



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA REGIÃO TOCANTINA DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, NATURAIS E LETRAS
CURSO DE ENGENHARIA AGRONÔMICA

CARACTERIZAÇÃO ESPECTROSCÓPICA DE SOLO E RESPOSTA DO
Cucumis Anguria L. À ADUBAÇÃO ORGANOMINERAL

JOYCE DE SOUSA CORDEIRO

ESTREITO, MA

2025

JOYCE DE SOUSA CORDEIRO

CARACTERIZAÇÃO ESPECTROSCÓPICA DE SOLO E RESPOSTA DO
Cucumis Anguria L. À ADUBAÇÃO ORGANOMINERAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão como requisito básico para a conclusão do Curso de Engenharia Agrônômica do Centro de Ciências Agrárias, Naturais e Letras.

Orientador: Prof. Dr. Járison Cavalcante Nunes

ESTREITO, MA

2025

C787c

Cordeiro, Joyce de Sousa

Caracterização espectroscópica de solo e resposta do *Cucumis Anguria L.* à adubação organomineral. Joyce de Sousa Cordeiro. – Estreito, MA, 2025.

23 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Agrônoma) – Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, Estreito, MA, 2025.

1. Espectroscopia. 2. Produtividade. 3. Produtividade. 4. Análises.
5. Estreito- MA. I. Título.

CDU 635.63:631.8(812.1)

CARACTERIZAÇÃO ESPECTROSCÓPICA DE SOLO E RESPOSTA DO
Cucumis Anguria L. À ADUBAÇÃO ORGANOMINERAL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Estadual da
Região Tocantina do Maranhão como
requisito básico para a conclusão do Curso
de Engenharia Agrônômica do Centro de
Ciências Agrárias, Naturais e Letras.

Data de apresentação: 18 / 07 / 2025

Banca Examinadora



Documento assinado digitalmente
JARISSON CAVALCANTE NUNES
Data: 18/08/2025 14:38:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Járison Cavalcante Nunes
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão



Documento assinado digitalmente
GUTIERREZ RODRIGUES DE MORAIS
Data: 18/08/2025 17:18:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gutierrez Rodrigues de Moraes
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão



Documento assinado digitalmente
RUTH DE ABREU ARAUJO
Data: 18/08/2025 17:10:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. Ruth de Abreu Araújo
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão

ESTREITO, MA
2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me fortalecer nos momentos difíceis desta jornada acadêmica e por me dar forças quando mais precisei. “Rendamos graças ao Senhor, porque ele é bom; o seu amor dura para sempre” (Salmo 136:1).

Aos meus pais e ao meu irmão, por serem minha base emocional durante toda a trajetória acadêmica. O apoio de vocês foi primordial para que este momento se tornasse possível.

À minha avó Ilza Carneiro, que me ensinou a enxergar o mundo com mais amor e responsabilidade, e que esteve ao meu lado do início ao fim da minha vida estudantil.

Ao meu namorado, que esteve presente em todos os períodos, compartilhando momentos bons e ruins. Seu companheirismo foi essencial para que eu conseguisse concluir este trabalho.

Aos meus amigos e colegas de turma, que tornaram meus dias mais felizes e leves. Ao grupo das Baixinhas e ao grupo da Fome, que sempre me faziam rir, mesmo em meio às dificuldades. À minha amiga de Feira Nova, que sempre me incentivou e esteve ao meu lado, contribuindo para o meu crescimento profissional.

Às minhas primas-irmãs, tios e tias, que nunca mediram esforços para me apoiar em todos os desafios e sempre aplaudiram de pé as minhas conquistas acadêmicas.

Ao meu orientador, professor Dr. Járison Cavalcante Nunes, pelo apoio, ajuda e paciência ao longo de toda a orientação. Sua dedicação foi essencial para que este trabalho fosse concluído com êxito.

Ao professor e coorientador Dr. Gutierrez Rodrigues de Moraes, por estar sempre ao meu lado, acreditando no meu potencial. Sua parceria foi fundamental para minha formação e crescimento profissional.

Agradeço à UEMASUL pelo suporte educacional e a todos os colaboradores, cujo empenho profissional contribuiu significativamente para meu desenvolvimento acadêmico. Aos professores, que além de transmitirem conhecimento, levavam leveza para a sala de aula.

A todos do Campus CCANL, com quem tive o prazer de conviver durante esses cinco anos, minha eterna gratidão. Vocês se tornaram minha segunda família.

Caracterização espectroscópica de solo e resposta do *Cucumis anguria* L. à adubação organomineral¹

Spectroscopic soil characterization and response of *Cucumis anguria* L. to organomineral fertilization

Caracterización espectroscópica del suelo y respuesta de *Cucumis anguria* L. a la fertilización organomineral

DOI: 10.54033/cadpedvXXnX-

Originals received: xx/xx/202x

Acceptance for publication: xx/xx/202x

Joyce de Sousa Cordeiro

Graduanda em Engenharia Agrônômica
Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)
Endereço: Estreito, Maranhão, Brasil
E-mail: joyce.cordeiro@uemasul.edu.br

Gutierrez Rodrigues de Moraes

Doutor em Física
Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)
Endereço: Estreito, Maranhão, Brasil
E-mail: gutierrez.morais@uemasul.edu.br

Járisson Cavalcante Nunes

Doutor em Agronomia
Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)
Endereço: Imperatriz, Maranhão, Brasil
E-mail: jarisson.nunes@uemasul.edu.br

Ruth de Abreu Araújo

Doutora em Produção Vegetal
Instituição: Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)
Endereço: Imperatriz, Maranhão, Brasil
E-mail: rutha.araujo@uemasul.edu.br

¹Trabalho de conclusão do curso de Engenharia Agrônômica apresentado na forma de artigo científico a ser submetido para a Revista Caderno Pedagógico.

RESUMO

A adubação agromineral é importante para uma boa composição físico-química do solo, proporcionando um bom desenvolvimento e produção de plantas. Contudo, o objetivo do trabalho é estudar as propriedades físico-químicas do solo através da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e avaliar a produtividade do maxixe com adubação orgânica e mineral. A pesquisa foi realizada na Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão, as amostras de solo foram coletadas antes e depois da aplicação dos tratamentos para melhor comparação. O experimento utilizou delineamento experimental de blocos casualizados, com cinco repetições. Os tratamentos foram referentes a cinco doses de adubação fosfatada (0; 96,2; 192,4; 288,6 e 384,8 g cova⁻¹ de P₂O₅). Os espectros obtidos permitiram identificar grupos funcionais e minerais, evidenciando alterações na composição do solo ao longo do ciclo da cultura. Os resultados mostraram uma degradação progressiva dos componentes do solo, como matéria orgânica e minerais, principalmente no tratamento com dose de 230 g cova⁻¹ de P₂O₅, onde a produtividade teve melhores resultados. Esse estudo ressalta a importância de práticas agrícolas sustentáveis, beneficiando de forma significativa os agricultores familiares produtores de plantas não convencionais.

Palavras-chave: Espectroscopia. Produtividade. Maxixe. Análises.

ABSTRACT

Agromineral fertilization is important for a good physical-chemical composition of the soil, providing good plant development and production. However, the objective of this study is to study the physical-chemical properties of the soil through fourier transform infrared spectroscopy (ftir) and to evaluate the productivity of gherkin with organic and mineral fertilization. The research was carried out at the state university of the tocantina region of maranhão, and soil samples were collected before and after the application of the treatments for better comparison. The experiment used a randomized block experimental design with five replicates. The treatments referred to five doses of phosphate fertilization (0; 96.2; 192.4; 288.6 and 384.8 g pit⁻¹ of P₂O₅). The spectra obtained allowed the identification of functional groups and minerals, evidencing changes in soil composition throughout the crop cycle. The results showed a progressive degradation of essential components, such as organic matter and minerals, mainly in the treatment with a dose of 230 g, where productivity had better results. This study highlights the importance of sustainable agricultural practices, significantly benefiting family farmers who produce unconventional plants.

Keywords: Spectroscopy. Productivity. Maxixe. Analysis.

RESUMEN

La fertilización agromineral es importante para una buena composición físico-química del suelo, proporcionando un buen desarrollo y producción vegetal. Sin embargo, el objetivo de este estudio es estudiar las propiedades físico-químicas del suelo mediante espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

y evaluar la productividad del pepinillo con fertilización orgánica y mineral. La investigación se llevó a cabo en la Universidad Estatal de la Región Tocantina de Maranhão, y se recolectaron muestras de suelo antes y después de la aplicación de los tratamientos para una mejor comparación. El experimento utilizó un diseño experimental en bloques al azar con cinco réplicas. Los tratamientos se refirieron a cinco dosis de fertilización fosfatada (0; 96,2; 192,4; 288,6 y 384,8 g pit⁻¹ de P₂O₅). Los espectros obtenidos permitieron la identificación de grupos funcionales y minerales, evidenciando cambios en la composición del suelo a lo largo del ciclo del cultivo. Los resultados mostraron una degradación progresiva de componentes esenciales, como materia orgánica y minerales, principalmente en el tratamiento con una dosis de 230 g, donde la productividad mostró mejores resultados. Este estudio destaca la importancia de las prácticas agrícolas sostenibles, que benefician significativamente a los agricultores familiares que producen plantas no convencionales.

Palabras clave: Espectroscopía. Productividad. Máxima precisión. Análisis.

1 INTRODUÇÃO

O maxixe (*Cucumis anguria* L.) é uma hortaliça não convencional, pertencente a família Cucurbitacea, com grande importância socioeconômica para diversas comunidades nas regiões do Brasil. Trata-se de uma planta rústica e adaptável em regiões de condições climáticas adversas, resistentes a componentes abióticos, sendo rica em vários nutrientes essenciais. Por conta dessas características, o maxixe apresenta uma alternativa relevante para promover a segurança alimentar de famílias em situação de vulnerabilidade social (Magalhães et al, 2024).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil produziu mais de 27 toneladas de maxixe no ano de 2017, sendo o estado do Pará o principal produtor (IBGE, 2017). Além de sua relevância econômica, o fruto do maxixe apresenta elevado valor nutricional e é fonte de cálcio e vitamina C, contribuindo na alimentação de várias famílias na região nordestina e na culinária tradicional. Estudos apontam que o fruto apresenta propriedades antioxidantes, anti-mutagênicas e antibacterianas associadas ao consumo (Yoon et al., 2015; Omokhua-Uyi e Staden, 2020).

Algumas hortaliças geralmente possuem ciclos curtos e alta exigência nutricional. Nesse contexto, práticas agronômicas bem elaboradas são essenciais para garantir altas produtividades. A análise de solo é uma ferramenta

essencial para determinar a fertilidade do solo e a quantidade de nutrientes disponível, o que irá permitir um manejo de adubação mais eficiente, resultando em aumento da produtividade e da lucratividade para o produtor (Cardoso et al. 2009). No entanto, métodos convencionais de análises de solo podem ser onerosos e de difícil acesso, especialmente para pequenos produtores.

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma ferramenta analítica poderosa utilizada para a identificação de compostos químicos e determinação de suas estruturas moleculares. Entre as diferentes técnicas de amostragem da FTIR, a Reflectância Total Atenuada (ATR, do inglês Attenuated Total Reflectance) destaca-se por sua simplicidade, rapidez e não destrutividade. A espectroscopia FTIR-ATR se mostra uma ferramenta altamente versátil na ciência do solo, permitindo análises rápidas e precisas da composição orgânica e inorgânica do solo. Sua capacidade de analisar diretamente amostras de solo sem preparo intenso, juntamente com a identificação de grupos funcionais e minerais, oferece insights valiosos sobre as propriedades do solo, a presença de poluentes e os processos de degradação e recuperação ambiental. À medida que a tecnologia avança, espera-se que no uso da FTIR-ATR se expanda ainda mais, contribuindo para a gestão sustentável do solo e a proteção ambiental.

A técnica FTIR-ATR possui várias vantagens em relação a outras técnicas de espectroscopia infravermelha. A principal vantagem é a facilidade de uso e a redução do tempo de preparo da amostra, uma vez que não requer tratamentos prévios complexos. Além disso, permite a análise de amostras opacas ou turvas, que seriam difíceis de analisar por transmissão direta (Smith, 2011). Conforme Xu et al. (2020) o FTIR-ATR é uma ferramenta de alta eficiência na diferenciação nos tipos de solo com base nas variações espectrais, evidenciando seu potencial em estudos que requerem caracterização detalhada da composição físico-química do solo.

O estudo de Xing et al. (2021) demonstrou que os espectros FTIR-ATR apresentou bandas de absorção características que variaram entre diferentes tipos de solos agrícolas, sendo eficazes nas características do conteúdo de

matéria orgânica do solo (MOS). Os resultados do estudo reforçam que o FTIR-ATR, além de ser uma técnica não destrutiva, é adequado para análises rápidas e quantitativas no campo da ciência do solo. Apesar das possibilidades de uso dessa técnica, no Brasil, as pesquisas científicas para avaliar os atributos do solo ainda são incipientes.

A pesquisa teve como objetivo estudar as propriedades físico-químicas do solo através da espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e avaliar as repostas do maxixe à adubação organomineral.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de campo foi realizado na área experimental do Centro de Ciências Agrárias, Naturais e Letras da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL campus de Estreito, Maranhão, durante o ano de 2024. Antes de implantar o experimento, foi realizada uma coleta de solo na área em estudo, para determinação das características físicas e químicas do solo.

Os cinco tratamentos foram distribuídos em delineamento experimental de blocos casualizados, com cinco repetições. Os tratamentos foram referentes a cinco doses de adubação fosfatada (0; 96,2; 192,4; 288,6 e 384,8 g cova⁻¹ de P₂O₅), sendo a dose central a recomendada para a cultura. As plantas foram conduzidas no espaçamento de 3,0 m entre linhas e 1,0 m entre plantas. A adubação orgânica foi realizada com biofertilizante bovino, na dose de 15 L m⁻² e antes da aplicação o insumo foi diluído em água na proporção de 1,0:1,0.

O insumo orgânico foi preparado com preparado conforme as sugestões de Santos (1992). Para a confecção do biofertilizante foram adicionadas partes iguais de esterco bovino fresco e água em um recipiente que não ocorresse processo de oxidação, mantendo-se 20% do seu volume total, para que o restando do recipiente fosse ocupado pelo gás metano produzido durante a fermentação. Para liberação do gás produzidos pelas as bactérias foram

conectadas uma extremidade de uma mangueira fina na parte superior do biodigestor mantendo a outra ponta da mangueira submersa em um recipiente com água.

Os insumos foram adicionados na circunferência de plantio de cada planta. As sementes utilizadas foram adquiridas em lojas agropecuárias da cidade de Estreito –Maranhão, e foram semeadas 3 sementes por cova. Após a germinação das sementes, foi realizada o desbaste de uma plântula, restando apenas duas plantas por cova.

A irrigação das plantas foi realizada através do método de irrigação localizada por gotejamento, para evitar perdas de água durante o processo. Ao decorrer do experimento foram realizadas adubações para o fornecimento dos demais nutrientes e tratos culturais de plantas espontâneas de forma manual com o auxílio da enxada.

A amostra do solo antes da instalação do experimento foi coletada a partir de amostras simples em vários pontos de cada bloco, para uniformizar e padronizar a amostra composta. O solo foi coletado com o auxílio de um trado adaptado de guidão de moto com material de aço. A amostra de solo foi analisada através das técnicas de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR) que mostram as características químicas e físicas do solo de forma mais detalhada do que análises convencionais.

Aos 15 dias após a primeira coleta, foi realizada uma segunda coleta na área de cada tratamento, na profundidade de 0-10 cm para comparar os atributos iniciais do solo com os valores obtidos após a aplicação dos tratamentos. As coletas foram armazenadas em um recipiente de plástico e enviadas o laboratório de Espectroscopia na Universidade Estadual de Maringá - PR, para serem realizadas as análises detalhadas de Infravermelho.

Para as análises de FTIR-ATR foi utilizado um espectrômetro da marca Bruker modelo Vertex 70V. As amostras de solo foram coletadas seguindo protocolos específicos, a partir de 10 cm de profundidades da área de estudo. As

amostras foram armazenadas em pinos plásticos limpos e identificados corretamente.

O solo seco foi pulverizado em um almofariz para reduzir o tamanho das partículas a menos de 2 mm, garantindo uma distribuição homogênea dos componentes. A fração de solo mais fina é a preferida, pois maximiza o contato com a superfície do cristal ATR e proporciona um sinal espectral mais claro e definido. O espectrômetro FTIR-ATR foi calibrado antes do início das análises. A calibração foi realizada usando um padrão de referência, como o poliestireno, para garantir que o sistema esteja operando corretamente e que os espectros obtidos sejam precisos. Os parâmetros de aquisição definidos foram a faixa espectral entre 4000 cm^{-1} e 400 cm^{-1} , a resolução de 4 cm^{-1} e o número de varreduras 32, de acordo com a sensibilidade do equipamento.

Para a aquisição dos espectros uma pequena quantidade da amostra de solo, de 20 mg, foi colocada diretamente sobre a superfície do cristal ATR. A amostra foi pressionada firmemente contra o cristal usando um acessório de pressão apropriado para garantir um bom contato entre o solo e a superfície do cristal. O contato adequado é crucial para a geração de um sinal de onda evanescente forte e, conseqüentemente, um espectro de alta qualidade.

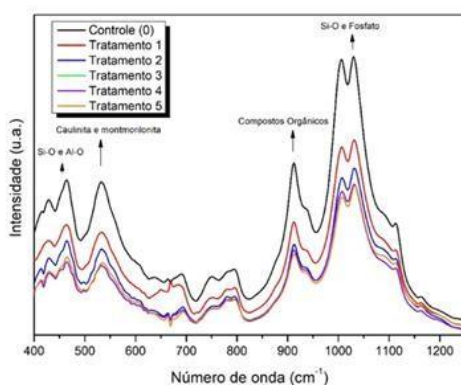
Antes de medir a amostra, um espectro de fundo foi registrado para eliminar a interferência de CO_2 e H_2O presente no ambiente. Este espectro de fundo é subtraído automaticamente dos espectros da amostra para melhorar a qualidade dos dados finais. Os espectros obtidos foram submetidos a processos para remoção de ruídos, suavização usando métodos de Savitzky-Golay e correção da linha de base.

As coletas dos frutos foram realizadas 2 vezes por semana e foram avaliados o comprimento dos frutos, o diâmetro dos frutos e a produtividade (t ha^{-1}). O comprimento e o diâmetro dos frutos foram aferidos com o auxílio de um paquímetro digital. Os dados foram processados utilizando o software Sisvar® (Ferreira, 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 1 ilustra os espectros de absorção no intervalo de 400 a 1250 cm^{-1} , permitindo a identificação de grupos funcionais relevantes para a caracterização mineralógica e orgânica do solo. Observa-se que o solo controle (sem adubação) apresentou maiores intensidades espectrais em todas as regiões analisadas, em comparação com os demais tratamentos.

Figura 1. Espectros de absorção no intervalo de 400 a 1250 cm^{-1} , permitindo a identificação de grupos funcionais relevantes para a caracterização mineralógica.



Fonte: Autores (2025).

Controle = Solo coletado antes da aplicação dos tratamentos ; Tratamento 1 = 0; Tratamento 2 = 96,2 g ; Tratamento 3 = 192,4 g ; Tratamento 4 = 288,6 g ; Tratamento 5 = 384,8 g cova^{-1} de P_2O_5 .

Na região de 400–600 cm^{-1} , os picos associados às vibrações de deformação dos grupos Si–O e Al–O, atribuídos principalmente aos filosilicatos presentes em minerais como caulinita e montmorilonita, são indicativos da fração mineral do solo (Madejová et al., 2021; Jansen et al., 2020). Com a aplicação dos tratamentos, observou-se uma redução progressiva da intensidade dessas bandas, principalmente a partir do tratamento 2 (96,2 g cova^{-1} de P_2O_5), sugerindo uma possível reorganização estrutural dos minerais de argila ou perda de elementos estruturais por lixiviação ou extração dos elementos pela cultura, fato já documentado em solos cultivados sob manejo intensivo (Peng et al., 2022).

A faixa de 600–800 cm^{-1} , atribuída a vibrações fora do plano de ligações C–H aromáticas e anéis aromáticos simples, está comumente associada a compostos orgânicos da matéria orgânica do solo, como ácidos húmicos e fúlvicos (Baes & Bloom, 2022; Barreto et al., 2021). Essa região apresentou declínio significativo de intensidade nos tratamentos 2 (96,2 g cova^{-1} de P_2O_5) a 5 (384,8 g cova^{-1} de P_2O_5), refletindo uma provável degradação ou mineralização da matéria orgânica, o que é consistente com o comportamento de solos submetidos à adubação mineral sem reposição suficiente de carbono (Chen et al., 2022).

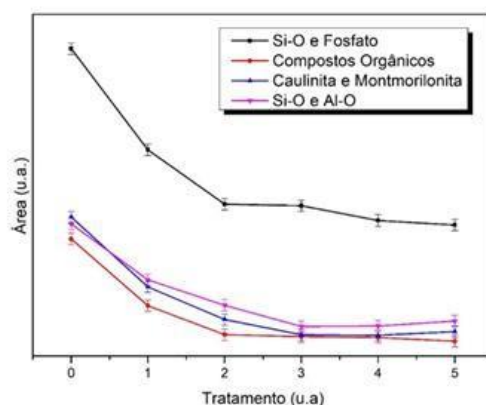
Entre 800–1000 cm^{-1} , as bandas são atribuídas às vibrações de estiramento do grupo C–O (principalmente em álcoois e ácidos orgânicos), além do estiramento P–O em fosfatos (Madejová et al., 2023; Zhang et al., 2021). A região é crítica para avaliar a presença de compostos orgânicos e nutrientes disponíveis. O tratamento controle apresentou os maiores valores de intensidade, enquanto os tratamentos subsequentes mostraram declínio acentuado, indicando extração dos nutrientes aplicados e possível mineralização da fração orgânica leve.

Já na faixa de 1000–1200 cm^{-1} , predominam as bandas de estiramento assimétrico de Si–O e P–O, relacionados à presença de silicatos e fosfatos inorgânicos, ambos essenciais para a estabilidade estrutural e fertilidade química do solo (Silva et al., 2022a; Oliveira et al., 2023). A redução progressiva da intensidade espectral nessa faixa, especialmente nos tratamentos 4 (288,6 g cova^{-1} de P_2O_5) e 5 (384,8 g cova^{-1} de P_2O_5), corrobora com os dados agrônômicos de extração de fósforo e aponta para um esgotamento parcial da reserva de fosfatos disponíveis. Conforme Galati et al. (2013), o fósforo é um dos elementos mais importantes principalmente durante o desenvolvimento de frutos não convencionais. Esses resultados indicam o consumo efetivo do fósforo adicionado ao solo pelas plantas ao longo do ciclo da cultura, evidenciado também em trabalhos de

monitoramento de fósforo em solos agrícolas por espectroscopia de infravermelho (Zhou et al., 2021; Oliveira et al., 2022).

A figura 2 apresenta a área integrada das bandas espectrais para cada grupo funcional analisado. Observa-se uma tendência decrescente nas áreas correspondentes a Si–O e fosfato, compostos orgânicos (C–O, C–H aromático), minerais de argila (caulinita/montmorilonita) e grupos Al–O, confirmando uma alteração física e química do solo ao longo dos tratamentos. Os maiores valores de área foram observados no tratamento controle (solo coletado antes da instalação do experimento), enquanto os menores valores ocorreram nos tratamentos 4 (288,6 g cova⁻¹ de P₂O₅) e 5 (384,8 g cova⁻¹ de P₂O₅), o que indica que o processo de cultivo promoveu a degradação da estrutura coloidal e mineral do solo, conforme também demonstrado por Wang et al. (2021) em solos tropicais sob hortaliças.

Figura 2. Área integrada das bandas espectrais para cada grupo funcional analisado.



Fonte: Autores (2025).

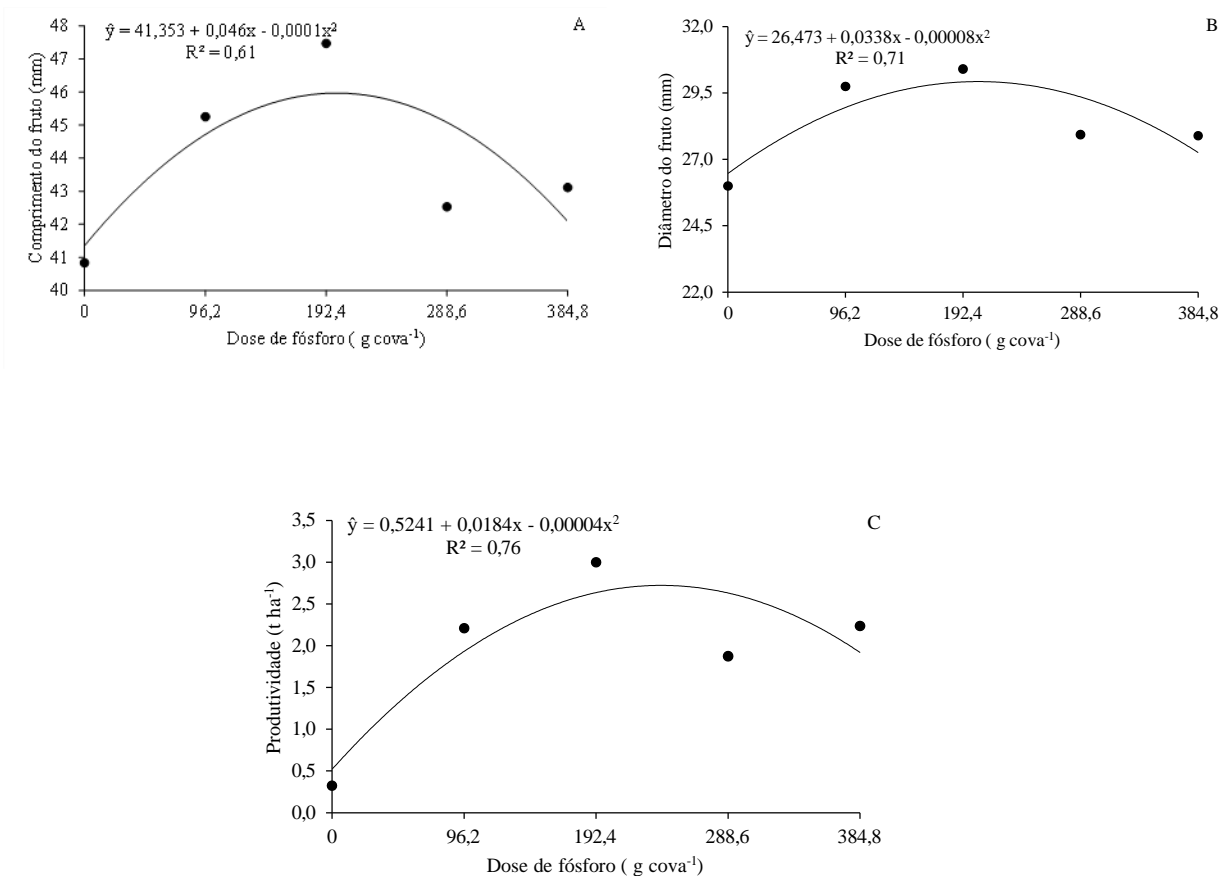
Esses dados espectroscópicos confirmam que o manejo com adubação fosfatada e biofertilizante induz alterações físico-químicas detectáveis no solo, promovendo redução nos teores de fosfatos e matéria orgânica, e afetando a fração mineral de forma significativa. Tais modificações, quando não acompanhadas de práticas adequadas de reposição nutricional e conservação

da matéria orgânica, podem comprometer a funcionalidade do solo e sua capacidade produtiva em médio e longo prazo (Souza et al., 2023; Zhang et al., 2023).

O incremento nas doses de fósforo promoveu ganhos expressivos nas variáveis agrônômicas avaliadas, incluindo comprimento do fruto, o diâmetro do fruto e a produtividade (Figura 3), corroborando com resultados observados em estudos recentes com hortaliças cultivadas em solos tropicais (Silva et al., 2021; Costa et al., 2023). A dose mais eficiente para o comprimento do fruto, diâmetro do fruto e produtividade, foram, respectivamente, 230, 211,25 e 230g cova⁻¹ de P₂O₅, quando associada ao uso de biofertilizante na dose de 15 L m², o que destaca a importância da adequada disponibilidade de fósforo para o metabolismo vegetal, fotossíntese e desenvolvimento reprodutivo (Gonçalves et al., 2022). Essas doses promoveram valores de comprimento de frutos de 46,6 mm, de diâmetro de fruto de 30,04 mm e de produtividade de 2,6 t ha⁻¹ de frutos de maxixe.

Conforme Resende (1998), os frutos apresentaram comprimento adequado para o genótipo (Maxixe do Norte), com comprimento de frutos variando entre 37,0 e 46,7 mm. O diâmetro do fruto foi superior ao valor médio de 24,6 mm observado por Resende (1998). Essa situação indica que os frutos apresentavam características adequadas para comercialização e que a disponibilidade de fósforo em solo do Cerrado favorece o desenvolvimento dos frutos de maxixe. Apesar da adubação fosfatada elevar a produtividade da cultura, o valor de 2,6 t ha⁻¹ está abaixo do potencial produtivo do genótipo.

Figura 3. Comprimento de frutos (A), diâmetro de frutos (B) e produtividade (C) do maxixe em função da aplicação de doses de fósforo.



Fonte: Autores (2025).

Ao correlacionar o aumento da produtividade do maxixe e a diminuição dos sinais espectroscópicos de fosfatos constata-se a eficiência da absorção de nutrientes, mas também aponta para a necessidade de estratégias de reposição contínua de fósforo no solo, a fim de prevenir o esgotamento nutricional em cultivos subsequentes (Melo et al., 2020).

Em relação ao impacto do biofertilizante na produção vegetal e na qualidade da matéria orgânica do solo, observou-se que a aplicação do insumo provavelmente contribuiu para melhoria das variáveis agrônômicas do maxixe. Isso é consistente com os efeitos relatados de biofertilizantes na liberação gradual de nutrientes e na estimulação da atividade microbiana do solo (Barreto et al., 2022; Ferreira et al., 2023).

Os solos tratados com biofertilizante (Tratamentos de 1 a 5) apresentaram maior preservação das bandas espectrais relacionadas à matéria orgânica, com destaque para as regiões $600\text{--}800\text{ cm}^{-1}$ e $800\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$, associadas às ligações C–O e C–H aromáticas, além de outros grupos funcionais orgânicos, corroborando achados de estudos recentes que utilizaram FTIR-ATR para avaliação de MOS (Silva et al., 2022b; Zhang et al., 2021).

A maior estabilidade da matéria orgânica em solos tratados com biofertilizante explica, ao menos parcialmente, o melhor desempenho agrônômico das plantas. Essa estabilidade contribuiu para melhorar a capacidade de troca catiônica, a retenção de água e a disponibilidade de nutrientes essenciais, como reportado em experimentos com hortaliças sob adubação orgânica (Santos et al., 2023; Wang et al., 2020).

O esgotamento de nutrientes e a degradação progressiva do solo ao longo do ciclo da cultura foram evidenciados pela queda no desempenho agrônômico nos tratamentos 4 e 5, associados a uma redução generalizada nos grupos funcionais relacionados a fosfatos, matéria orgânica e minerais de argila (Si–O e Al–O), conforme detectado nos espectros de FTIR-ATR. Essa degradação física e química é condizente com os efeitos de manejo inadequado em solos cultivados intensivamente, já reportados na literatura (Rodrigues et al., 2021; Li et al., 2023).

A prática de cultivos sucessivos sem estratégias adequadas de reposição de nutrientes resulta em empobrecimento físico-químico do solo, fato já descrito em outras culturas agrícolas tropicais (Costa et al., 2022). A análise espectroscópica foi capaz de detectar esses sinais precoces de degradação, antes mesmo que os impactos fossem totalmente visíveis nas variáveis de produtividade.

O efeito do manejo na dinâmica da matéria orgânica do solo também foi evidente. O incremento de MOS, provavelmente foi proporcionado pelo biofertilizante. As regiões espectrais entre $600\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$, relacionadas a compostos orgânicos, mostraram maior estabilidade nos solos com biofertilizante, o que contribuiu para retardar a degradação natural da matéria orgânica, conforme também observado por Chen et al. (2022).

Entretanto, os dados indicam que o fornecimento de matéria orgânica, mesmo com biofertilizantes, não foi suficiente para impedir a perda de nutrientes e a degradação mineral nos estágios mais avançados, fato também apontado em estudos com solos de hortaliças tropicais sob manejo orgânico e mineral (Freitas et al., 2020; Zhang et al., 2023).

Por fim, a integração entre os resultados agronômicos e espectroscópicos reforça a importância de monitoramento contínuo da qualidade do solo para assegurar a sustentabilidade dos sistemas de produção. A espectroscopia FTIR-ATR demonstrou-se uma ferramenta eficiente para detecção precoce de sinais de esgotamento nutricional e degradação da matéria orgânica, permitindo a implementação de ações de manejo como adubação de cobertura, rotação de culturas, calagem ou aplicação de compostos orgânicos de liberação lenta (Matos et al., 2021; Oliveira et al., 2023).

De maneira geral, a combinação de adubação fosfatada e biofertilizante bovino foi eficiente para o aumento da produtividade do maxixe a curto prazo. No entanto, os resultados também evidenciam um processo de esgotamento de nutrientes do solo e degradação da matéria orgânica com o avanço do cultivo, o que reforça a necessidade de estratégias de manejo conservacionistas e de reposição de nutrientes, para garantir a viabilidade de cultivos sucessivos e a conservação da qualidade do solo a longo prazo (Souza et al., 2023).

CONCLUSÃO

A aplicação de doses de fósforo até o limite de 230 g cova⁻¹ de P₂O₅ juntamente com a aplicação de biofertilizante bovino promove melhorias nas variáveis agronômicas do maxixe (*Cucumis anguria L.*).

As análises espectroscópicas por FTIR-ATR revelaram uma redução progressiva nas bandas associadas aos grupos fosfatados (P–O), particularmente nas regiões espectrais entre 800–1000 cm⁻¹ e 1000–1200 cm⁻¹, nos tratamentos com as maiores doses de fósforo.

Esses estudos são essenciais para a contribuição de informações principalmente para os produtores de hortaliças não convencionais, visando melhorias no manejo das culturas.

REFERÊNCIAS

- BAES, A. U.; BLOOM, P. R. Spectral signatures of humic substances by second-derivative FTIR. **Soil Science Society of America Journal**, v. 86, n. 1, p. 142–153, 2022.
- BARRETO, J. C. et al. Impact of organic fertilizers on soil fertility and crop productivity: A meta-analysis. **Agriculture**, v. 12, n. 2, p. 214, 2022.
- BARRETO, J. C. et al. Impacts of organic amendments on soil organic matter quality. **Science of the Total Environment**, v. 775, p. 145682, 2021.
- CARDOSO, Evaldo Luis et al. Análise de solos: finalidade e procedimentos de amostragem. **Corumbá: Embrapa Pantanal**, 2009. 5 p. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 79).
- CHEN, L. et al. Long-term organic amendments improve soil organic matter stability and nutrient retention. **Soil and Tillage Research**, v. 221, p. 105374, 2022.
- COSTA, M. G. et al. Effects of phosphorus fertilization on soil properties and vegetable yield in tropical regions. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 3, p. 289-302, 2022.
- COSTA, R. S. et al. Integrated use of biofertilizers and phosphorus improves crop performance under low-fertility soils. **Scientific Reports**, v. 13, p. 1123, 2023.
- FERREIRA, A. L. et al. Biofertilizer effects on soil microbial activity and plant development in tropical horticulture. **Agronomy**, v. 13, n. 1, p. 78, 2023.
- FREITAS, R. F. et al. Soil quality indicators under organic and conventional vegetable production. **Geoderma Regional**, v. 23, e00363, 2020.
- GALATI, V. C., et al. Crescimento e acúmulo de nutrientes da cultura do quiabeiro. **Semina: Ciências Agrárias**, 34(1), 191-200, 2013.
- GONÇALVES, C. S. et al. Phosphorus availability and crop yield in response to fertilization strategies in sandy tropical soils. **Agronomy Journal**, v. 114, n. 2, p. 645-655, 2022.
- IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Disponível em:

<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuário/censo-agropecuário2017>.
Acesso em: 10 jun. 2025.

JANSEN, B. et al. Clay mineral transformations and soil degradation. **Geoderma**, v. 365, p. 114243, 2020.

LI, X. et al. Long-term fertilization impacts on soil phosphorus fractions and crop productivity. **Geoderma**, v. 432, p. 116337, 2023.

MADEJOVÁ, J. FTIR techniques in clay mineral studies. **Vibrational Spectroscopy**, 31(1), 1- 10, 2023.

MAGALHÃES, I. C. S. et al. Efeitos da polinização por abelhas na produtividade e composição química de frutos de maxixe (*Cucumis anguria* L., Cucurbitaceae) no semiárido brasileiro. **Brazilian Journal of Biology**, [S. l.], v. 84, e284217, 2024.

MATOS, F. S. et al. Spectroscopic assessment of soil organic matter quality after long-term fertilization. **Soil Research**, v. 59, n. 2, p. 140-149, 2021.

MELO, V. S. et al. Soil phosphorus dynamics and plant uptake under varying fertilization levels. **Soil Use and Management**, v. 36, n. 4, p. 638-648, 2020.

OLIVEIRA, F. J. et al. Spectroscopic monitoring of phosphate availability in tropical soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 2, p. 789–803, 2023.

OLIVEIRA, R. C. et al. Infrared spectroscopy applied to phosphorus monitoring in agricultural soils. **Soil Systems**, v. 6, n. 1, p. 12, 2022.

OMOKHUA-UYI, A.G., VAN STADEN, J. Phytomedicinal relevance of South African Cucurbitaceae species and their safety assessment: **A review. Journal of Ethnopharmacology**, 259, 112967, 2020.

PENG, X. et al. Structural and chemical degradation of clay minerals under intensive vegetable production. **Catena**, v. 215, p. 106291, 2022.

RESENDE, G. M. de. Rendimento de cultivares de maxixe em função de épocas de plantio. **Horticultura Brasileira, Brasília**, v. 16, n.2, p. 167-171, novembro 1998.

RODRIGUES, D. A. et al. Soil fertility and nutrient dynamics in vegetable systems

under organic management. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 4821, 2021.

SANTOS, J. P. et al. Soil organic amendments and phosphorus dynamics in agroecosystems. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 69, n. 3, p. 355-368, 2023.

SILVA, D. F. et al. Phosphorus management in vegetable crops: a review. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1583, 2021.

SILVA, P. H. et al. Application of FTIR spectroscopy to monitor soil organic matter dynamics. **Catena**, v. 213, p. 106138, 2022.

SILVA, P. H. et al. Mid-IR spectral indices as indicators of soil fertility under different fertilization practices. **Soil and Tillage Research**, v. 219, p. 105320, 2022.

SMITH, B. Infrared Spectral Interpretation: **A Systematic Approach**. CRC Press, 2011.

SOUZA, R. L. et al. Monitoring soil degradation using infrared spectroscopy: a Brazilian case study. **Geoderma Regional**, v. 33, e00642, 2023.

SOUZA, R. L. et al. Soil health monitoring using infrared spectroscopy: a review. **Geoderma**, v. 424, p. 115991, 2023.

WANG, H. et al. Bio-organic fertilizers improve soil fertility and crop productivity in degraded soils. **Soil and Tillage Research**, v. 199, p. 104577, 2020.

WANG, Y. et al. Long-term effects of vegetable cultivation on soil properties and nutrient loss. **Agricultural Systems**, v. 190, p. 103126, 2021.

XING, Z. et al. A method combining FTIR-ATR and Raman spectroscopy to determine soil organic matter: improving prediction accuracy using competitive adaptive reweighted sampling (CARS). **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 191, p. 106549, 2021

XU, X. et al. Forensic soil analysis using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and Fourier transform infrared total attenuated reflectance spectroscopy (FTIR-ATR): principles and case studies. **Forensic Science International**, v. 310, p. 110222, 2020.

YOON, J. Y.; CHUNG, I. M.; THIRUVENGADAM, M. Evaluation of phenolic compounds, antioxidant and antimicrobial activities from transgenic hairy root cultures of gherkin (*Cucumis anguria* L.). **South African Journal of Botany**, v.

100, p. 80-86, 2015.

ZHANG, L. et al. Infrared spectroscopy reveals carbon and phosphorus transformations in amended soils. **Soil and Tillage Research**, v. 207, p. 104839, 2021.

ZHANG, L. et al. Integrated nutrient management effects on soil fertility and crop yield. **Agronomy**, v. 13, n. 6, p. 1522, 2023.

ZHANG, Y. et al. FTIR spectroscopy in soil science: recent advances and applications. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 56, n. 2, p. 115-139, 2021.

ZHANG, Y. et al. Evaluating soil quality dynamics with FTIR and multivariate analysis in horticultural systems. **Agronomy**, v. 13, n. 4, p. 958, 2023.

ZHOU, X. et al. Soil phosphorus dynamics under different fertilization practices assessed by FTIR spectroscopy. **Geoderma**, v. 382, p. 114700, 2021.