

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CAROLINA BRITO COLLARES DA SILVA

**COAL CHAR ATIVADO IMPREGNADO COM NPK: AVALIAÇÃO COMO
FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DE FÓSFORO**

BAGÉ

2026

CAROLINA BRITO COLLARES DA SILVA

**COAL CHAR ATIVADO IMPREGNADO COM NPK: AVALIAÇÃO COMO
FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DE FÓSFORO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso
de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa,
como requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Rosa Costa Muniz

Bagé

2026

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

d586 da Silva, Carolina Brito Collares
COAL CHAR ATIVADO IMPREGNADO COM NPK: AVALIAÇÃO COMO
FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DE FÓSFORO / Carolina
Brito Collares da Silva.
50 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA, 2026.
"Orientação: Ana Rosa Costa Muniz Muniz".

1. coal char. 2. Impregnação de NPK. 3. Carbonização. 4.
Desenvolvimento vegetal . 5. Fertilizante. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

CAROLINA BRITO COLLARES DA SILVA

**COAL CHAR ATIVADO IMPREGNADO COM NPK: AVALIAÇÃO COMO
FERTILIZANTE DE LIBERAÇÃO CONTROLADA DE FÓSFORO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 09 de julho de 2026

Banca examinadora:

Profa. Dra. Ana Rosa Costa Muniz
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Marcilio Machado Moraes
UNIPAMPA

Engº Mario Valdnei H. Neitzel
SEIVAL SUL AGRONEGÓCIO LTDA



Assinado eletronicamente por **ANA ROSA COSTA MUNIZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/07/2026, às 10:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARIO VALNEI HELLWIG NEITZEL, Usuário Externo**, em 15/07/2026, às 13:16, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARCILIO MACHADO MORAIS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 17/07/2026, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2093726** e o código CRC **B5DCAF91**.

Referência: Processo nº 23100.011575/2026-72 SEI nº 2093726

AGRADECIMENTO

Agradeço à minha família por todo o apoio, incentivo e compreensão ao longo desta trajetória. Em especial, à minha irmã, Camila, que mesmo à distância sempre esteve presente, oferecendo apoio, conselhos e incentivo nos momentos mais difíceis. Aos meus pais, por todo o suporte e por acreditarem em mim durante essa caminhada.

À minha orientadora, Prof.^a Dra. Ana Rosa, pela orientação, paciência e confiança depositada em meu trabalho, além da oportunidade de desenvolvimento acadêmico e profissional ao longo deste período.

Agradeço também aos colegas e amigos do Laboratório de Energia e Carboquímica (LEC), pelos conhecimentos compartilhados, pelo auxílio nas atividades experimentais e pela convivência diária, que tornou essa jornada mais leve e enriquecedora.

Um agradecimento especial às minhas amigas Jennifer, Lilian e Alexia. À Jennifer, por compartilhar de perto os desafios, aprendizados e conquistas desta caminhada. À Lilian, por ter sido fundamental nos primeiros anos da graduação, contribuindo para que essa trajetória fosse mais leve e significativa. E à Alexia, pela amizade, apoio constante e por estar sempre disponível para ajudar, mesmo após a conclusão de sua graduação. Sou grata por todo o incentivo, companheirismo e pelos momentos compartilhados ao longo dessa jornada.

Por fim, agradeço a todos os professores, técnicos, colegas e amigos que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação acadêmica e para a realização deste trabalho.

RESUMO

O uso de materiais carbonáceos como suporte para nutrientes tem despertado interesse devido ao seu potencial de contribuir para a melhoria da qualidade do solo e para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis na agricultura. Embora diversos estudos abordem a utilização de *biochar* para esse fim, ainda são limitadas as pesquisas envolvendo o emprego de carvão mineral ativado como matriz para incorporação de nutrientes. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar um *coal char* ativado impregnado com nutrientes NPK (nitrogênio, fósforo e potássio), visando sua aplicação potencial como fertilizante de liberação gradual. O carvão mineral proveniente da jazida de Candiota (RS) foi caracterizado inicialmente e posteriormente foi submetido à carbonização e ativação física em atmosferas de nitrogênio e dióxido de carbono, sendo posteriormente impregnado com nitrato de potássio, sulfato de amônio e fosfato monoamônico (MAP). A caracterização do material compreendeu análises imediatas, determinação do poder calorífico superior, pH de carga zero e análise de área superficial específica pelo método BET. O carvão mineral apresentou teor de umidade de 12,20%, teor de cinzas de 50,2%, teor de materiais voláteis de aproximadamente 20,8% e poder calorífico superior de 2626 cal g⁻¹. O valor de pHPZC foi estimado em 5,9. A ativação promoveu aumento significativo da área superficial específica, passando de 38,67 m² g⁻¹ para 96,78 m² g⁻¹, além do aumento do volume total de poros de 0,0393 para 0,0721 cm³ g⁻¹. A determinação de fósforo por espectrofotometria UV-Vis evidenciou aumento expressivo da disponibilidade do nutriente após a ativação e impregnação do material. Nos ensaios de crescimento vegetal, os tratamentos contendo *coal char* impregnado apresentaram maior desenvolvimento das plantas quando comparados ao controle, com destaque para o aumento da altura e do número de folhas das mudas de alface. Os resultados obtidos demonstraram que o *coal char* ativado apresenta potencial para atuar como matriz de disponibilização de nutrientes, indicando sua viabilidade como fertilizante organomineral de liberação gradual.

Palavras-Chave: Organomineral; ativação; gaseificação; substâncias húmicas; sustentabilidade agrícola.

ABSTRACT

The use of carbonaceous materials as nutrient carriers has attracted interest due to their potential to improve soil quality and foster more sustainable agricultural alternatives. While numerous studies address the use of biochar for this purpose, research involving activated mineral coal as a matrix for nutrient incorporation remains limited. In this context, this study aimed to produce and characterize an activated coal char impregnated with NPK nutrients (nitrogen, phosphorus, and potassium) for potential application as a slow-release fertilizer. Mineral coal from the Candiota mine (RS) was initially characterized and subsequently subjected to carbonization and physical activation in nitrogen and carbon dioxide environment; it was then impregnated with potassium nitrate, ammonium sulfate, and monoammonium phosphate (MAP). Material characterization included proximate analysis, determination of the higher heating value (HHV) and pH at the point of zero charge (pHpzc), and specific surface area analysis using the BET method. The mineral coal exhibited a moisture content of 12.20%, an ash content of 50.2%, a volatile matter content of approximately 20.8%, and an HHV of 2626 cal g⁻¹. The pHpzc value was estimated at 5.9. Activation led to a significant increase in specific surface area—rising from 38.67 m² g⁻¹ to 96.78 m² g⁻¹—as well as an increase in total pore volume from 0.0393 to 0.0721 cm³ g⁻¹. Phosphorus determination via UV-Vis spectrophotometry revealed a marked increase in nutrient availability following the material's activation and impregnation. In plant growth assays, treatments containing impregnated coal char resulted in greater plant development compared to the control, particularly regarding the height and number of leaves in lettuce seedlings. The results obtained demonstrated that the activated coal char has the potential to serve as a nutrient-delivery matrix, indicating its viability as a slow-release organo-mineral fertilizer.

Keywords: Organo-mineral; activation; gasification; humic substances; agricultural sustainability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura Química do ácido húmico.....	21
Figura 2: FTIR do ácido húmico proveniente de carvão mineral de três diferentes jazidas	22
Figura 3: Fluxograma simplificado das etapas experimentais realizadas no desenvolvimento do carvão ativado impregnado com NPK.....	29
Figura 4: Reator tubular – LEC/UNIPAMPA	31
Figura 5: Incubadora B.O.D com fotoperíodo.....	33
Figura 6: Determinação do pH de carga zero (pHPZC) do carvão mineral por meio da variação de ΔpH em função do pH inicial da solução.....	35
Figura 7: Curva de calibração para determinação de fósforo por espectrofotometria UV-Vis.	38
Figura 8: Acompanhamento do desenvolvimento vegetal	41
Figura 9: Altura alface ao longo dos dias	42
Figura 10: Quantidade de folhas de alface ao longo dos dias	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação do carvão por rank.....	16
Tabela 2: Propriedades texturais obtidas por BET das amostras estudadas.....	36
Tabela 3: Teor de fósforo determinado nas amostras analisadas	38
Tabela 4: Fósforo estimado ao longo dos dias	40

LISTA DE SIGLAS

BC	<i>Biochar</i>
BDDT	<i>Brunauer, Deming, Deming, Teller</i>
BET	<i>Brunauer-Emmett-Teller</i> (Análise de área superficial específica)
CCA	Carvão da mina de Candiota (RS)
CCC	Carvão da Carbonífera Cambuí (PR)
CC	Coal Char
CF	Carbono Fixo
CML	Carvão de Minas do Leão RS
DRX	Análise por Difração de Raio X
FTIR	Análise por Infravermelho com Transformada de Fourier
LEC	Laboratório de Energia e Carboquímica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MV	Matéria Volátil
NPK	Nitrogênio, Fósforo, Potássio
PCL	Poder Calorífico
pH	Potencial hidrogeniônico
SH	Substâncias Húmicas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
2.1 Objetivo geral	14
2.2 Objetivos específicos.....	14
3 REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1 Carvão mineral	15
3.2 Carvão ativado.....	17
3.3 Carvão incombusto (<i>coal char</i> ativado) e seu potencial de aplicação no solo.....	19
3.4 Substâncias húmicas	20
3.5 Fertilizante organomineral.....	23
3.6 Métodos de caracterização de materiais carbonosos	24
3.6.1 Análise imediata	24
3.6.2 Análise de área superficial específica pelo método de BET	25
3.6.3 Calorimetria.....	26
3.6.4 pH de carga zero	26
3.6.5 Análise de NPK	27
4 METODOLOGIA.....	29
4.1 Caracterização carvão mineral.....	29
4.2 Carbonização	30
4.3 Impregnação do carvão ativado com NPK.....	31
4.4 Determinação do fósforo disponível.....	32
4.5 Avaliação do desenvolvimento vegetal	32
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
5.1 Caracterização do carvão mineral por análise imediata e poder calorífico	34
5.2 Determinação do pH de carga zero.....	35
5.3 Determinação da área superficial específica pelo método BET	36
5.4 Determinação do fósforo disponível.....	37
5.4.1 Curva de calibração	37
5.4.2 Teor de fósforo no solo e no <i>coal char</i> impregnado.....	38
5.4.3 Estimativa do fósforo extraível no solo ao longo do cultivo.....	39
5.5 Avaliação do desenvolvimento vegetal	41
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTURAS.....	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral, também denominado carvão de pedra, é uma rocha sedimentar de coloração escura formada a partir da transformação de matéria orgânica vegetal em ambiente anóxico ao longo de milhões de anos. Essa matéria vegetal acumulou-se em regiões alagadas, como pântanos, onde a baixa disponibilidade de oxigênio favoreceu sua preservação. Com o soterramento progressivo por sedimentos, ocorreram aumentos de pressão e temperatura, promovendo a expulsão de hidrogênio e oxigênio e resultando no enriquecimento em carbono, processo conhecido como carbonificação (Cosmo *et al.*, 2020).

Segundo Cosmo *et al.* (2020) a composição do carvão mineral é predominantemente carbonosa, contendo também oxigênio, hidrogênio, enxofre e frações minerais inorgânicas. Variações na composição da biomassa original e nas condições geológicas de formação resultam em diferentes tipos de carvão, classificados conforme seu grau de carbonificação, como turfa, linhito, hulha e antracito. O processamento do carvão mineral gera subprodutos com potencial de aplicação agrícola, como fertilizantes nitrogenados, gesso proveniente da dessulfurização e sulfato de amônio obtido na lavagem de gases, além de resíduos sólidos, como cinzas, que podem atuar como condicionadores do solo.

A agricultura moderna apresenta elevada dependência de fertilizantes minerais, especialmente aqueles à base de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK), essenciais para o aumento da produtividade agrícola. No entanto, essa dependência tem sido fortemente impactada por instabilidades geopolíticas recentes. A guerra entre Rússia e Ucrânia comprometeu significativamente as cadeias globais de suprimento, afetando o acesso a fertilizantes em mais de 130 países. A Rússia destaca-se como um dos principais exportadores mundiais, sendo responsável por cerca de 13% dos fertilizantes nitrogenados, 16% dos potássicos e 15% dos fertilizantes mistos, o que torna diversos países altamente dependentes dessas importações (Zhang *et al.*, 2023).

Além disso, países com forte atividade agrícola, como o Brasil, figuram entre os maiores importadores de fertilizantes, tornando-se particularmente vulneráveis a interrupções no fornecimento internacional. Essa dependência impacta diretamente a produção agrícola, uma vez que o uso de fertilizantes NPK pode aumentar significativamente a produtividade das culturas (Zhang *et al.*, 2023; Silva, 2023).

Além da dependência externa, outro fator crítico está relacionado à eficiência do uso desses insumos no solo. Em muitos sistemas agrícolas, fertilizantes químicos são aplicados de

forma excessiva e desbalanceada, com o objetivo de maximizar a produtividade, o que pode resultar na degradação da qualidade do solo e em impactos ambientais significativos (Reza *et al.*, 2025). Esse uso inadequado compromete a eficiência de aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, uma vez que parte significativa pode ser perdida por processos como lixiviação, volatilização e escoamento superficial. Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de estratégias que permitam otimizar a aplicação de fertilizantes, reduzir perdas e aumentar a eficiência agrônômica (Reza *et al.*, 2025).

Nesse cenário, materiais carbonosos obtidos por processos termoquímicos têm sido amplamente estudados devido à sua capacidade de modificar propriedades do solo e melhorar a eficiência do uso de nutrientes. Estudos demonstram que materiais como o *biochar* apresentam elevada capacidade de retenção de água e nutrientes, além de contribuírem para o aumento da capacidade de troca catiônica do solo, favorecendo a disponibilidade de elementos essenciais para o crescimento vegetal. Esses materiais apresentam alta capacidade de adsorção, permitindo a retenção de nutrientes tanto naturais quanto provenientes de fertilizantes, reduzindo perdas por lixiviação e aumentando a eficiência agrônômica. A redução da lixiviação de nutrientes é particularmente relevante, pois contribui tanto para a diminuição de impactos ambientais quanto para o melhor aproveitamento dos insumos aplicados ao solo (Amare, 2023).

Embora grande parte dos estudos esteja voltada ao uso de *biochar*, esses mecanismos podem ser considerados análogos ao comportamento de outros materiais carbonosos, como o *coal char* ativado, obtido a partir da ativação do carvão mineral com nitrogênio e dióxido de carbono. Esse material apresenta elevada porosidade, estabilidade química e alto teor de carbono fixo, características que favorecem sua aplicação como matriz para fertilizantes. Apesar do potencial apresentado, ainda são limitados os estudos voltados ao uso de *coal char* ativado derivado de carvão mineral, especialmente no que se refere à sua aplicação como matriz de liberação controlada de nutrientes no solo, evidenciando uma lacuna científica relevante (Thapa *et al.*, 2024).

Materiais derivados de carvão de baixo *rank* podem apresentar compostos orgânicos funcionalizados, como substâncias húmicas, que contribuem para a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Rosa *et al.*, 2009; Souza *et al.*, 2015). Dessa forma, o aproveitamento do *coal char* ativado como matriz para fertilizantes NPK apresenta-se como uma alternativa promissora para o aumento da eficiência do uso de nutrientes, redução de perdas e desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis.

Portanto, este trabalho dedica-se à avaliação experimental do *coal char* ativado como

matriz para fertilizantes NPK, contemplando sua produção, caracterização físico-química, impregnação de nutrientes e análise do comportamento em solo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial de um carvão mineral ativado e impregnado com nutrientes NPK como fertilizante de liberação gradual de fósforo para aplicação agrícola.

2.2 Objetivos específicos

- i. Produzir carvão mineral ativado por carbonização e ativação física.
- ii. Impregnar o carvão ativado com fontes de nitrogênio, fósforo e potássio.
- iii. Determinar o teor de fósforo extraível do carvão impregnado.
- iv. Avaliar o desenvolvimento inicial de plantas cultivadas em solo contendo o fertilizante produzido.
- v. Comparar o crescimento vegetal entre tratamentos com diferentes doses do fertilizante.

3 REVISÃO DE LITERATURA

A utilização de materiais carbonosos na agricultura tem se destacado como alternativa promissora para o aumento da eficiência do uso de fertilizantes e melhoria das propriedades do solo. Nesse contexto, o carvão mineral, tradicionalmente empregado como fonte energética, passa a ser investigado quanto ao aproveitamento de seus subprodutos, como o *coal char* ativado, obtido por pirólise. Esse material apresenta características físico-químicas relevantes, como elevada porosidade e presença de grupos funcionais superficiais, que favorecem a retenção e liberação de nutrientes no solo, indicando seu potencial como matriz para fertilizantes organominerais (Thapa *et al.*, 2024).

A revisão de literatura foi realizada por meio de busca no Portal de Periódicos da CAPES, utilizando as palavras-chave “char”, “fertilizer”, “NPK” e “pyrolysis”, além de “humic acid” e “organominerals”, em diferentes idiomas. Observou-se que a maior parte dos estudos está relacionada ao uso de *biochar* proveniente de biomassa vegetal, sendo ainda

limitada a quantidade de trabalhos voltados ao *coal char* derivado de carvão mineral. Essa lacuna científica reforça a importância do presente estudo, tendo como base, entre outros, o trabalho de Thapa *et al.* (2024).

3.1 Carvão mineral

O carvão mineral é um combustível fóssil de origem sedimentar, constituído predominantemente por carbono e formado a partir da transformação de resíduos vegetais submetidos a processos geológicos ao longo de milhões de anos. Sua formação ocorre em ambientes com baixa disponibilidade de oxigênio, onde a matéria orgânica é preservada e posteriormente submetida ao soterramento por camadas sucessivas de sedimentos. O aumento gradual da pressão e da temperatura promove alterações físicas e químicas na estrutura do material, resultando na eliminação de compostos voláteis e no enriquecimento do teor de carbono. Esse processo, denominado carbonificação ou carbonização natural, é responsável pela formação dos diferentes tipos de carvão mineral, que apresentam características distintas em função do seu grau de maturação geológica (Cosmo *et al.*, 2020).

Sua composição envolve predominantemente carbono, além de oxigênio, hidrogênio, enxofre e minerais que constituem a fração inorgânica. Como o precursor principal é a madeira, cujo teor médio inclui cerca de 50% de carbono, variações na composição da vegetação original e nas condições geológicas de formação resultam em carvões com diferentes teores de carbono (Cosmo *et al.*, 2020). O carvão classifica-se de acordo com o carbono fixo, cujo valor calorífico (expresso em Btu/lb) é calculado na ausência de matéria mineral. Carvões com alta classificação são assim definidos de acordo com o carbono fixo em base seca, já os de classificação mais baixa são determinados de acordo com o valor calorífico em base úmida. Dessa forma, a classificação do carvão mineral pode ser sistematizada conforme critérios técnicos padronizados, como apresentado na norma ASTM D388-19a (Quadro 1), que organiza os diferentes tipos de carvão de acordo com seu grau de carbonificação.

Tabela 1: Classificação do carvão por rank

Classe	Subgrupo	CF (%)	MV (%)	PCL (Btu/lb)	Poder aglomerante
Antracito	Meta-antracito	=> 98	2	-	Não aglomerante
	Semi-antracito	86-92	8-14		
	Antracito	92-98	2-8		
Betuminoso	Carvão betuminoso de baixa volatilidade	78-86	14-22		Comumente aglomerante
	Carvão betuminoso de média volatilidade	69-78	22-31		
	Carvão betuminoso A de alta volatilidade	<69	>31	=>14000	
	Carvão betuminoso B de alta volatilidade	-	-	13000-14000	Aglomerante
	Carvão betuminoso C de alta volatilidade	-	-	11500-13000 10500-11500	
Sub-betuminoso	Carvão sub-betuminoso A	-	-	10500-11500	Não aglomerante
	Carvão sub-betuminoso B	-	-	9500-10500	
	Carvão sub-betuminoso C	-	-	8300-9500	
Linhito	Linhito A	-	-	6300-8300	Não aglomerante
	Linhito B	-	-	<6300	

Fonte: Norma D388-19^a

Na região de Candiota/RS, os carvões apresentam significativa heterogeneidade petrográfica, que influencia diretamente seu comportamento tecnológico e potencial de aproveitamento energético. No setor de Seival, localizado na região de Candiota, no estado do Rio Grande do Sul, observa-se predominância de macerais do grupo vitrinita, seguidos por liptinita e inertinita, caracterizando esses depósitos como carvões húmicos. Contudo, a camada superior apresenta maior proporção de inertinita, indicando condições deposicionais

mais secas e maior exposição subaérea do turfeiro durante sua formação (Chaves *et al.*, 2018). O teor mineral é elevado, composto principalmente por argilas introduzidas por retrabalhamento associado a eventos.

Quanto ao grau de carbonificação, os valores de refletância da vitrinita revelam rank baixo, variando desde turfa até sub-betuminoso B, sem relação direta com a profundidade estratigráfica, evidenciando que variações faciológicas exercem maior influência no processo (Chaves *et al.*, 2018). Assim, a combinação entre baixo rank, elevado teor mineral e forte variabilidade petrográfica condiciona o comportamento industrial dos carvões de Candiota, afetando seu poder calorífico e a necessidade de beneficiamento.

Já a jazida do município de Figueira, situada no nordeste do Paraná, apresenta uma única camada de carvão, localizada a aproximadamente 40 m de profundidade. Essa camada é composta por duas porções, com espessuras de 20 cm e 40 cm, separadas por um nível de siltito carbonoso. As condições paleoambientais associadas a um ambiente estuarino contribuíram para que essa camada fosse depositada de maneira irregular. A associação paleoflorística identificada por Ricardi-Branco *et al.* (2003) no nível siltico intermediário confirma a composição dessa sequência, este carvão é classificado como sub-betuminoso (Souza., 2024).

Atualmente, o carvão mineral produzido no Brasil é empregado principalmente na geração de energia elétrica, e as reservas existentes são suficientes para abastecer o país por mais de 500 anos. Contudo, o carvão nacional destinado à siderurgia não atende aos requisitos técnicos necessários, o que torna indispensável a importação de todo o carvão desse tipo. Para ampliar seu uso, são necessários avanços científicos e tecnológicos combinados a processos de forte inovação (Souza., 2024).

Nesse contexto, o aproveitamento do carvão mineral vai além de sua utilização energética, sendo possível obter, por meio de processos como a pirólise, materiais carbonosos como o *coal char*, que apresentam propriedades favoráveis para aplicações no solo, especialmente como suporte para nutrientes.

3.2 Carvão ativado

O carvão ativado é um material carbonáceo amplamente utilizado em processos de adsorção devido à sua elevada área superficial específica, estrutura porosa desenvolvida e presença de grupos funcionais superficiais. Além da aplicação tradicional em tratamento de água e efluentes, esses materiais também vêm sendo estudados como suportes para catalisadores, eletrodos para armazenamento de energia e matrizes para retenção de nutrientes

(Zhao *et al.*, 2023b). A produção do carvão ativado ocorre, geralmente, em duas etapas principais: carbonização e ativação. A carbonização consiste na decomposição térmica do material precursor em atmosfera com baixa disponibilidade de oxigênio. Durante essa etapa ocorre a remoção de umidade e compostos voláteis, resultando no aumento do teor de carbono fixo e na formação do char carbonáceo. Além disso, a liberação dos compostos voláteis promove o surgimento de fissuras e cavidades que servirão como precursores para o desenvolvimento da estrutura porosa durante a etapa subsequente de ativação (Ge *et al.*, 2023a; Zhao *et al.*, 2023b).

Segundo Zhao *et al.* (2023b), a ativação corresponde ao processo responsável pelo desenvolvimento efetivo da estrutura porosa do material carbonizado. Esse processo pode ocorrer por rotas físicas ou químicas. Na ativação física são empregados agentes gasosos, como vapor d'água e dióxido de carbono, em temperaturas elevadas. Já na ativação química são utilizados agentes como hidróxido de potássio, ácido fosfórico ou cloreto de zinco, os quais promovem a formação de poros por meio de reações químicas com a matriz carbonosa. Entre os métodos de ativação física, a utilização de dióxido de carbono destaca-se pela maior facilidade de controle operacional e pela capacidade de promover o desenvolvimento de microporos. O mecanismo de ativação ocorre por meio da reação de gaseificação parcial do carbono, representada pela Equação 1.



Durante essa reação ocorre a remoção seletiva de carbono da estrutura sólida, ampliando o volume de poros e aumentando a área superficial específica do material. De acordo com Zhao *et al.* (2023b), a ativação com CO₂ favorece predominantemente a formação de microporos, enquanto a ativação com vapor tende a promover a formação de mesoporos e macroporos. Dessa forma, a escolha do agente ativante influencia diretamente a distribuição de tamanho de poros e, conseqüentemente, o desempenho do material em aplicações adsorptivas.

A eficiência da ativação é influenciada por diversos parâmetros operacionais, incluindo temperatura, tempo de residência e vazão do gás ativante. Temperaturas mais elevadas favorecem a reação entre o dióxido de carbono e a matriz carbonosa, promovendo maior desenvolvimento da porosidade. Entretanto, condições excessivamente severas podem provocar alargamento excessivo dos poros e redução do rendimento do material ativado (Zhao *et al.*, 2023b).

3.3 Carvão incombusto (*coal char* ativado) e seu potencial de aplicação no solo

O carbono presente no solo é um dos principais indicadores de sua qualidade e funcionalidade. A incorporação de materiais ricos em carbono orgânico contribui para a melhoria das propriedades químicas, físicas e biológicas do solo, promovendo a redução da densidade aparente, o aumento da capacidade de retenção de água e a diminuição da resistência à penetração (Thapa *et al.*, 2024). Esta resistência à penetração é a força que o solo exerce contra o avanço das raízes, sendo um parâmetro diretamente relacionado ao grau de compactação. Solos menos compactados oferecem menor resistência, permitindo maior crescimento radicular, melhor exploração de nutrientes e maior infiltração de água.

A aplicação de materiais carbonizados obtidos por pirólise, com elevado teor de carbono, como condicionantes do solo, pode elevar imediatamente o conteúdo de carbono orgânico, uma vez que esses materiais apresentam concentrações expressivas desse elemento. Dessa forma, o uso de corretivos orgânicos com alto teor de carbono representa uma estratégia promissora para o fortalecimento de práticas agrícolas sustentáveis (Thapa *et al.*, 2024).

Semelhante ao *biochar*, o *coal char* é um material obtido a partir da pirólise do carvão, resultando em um produto de carbono poroso, com ampla área superficial e baixa densidade aparente. Quando aplicado como corretivo do solo, o *coal char* tende a apresentar efeitos comparáveis aos proporcionados pelo *biochar*, promovendo o aumento da capacidade de retenção de água, do pH, da capacidade de troca catiônica e do teor de carbono orgânico, além de reduzir a resistência à penetração do solo. Por possuir baixa densidade, sua incorporação ao solo contribui para a redução da densidade aparente e o aumento da porosidade. Tanto o *coal char* quanto o *biochar* apresentam elevada resistência à biodegradação, o que lhes confere estabilidade prolongada no ambiente. Assim, a aplicação agrícola de *coal char* representa uma estratégia eficaz para reintegrar o carbono estável proveniente do carvão ao solo, promovendo melhorias duradouras em suas propriedades e potencializando a produtividade agrícola (Thapa *et al.*, 2024).

Segundo Sieradzka *et al.* (2020), a pirólise é um processo termoquímico amplamente utilizado na conversão de materiais carbonosos, caracterizado pela decomposição térmica na ausência ou em condições limitadas de oxigênio. Esse processo ocorre tipicamente em faixas de temperatura entre 300 e 700 °C, sendo conduzido em atmosfera inerte, como nitrogênio, de modo a evitar a combustão do material. Durante a pirólise, a matéria-prima sofre uma série de reações simultâneas, incluindo desidratação, descarboxilação e ruptura de ligações químicas,

resultando na formação de três frações principais: um produto sólido rico em carbono (*char*), uma fração líquida (bio-óleo) e uma fração gasosa composta por gases combustíveis, como monóxido de carbono, hidrogênio e metano (Sieradzka *et al.*, 2020).

As condições operacionais do processo, especialmente a temperatura, exercem influência direta sobre a distribuição dos produtos e as propriedades do material sólido obtido. O aumento da temperatura tende a favorecer a formação de um *char* com maior teor de carbono e menor conteúdo de oxigênio, devido à intensificação das reações de desidratação e descarboxilação (Fu *et al.*, 2025). Além disso, as transformações estruturais ocorridas durante a pirólise impactam diretamente propriedades como área superficial, porosidade e presença de grupos funcionais, características que são fundamentais para aplicações do *char* como material adsorvente ou como matriz para retenção de nutrientes no solo (Fu *et al.*, 2025).

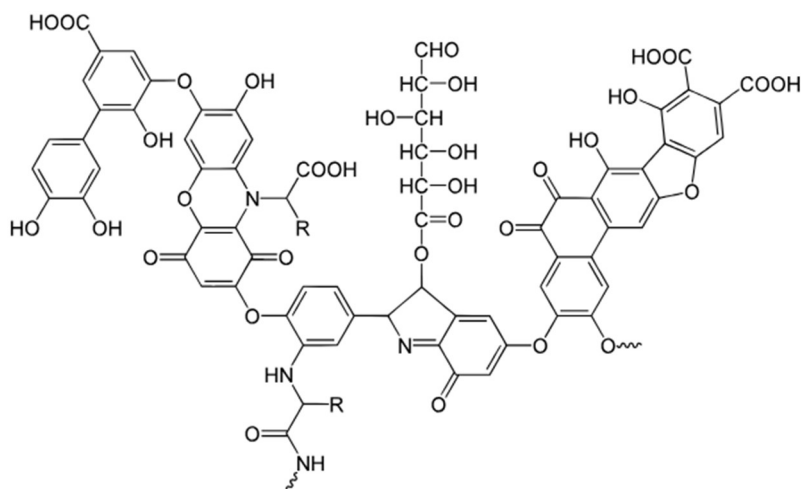
A aplicação de *coal char* em áreas agrícolas também proporciona benefícios ambientais significativos, especialmente por contribuir para o sequestro de carbono no solo ao longo de muitos anos. Ao converter o carvão em *coal char* para uso como corretivo do solo, em vez de queimá-lo em usinas termoeletricas, reduz a emissão de CO₂ para a atmosfera (Thapa *et al.*, 2024). Dessa forma, o uso agrícola do *coal char* representa uma alternativa sustentável e eficaz para mitigar as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, ao mesmo tempo em que melhora a qualidade e a produtividade do solo.

Nesse contexto, torna-se relevante compreender não apenas as propriedades físicas do *coal char*, mas também sua composição química, especialmente no que se refere à presença de substâncias húmicas, as quais estão diretamente relacionadas à retenção e disponibilidade de nutrientes no solo.

3.4 Substâncias húmicas

As substâncias húmicas são constituídas por centenas de compostos orgânicos, incluindo carboidratos, cujos derivados nitrogenados e anéis aromáticos condensados são substituídos por grupos funcionais como os carboxílicos e fenólicos (Figura 1). Essas substituições são especialmente relevantes, pois conferem às substâncias húmicas maior reatividade química e comportamento polietrolítico, favorecendo interações eletrostáticas, complexação e troca iônica (Chassapis *et al.*, 2009; Piccolo, 2002).

Figura 1: Estrutura Química do ácido húmico



Fonte: Naghizadeh *et al.* (2016 *apud* Khodadadi *et al.*, 2019).

Estas substâncias têm um papel positivo na agricultura, já que extratos ricos em nitrogênio atuam como fertilizantes e estimuladores de crescimento vegetal (Chassapis *et al.*, 2009). Quando incorporados ao solo, promovem melhorias nas propriedades físicas, na fertilidade e na capacidade de retenção de umidade, favorecendo também a disponibilidade de micronutrientes por meio de quelação com íons metálicos. Neste processo, os íons são ligados por grupos funcionais presentes na matéria orgânica, formando complexos estáveis que evitam sua precipitação e aumentam sua mobilidade e disponibilidade para as plantas (Chassapis *et al.*, 2009). A formação de complexos entre íons metálicos e polímeros húmicos aumenta a estabilidade desses íons, permitindo que permaneçam em solução e sejam absorvidos pelas plantas, reduzindo sua fragilidade à ação microbiana. As interações entre substâncias húmicas e íons metálicos podem ocorrer por meio de diferentes mecanismos, como troca iônica, adsorção superficial, quelação, coagulação e peptização. A intensidade dessas interações depende de fatores como o tamanho e a configuração da matéria húmica, as condições de pH e a força iônica da solução, bem como das propriedades químicas do metal e da proporção entre os componentes. Compreender a química desses complexos é essencial para elucidar o papel das substâncias húmicas na formação e estruturação dos solos, na disponibilidade de nutrientes e na mobilização e transporte de microelementos e elementos tóxicos em ambientes aquáticos (Chassapis *et al.*, 2009).

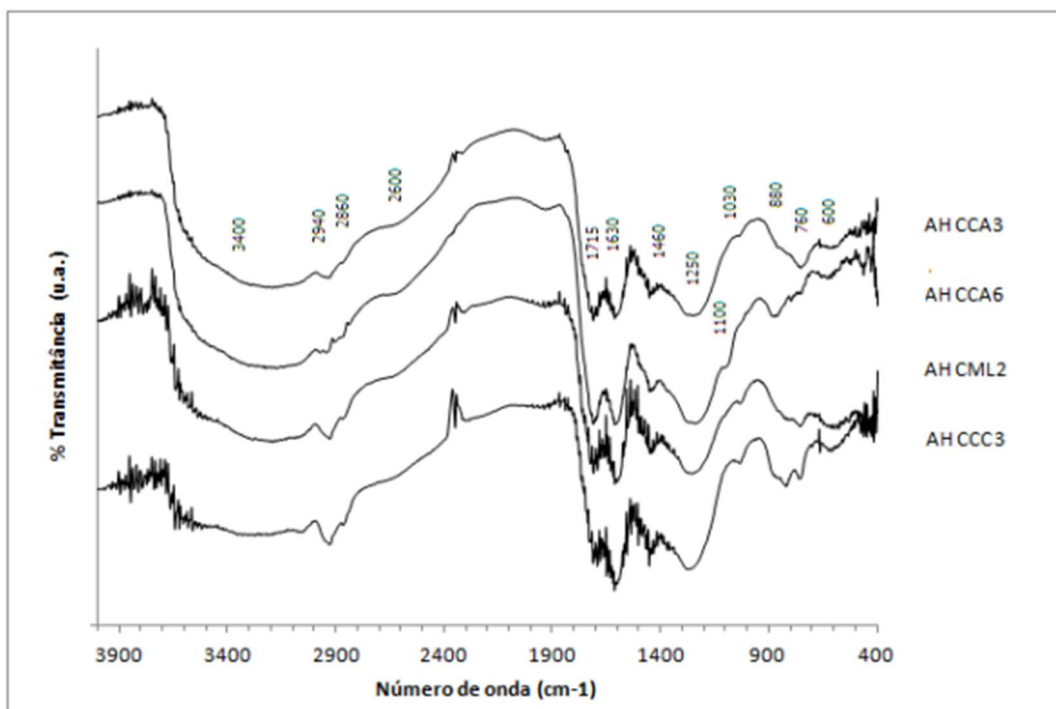
As substâncias húmicas (SH), compostas por ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina, representam entre 85% e 90% da matéria orgânica do solo e resultam de transformações bioquímicas de compostos como lignina, celulose, hemicelulose, açúcares e aminoácidos (Silva, Mendonça, 2007 *apud* ROSA *et al.*, 2009). Além disso, devido à

semelhança química entre o material de origem da matéria orgânica e o carvão, este também pode conter SH. Estudos apontam que carvões extraídos de diferentes minas do Rio Grande do Sul apresentam entre 10% e 26% dessas substâncias, constituindo uma fonte acessível e pouco poluente, com potencial de desempenhar funções benéficas às plantas (Silva *et al.*, 1999 *apud* ROSA *et al.*, 2009).

Os ácidos húmicos (AH) do carvão podem ser definidos como substâncias escuras derivadas desse material, solúveis em soluções alcalinas e insolúveis em meio ácido. A ocorrência e a quantidade de AH variam conforme o tipo de carvão, sendo mais comuns em carvões de baixo poder calorífico. Além disso, fatores como o grau de maturidade do carvão e os processos de beneficiamento influenciam no rendimento e nas características estruturais desses compostos (Souza *et al.*, 2014).

Souza *et al.* (2014) caracterizaram o ácido húmico proveniente de carvão mineral quanto à sua composição química, por FTIR, utilizando pastilhas de ácido húmico com KBr. Na Figura 2 são apresentados os resultados obtidos desta análise. Os carvões utilizados foram provenientes de três regiões: da Mina de Candiota (RS), de Minas do Leão (RS), e da Carbonífera Cambuí (PR).

Figura 2: FTIR do ácido húmico proveniente de carvão mineral de três diferentes jazidas



Fonte: Souza *et al.* (2014, p. 5).

O espectro FTIR confirmou a presença de ácidos húmicos, evidenciada por bandas

típicas de materiais húmicos, como O–H ($\sim 3400\text{ cm}^{-1}$), C–H alifático ($2940\text{--}2860\text{ cm}^{-1}$), carbonila e carboxilatos (1715 e 1630 cm^{-1}), além de sinais aromáticos, polissacarídeos e componentes minerais. Esse conjunto de absorções indica um material orgânico complexo e funcionalmente diverso (Souza *et al.*, 2014).

A presença de substâncias húmicas no solo está diretamente associada ao aumento da capacidade de troca catiônica e à redução de perdas por lixiviação, aspectos que são explorados na formulação de fertilizantes organominerais, os quais buscam otimizar a disponibilidade de nutrientes e promover maior sustentabilidade nos sistemas agrícolas.

3.5 Fertilizante organomineral

Martínez-Tarazona *et al.* (1990) propuseram o termo "organomineral" para descrever componentes presentes no carvão de baixo grau de carbonificação (carvão de baixo *rank*), que resultam da interação entre matéria orgânica e mineral durante o processo de carbonificação. Esses componentes são caracterizados por uma associação íntima entre a matéria orgânica e os minerais presentes no carvão, formando estruturas híbridas que influenciam suas propriedades físico-químicas.

Já Perry *et al.* (2007) propõem a introdução do termo “organomineral” para descrever produtos minerais cuja formação é induzida por subprodutos da atividade biológica, organismos mortos e em decomposição, ou compostos orgânicos não biológicos. Os autores diferenciam organominerais de biominerais, estes últimos formados pela absorção de elementos e sua incorporação em estruturas minerais sob controle biológico direto (Defarge *et al.*, 2009).

Em virtude da elevação da capacidade de troca catiônica, a incorporação de compostos orgânicos em fertilizantes organominerais contribui significativamente para o aumento da retenção de nutrientes no solo. A liberação desses nutrientes ocorre de forma gradual, reduzindo perdas por lixiviação e favorecendo seu melhor aproveitamento pelas plantas. Além disso, o componente orgânico proporciona benefícios adicionais, como a melhoria da estrutura e agregação do solo, aumento da capacidade de retenção de água e nutrientes, complexação de metais pesados, manutenção do equilíbrio do pH e estímulo à atividade de microrganismos benéficos, tornando o ambiente mais favorável ao desenvolvimento vegetal (Cardoso *et al.*, 2015).

Nesse contexto, materiais carbonosos obtidos por processos termoquímicos, como a

pirólise, têm sido amplamente estudados para aplicação em sistemas agrícolas. A pirólise consiste na decomposição térmica de materiais orgânicos na ausência ou em condições limitadas de oxigênio, resultando na formação de um material sólido rico em carbono, conhecido como char. As condições do processo, especialmente a temperatura, influenciam diretamente as propriedades do material obtido, como porosidade, área superficial e presença de grupos funcionais, características que favorecem sua interação com nutrientes e com o solo.

Na literatura, observa-se uma predominância de estudos relacionados ao uso de *biochar*, sendo ainda limitados os trabalhos voltados especificamente ao *coal char*. Dessa forma, o entendimento dos mecanismos de incorporação de nutrientes tem sido baseado em estudos com *biochar*, devido à similaridade de propriedades entre esses materiais carbonosos. O processo mais comum para incorporação de nutrientes nesses materiais consiste na impregnação com soluções contendo os elementos desejados. Kizito *et al.* (2019) descreveram um procedimento no qual o *biochar* é inicialmente seco a aproximadamente 80 ± 5 °C para redução da umidade. Em seguida, uma massa conhecida do material é misturada a uma solução nutritiva em proporção de 1:5 (m/V), sendo a mistura mantida sob agitação contínua por 48 horas, permitindo a sorção dos nutrientes. Após esse período, as fases sólida e líquida são separadas, e o material sólido é seco até atingir teor de umidade semelhante ao do solo seco ao ar.

De forma complementar, Khan *et al.* (ano *apud* Wang, 2022) descrevem que o *biochar* pode ser obtido por pirólise lenta em temperaturas entre 300 °C e 350 °C, sendo posteriormente submetido ao processo de impregnação com soluções contendo nutrientes como fósforo, potássio, cálcio e nitrogênio. A mistura é agitada por algumas horas para promover a adsorção dos nutrientes, seguida de filtração e secagem do material obtido.

3.6 Métodos de caracterização de materiais carbonosos

Neste tópico são descritas as técnicas analíticas utilizadas para a caracterização do *coal char* ativado, antes e após o processo de impregnação, encontradas na literatura da área. As análises realizadas incluem: análise imediata, calorimetria, determinação de área superficial (BET), determinação do pH de carga zero e quantificação de fósforo.

3.6.1 Análise imediata

O texto abaixo é baseado no estudo de Fallavena *et al.*, 2005, que se baseia no método

brasileiro MB-15 que é amplamente adotado para análise imediata do carvão, sendo reconhecido por sua padronização e confiabilidade na determinação dos principais parâmetros que influenciam o desempenho energético e ambiental do carvão. Neste método tem-se a determinação da umidade, material volátil, cinzas, e carbono fixo.

A determinação da umidade visa quantificar a água presente na amostra de carvão. O procedimento consiste na secagem da amostra em estufa a 105 °C até que se atinja massa constante. Este parâmetro é relevante, pois elevados teores de umidade reduzem o poder calorífico do carvão e dificultam sua ignição e combustão eficiente já a matéria volátil corresponde aos compostos orgânicos que se desprendem da amostra quando esta é aquecida a aproximadamente 950°C. A análise é realizada em cadinhos tampados, a fim de evitar a entrada de oxigênio. O teor de voláteis está diretamente relacionado à reatividade do carvão e à facilidade com que este se inflama. As cinzas representam o resíduo inorgânico remanescente após a combustão completa da amostra. Para sua determinação, o carvão é aquecido em atmosfera oxidante a cerca de 750°C. O conteúdo de cinzas é indicativo da presença de minerais e impurezas, influenciando diretamente o rendimento energético e o desgaste de equipamentos industriais. O carbono fixo é calculado da seguinte forma:

- O teor de carbono fixo (CF) é obtido pela diferença entre a soma dos teores de umidade (U), matéria volátil (MV) e cinzas (Cz).

Este parâmetro representa a fração de carbono que permanece na amostra após a eliminação da umidade e voláteis, sendo responsável pela maior parte da energia liberada durante a combustão.

3.6.2 Análise de área superficial específica pelo método de BET

A análise BET (*Brunauer–Emmett–Teller*) é uma técnica utilizada para determinar a área superficial específica e a porosidade de materiais sólidos por meio da adsorção física de gases na superfície da amostra. O método baseia-se na teoria da adsorção multicamadas, em que moléculas gasosas são adsorvidas sobre a superfície do material formando sucessivas camadas de adsorbato (Shimizu *et al.*, 2022).

Na análise BET, utiliza-se geralmente nitrogênio gasoso a -196°C como adsorbato, devido à sua estabilidade e capacidade de interagir fisicamente com a superfície do material. A quantidade de gás adsorvido em diferentes pressões relativas permite a construção de isotermas de adsorção, a partir das quais é possível calcular a área superficial específica do sólido. Além disso, o método considera que a adsorção ocorre inicialmente na forma de monocamada e posteriormente em multicamadas, permitindo a determinação das propriedades

texturais do material (Irwansyah *et al.*, 2023).

A técnica BET é amplamente empregada na caracterização de materiais porosos, carvões ativados, catalisadores, biomateriais e adsorventes, sendo importante para avaliar propriedades relacionadas à capacidade de adsorção e à estrutura superficial dos materiais. Além disso, parâmetros como volume e distribuição de poros podem ser obtidos a partir das isotermas de adsorção e dessorção de gases (Shimizu *et al.*, 2022).

3.6.3 Calorimetria

Segundo a norma NBR8628 de 10/2011, calorimetria é a técnica que mede a quantidade de calor liberado ou absorvido durante uma reação química ou mudança de estado físico. No caso do carvão, utiliza-se um calorímetro tipo bomba, um dispositivo fechado e pressurizado onde ocorre a combustão completa da amostra em atmosfera de oxigênio puro. A energia liberada aquece a água ao redor da bomba, e a variação de temperatura é usada para calcular o PCS (Poder Calorífico Superior) energia total liberada na combustão completa do carvão, incluindo a condensação do vapor de água.

Para o uso do calorímetro, primeiramente a amostra de carvão pirólise é previamente seca, moída e homogeneizada. A seguir uma quantidade precisa (geralmente entre 0,5 g e 1,0 g) é colocada em um cadinho metálico dentro da bomba calorimétrica. Após a introdução de oxigênio sob pressão, a combustão é iniciada eletricamente. O sistema é isolado termicamente para garantir que toda a energia liberada seja absorvida pela água e pelos componentes do calorímetro.

A determinação precisa do poder calorífico do carvão pirolisado é fundamental para estudos de conversão energética, controle de qualidade e desenvolvimento de tecnologias limpas.

3.6.4 pH de carga zero

O ponto de carga zero ($pH_{p,cz}$) de um material é o valor de pH no qual sua superfície apresenta carga elétrica líquida nula, sendo uma propriedade fundamental para compreender o comportamento de adsorção em função do pH. Para sua determinação, é utilizado o método dos 11 pontos, proposto por Regalbuto e Robles (2004).

O método consiste em preparar uma solução de eletrólito inerte (geralmente NaCl 0,1 mol L⁻¹) para manter a força iônica constante. A partir dessa solução, ajustam-se onze valores

diferentes de pH inicial, tipicamente entre 1 e 12, utilizando soluções de HCl e NaOH. Em seguida, uma massa fixa do adsorvente é adicionada a cada amostra (por exemplo, 0,05 g em 50 mL da solução) e os frascos são mantidos sob agitação controlada (cerca de 100 rpm) e temperatura constante (25 °C) durante um período de equilíbrio de aproximadamente 24 h.

Após o tempo de contato, mede-se o pH final de cada suspensão. Em seguida, constrói-se um gráfico de pH final *versus* pH inicial. O ponto de interseção onde $\Delta\text{pH} = 0$ indica o ponto de carga zero (pH_{pcz}) do material, correspondendo ao pH em que as cargas positivas e negativas da superfície se equilibram.

O conhecimento do pH_{pcz} é fundamental para compreender o comportamento de adsorção, troca iônica e interação entre a superfície do material e espécies químicas em solução. O método de 11 pontos é empregado justamente para obter esse valor com maior precisão, uma vez que utiliza várias amostras em diferentes faixas de pH, permitindo uma análise mais detalhada e confiável.

O método dos 11 pontos é amplamente utilizado por sua simplicidade, reprodutibilidade e capacidade de caracterizar o comportamento ácido-base de diferentes materiais adsorventes, incluindo carvões ativados, óxidos metálicos e biomateriais.

3.6.5 Análise de NPK

As análises de NPK (nitrogênio, fósforo e potássio) são fundamentais para avaliar a fertilidade e orientar o manejo adequado da adubação. Esses nutrientes possuem papel essencial no desenvolvimento vegetal, sendo o nitrogênio responsável pela formação de proteínas e clorofila, o fósforo relacionado à transferência de energia e ao desenvolvimento radicular, e o potássio atuante na regulação osmótica e no metabolismo de açúcares (Carvalho *et al.*, 2006). Dessa forma, a determinação quantitativa desses elementos é de grande importância para caracterização de materiais com potencial aplicação agrícola.

A determinação de nitrogênio pelo método de Kjeldahl (1883) baseia-se na conversão do nitrogênio orgânico em íon amônio por meio da digestão da amostra com ácido sulfúrico concentrado sob aquecimento. Após a digestão, ocorre a etapa de destilação, na qual a amônia formada é arrastada por vapor e coletada em solução de ácido bórico. Posteriormente, a solução é submetida à titulação com ácido padronizado, permitindo determinar a concentração de nitrogênio presente na amostra. Mesmo após adaptações ao longo dos anos, o método mantém elevada confiabilidade, precisão analítica e baixo custo operacional (Oliveira *et al.*, 2022).

As transformações químicas envolvidas no método de Kjeldahl, criado em 1883, ocorrem em três etapas principais: digestão, destilação e titulação. Na etapa de digestão, a matéria orgânica é degradada na presença de ácido sulfúrico concentrado e aquecido, convertendo o nitrogênio orgânico em sulfato de amônio. Posteriormente, durante a destilação, adiciona-se hidróxido de sódio para liberação da amônia, que é arrastada por vapor e captada em solução de ácido bórico. Por fim, na etapa de titulação, o complexo formado é titulado com ácido padronizado, permitindo determinar quantitativamente o teor de nitrogênio presente na amostra.

A determinação de fósforo por espectrofotometria utiliza soluções ácidas, como ácido clorídrico e ácido sulfúrico, para promover a extração do fósforo presente na amostra. Entre os extratores empregados destaca-se a solução Mehlich I, formada pela combinação desses ácidos, na qual o íon cloreto auxilia na manutenção do fósforo em solução após a extração (Oliveira *et al.*, 2022).

Após a extração, o fósforo reage com molibdato em meio ácido, formando o complexo fosfomolibdico. Em seguida, adiciona-se ácido ascórbico como agente redutor, originando o chamado azul de molibdênio, composto que apresenta elevada absorção na região do visível, próxima de 660 nm (Oliveira *et al.*, 2022). A intensidade da coloração formada é proporcional à concentração de fósforo presente na amostra.

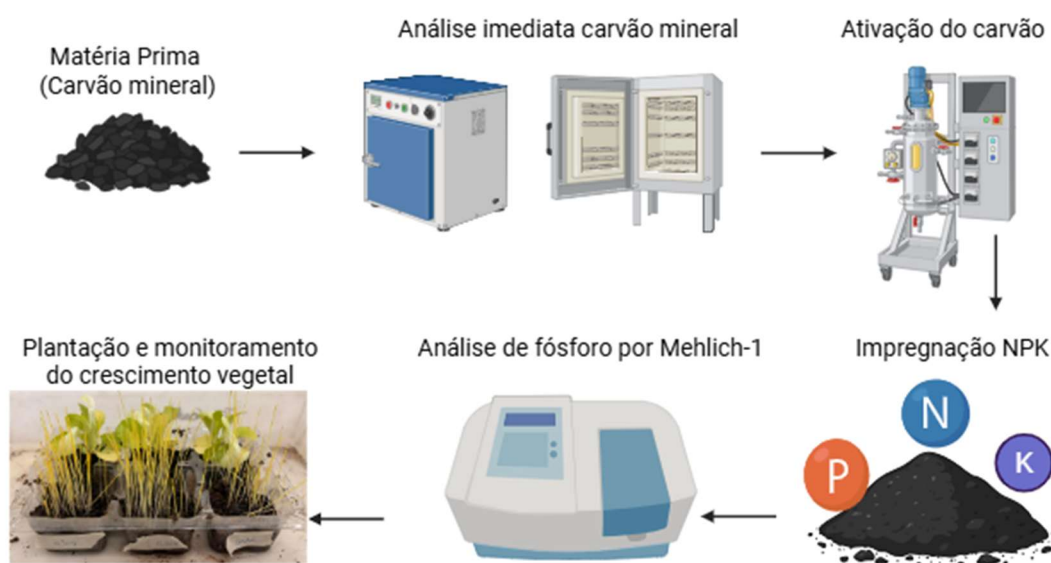
A quantificação é realizada em espectrofotômetro UV-Vis, equipamento que mede a absorção da radiação ultravioleta e visível pelas moléculas da amostra. O princípio da técnica baseia-se na absorção de energia pelos elétrons, promovendo sua excitação e permitindo correlacionar a absorbância obtida com a concentração do analito presente (Oliveira *et al.*, 2022).

Já para determinação de potássio em amostras de solo, fertilizantes e extratos obtidos por métodos de extração química pode ser realizada por fotometria de chama, uma das técnicas mais utilizadas para a quantificação desse nutriente. O método baseia-se na emissão de radiação característica pelos átomos de potássio quando submetidos a uma chama de alta temperatura. A intensidade da luz emitida é proporcional à concentração do elemento na amostra, permitindo sua quantificação por meio de curvas de calibração. Devido à sua rapidez, simplicidade operacional e boa sensibilidade para esse elemento, a fotometria de chama é amplamente empregada em laboratórios de análise de fertilidade do solo e fertilizantes (SOARES *et al.*, 2012).

4 METODOLOGIA

Baseado na revisão da literatura apresentada, passa-se a apresentar o procedimento experimental adotado neste trabalho. Ele foi dividido em etapas sequenciais, compreendendo a caracterização inicial do carvão mineral, a ativação física, a impregnação com nutrientes, a determinação de fósforo disponível e a avaliação preliminar do desenvolvimento vegetal. A Figura 3 apresenta, de forma resumida, as etapas realizadas ao longo do estudo.

Figura 3: Fluxograma simplificado das etapas experimentais realizadas no desenvolvimento do carvão ativado impregnado com NPK.



Fonte: Autora, composto com elementos gráficos de Canva (2026).

4.1 Caracterização carvão mineral

O carvão mineral utilizado neste estudo foi proveniente da jazida de Candiota, Rio Grande do Sul, sendo obtido junto ao Complexo Termelétrico Pampa Sul. Inicialmente, o material foi submetido à etapa de preparação granulométrica, visando a obtenção de uma amostra mais homogênea para os ensaios subsequentes.

Para isso, o carvão mineral *in natura* foi submetido ao peneiramento utilizando peneira Tyler 60 de diâmetro 0,250 mm. A fração retida foi selecionada para a realização dos experimentos de ativação, impregnação e caracterização. A padronização granulométrica foi realizada com o objetivo de minimizar a influência do tamanho de partícula nos processos de ativação e adsorção de nutrientes, garantindo maior reprodutibilidade dos resultados experimentais.

A caracterização do carvão mineral *in natura* foi realizada por meio da análise

imediate, compreendendo a determinação dos teores de umidade, cinzas, matéria volátil e carbono fixo, conforme as normas NBR 16586 (ABNT, 2017), NBR 16587 (ABNT, 2017), NBR 16508 (ABNT, 2016) e NBR 16702 (ABNT, 2018), respectivamente.

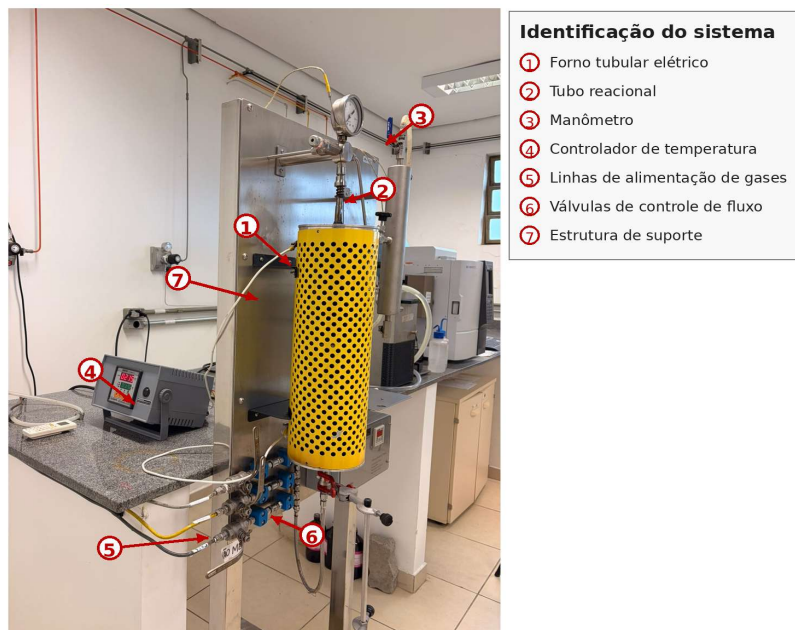
A determinação da umidade foi realizada mediante secagem das amostras em estufa a 105 °C até massa constante. O teor de cinzas foi determinado por combustão das amostras em mufla, permitindo a quantificação da fração mineral remanescente após a completa oxidação da matéria orgânica. A determinação da matéria volátil foi realizada por aquecimento das amostras em mufla a elevada temperatura, utilizando cadinhos tampados para evitar a entrada de oxigênio durante o ensaio.

O teor de carbono fixo foi determinado conforme a norma NBR 16702 (ABNT, 2018), sendo calculado a partir dos resultados obtidos para umidade, cinzas e matéria volátil. Adicionalmente, foi realizada a determinação do poder calorífico superior (PCS) em bomba calorimétrica, conforme a NBR 8628 (ABNT, 2011). O ensaio consistiu na combustão completa da amostra em atmosfera de oxigênio pressurizado, sendo o valor do PCS calculado a partir da variação de temperatura observada no sistema calorimétrico.

4.2 Carbonização

O estudo foi conduzido no Laboratório de Energia e Carboquímica (LEC) da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), utilizando carvão mineral proveniente da jazida de Candiota, Rio Grande do Sul, como matéria-prima. A produção do carvão ativado foi realizada em um reator tubular da marca Metalotec (Figura 4), por meio de ativação física em duas etapas. Inicialmente, a amostra foi submetida a aquecimento sob atmosfera de nitrogênio (N₂) a 600 °C durante 2 h, visando a remoção de compostos voláteis e ao desenvolvimento inicial da estrutura carbonácea. Posteriormente, a mesma amostra foi ativada sob fluxo de dióxido de carbono (CO₂), a 800 °C, durante 4 h. O CO₂ foi utilizado como agente ativante devido à maior facilidade de controle do processo e à sua capacidade de favorecer o desenvolvimento da estrutura porosa, especialmente de microporos, contribuindo para o aumento da porosidade e da área superficial específica do material. A seleção das temperaturas e dos tempos de tratamento foi baseada em faixas comumente empregadas na literatura para a carbonização e ativação física de materiais carbonáceos.

Figura 4: Reator tubular – LEC/UNIPAMPA



Fonte: Autora, 2026.

4.3 Impregnação do carvão ativado com NPK

A impregnação do carvão ativado foi realizada utilizando 10 g de amostra previamente ativada. Para o preparo da solução nutritiva foram utilizados nitrato de potássio (KNO_3), sulfato de amônio ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) e fosfato monoamônico (MAP), empregados como fontes de potássio, nitrogênio e fósforo, respectivamente.

Baseado em Kizito *et al.* (2019), a solução foi preparada na proporção de 1:5 (m/V), sendo posteriormente adicionada ao carvão ativado. A mistura foi mantida sob agitação contínua em *shaker* a 150 rpm durante 24 h, visando promover a adsorção dos nutrientes na superfície e no interior dos poros do material carbonáceo.

Após o período de impregnação, o material foi submetido à secagem em estufa a 60 °C por 24 h para remoção da umidade residual. Ao término da secagem, observou-se a formação de uma camada superficial de sais provenientes da cristalização dos nutrientes. Dessa forma, o material foi submetido à maceração em almofariz até completa homogeneização, visando garantir a distribuição uniforme dos sais impregnados na matriz carbonácea.

O material obtido foi posteriormente utilizado nas análises de fósforo disponível e nos ensaios de crescimento vegetal.

4.4 Determinação do fósforo disponível

A determinação do fósforo disponível no carvão ativado impregnado foi realizada com base na metodologia descrita por Oliveira et al. (2022), por meio da extração com solução Mehlich-1 e posterior quantificação por espectrofotometria UV-Vis. Inicialmente, foi construída uma curva de calibração utilizando soluções padrão de fósforo em concentrações conhecidas. As soluções foram submetidas ao mesmo procedimento analítico empregado para as amostras, envolvendo a formação do complexo fosfomolibdênio e posterior redução pelo ácido ascórbico, resultando na formação do composto conhecido como azul de molibdênio. A absorbância das soluções padrão foi determinada em espectrofotômetro UV-Vis no comprimento de onda de 660 nm. A partir dos valores de absorbância obtidos, foi construída a curva de calibração relacionando a concentração de fósforo com a resposta instrumental, sendo utilizada posteriormente para a determinação da concentração de fósforo presente nas amostras.

Para a extração do fósforo disponível, foram pesados 1,0 g de carvão ativado impregnado em Erlenmeyer, aos quais foram adicionados 10 mL da solução extratora Mehlich-1, composta por ácido clorídrico (HCl) e ácido sulfúrico (H₂SO₄) diluídos. A mistura foi submetida à agitação em *shaker* durante 5 min, utilizando a proporção de 1:10 (m/V) entre amostra e solução extratora.

Após a etapa de extração, as amostras foram filtradas para remoção das partículas sólidas, sendo o filtrado utilizado para a determinação espectrofotométrica do fósforo. Em seguida, foi realizada a adição dos reagentes colorimétricos necessários para a formação do azul de molibdênio, permitindo a quantificação do fósforo por comparação com a curva de calibração previamente obtida.

Os ensaios foram realizados em triplicata, sendo os resultados expressos como média e desvio padrão.

4.5 Avaliação do desenvolvimento vegetal

Com o objetivo de avaliar preliminarmente o potencial do carvão ativado impregnado com NPK como fertilizante, foram conduzidos ensaios de crescimento vegetal utilizando azevém (*Lolium multiflorum*) e mudas de alface (*Lactuca sativa*).

Os experimentos foram realizados em vasos contendo 60 g de solo sem adubo e baixo teor de fósforo. Para cada espécie vegetal foram estabelecidos três tratamentos: um tratamento controle, sem adição do material impregnado, e dois tratamentos contendo 0,20 g e 0,30 g de

carvão ativado impregnado com NPK, respectivamente. Dessa forma, foram preparados seis vasos experimentais, sendo três destinados ao cultivo de azevém e três ao cultivo de alface.

Após a preparação dos vasos, realizou-se a semeadura do azevém e o transplântio das mudas de alface. Em seguida, os recipientes foram acondicionados em uma incubadora B.O.D. com fotoperíodo, modelo BT 72/HR, da marca Biothec, sob condições controladas de temperatura e luminosidade. Durante todo o período experimental, a temperatura foi mantida em 25 °C e o fotoperíodo foi ajustado para ciclos de 12 horas de luz e 12 horas de escuro, proporcionando condições ambientais controladas e uniformes para o desenvolvimento das plantas. A incubadora utilizada durante o experimento é apresentada na Figura 5.

Figura 5: Incubadora B.O.D com fotoperíodo



Fonte: Autora, 2026.

A irrigação foi realizada inicialmente no momento do plantio e, posteriormente, de acordo com a necessidade hídrica observada ao longo do experimento. Os vasos foram avaliados diariamente quanto à umidade do solo e, quando este apresentava aspecto seco, realizou-se a aplicação de água por borrifação até que o solo atingisse condição visualmente

úmida. Durante o período de cultivo, foram monitorados parâmetros relacionados ao desenvolvimento vegetal, incluindo altura das plantas, número de folhas e aspectos visuais associados ao crescimento.

Adicionalmente, foram realizadas coletas de solo dos vasos para avaliação da disponibilidade e mobilidade dos nutrientes ao longo do período experimental.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Caracterização do carvão mineral por análise imediata e poder calorífico

A caracterização do carvão mineral proveniente da região de Candiota (RS) foi realizada por meio da análise imediata e da determinação do poder calorífico superior, visando avaliar suas propriedades físico-químicas e seu potencial como precursor para a produção de carvão ativado destinado à impregnação de nutrientes.

O teor médio de umidade obtido foi de $12,2\% \pm 0,05$. A presença de umidade está relacionada à água adsorvida na superfície e nos poros do material, influenciando diretamente o comportamento térmico do carvão e reduzindo a quantidade de energia disponível durante processos de combustão ou tratamento térmico. O valor encontrado é compatível com resultados reportados para o carvão mineral de Candiota. Kalkreuth et al. (2006) observaram teor de umidade de 16,4% para amostras desse carvão, valor da mesma ordem de grandeza do obtido neste trabalho. A diferença observada pode estar associada às características específicas da amostra e aos tratamentos térmicos aplicados ao material antes da realização das análises.

O teor médio de cinzas foi de $50,2\% \pm 0,2$ indicando elevada concentração de matéria mineral na amostra estudada. Esse resultado apresentou excelente concordância com os dados reportados para os carvões da jazida de Candiota. Segundo Kalkreuth *et al.* (2006), os carvões da região apresentam elevado conteúdo mineral, com teor médio de matéria mineral de 49,09%, sendo constituídos predominantemente por quartzo, argilominerais, feldspatos e óxidos metálicos. Da mesma forma, Silva *et al.* (2005) relatam que os carvões de Candiota apresentam rendimentos de cinzas superiores a 50%, característica considerada típica desse depósito carbonífero. Assim, o valor obtido experimentalmente neste trabalho confirma a representatividade da amostra utilizada em relação ao carvão explorado comercialmente na região de Candiota.

O teor médio de materiais voláteis foi de aproximadamente $20,8\% \pm 1,1$. Os materiais voláteis correspondem à fração orgânica liberada durante o aquecimento na ausência de

oxigênio, incluindo hidrocarbonetos leves, gases combustíveis e compostos oxigenados. Embora os trabalhos de Kalkreuth *et al.* (2006) e Silva *et al.* (2005) demonstrem a variabilidade composicional existente entre as diferentes camadas de carvão de Candiota, ambos classificam esses carvões como sub-betuminosos de baixo grau de carbonificação, característica compatível com o teor de voláteis observado neste estudo.

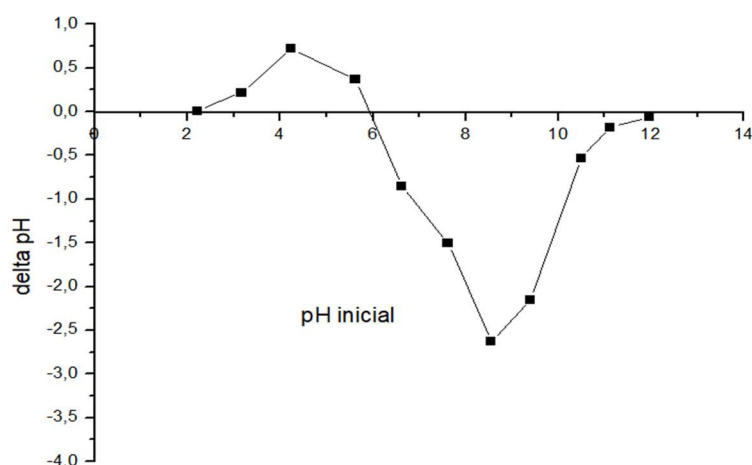
O poder calorífico superior médio determinado experimentalmente foi de 2626 cal g^{-1} , equivalente a aproximadamente $10,99 \text{ MJ kg}^{-1}$. Esse resultado é compatível com a classificação do carvão estudado como um carvão sub-betuminoso de baixo *grade* e com elevado teor de cinzas.

De modo geral, os resultados obtidos permitiram caracterizar o material estudado como um carvão sub-betuminoso de baixo *grade*, com elevada concentração de matéria mineral, reduzido teor de carbono fixo e baixo conteúdo energético. Apesar dessas características limitarem sua utilização como combustível de alto desempenho, elas não inviabilizam sua aplicação como precursor para a produção de carvão ativado.

5.2 Determinação do pH de carga zero

A Figura 5 apresenta a determinação do pH de carga zero (pHPZC) do carvão mineral por meio da variação de ΔpH em função do pH inicial da solução. O valor de pHPZC foi estimado em aproximadamente 5,9, correspondendo ao ponto em que a carga superficial líquida do material é igual a zero.

Figura 6: Determinação do pH de carga zero (pHPZC) do carvão mineral por meio da variação de ΔpH em função do pH inicial da solução.



Segundo Bernal, Giraldo e Moreno-Piraján (2018), o pH de carga zero é um dos parâmetros físico-químicos mais relevantes para processos de adsorção em meio aquoso, pois indica a carga líquida da superfície do adsorvente quando em contato com a solução.

O resultado obtido encontra-se compatível com o comportamento esperado para materiais carbonáceos contendo grupos funcionais oxigenados na superfície. Além disso, esse parâmetro apresenta grande importância para o presente estudo, uma vez que os nutrientes utilizados na impregnação se encontram predominantemente na forma iônica. O fósforo proveniente do fosfato monoamônico (MAP), por exemplo, encontra-se principalmente na forma de espécies aniônicas, como H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} . Dessa forma, em condições de pH inferiores ao pHPZC, a adsorção dessas espécies pode ser favorecida pela atração eletrostática entre os ânions fosfato e os sítios positivos presentes na superfície do carvão.

Essa capacidade de interação com espécies iônicas sugere que o material pode atuar como reservatório de nutrientes, favorecendo sua retenção na estrutura carbonácea e reduzindo perdas imediatas para o meio. Assim, o valor de pHPZC determinado, aliado às características superficiais do carvão, indica potencial para aplicação do material como suporte adsorvente de nutrientes em sistemas de fertilização de liberação gradual.

5.3 Determinação da área superficial específica pelo método BET

Inicialmente, o carvão mineral foi submetido a um processo de pirólise, originando o material denominado *coal char*. Posteriormente, uma fração desse material foi submetida à ativação física em atmosfera controlada, visando promover o desenvolvimento da estrutura porosa e aumentar a área superficial específica. Para fins de comparação, foram realizadas análises texturais tanto do *coal char* obtido após a pirólise quanto do material após a etapa de ativação, denominado neste trabalho como *coal char* ativado. Dessa forma, a avaliação dos parâmetros obtidos por adsorção física de nitrogênio permitiu verificar a influência da ativação sobre as propriedades texturais do material carbonáceo. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos no BET, como sua área superficial e volume de poros e microporos.

Tabela 2: Propriedades texturais obtidas por BET das amostras estudadas

Parâmetro	Continua	
	<i>Coal char</i>	<i>Coal char</i> ativado
Área superficial BET (m^2/g)	38,67	96,78
Área DFT (m^2/g)	41,69	66,64

Conclusão

Volume total de poros (cm³/g)	0,0393	0,0721
Volume de microporos HK (cm³/g)	0,0158	0,0453

Fonte: Autora, 2026.

Os resultados apresentados na Tabela 2 demonstram que o processo de ativação promoveu o desenvolvimento da estrutura porosa do *coal char*. A área superficial específica BET aumentou de 38,67 para 96,78 m²/g, enquanto o volume total de poros passou de 0,0393 para 0,0721 cm³/g. Também foi observado um aumento expressivo no volume de microporos, de 0,0158 para 0,0453 cm³/g, indicando que a ativação favoreceu especialmente o desenvolvimento da microporosidade.

Essa característica é corroborada pelos valores de diâmetro modal dos poros, de 1,61 nm para o *coal char* e 1,69 nm para o *coal char* ativado. Como ambos os valores são inferiores a 2 nm, os materiais apresentam predominância de microporos. Apesar do comportamento das isotermas ter sido associado ao tipo II, a análise conjunta das isotermas e dos parâmetros texturais evidencia a presença de microporosidade nas amostras. Dessa forma, o aumento da área superficial e do volume de poros promovido pela ativação resulta em maior superfície disponível para interação com os nutrientes, justificando a escolha do *coal char* ativado para a etapa de impregnação com NPK.

5.4 Determinação do fósforo disponível

5.4.1 Curva de calibração

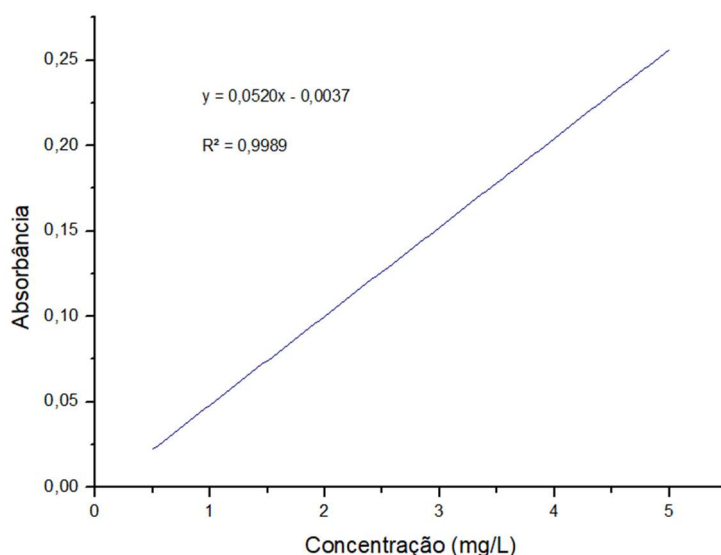
A Figura 6 apresenta a curva de calibração na faixa de 0,5 a 5,0 mg/L obtida para a determinação de fósforo por espectrofotometria UV-Vis. Observou-se comportamento linear entre a concentração de fósforo e os valores de absorbância obtidos, resultando em coeficiente de correlação de Pearson (r) igual a 0,9988 e coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) de 0,99741, evidenciando excelente ajuste do modelo linear aos dados experimentais.

A equação da reta obtida foi $y = 0,0520x - 0,0037$, sendo utilizada para o cálculo das concentrações de fósforo presentes nas amostras analisadas. A análise de variância demonstrou significância estatística da regressão ($F = 2693,65$; $p = 3,43 \times 10^{-9}$), confirmando a adequação do modelo para a quantificação de fósforo.

Além disso, a baixa soma dos quadrados dos resíduos ($9,78 \times 10^{-5}$) indica reduzida dispersão dos pontos experimentais em relação à reta ajustada. Dessa forma, a linearidade

observada sugere boa precisão analítica na faixa de concentrações estudada, conferindo confiabilidade aos resultados obtidos para o monitoramento da disponibilidade de fósforo ao longo do período experimental.

Figura 7: Curva de calibração para determinação de fósforo por espectrofotometria UV-Vis.



Fonte: Autora, 2026.

5.4.2 Teor de fósforo no solo e no *coal char* impregnado

Após a obtenção da curva de calibração, foi realizada a determinação do teor de fósforo presente no solo utilizado no experimento e no carvão ativado impregnado com NPK. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Foi realizada uma primeira impregnação antes da ativação, a amostra apresentou absorbância de 0,021, valor próximo ao limite inferior da curva de calibração, indicando baixa concentração de fósforo extraível. Após a nova etapa de impregnação, as absorbâncias das amostras foram superiores à faixa linear da curva analítica, evidenciando aumento expressivo da presença de fósforo, embora sem possibilidade de quantificação precisa devido à ausência de diluição das amostras.

Tabela 3: Teor de fósforo determinado nas amostras analisadas

Amostra	Absorbância média	Fator de diluição	Teor de fósforo (mg kg ⁻¹)
Solo	0,113	10	224,42
<i>coal char</i> + NPK	0,043	100	898,08

Fonte: Autora, 2026.

Conforme observado na Tabela 1, o solo utilizado apresentou concentração de fósforo de 224,42 mg kg⁻¹, enquanto o carvão ativado impregnado apresentou concentração de 898,08 mg kg⁻¹. Dessa forma, o teor de fósforo presente no material impregnado foi aproximadamente quatro vezes superior ao encontrado no solo inicial.

Embora a absorbância medida para a amostra de *coal char* + NPK tenha sido inferior à observada para o solo, esse comportamento é explicado pelo maior fator de diluição aplicado à amostra impregnada. Enquanto o extrato do solo foi diluído 10 vezes, a amostra de carvão impregnado foi diluída 100 vezes, resultando em uma absorbância menor, porém em uma concentração final superior após a correção pelo fator de diluição.

Os resultados obtidos indicam que a ativação física realizada em atmosfera de nitrogênio e dióxido de carbono, seguida da impregnação com fosfato monoamônico, foi eficiente na incorporação de fósforo ao material carbonáceo. A elevada concentração observada no carvão impregnado sugere que o material apresenta potencial para atuar como matriz de suporte de nutrientes, possibilitando sua posterior liberação no sistema solo-planta.

Esse resultado é particularmente relevante para o presente trabalho, pois demonstra que o carvão ativado foi capaz de reter fósforo em sua estrutura, justificando o monitoramento da disponibilidade do nutriente no solo ao longo do período experimental e sua relação com o desenvolvimento das plantas.

5.4.3 Estimativa do fósforo extraível no solo ao longo do cultivo

Os resultados obtidos na Tabela 2 para as amostras de solo demonstraram a presença de fósforo em todos os tratamentos avaliados ao longo do período experimental. As absorbâncias médias observadas variaram entre 0,347 e 0,845, indicando elevada disponibilidade do nutriente nas amostras analisadas. Nos primeiros dias de cultivo, foram registrados os maiores valores de absorbância, destacando-se as amostras AZ1 0,20G (0,845), AL1 0,30G (0,840) e AZ1 0,30G (0,792). Nos períodos subsequentes, observou-se redução gradual dos valores obtidos, com absorbâncias entre 0,347 e 0,653 no terceiro dia e entre 0,411 e 0,510 no quinto dia. Esse comportamento sugere a utilização progressiva do fósforo pelas plantas e/ou sua redistribuição no sistema solo-fertilizante ao longo do cultivo.

As concentrações de fósforo foram estimadas a partir da equação da curva de calibração. No entanto, algumas amostras apresentaram absorbâncias superiores à faixa dos padrões utilizados, sendo necessário realizar a extrapolação da curva analítica para obtenção dos

valores estimados. Ressalta-se que, devido à quantidade limitada de amostra disponível, não

Tabela 4: Fósforo estimado ao longo dos dias

Amostra	Absorbância média	P estimado (mg L-1)
Alface dia 1 Controle	0,712	13,763
Alface dia 1 0,20 g	0,762	14,725
Alface dia 1 0,30g	0,84	16,225
Azevém dia 1 Controle	0,747	14,436
Azevém dia 1 0,20 g	0,845	16,321
Azevém dia 1 0,30 g	0,792	15,301
Alface dia 3 Controle	0,5	9,686
Alface dia 3 0,20 g	0,483	9,359
Alface dia 3 0,30g	0,525	10,167
Azevém dia 3 Controle	0,347	6,744
Azevém dia 3 0,20 g	0,498	9,648
Azevém dia 3 0,30 g	0,653	12,628
Alface dia 5 Controle	0,46	8,917
Alface dia 5 0,20 g	0,451	8,744
Alface dia 5 0,30g	0,451	8,744
Azevém dia 5 Controle	0,51	9,878
Azevém dia 5 0,20 g	0,411	7,975
Azevém dia 5 0,30 g	0,463	8,975

Fonte: Autora, 2026.

foi possível realizar nova diluição e repetir a leitura de absorbância. Assim, os resultados são apresentados como estimativas, sendo recomendada a repetição do experimento em trabalhos futuros, com diluições adequadas para enquadramento das leituras dentro da faixa linear da curva de calibração, obedecendo a lei de Beer-Lambert.

De maneira geral, os tratamentos contendo fertilizante apresentaram respostas analíticas superiores às observadas para as amostras controle, evidenciando a disponibilidade do nutriente no solo durante todo o período avaliado. A manutenção de valores expressivos de absorbância mesmo após cinco dias de cultivo indica que o material impregnado foi capaz de

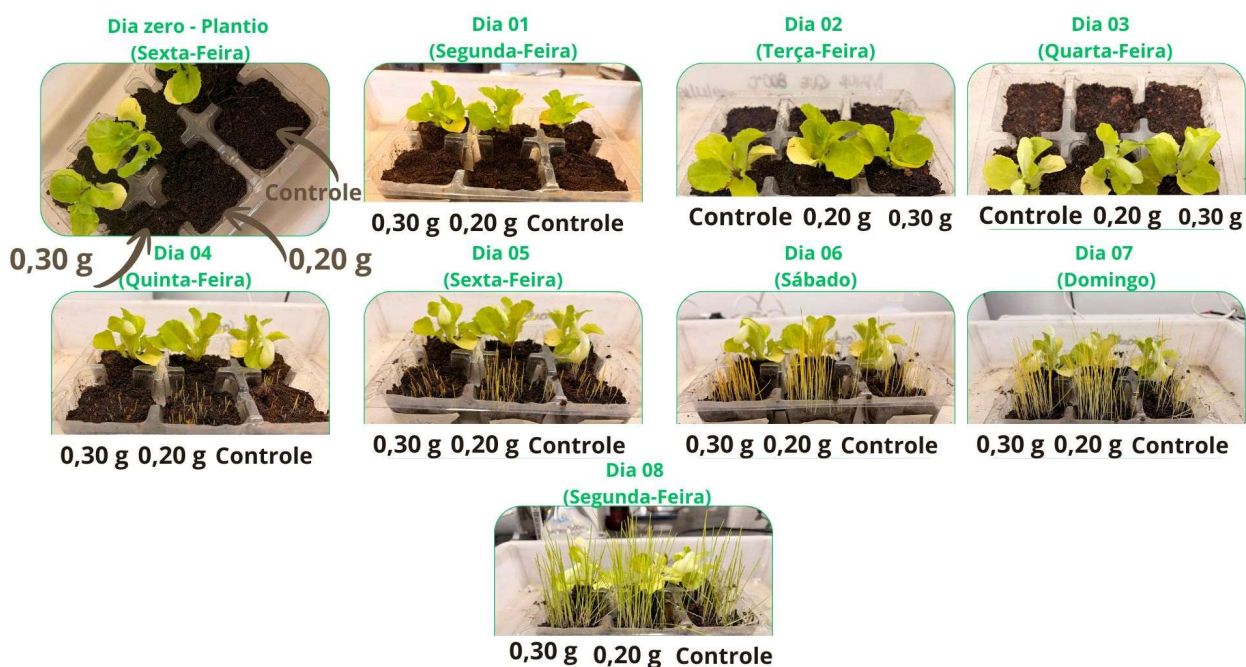
disponibilizar fósforo ao sistema, contribuindo para o desenvolvimento das plantas observado nos ensaios de crescimento.

5.5 Avaliação do desenvolvimento vegetal

O desenvolvimento das culturas foi acompanhado diariamente por meio de registros fotográficos e da medição da altura e do número de folhas das mudas de alface. Para o azevém, foi realizado acompanhamento visual da emergência e do estabelecimento das plântulas ao longo do período experimental.

A Figura 7 apresenta a evolução visual das culturas ao longo do período experimental (8 dias). Observou-se que as mudas de alface permaneceram viáveis durante todo o período de avaliação, apresentando expansão foliar e crescimento contínuo. A emergência das plântulas de azevém foi observada no dia 4 indicado na figura após a semeadura, sendo seguida por aumento progressivo da densidade de plantas nos dias subsequentes

Figura 8: Acompanhamento do desenvolvimento vegetal

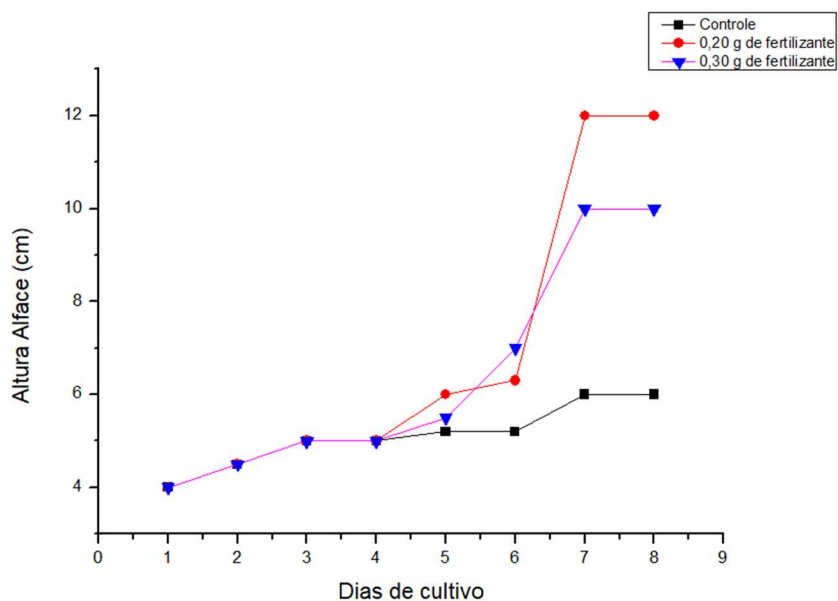


Fonte: Autora, composto com elementos gráficos de Canva (2026).

Os resultados de altura e número de folhas da alface, serão apresentados nas Figuras 8 e 9 respectivamente, demonstram o desenvolvimento vegetativo das mudas durante o período

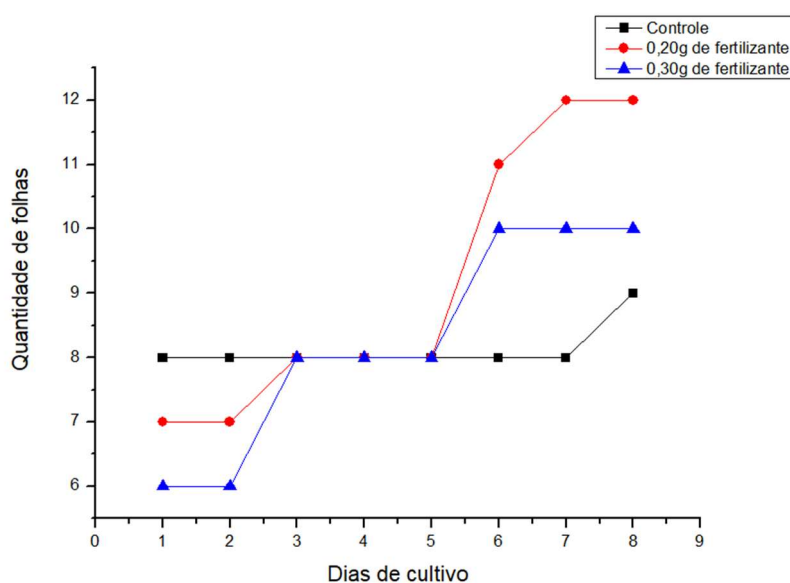
experimental. De maneira geral, não foram observados sintomas severos de fitotoxicidade, como necrose intensa, murchamento ou morte das plantas, indicando que a aplicação do carvão ativado impregnado com NPK não comprometeu o desenvolvimento inicial das culturas.

Figura 9: Altura alface ao longo dos



Fonte: Autora, 2026.

Figura 10: Quantidade de folhas de alface ao longo dos dias



Fonte: Autora, 2026.

As Figuras 8 e 9 apresentam a evolução da altura e do número de folhas das plantas de alface submetidas aos diferentes tratamentos durante o período experimental. Observou-se crescimento em todos os tratamentos ao longo dos oito dias de cultivo, indicando que as condições adotadas foram adequadas para o desenvolvimento das plantas.

Em relação à altura das plantas, verificou-se que o tratamento contendo 0,30 g de fertilizante promoveu o maior crescimento, atingindo 7,0 cm ao final do experimento. O tratamento com 0,20 g apresentou altura final de 6,5 cm, enquanto o controle atingiu 6,0 cm. Esses resultados sugerem que a aplicação do fertilizante favoreceu o desenvolvimento vegetativo da alface, sendo o efeito mais pronunciado na maior dosagem avaliada.

Quanto ao número de folhas, todos os tratamentos apresentaram aumento ao longo do período experimental. Entretanto, o tratamento contendo 0,20 g de fertilizante resultou no maior número de folhas ao final do experimento, alcançando 12 folhas, enquanto os tratamentos com 0,30 g e controle atingiram 10 e 9 folhas, respectivamente. Esse comportamento indica que, embora a maior dosagem tenha favorecido o crescimento em altura, a dosagem intermediária proporcionou maior emissão de folhas. De modo geral, os resultados demonstram que a aplicação do fertilizante influenciou positivamente o desenvolvimento das plantas de alface em comparação ao tratamento controle. Além disso, os dados sugerem que diferentes dosagens podem afetar de maneira distinta os parâmetros de crescimento avaliados, uma vez que a maior altura foi observada no tratamento com 0,30 g, enquanto o maior número de folhas foi obtido com a aplicação de 0,20 g de fertilizante. Esse resultado pode estar relacionado às diferentes demandas fisiológicas da planta, visto que a disponibilidade de nutrientes pode influenciar de forma distinta o crescimento vegetativo e a emissão de folhas. Segundo a Embrapa Hortaliças, a adequada disponibilidade de nutrientes é um dos fatores determinantes para o desenvolvimento da alface, refletindo diretamente em características como crescimento e formação foliar (FILGUEIRA, 2013).

Em relação ao azevém, o acompanhamento visual e os registros fotográficos apresentados na Figura 8 permitiram observar a emergência das plântulas a partir do quarto dia de cultivo, com crescimento mais evidente a partir do quinto dia. Nos dias subsequentes, observou-se o desenvolvimento contínuo das plantas em todos os tratamentos. Além da avaliação visual, as medidas de altura apresentadas na Figura Y indicaram maior crescimento no tratamento com 0,20 g de fertilizante ao longo do período experimental. Esse comportamento está de acordo com o padrão de crescimento da espécie, que apresenta rápida resposta ao suprimento de nutrientes durante as fases iniciais de desenvolvimento, refletindo no crescimento da parte aérea e no acúmulo de biomassa (FONTANELI; SANTOS;

FONTANELI, 2012). Dessa forma, os resultados preliminares sugerem que o fertilizante produzido não apresentou efeitos visuais prejudiciais ao estabelecimento das plantas e demonstrou potencial para favorecer seu desenvolvimento inicial.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho permitiu avaliar o potencial de utilização de um *coal char* ativado impregnado com nutrientes NPK como fertilizante organomineral de liberação gradual. Os resultados da caracterização demonstraram que o carvão mineral proveniente da jazida de Candiota apresenta elevado teor de cinzas e baixo poder calorífico, características que limitam seu uso energético, mas não impedem sua aplicação como precursor de materiais carbonáceos para fins agrícolas.

A ativação física realizada em atmosfera de nitrogênio e dióxido de carbono promoveu modificações significativas na estrutura do material. A área superficial específica aumentou de 38,67 para 96,78 m² g⁻¹, acompanhada por incremento do volume total de poros e do volume de microporos, evidenciando o desenvolvimento da porosidade e a criação de sítios favoráveis à retenção de nutrientes.

A análise de fósforo demonstrou que a impregnação foi eficiente, uma vez que as amostras apresentaram concentrações superiores às observadas na etapa inicial do estudo.

Nos ensaios de crescimento vegetal, os tratamentos contendo *coal char* impregnado apresentaram desempenho superior ao tratamento controle, especialmente no cultivo de alface, indicando que o material foi capaz de disponibilizar nutrientes ao longo do período experimental. Além disso, o desenvolvimento contínuo do azevém após a emergência e as maiores alturas observadas nos tratamentos fertilizados reforçam a compatibilidade do material com o sistema solo-planta. Em conjunto, esses resultados sugerem que o *coal char* impregnado atuou como fonte de nutrientes para as culturas avaliadas, demonstrando potencial para aplicação agrícola e contribuindo para o aproveitamento de materiais carbonáceos de origem mineral no desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis de fertilização.

Por fim, conclui-se que a ativação física foi fundamental para aumentar a área superficial e a capacidade de incorporação de nutrientes do *coal char*, tornando o material promissor para utilização como fertilizante organomineral. Estudos futuros

envolvendo períodos mais longos de cultivo, avaliação dos teores de nitrogênio e potássio, além de ensaios agrônômicos em maior escala, poderão contribuir para a validação e otimização da aplicação desse material em sistemas agrícolas.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTURAS

Embora os resultados obtidos neste trabalho tenham demonstrado o potencial do coal char ativado e impregnado com NPK, diferentes aspectos ainda podem ser investigados em estudos futuros. Recomenda-se avaliar períodos mais longos e diferentes ciclos de liberação dos nutrientes, bem como investigar a cinética e os mecanismos envolvidos nesse processo. Além do fósforo, estudos posteriores podem avaliar a liberação de outros nutrientes presentes no NPK, especialmente nitrogênio e potássio, assim como testar diferentes concentrações e proporções de fertilizante e otimizar as condições de impregnação. Também se sugere investigar a influência das condições de ativação e das propriedades texturais do material sobre sua capacidade de retenção e liberação de nutrientes. Outra possibilidade consiste em avaliar o coal char como condicionador de solo, considerando seus efeitos sobre propriedades físicas e químicas, como retenção de água, porosidade, densidade aparente, pH e capacidade de troca catiônica. Estudos em diferentes tipos de solo e culturas agrícolas, bem como avaliações de perdas de nutrientes por lixiviação e da estabilidade do material no solo em longo prazo, também são recomendados. Por fim, a realização de ensaios em condições de campo e estudos de viabilidade econômica e ambiental são etapas importantes para avaliar a possibilidade de aplicação prática dessa tecnologia na agricultura.

REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 16702: Carvão mineral – Determinação do carbono fixo – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT. NBR 16586: Carvão mineral – Determinação de cinzas – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT. NBR 16587: Carvão mineral – Determinação de materiais voláteis – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ABNT. NBR 16508: Carvão mineral – Teor de umidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT. NBR 8628: Carvão mineral – Determinação do poder calorífico – Método de ensaio por calorimetria. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AMARE, Ermias Misganaw. Biochar soil amendment: effect on soil, crop performance, and disease resistance. **International Journal on Food, Agriculture and Natural Resources**, 2023. BERNAL, V.; GIRALDO, L.; MORENO-PIRAJÁN, J. C. Physicochemical Properties of Activated Carbon: Their Effect on the Adsorption of Pharmaceutical Compounds and Adsorbate–Adsorbent Interactions. *C*, v. 4, n. 4, p. 62, 2018

CARDOSO, A. F.; LUZ, J. M. Q.; LANA, R. M. Q. Produtividade e qualidade de tubérculos de batata em função do fertilizante organomineral e safras de plantio. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 28, n. 4, p. 80–89, out./dez. 2015. DOI: 10.1590/1983-21252015v28n409rc.

CARVALHO, F. T. de; NOVAIS, R. F. de; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F. de; CANTARUTTI, R. B.; BAHIA FILHO, A. F. C. Sistema de interpretação de análise de solo para recomendação de NPK para a cultura do milho. *Revista Ceres*, Viçosa, v. 53, n. 306, p. 211–223, 2006. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/490424>. Acesso em: 28 jun. 2026.

COSMO, Bruno Marcos Nunes; GALERIANI, Tatiani Mayara; NOVAKOSKI, Fabíula Patricia; RICINI, Bruna Martins. Carvão mineral. *Revista Agronomia Brasileira*, v. 4, 2020. Publicado em: 17 mar. 2020. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/rab>. Acesso em: 30 nov.2025.

CHAVES, H. A. F.; RODRIGUES, R.; ADE, M. V. B. Geochemical characterization of coal deposits of Candiota coalfield Rio Bonito Formation (Eo-Permian) of Paraná Basin, South Brazil. **Journal of Sedimentary Environments**, v. 3, n. 1, p. 19-35, 2018. DOI: 10.12957/jse.2018.33240.

CHASSAPIS, K.; ROULIA, M.; TSIRIGOTI, D. Chemistry of metal–humic complexes contained in Megalopolis lignite and potential application in modern organomineral

fertilization. **International Journal of Coal Geology**, v. 78, p. 288–295, 2009. DOI: 10.1016/j.coal.2009.03.004.

DÉFARGE, Christian et al. Defining organominerals: comment on “Defining biominerals and organominerals: direct and indirect indicators of life” by Perry *et al.* (2007, *Sedimentary Geology*, 201, 157–179). **Sedimentary Geology**, v. 213, p. 152–155, 2009.

DE OLIVEIRA, Arnald Pinho et al. Produção de biofertilizante em biodigestor e análise química de nitrogênio e fósforo no produto. **Recital-Revista de Educação, Ciência e Tecnologia de Almenara/MG**, v. 4, n. 2, p. 10-26, 2022.

FALLAVENA, V. L. V. et al. Avaliação de métodos de determinação do teor de matéria mineral em carvões brasileiros. Rede Carvão – UFRGS, Porto Alegre, 2005. Disponível em: https://www.ufrgs.br/rede-carvao/Sess%C3%B5es_C1_C2_C3/C3_ARTIGO_01.pdf. Acesso em: 28 jun. 2026.

FILGUEIRA, F. A. R. Novo Manual de Olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. 3. ed. Viçosa: UFV, 2013.

FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S. Forrageiras para Integração Lavoura-Pecuária-Floresta na Região Sul-Brasileira. 2. ed. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012.

FU, Hongyue et al. Role of secondary char on the fuel properties and pyrolysis behaviors of hydrochars: Effect of temperature and liquid-solid ratio. **Fuel Processing Technology**, v. 267, p. 108167, 2025.

GE, L. et al. An analysis of the carbonization process of coal-based activated carbon at different heating rates. **Energy**, 2023.

IRWANSYAH, F. S. et al. How to Read and Determine the Specific Surface Area of Materials Using the BET Method. **ASEAN Journal of Science and Engineering**, 2023. Disponível em: <https://ejournal.upi.edu/index.php/AJSE/article/view/60748/23540> Acesso em: 28 jun. 2026.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; MACHADO, G.; MEXIAS, A.; SILVA, M. B.; WILLETT, J.; FINKELMAN, R.; BURGER, H. Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota Coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. **International Journal of Coal Geology**, v. 68, n. 1-2, p. 79-116, 2006.

KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M.; MACHADO, G.; MEDEIROS, M.; JASINSKI, S.; LEVANDOWSKI, J.; SILVA, M. B. Caracterização do carvão de Candiota. *Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 59, n. 1, p. 91–97, 2006.

KHODADADI, Maryam; AL-MUSAWI, Tariq J.; KAMRANIFAR, Mohammad; SAGHI,

Mohammad Hossein; PANAHI, Ayat Hossein. A comparative study of using barberry stem powder and ash as adsorbents for adsorption of humic acid. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 26159–26169, 2019.

KIZITO, S. et al. Role of nutrient-enriched biochar as a soil amendment during maize growth: exploring practical alternatives to recycle agricultural residuals and to reduce chemical fertilizer demand. **Sustainability**, Basel, v. 11, n. 11, p. 1–18, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/11/3211>. Acesso em: 28 jun. 2026.

MARTÍNEZ-TARAZONA, M. R.; PALACIOS, J. M.; TASCÓN, J. M. D. The characterization of organomineral components of low-rank coals. **Fuel Processing Technology**, v. 25, p. 81–87, 1990. DOI: 10.1016/0378-3820(90)90097-C.

PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances. **Soil Science**, v. 166, n. 11, p. 810–832, 2002.

REZA, M. N. et al. Trends of soil and solution nutrient sensing for open field and hydroponic cultivation in facilitated smart agriculture. **Sensors**, 2025.

Ricardi-Branco, F. & Ricardi, M.T., 2003. **Licófitas da Formação Rio Bonito (Permiano Inferior, Bacia do Paraná), Nordeste do Estado do Paraná, Brasil**. Revista Brasileira de Paleontologia, 6:19-28.

ROSA, C. M. da et al. Efeito de substâncias húmicas na cinética de absorção de potássio, crescimento de plantas e concentração de nutrientes em *Phaseolus vulgaris* L. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 959–967, 2009. DOI: 10.1590/S0100-06832009000400020.

SHIMIZU, S. et al. Surface Area Estimation: Replacing the Brunauer–Emmett–Teller (BET) Model. **Langmuir**, v. 38, n. 26, p. 8072–8084, 2022. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.langmuir.2c00753?ref=article_openPDF Acesso em: 28 jun. 2026.

SIERADZKA, Małgorzata et al. Biomass thermochemical conversion via pyrolysis with integrated CO₂ capture. **Energies**, v. 13, n. 5, p. 1050, 2020.

SILVA, Bruno Macedo da; SILVA, Mateus Freire Anselmo. Guerra Rússia–Ucrânia: impactos no setor de exportação do agronegócio brasileiro gerado pela restrição de fertilizantes importados pelo Brasil. Fatec Padre Danilo José de Oliveira Ohl – Fatec Barueri, 2023.

SILVA, M. L. P. Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2007. Disponível em: https://www.lsi.usp.br/~acseabra/pos/5749_files/ftir_MLPSilva2007.pdf Acesso em: 28 jun. 2026.

SILVA, M. B.; KALKREUTH, W.; HOLZ, M.; KERN, M. Petrological and geochemical characterization of Candiota coal seams, Brazil: implication for coal facies interpretations and coal rank. *International Journal of Coal Geology*, v. 64, n. 3-4, p. 217-238, 2005.

SOARES, R.; ESCALEIRA, V.; CAMPOS, D. V. B.; MONTEIRO, M. I. C.; CARNEIRO, M. C.; SANTELLI, R. E.; BERNARDI, A. C. C. Comparação de métodos convencional e alternativo para determinação de sódio, potássio e fósforo em extratos de solos obtidos com solução de Mehlich-1. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 547–555, 2012.

SOUZA, Lucas Eduardo Wille de. Processo contínuo de adsorção de enxofre do syngas em cinza leve da gaseificação do carvão mineral. 2024. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) — Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2024.

SOUZA, F. de; KROTH, P.; PAROLIN, G.; BRAGANÇA, S. R. Extração e caracterização de ácidos húmicos de três carvões do sul do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA – COBEQ, 20., 2014, Florianópolis. *Anais...* São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Química, 2015. DOI: 10.5151/chemeng-cobeq2014-0647-24602-174851. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/300664047>. Acesso em: 28 jun. 2026.

THAPA, Resham B.; COUPAL, Roger H.; DANGI, Mohan B.; STAHL, Peter D. An assessment of plant growth and soil properties using coal char and biochar as a soil amendment. *Agronomy*, v. 14, n. 320, p. 1–13, 2024.

WANG, C. et al. Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: a mini review. *Environmental Science and Pollution Research*, [S.l.], v. 29, p. 1–17, 2022.

ZHANG, Z. et al. Countries' vulnerability to food supply disruptions caused by the Russia–Ukraine war from a trade dependency perspective. *Scientific Reports*, 2023.

ZHAO, C. et al. Review on Coal-Based Activated Carbon: Preparation, Modification, Application, Regeneration, and Perspectives. *Energy & Fuels*, 2023a.

ZHAO, C. et al. Preparation and performance of coal-based activated carbon based on an orthogonal experimental study. *Energy*, 2023b.