tabela 1 – Massa do resíduo de jardim inicial e após o processamento das diferentes etapas de moagem e o seus rendimentos – 1ª Preparação em 16/12/2024

MASSA DA Biomassa INICIAL processada em 16/12/2025 – 1ª Preparação				
MASSA INICIAL DE BIOMASSA(g)	MOAGEM 1 (g)	R (%)	MOAGEM 2 (g)	R (%)
73,08	66,99	-	42,20	-
73,05	67,01	-	42,19	-
73,02	67,00	-	42,18	-
(73,05 ± 0,03)	(67,00 ± 0,01)	91,7	(42,19 ± 0,01)	57,7

*R = Rendimento

Fonte: Autoria própria, 2025

Tabela 2 - Massa do resíduo de jardim inicial e após o processamento das diferentes etapas de moagem e o seus rendimentos – 2ª Preparação em 16/12/2024

MASSA DA Biomassa processada em 16/12/2025 – 2ª Preparação				
MASSA INICIAL DE BIOMASSA(g)	MOAGEM 1 (g)	R (%)	MOAGEM 2(g)	R (%)
84,27	81,4	-	78,37	-
84,22	81,41	-	78,36	-
84,21	81,39	-	78,36	-
(84,22 ± 0,03)	(81,4 ± 0,01)	96,7	(78,36 ± 0,01)	93,04

*R = Rendimento

Fonte: Autoria própria, 2025

Tabela 3 - Massa do resíduo de jardim inicial e após o processamento das diferentes etapas de moagem e o seus rendimentos – 3ª Preparação em 16/12/2024

MASSA DA Biomassa processada em 16/12/2025 – 3ª Preparação				
MASSA INICIAL DE BIOMASSA(g)	MOAGEM 1 (g)	R (%)	MOAGEM 2 (g)	R (%)
147,5	107,62	-	107,37	-

147,46	107,6	-	107,37	-
147,41	107,61	-	107,36	-
(147,46 ± 0,05)	(107,61 ± 0,01)	72,97	(107,37 ± 0,01)	72,81

*R = Rendimento

Fonte: Autoria própria, 2025

Ao longo do processo, foi possível observar que os resultados obtidos com as Tabelas 1, 2 e 3 tiveram diferenças no rendimento. Na qual, a maior diferença de rendimento é observada na Tabela 1, isso pode estar relacionado com o fato do ar condicionado estar ligado ao longo do procedimento, o que pode ter causado dispersão das partículas e influenciado nos resultados.

Tabela 4 - Massa do resíduo de jardim inicial e após o processamento das diferentes etapas de moagem e o seus rendimentos – 1ª Preparação em 09/05/2025

MASSA DA Biomassa processada em 09/05/2025 – 1ª Preparação				
MASSA INICIAL DE BIOMASSA(g)	MOAGEM 1 (g)	R (%)	MOAGEM 2 (g)	R (%)
139,65	121,35	-	116,35	-
140,54	121,34	-	116,35	-
140,22	121,38	-	116,36	-
(140,22 ± 0,45)	(121,35 ± 0,01)	86,56	(116,35 ± 0,01)	82,98

*R = Rendimento

Fonte: Autoria própria, 2025

Tabela 5 - Massa do resíduo de jardim inicial e após o processamento das diferentes etapas de moagem e o seus rendimentos – 2ª Preparação em 09/05/2025

MASSA DA Biomassa processada em 09/05/2025 – 2ª Preparação				
MASSA INICIAL DE BIOMASSA(g)	MOAGEM 1 (g)	R (%)	MOAGEM 2 (g)	R (%)
229,27	124,23	-	122,62	-
225,46	124,29	-	122,62	-
235,51	124,22	-	122,62	-
(229,27 ± 6,71)	(124,23 ± 0,04)	54,19	(122,62 ± 0,01)	53,48

*R = Rendimento

Fonte: Autoria própria, 2025

Tabela 6 - Massa do resíduo de jardim inicial e após o processamento das diferentes etapas de moagem e o seus rendimentos – 3ª em 09/05/2025

MASSA DA Biomassa processada em 09/05/2025 – 3ª Preparação				
MASSA INICIAL DE BIOMASSA(g)	MOAGEM 1 (g)	R (%)	MOAGEM 2 (g)	R (%)
145,4	109,94	-	109,32	-
145,55	109,95	-	109,26	-
145,64	109,92	-	109,25	-
(145,55 ± 0,12)	(109,94 ± 0,02)	75,53	(109,26 ± 0,04)	75,07

*R = Rendimento

Fonte: Autoria própria, 2025

Durante o procedimento, verificou-se que os valores apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6 exibiram variações no rendimento. Observa-se que a discrepância mais significativa ocorre na Tabela 4, possivelmente devido ao ar-condicionado permanecer ligado durante as medições, o que pode ter provocado dispersão de partículas e, consequentemente, interferido nos resultados obtidos.

A Tabela 7 apresenta o rendimento médio das etapas de processamento da biomassa de cada dia.

Tabela 7 - Rendimento Médio Preparação Biomassa

Rendimento Médio das diversas Etapas de Preparação da Biomassa		
Data	Rendimento da etapa da Moagem 1(%)	Rendimento da etapa da Moagem 2 (%)
16/12/2025	87,09	74,29
09/05/2025	72,09	70,51
	(79 ± 11)%	(72 ±3)%

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da tabela 7, nota-se que a a primeira moagem (Moagem 1) apresenta rendimento de 87,09% e 72,09%, indicando uma perda de material relativamente baixa. Já na etapa seguinte (Moagem 2), os rendimentos foram de 74,29% e 70,51%, demonstrando uma maior redução, porém com uma perda de aproximadamente 30% da massa nos dois processos de moagem.

A menor eficiência de rendimento após a Moagem 2 deve-se à granulometria muito fina da biomassa, que favorece sua dispersão no ar e adesão ao equipamento, dificultando a coleta. Já o biochar produzido a 400 °C apresenta mudanças significativas, passando de um material úmido e avermelhado para um produto seco, leve e marrom escuro, com boa homogeneização entre os componentes e formação de uma matriz coesa, indicando incorporação eficiente.

Pode-se verificar a magnetismo da pirólise de lama vermelha e resíduo de jardinagem a 400ºC (FIGURA 12). A Figura mostra que utilizando-se um ímã, nota-se que o material é atraído e pode ser movimentado. Isso confirma a obtenção de material magnético com resíduo de jardim, corroborando dados da literatura (WANG, 2005) que se utilizam de resíduo agrícola para o mesmo fim.

FIGURA 11 - Reatores com o Biochar Magnético pirolisado



Fonte: Autoria própria, 2025

FIGURA 12 - Teste de Ímã



Fonte: Autoria própria, 2025

A Tabela 8 apresenta a massa inicial de matéria prima utilizada para a produção do biochar magnético. Já a Tabela 9 apresenta os valores de massa registrados na produção do biochar de resíduo de jardim e lama vermelha queimada a 400ºC (Biochar magnético).

Tabela 8 - Massas da Produção

Biochar Magnético - 1º Teste 30/01/2025	
Lama Vermelha (g)	5,00 ± 0,01
Biomassa Folhas de Jardim (g)	5,00 ± 0,01
Massa Total (g)	10,00 ± 0,01

Fonte: Autoria própria, 2025

O cálculo do rendimento do biochar magnético produzido foi avaliado em cada reator, utilizando-se a equação 2. Como as análises foram realizadas em triplicata, a Tabela 9 apresenta resultados de rendimento da queima a 400ºC.

Tabela 9 - Rendimento após pirólise a 400ºC do biochar magnético

Amostra Produzida					
REATOR 1 (g)	R (%)	REATOR 2 (g)	R (%)	REATOR 3 (g)	R (%)
4,39	-	4,9	-	4,92	-
4,38	-	4,9	-	4,91	-
4,38	-	4,89	-	4,9	-
(4,38 ± 0,02)	43,8	(4,9 ± 0,01)	49,0	(4,91 ± 0,01)	49, 1

*R = Rendimento

Fonte: Autoria própria, 2025

Na produção de biochar magnético a 400 °C, foram utilizados 10,00 g de material inicial por amostra (5,00 g de biomassa e 5,00 g de lama vermelha). As massas finais variaram entre 4,38 e 4,91 g, resultando em rendimentos de 43,8% a 49,1%. A redução de massa ocorreu devido à degradação térmica da biomassa e à perda de compostos voláteis, incluindo frações da lama vermelha.

O biochar magnético produzido a 700 °C apresentou mudanças visíveis em relação à matéria-prima: de uma mistura úmida, avermelhada e solta, passou a um material seco e de coloração marrom escura, evidenciando a decomposição da biomassa e a carbonização da lama vermelha.A pirólise a temperaturas mais elevadas resultou em um processo de carbonização mais completo, conferindo ao biochar uma estrutura mais densa e compacta (LI et al., 2022). Foi observada uma boa integração entre a lama vermelha e o biochar de resíduo de jardim, formando uma matriz relativamente uniforme e coesa, sugerindo uma possível combinação eficaz dos componentes. Isso pode indicar um potencial para a produção de biochar magnético, com propriedades que podem ser vantajosas para aplicações futuras.

Observou-se a presença de propriedades magnéticas no biochar de lama vermelha e resíduo de jardinagem submetido à pirólise a 700ºC. Ao utilizar um ímã, o material demonstrou ser atraído e deslocado, indicando a formação de um material magnético a partir do resíduo de jardinagem. Esse comportamento é consistente com dados da literatura (WANG, 2005), que também utilizaram resíduos agrícolas para a produção de materiais magnéticos.

O rendimento da pirólise para obtenção da lama vermelha magnética é apresentado nas Tabelas 10 e 11, sendo a Tabela 10 referente à massa inicial da matéria-prima e a Tabela 11 aos valores de massa obtidos na produção do biochar a 400 °C.

Tabela 10 - Massas da Produção

Biochar Magnético - Moagem 2 a 700ºC			
Massa Inicial	(g)	Massa Final	(g)
FUNDO	13,08	FUNDO	3,91
MEIO	13,09	MEIO	3,65

PORTA	13,69	PORTA	4,28

Fonte: Autoria própria, 2025

O cálculo do rendimento do biochar magnético produzido foi avaliado em cada reator, utilizando-se a equação 2. Como as análises foram realizadas em triplicata, a Tabela 11 apresenta resultados de rendimento da queima a 700ºC.

Tabela 11 - Rendimento após pirólise a 700ºC do biochar magnético

Amostra Produzida de Biochar Magnético					
REATOR 1 MASSA (g)	R (%)	REATOR 2 MASSA (g)	R (%)	REATOR 3 MASSA (g)	R (%)
3,90	-	3,63	-	4,28	-
3,89	-	3,64	-	4,27	-
3,91	-	3,65	-	4,28	-
(3,90 ± 0,02)	29,82	(3,64 ± 0,01)	27,81	(4,28 ± 0,01)	31,24

*R = Rendimento

Fonte: Autoria própria, 2025

Após a pirólise a 700ºC, os rendimentos da produção do biochar magnético mostraram uma redução significativa da massa inicial. As massas foram (3,91 ± 0,02) g, (3,65 ± 0,01) g e (4,28 ± 0,01) g, correspondendo a rendimentos de 29,82 %, 27,81 % e 31,24 %. Essa perda está associada à degradação da biomassa e à volatilização de componentes da lama vermelha, incluindo frações orgânicas residuais. A variação entre os reatores sugere que a eficiência da produção de biochar magnético pode ser influenciada pela composição do material e pelas condições locais de aquecimento.

O rendimento do biochar magnético obtido a 400°C e 700°C apresenta diferenças significativas devido ao comportamento termoquímico da biomassa durante a pirólise. A temperaturas mais baixas, como 400°C, a pirólise é parcial, o que significa que a decomposição dos compostos orgânicos não é totalmente completa. Nesse processo, uma maior quantidade de compostos voláteis (como gases e líquidos) permanece no material, resultando em um biochar com maior teor de matéria orgânica remanescente, mas com uma estrutura menos densa e menos estável. Os rendimentos absolutos observados a 400°C foram de (4,38 ± 0,02) g, (4,90 ± 0,01) g e (4,91 ± 0,01) g, correspondendo a rendimentos percentuais de 43,8%, 49,0% e 49,1% para as amostras de Biochar Mag 1, Biochar Mag 2 e Biochar Mag 3, respectivamente (LI et al., 2022).

Por outro lado, a pirólise a 700°C favorece uma carbonização mais completa, com maior remoção de voláteis e degradação de compostos orgânicos, como celulose, hemicelulose e lignina, que se volatilizam a temperaturas mais altas. Esse processo de desvolatilização completa resulta em um biochar mais denso, compacto e estável, com maior conteúdo de carbono fixo. Os rendimentos a 700°C foram de (3,91 ± 0,02) g, (3,65 ± 0,01) g e (4,28 ± 0,01) g, correspondendo a rendimentos percentuais de 29,82%, 27,81% e 31,24% para as amostras de Biochar Mag 1, Biochar Mag 2 e Biochar Mag 3, respectivamente (WANG et al., 2021).

A diferença nos rendimentos é esperada, pois a temperatura mais alta permite que mais substâncias voláteis sejam removidas, deixando para trás um material mais carbonizado e com maior capacidade de adsorção, o que melhora suas propriedades magnéticas e o torna mais adequado para aplicações ambientais (ANTUNES et al., 2012). Em resumo, a pirólise a 700°C gera um biochar mais completo, com uma estrutura mais compacta, enquanto a 400°C a carbonização é incompleta, resultando em um produto com maior conteúdo de voláteis e menor densidade estrutural.

Os resultados das medições de pH realizadas em biomassas de diferentes granulometrias, como descrito no item 4.1.2 estão apresentados na Tabela 12. Os dados incluem as médias e os desvios padrão correspondentes a cada conjunto de medições.

Tabela 12 - Medição do pH das granulometrias

pH em diferentes granulometrias			
MOAGEM 1	MOAGEM 2	MOAGEM 3	Moagem 2 C/ Lama Vermelha
5,07	4,95	4,85	8,17
5,12	4,85	4,9	8,19
5,1	4,87	4,84	8,22
(5,1 ± 0,03)	(4,87 ± 0,05)	(4,85 ± 0,03)	(8,19 ± 0,03)

Fonte: Autoria própria

Foram realizadas medições de condutividade elétrica nas três granulometrias da biomassa, como descrito na etapa anterior no item 4.1.2. Para cada amostra foram calculados a média e desvio padrão. Os resultados estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 - Medição de condutividade das granulometrias

Condutividade (mS/cm) em diferentes granulometrias			
MOAGEM 1	MOAGEM 2	MOAGEM 3	Moagem 2 C/ Lama Vermelha
0,88	0,95	1,26	0,91
0,91	0,93	1,26	0,93
0,87	0,94	1,28	0,93
(0,88 ± 0,02)	(0,94 ± 0,01)	(1,26 ± 0,01)	(0,93 ± 0,01)

Fonte: Autoria própria

A redução da granulometria da biomassa aumentou a condutividade elétrica, com valores de 0,88 (Moagem 1), 0,94 (Moagem 2) e 1,26 mS/cm (Moagem 3). A amostra com lama vermelha apresentou 0,93 mS/cm, próxima à Moagem 2, enquanto a lama vermelha isolada tem valor maior (2,12 mS/cm), indicando que sua incorporação não elevou significativamente a condutividade da biomassa. Quanto ao pH, as amostras variaram de 5,10 a 4,85 (ácidas), mas a adição de lama vermelha elevou o pH para 8,19, devido ao seu caráter altamente alcalino.

A Tabela 14 apresenta os valores obtidos nas medições do pH das matérias primas utilizadas para a produção do biochar magnético e do biochar magnético obtido (Biochar Mag 1 a 400; Biochar Mag 2 a 400; Biochar Mag 3 a 400) Foram registrados os resultados individuais de cada medição, além das respectivas médias e desvios padrão calculados para cada conjunto de dados.

Tabela 14 - Medição do pH das matérias primas e do biochar magnético obtido a 400ºC

Medição pH

Lama Vermelha	Biomassa Folhas	Biochar Mag 1 a 400	Biochar Mag 2 a 400	Biochar Mag 2 a 400
10,09	5,42	9,5	9,56	9,2
10,13	5,3	9,6	9,58	9,22
10,13	5.3	9,58	9,55	9,22
(10,13 ± 0,02)	(5,3 ± 0,7)	(9,58 ± 0,05)	(9,56 ± 0,02)	(9,22 ± 0,01)

Fonte: Autoria própria, 2025

A Tabela 14 evidencia que, após a combinação da lama vermelha com biomassa vegetal e sua subsequente pirólise, o pH do material reduziu-se de (10,13 ± 0,02) para valores entre (9,22 ± 0,01) e (9,58 ± 0,05) nas amostras finais (Biochar Mag 1 a 400; Biochar Mag 2 a 400; Biochar Mag 3 a 400). Embora o produto final mantenha caráter marcadamente alcalino, essa redução indica uma neutralização parcial da alcalinidade original da lama vermelha. Resultados semelhantes são descritos na literatura, onde processos térmicos ou redutores modificam a superfície dos óxidos de ferro e alumínio presentes no resíduo, alterando seu comportamento ácido-base (ANTUNES et al., 2012).

Durante a pirólise, a biomassa libera compostos voláteis e forma estruturas carbonáceas com grupos oxigenados que interagem com os metais da lama vermelha. Essa interação promove a incorporação de carbono e grupos menos básicos, reduzindo moderadamente o pH e alterando a reatividade do material (LI et al., 2022). Além disso, favorece a conversão parcial de fases férricas em magnetita, evidenciando uma interação química efetiva entre biomassa e lama vermelha (WANG et al., 2021).

A redução do pH indica que a biomassa pirolisada modula o comportamento químico da lama vermelha, diminuindo sua alcalinidade e alterando as espécies superficiais, sem eliminar seu caráter básico. Isso resulta em um biochar magnético com propriedades mais equilibradas e potencial para aplicações ambientais, como adsorção, neutralização e suporte catalítico.

A Tabela 15 apresenta os valores obtidos nas medições de condutividade elétrica das amostras, realizadas. Foram registrados os resultados individuais de cada medição, além das respectivas médias e desvios padrão calculados para cada conjunto de dados.

Tabela 15 - Medição da Condutividade das matérias primas e do biochar magnético obtido a 400ºC

Medição Condutividade (mS/cm)				
Lama Vermelha	Biomassa Folhas	Biochar Mag 1 a 400	Biochar Mag 2 a 400	Biochar Mag 3 a 400
2,13	0,88	1,75	1,78	1,83
2,11	0,87	1,73	1,78	1,84
2,12	0,88	1,75	1,8	1,86
(2,12 ± 0,01)	(0,88 ± 0,01)	(1,75 ± 0,01)	(1,78 ± 0,01)	(1,84 ± 0,02)

Fonte: Autoria própria, 2025

A lama vermelha apresentou alta condutividade (2,12 mS/cm) devido aos íons solúveis, enquanto a biomassa teve valor menor (0,88 mS/cm). As amostras pirolisadas apresentaram condutividades intermediárias (1,75–1,84 mS/cm), indicando que a pirólise reduziu parcialmente a condutividade da lama vermelha, mas manteve parte de seus compostos iônicos.

Os biochars magnéticos produzidos a 700 °C (Biochar Mag 1, 2 e 3) tiveram seus valores de pH medidos individualmente, sendo posteriormente calculadas as médias e desvios padrão, apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Medição do pH do biochar magnético obtido a 700º C

Medição pH a 700ºC		
Biochar Mag 1 - 700ºC	Biochar Mag 2 - 700ºC	Biochar Mag 3 - 700ºC
10,44	10,41	10,25
10,45	10,42	10,26
10,47	10,4	10,28
(10,75 ± 0,02)	(10,41 ± 0,01)	(10,26 ± 0,02)

Fonte: Autoria própria, 2025

Após a pirólise a 700 °C, os biochars apresentaram pH médio de 10,45 (Mag 1), 10,41 (Mag 2) e 10,26 (Mag 3), com desvios padrão muito baixos (±0,01 a ±0,02), indicando alta consistência e pequenas diferenças entre as amostras. A Tabela 17 reúne os resultados de condutividade elétrica, incluindo valores individuais, médias e desvios padrão.

Tabela 17 - Medição da Condutividade do biochar magnético obtido a a 700ºC

Condutividade (mS/cm) a 700ºC		
Biochar Mag 1 - 700ºC	Biochar Mag 2 - 700ºC	Biochar Mag 3 - 700ºC
1,25	1,12	1,13
1,26	1,13	1,14
1,27	1,13	1,14
(1,26 ± 0,01)	(1,13 ± 0,002)	(1,14 ± 0,005)

Fonte: Autoria própria, 2025

Após a pirólise a 700 °C, os biochars magnéticos apresentaram condutividade de 1,26 (Mag 1), 1,13 (Mag 2) e 1,14 mS/cm (Mag 3), com baixa variação entre as amostras, indicando boa consistência. Embora menores que a da lama vermelha, os valores mostram que ainda há compostos iônicos presentes, evidenciando uma redução parcial da condutividade devido às alterações na estrutura iônica durante a pirólise.

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou a viabilidade da produção de biochar magnético a partir da combinação de biomassa de podas e lama vermelha via pirólise, gerando um material com propriedades promissoras para aplicações ambientais, especialmente na adsorção de

poluentes. O rendimento variou de 43,8% a 49,1% (400 °C) e de 27,81% a 31,24% (700 °C), com maiores perdas em temperaturas elevadas devido à degradação térmica e volatilização de compostos.

Observou-se redução do pH em relação à lama vermelha original, mantendo parcialmente sua alcalinidade, e diminuição da condutividade após a pirólise, especialmente a 700 °C, embora ainda com presença de compostos iônicos. A condutividade também aumentou com a redução da granulometria da biomassa.

O material apresentou propriedades magnéticas, confirmadas por testes com ímãs, evidenciando a incorporação de ferro e potencial para remediação ambiental. Assim, o processo se mostra uma alternativa sustentável para reaproveitamento de resíduos, produzindo um biochar funcionalizado com potencial aplicação ambiental e contribuindo para a redução de impactos associados ao descarte inadequado.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, M. L. P. et al. Red Mud from Brazil: Thermal Behavior and Physical Properties. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 51, n. 2, p. 775-777, 2012. DOI: 10.1021/ie201700k.

CHAIB, J. G. Produção de biochar por pirólise de resíduos verdes de um horto e avaliação do seu potencial no crescimento de Lactuca sativa. 2019. Dissertação (Mestrado em Energias Sustentáveis) – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2019.

JESUS, C. P. C. de. Caracterização da lama vermelha e sua aplicabilidade na adsorção do corante têxtil reativo azul 19. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru, 2011.

LEHMANN, J. et al. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. London: Earthscan, 2009.

LI, X. et al. Biomass-assisted magnetization of red mud using rice straw. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022.

LIRA, V. C. de. Produção e caracterização de agregados sintéticos utilizando resíduos do processo Bayer. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.

MAIA, C. M. B. F. Biochar: uma nova ferramenta no manejo de solos. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. (Anais do II Seminário de Atualização Florestal e XI Semana de Estudos Florestais).

OLIVEIRA, J. C. et al. Resposta morfofisiológica de plantas do Cerrado à aplicação de biochar de torta de filtro. Ciência Florestal, v. 33, n. 3, p. 1–20, 2023. https://doi.org/10.5902/1980509871838

PAN, J. R. et al. Reuse of red mud as a catalyst. Resources, Conservation and Recycling, v. 39, n. 1, p. 1–10, 2003.

SILVA, J. F. et al. Adsorção de Cd(II) por lama vermelha natural e com diferentes ativações. Geochimica Brasiliensis, v. 33, n. 1, p. 77–90, 2019.

SILVA FILHO, J. C. et al. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SOARES, D. C. O. et al. Uso do biochar e de bioestimulante na produção e qualidade de mudas de Sapindus saponaria L. Ciência Florestal, v. 31, n. 1, p. 106–122, 2021. https://doi.org/10.5902/1980509828677

SOUZA, Kelli Cristina de; ANTUNES, Maria Lúcia Pereira; COUPERTHWAITE, Sara Jane; CONCEIÇÃO, Fabiano Tomazini da; BARROS, Thalita Rangueri de; FROST, Ray. Adsorption of reactive dye on seawater-neutralised bauxite refinery residue. Journal of Colloid and Interface Science, [S.l.], v. 396, p. 210-214, jan. 2013. Elsevier Inc. DOI: [10.1016/j.jcis.2013.01.011]. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.01.011. Acesso em: 9 dez. 2025.

TOR, A. et al. Removal of color and COD from wastewater containing Reactive Black 5 using red mud. Desalination, v. 201, n. 1–3, p. 83–91, 2006.

TRAZZI, P. A. et al. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. Ciência Florestal, v. 28, n. 2, p. 875–887, 2018. https://doi.org/10.5902/1980509832128

WANG, K. et al. Mechanism of magnetizing Bayer red mud using biomass. Journal of Environmental Management, 2021.

WANG, S. et al. Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud. Water Research, v. 39, n. 1, p. 129–138, 2005.

WANG, S. et al. Characterization of red mud derived from a combined Bayer process and bauxite calcination method. Journal of Hazardous Materials, v. 154, p. 649–656, 2008.