



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

JEFERSON ANTONIO DOS SANTOS DA SILVA

**ANÁLISE GEOESPACIAL E MODELAGEM DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA  
DE SOLO CULTIVADO COM REPOLHO NO VALE ALUVIAL DO MIMOSO**

Recife - PE

2025.2

JEFERSON ANTONIO DOS SANTOS DA SILVA

**ANÁLISE GEOESPACIAL E MODELAGEM DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA  
DE SOLO CULTIVADO COM REPOLHO NO VALE ALUVIAL DO MIMOSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

**Orientador:** Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

Recife - PE

2025.2

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

S586a Silva, Jeferson Antonio dos Santos da.  
Análise geoespacial e modelagem da condutividade  
hidráulica de solo cultivado com repolho no Vale Aluvial do  
Mimoso: estudo de caso / Jeferson Antonio dos Santos da  
Silva. – Recife, 2025.  
53 f.; il.

Orientador(a): Abelardo Antônio de Assunção  
Montenegro.

Co-orientador(a): Ravi Emanuel de Melo.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –  
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado  
em Engenharia Agrícola e Ambiental, Recife, BR-PE, 2026.

Inclui referências.

1. Agricultura familiar. 2. Biocarvão. 3. Cobertura morta.  
4. Drone 5. Manejo de água. I. Montenegro, Abelardo  
Antônio de Assunção, orient. II. Melo, Ravi Emanuel de,  
coorient. III. Título

CDD 628

JEFERSON ANTONIO DOS SANTOS DA SILVA

**ANÁLISE GEOESPACIAL E MODELAGEM DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA  
DE SOLO CULTIVADO COM REPOLHO NO VALE ALUVIAL DO MIMOSO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Aprovado em: 22/12/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro (Orientador)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Gledson Luiz Pontes de Almeida (Examinador Interno)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Dra. Thayná Alice Brito Almeida (Examinador Externo)

Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Dr. Utaiguara da Nóbrega Borges (Examinador Externo)

Universidade Federal da Paraíba

## **DEDICATÓRIA**

**A Deus, minha mãe, familiares e amigos.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me concedido força, sabedoria e saúde para persistir no decorrer desta jornada.

À minha avó, Angela Maria dos Santos (*in memoriam*), pescadora, exemplo de resistência e resiliência, que apesar de não ter tido acesso à educação sempre me falou que os estudos seriam o caminho para realizar os meus sonhos.

Aos meus pais, Angela Maria dos Santos Filha e José Antonio da Silva, por terem me apoiado no decorrer deste processo, por todo amor e carinho que me guiaram até aqui, pelos valores que me foram passados ao longo da vida e por sempre estarem ao meu lado, me apoiando nos desafios da caminhada.

Aos meus irmãos, Ayrlí e Ayron, pelo amor, paciência e incentivo constante; sem vocês, não seria possível.

Aos familiares de coração, Patrícia, Jaqueline, Dona Simone, Elielson, Emerson, Ravi, Ingrid, Renata, Samuel, Laercio e muitos outros que compartilharam essa jornada comigo, incentivando e apoiando.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, por todas as políticas de assistência estudantil que me possibilitaram estudar, sonhar e ir além das barreiras que me foram impostas por uma sociedade desigual, minha eterna gratidão.

Sou grato a toda a equipe do LAS (Laboratório de Água e Solo - UFRPE) do departamento de engenharia agrícola, pelo apoio, dedicação e auxílio no processo de construção do conhecimento, pelas oportunidades de participar de atividades de campo e discussões enriquecedoras, base fundamental para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal; vocês são parte fundamental de minha trajetória, em especial à Dra. Thayná Almeida e Engenheiro Eric Gabriel.

Ao meu orientador, Prof. Abelardo, por quem tenho tremenda admiração por sua incansável dedicação ao ensino, disponibilidade e por ter guiado este trabalho com tanto comprometimento e sensibilidade. Sua orientação foi base fundamental para o desenvolvimento deste TCC.

Ao CNPq e à FACEPE pelo apoio financeiro necessário à aquisição dos equipamentos que foram utilizados neste estudo.

A todos que, de alguma maneira, contribuíram para a construção deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“A educação modela as almas e recria os corações. Ela é a alavanca das mudanças sociais.”

Paulo Freire

## RESUMO

O presente trabalho analisa a utilização de geotecnologias e modelagem da condutividade hidráulica em conjunto com soluções baseadas na natureza (SbN) para práticas de manejo agrícola sustentável no semiárido brasileiro, tendo como fatores característicos a escassez hídrica e solos com baixa retenção de água. O objetivo geral constitui-se em avaliar de maneira não destrutiva, a influência do biochar e da cobertura morta na condutividade hidráulica e no vigor vegetativo do repolho (*Brassica oleracea*), por meio de imagens capturadas por drone. A pesquisa foi realizada no Vale Aluvial do Mimoso, em Pesqueira, Pernambuco, Brasil, com delineamento em blocos casualizados associando ou não a cobertura morta a diferentes doses de biochar. O monitoramento utilizou drone equipado com sensores multiespectrais, RGB e infravermelho próximo, para avaliação dos índices de vegetação Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), além da utilização do algoritmo Beerkan Estimation of Soil Transfer (BEST) para modelagem de condutividade hidráulica. Os resultados indicaram que a utilização de biochar e cobertura morta auxiliou no vigor vegetativo, com resultados significativos nos índices espectrais e melhoria na estrutura porosa do solo. A cobertura morta apresentou-se eficiente para atenuar o efeito de fundo do solo exposto nas imagens com vegetação esparsa, possibilitando maior precisão nas interpretações dos índices sobre a saúde das plantas. Conclui-se que o uso de práticas conservacionistas associadas ao monitoramento com drones possibilita uma gestão estratégica para a agricultura, auxiliando na tomada de decisão e na resiliência frente às limitações climáticas da região.

**Palavras-chave:** Agricultura familiar, Biochar, Cobertura morta, Drones, Manejo hídrico, Semiárido.

## ABSTRACT

This study analyzes the use of geotechnologies and hydraulic conductivity modeling in conjunction with nature-based solutions (NbS) for sustainable agricultural management practices in the Brazilian semi-arid region, characterized by water scarcity and soils with low water retention. The overall objective is to non-destructively evaluate the influence of biochar and mulch on the hydraulic conductivity and vegetative vigor of cabbage (*Brassica oleracea*) using drone-captured images. The research was conducted in the Mimoso Alluvial Valley, in Pesqueira, Pernambuco, Brazil, using a randomized block design associating or not associating mulch with different doses of biochar. Monitoring was carried out using a drone equipped with multispectral, RGB, and near-infrared sensors to evaluate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Visible Atmospherically Resistant Index (VARI), in addition to using the Beerkan Estimation of Soil Transfer (BEST) algorithm for hydraulic conductivity modeling. The results indicated that the use of biochar and mulch aided in vegetative vigor, with significant results in spectral indices and improvement in soil pore structure. Mulch proved efficient in attenuating the background effect of exposed soil in images with sparse vegetation, allowing for greater precision in the interpretation of plant health indices. It is concluded that the use of conservation practices associated with drone monitoring enables strategic management for agriculture, assisting in decision-making and resilience in the face of the region's climatic limitations.

**Keywords:** Family farming, Biochar, Mulching, Drones, Water management, Semiarid.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da área de estudo	24
Figura 2 – Croqui da área experimental por tratamentos	25
Figura 3 – Procedimento experimental do método Beekan	28
Figura 4 – Malha de pontos para extração dos índices	30
Figura 5 – Espacialização dos índices NDVI e VARI sobre a área de estudo	33
Tabela 1 – Estatística descritiva NDVI e VARI malha A	33
Figura 6 – Boxplots dos índices NDVI e VARI para os tratamentos aplicados ao repolho na malha A	34
Tabela 2 – Estatística descritiva NDVI e VARI para os tratamentos aplicados ao repolho na malha B	36
Figura 7 – Boxplots dos índices NDVI e VARI para os tratamentos aplicados ao repolho na malha B	37
Figura 8 – Análise estatística do NDVI em relação aos diferentes tratamentos	38
Figura 9 – Análise estatística do VARI em relação aos diferentes tratamentos	38
Figura 10 – Curvas de infiltração por pontos amostral	40
Figura 11 – Curvas de infiltração por tratamento	42
Figura 12 – Curvas de infiltração acumulada em função do tempo	44

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Brasileira de Aviação Civil
ANOVA	Análise de variância
AP	Amplitude entre quartis
BEST	Beerkan estimation of soil transfer parameters
BSsh	Extremamente quente e semiárido
BSL	BEST-Slope
CV	Coefficiente de variação
Dp	Densidade de Partículas
Ds	Densidade do solo
hg	Altura geométrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K( $\theta$ )	Condutividade hidráulica
Ks	Condutividade hidráulica saturada
Li	Limite inferior
Ls	Limite superior
Ma	Massa de amostra seca
Um	Massa de solo úmida
Ms	Massa de solo seca
NDVI	Normalized difference vegetation index
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
Qi	Quartil inferior
Qs	Quartil superior
RGB	(Red, Green, Blue)
RPA	Aeronave remotamente pilotada
SbN	Soluções baseadas na natureza
UFRPE	Universidade Federal Rural de Pernambuco
Ug	Umidade gravimétrica
VAM	Vale Aluvial do Mimoso
VARI	Visible Atmospherically Resistant Index
Vt	Volume total
Vu	Volume utilizado
$\theta(h)$	Curva de retenção de água

$\theta_s$

Umidade saturada

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2.</b>	<b>HIPÓTESE</b> .....	<b>17</b>
<b>3.</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
3.1.	Geral .....	18
3.2.	Específicos.....	18
<b>4.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>19</b>
4.1.	Semiárido Brasileiro e os Desafios da Disponibilidade Hídrica .....	19
4.2.	Biorretentores na Horticultura Irrigada em Ambiente Semiárido .....	20
4.3.	Necessidades do Monitoramento Agrícola .....	21
<b>5.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
5.1.	Área de Estudo .....	24
5.2.	Arranjo Experimental.....	25
5.3.	Monitoramento das Variáveis do Solo .....	25
5.4.	Monitoramento com Uso de Drone.....	29
5.5.	Análise Estatística.....	30
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>32</b>
6.1.	Malha A.....	33
6.2.	Vigor Vegetativo do Repolho Obtido por Índices Espectrais.....	33
6.3.	Malha B.....	35
6.4.	Vigor Vegetativo do Repolho Obtido por Índices Espectrais.....	35
6.5.	Modelagem de Parâmetros Hidrofísicos pelo Algoritmo BEST- Slope.....	39
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>45</b>
7.1.	Limitações e Perspectivas.....	45
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Regiões áridas e semiáridas ao redor do mundo enfrentam de maneira mais intensa o crescente desafio no manejo dos recursos hídricos, especialmente frente à intensificação da escassez hídrica e das mudanças climáticas globais (Sousa et al., 2025). O ciclo hidrológico, sensível às atividades antrópicas, sofre alterações que comprometem a disponibilidade e a qualidade da água, afetando diretamente os agroecossistemas agrícolas (Liu et al., 2025). Diante deste cenário, práticas agrícolas sustentáveis e tecnologias emergentes tornam-se essenciais para a adaptação produtiva e a conservação dos serviços ecossistêmicos nessas regiões (Teixeira et al., 2020).

Ambientes semiáridos, caracterizados por chuvas escassas, irregulares, elevada evapotranspiração e alta variabilidade climática, demandam soluções inovadoras que permitam o monitoramento integrado do solo, da vegetação e da disponibilidade hídrica. Entre essas inovações, o uso de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) no sensoriamento remoto tem-se destacado pela sua precisão e flexibilidade operacional. Segundo Almalki et al. (2022), o planejamento produtivo orientado por dados obtidos por sensoriamento remoto permite otimizar a gestão dos recursos naturais, oferecendo informações em tempo real sobre vigor vegetativo e padrões de estresse.

No tocante ao sensoriamento remoto com a utilização de imagens oriundas de satélite para o monitoramento de pequenas propriedades, observam-se limitações quando a resolução espacial e temporal (Panday et al., 2020). Por outro lado, o uso de drones equipados com câmeras RGB ou multiespectrais tem demonstrado grande potencial para o acompanhamento de pequenas áreas agrícolas, gerando produtos de alta resolução espacial e temporal, o que possibilita compreender com maior detalhamento a relação entre solo, água e planta (Fonseca et al., 2024; Guebsi et al., 2025).

Essa compreensão pode ser aprimorada com a avaliação da condutividade hidráulica do solo, que reflete sua capacidade de infiltração e redistribuição da água, sendo um dos principais indicadores ambientais associados à produtividade agrícola e à sustentabilidade dos sistemas de cultivo (Bargués-Tobella et al., 2024). Sua variação espacial influencia diretamente o desenvolvimento vegetativo das culturas e o manejo eficiente da irrigação. Estudos recentes indicam que o uso de índices

espectrais derivados de drones pode representar indiretamente variações da condutividade hidráulica, correlacionando parâmetros ópticos da vegetação, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice Resistente à Atmosfera na Região Visível (VARI), com o status hídrico e o vigor das plantas (Qubaa et al., 2021; Karunathilake et al., 2023).

Apesar dos avanços, a incorporação de drones na agricultura familiar ainda requer popularização do acesso e capacitação técnica. A integração entre agricultura de precisão e agricultura familiar pode reduzir desperdícios de recursos naturais e promover maior resiliência produtiva, especialmente em regiões semiáridas (John et al., 2023). Assim, o uso de RPA para mapear atributos físico-hídricos do solo, como a condutividade hidráulica, representa um avanço metodológico promissor para a gestão sustentável da produção agrícola em pequenas propriedades (Díaz-Delgado et al., 2025).

No contexto da agricultura familiar, o cultivo do repolho (*Brassica oleracea* var. capitata) constitui-se em um sistema produtivo altamente sensível às variações microambientais e ao manejo local, tornando-se uma cultura propícia à aplicação do sensoriamento remoto com aeronave remotamente pilotada (RPA), para auxiliar na tomada de decisão. O repolho é muito apreciado por seu alto valor nutricional, além de apresentar compostos bioativos como aminoácidos livres, em algumas variedades possui antocianinas, atribuindo propriedades antioxidantes (Jin et al., 2021). Destaca-se por ser uma das hortaliças mais consumidas no Brasil de acordo com o Ministério da Saúde (2022), ressaltando sua significância na segurança alimentar. Além disso, o cultivo do repolho ganha destaque por fortalecer a agricultura familiar como alternativa econômica por sua ampla aceitação no mercado com produção nacional de 467.622 toneladas em 2017, segundo o IBGE.

A forma como ocorre o uso da terra está conectado a problemáticas enfrentadas pela sociedade, tal quais a desertificação, escassez hídrica e desafios socioambientais (Dieguez et al., 2025). Faz-se necessário buscar não apenas o aprimoramento técnico da agricultura familiar, mas a integração de Soluções Baseadas na Natureza (SbN) voltadas à conservação hídrica e ao manejo sustentável dos agroecossistemas. A união de saberes entre o conhecimento tradicional e o técnico-científico oportuniza alternativas de gestão que fortalecem o senso de pertencimento da agricultura familiar, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis. Essa abordagem integradora poderá subsidiar políticas públicas e

estratégias de convivência produtiva com o semiárido, alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 2, 12 e 15) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

## **2. HIPÓTESE**

Os indicadores de vigor vegetativo obtidos por aeronave remotamente pilotada (RPA), associados à modelagem hidráulica do solo em áreas cultivadas com repolho, consorciado com cobertura morta e biochar, possibilitam um monitoramento agrícola de precisão, em sistemas de base familiar no semiárido?

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Geral**

Avaliar, de forma não destrutiva, a influência de soluções baseadas na natureza (SbN) na condutividade hidráulica do solo e a efetividade dos índices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e VARI (Visible Atmospherically Resistant Index obtidos), gerados a partir de imagens capturadas por drone, no manejo da cultura do repolho.

#### **3.2. Específicos**

1. Determinar a taxa de infiltração superficial da água no solo da área experimental;
2. Aplicar índices RGB e multiespectrais, VARI, NDVI, para caracterizar o vigor vegetativo do repolho irrigado;
3. Levantar os dados necessários para o algoritmo BEST-Slope: água infiltrada ao longo do tempo, granulometria do solo, teor de água inicial e o raio do anel do infiltrometro.
4. Modelar as propriedades hidráulicas do solo, estimando condutividade hidráulica e curva de retenção de água no solo por meio do algoritmo BEST-Slope.

## 4. REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1. Semiárido Brasileiro e os Desafios da Disponibilidade Hídrica

O semiárido brasileiro (SAB) é caracterizado por elevadas taxas de evapotranspiração, longos períodos de estiagem e chuvas irregulares, com alta variabilidade espaço-temporal (Almeida et al., 2024). Nessa região, a disponibilidade de água é afetada de forma direta pela variabilidade das precipitações, o que fragiliza a continuidade de atividades econômicas, principalmente aquelas que dependem do acesso constante a água (Montenegro e Ragab, 2010).

Esses ambientes se caracterizam por solos frequentemente rasos, com baixa capacidade de retenção, e reduzida disponibilidade hídrica, tanto superficial quanto subterrânea. As interferências humanas afetam diretamente a resiliência dos ecossistemas da região, fragilizando a capacidade de regeneração, não podendo ser apenas atribuído ao clima o avanço da aridez. Além disso, o manejo inadequado do solo, devido ao excessivo revolvimento por aração e a falta de manejo conservacionista, associado ao desmatamento, causam sua compactação e potencializam o aumento da aridez (Melo et al., 2020). Segundo Almeida et al. (2024), apesar dos esforços dos gestores em viabilizar o acompanhamento contínuo do ambiente semiárido, os custos e a extensão territorial se tornam barreiras para ampla compreensão das dinâmicas existentes.

Desta forma, o clima da região se estabelece como um grande desafio a ser superado. Marengo (2016) amplifica a argumentação mostrando que o semiárido nordestino enfrenta uma vulnerabilidade em relação a secas recorrentes com potencial de eventos extremos devido as mudanças climáticas, sendo necessário políticas de adaptação hídrica, ampliação e melhoria das infraestruturas de reservatórios e manejo agrícola mais resilientes.

A produção agrícola enfrenta desafios diretos estabelecidos por essas condições, que a torna vulnerável à flutuação da disponibilidade hídrica. Esses fatores, reforçam a necessidade da agricultura de base familiar, em adotar práticas sustentáveis e tecnologias emergentes no manejo como estratégia para manter a produtividade (Oliveira et al., 2025). Contudo, secas recorrentes, falha na oferta hídrica e a limitação de acesso a suporte técnico adequado, fazem com que a utilização de novos recursos tecnológicos e operacionais na irrigação, por exemplo

não atinjam o pequeno produtor, afetando a sustentabilidade ambiental e econômica das famílias no campo (Foster et al., 2018).

Desta forma, iniciativas que buscam o desenvolvimento produtivo ou econômico na região deverão superar o conjunto de limitações que torna o monitoramento da água e do solo uma etapa essencial. O levantamento do comportamento hídrico, das dinâmicas climáticas e alterações ambientais trará uma base de dados que serão indispensáveis para o estabelecimento de práticas de manejo agrícolas sustentáveis, além de servir como base para orientar políticas públicas para elaboração de estratégias de convivência com a seca (Bennett, 2024). As geotecnologias têm o potencial para viabilizar uma melhor compreensão dos resultados das dinâmicas existentes no semiárido, como por exemplo, identificar áreas propensas a construção de barragens que pode constituir parte como da estratégia de resiliência com o semiárido (Sousa et al., 2025), e possibilitar adoção de técnicas de agricultura de precisão.

#### **4.2. Biorretentores na Horticultura Irrigada em Ambiente Semiárido**

No caso das hortaliças, o cultivo no semiárido apresenta desafios particulares, devido à elevada sensibilidade a variação de disponibilidade hídrica, temperatura e umidade. Para realização de um cultivo adequado se faz necessário um manejo rigoroso, condições ambientais estáveis, suprimento de nutrientes adequado para que seja alcançado o máximo potencial produtivo (Almeida, 2022). Perdas significativas podem ser causadas devido a oscilação na disponibilidade de água, sendo necessário buscar meios e alternativas para um manejo de qualidade (El Fartassi et al., 2025).

O cultivo de repolho no semiárido torna os desafios ainda mais evidentes, devido a sua forte dependência hídrica. Para garantir a expansão celular e a formação compacta das cabeças do repolho, é necessária umidade relativamente constante (Mohan et al., 2025). Esses fatores, fazem com que seja necessário um manejo hídrico preciso, pois o estresse hídrico ocasiona redução do crescimento, folhas internas mal-formadas, rachaduras e queda acentuada na qualidade comercial (Abbas et al., 2023). Por isso, entender o comportamento hídrico do solo, suas variações na capacidade de infiltração são cruciais para alcançar boa produtividade no semiárido.

O uso de biorretentores como a cobertura morta é estratégico enquanto técnica conservacionista para o semiárido, proporciona proteção física ao solo, amenizando os efeitos negativos das altas temperaturas, reduzindo a perda de água por evaporação beneficiando de maneira direta a cultura produzida (Rodrigues et al., 2023). Essa prática consiste em deixar restos culturais sobre o solo, embora seja considerada simples, pode potencializar os resultados da agricultura familiar. Dependendo da concentração aplicada e dos materiais de origem, podem melhorar a eficiência da irrigação (Carvalho et al., 2011).

Esta técnica pode ser combinada com o biochar, que se constitui em um adsorvente que contribui para o alcance de uma agricultura sustentável, por meio da melhoria dos atributos do solo e contribuindo para eficiência na produção (Lima et al., 2021). Como o biochar pode ser produzido a partir de resíduos de vegetais, tais como casca de arroz, sabugo de milho entre outras fontes, torna-se uma forma sustentável de destinação desses resíduos. Desta forma, o sensoriamento remoto se entrelaça entre as práticas que o agricultor pode adotar para acompanhar os resultados do manejo adotado na produção de repolho no semiárido.

### **4.3. Necessidades do Monitoramento Agrícola**

A compreensão da maneira como a água se distribui e sua dinâmica de infiltração e armazenamento em solos do semiárido é fundamental para entender a disponibilidade hídrica (Mao et al., 2022). Fatores como textura do solo, teor de matéria orgânica, estrutura física e condutividade elétrica, regulam o fluxo de água tanto no subsolo quanto na superfície. Parte significativa da água da chuva em regiões semiáridas é perdida pela elevada evapotranspiração, prejudicando o balanço hídrico (Liu et al., 2022).

Além disso, as águas subterrâneas são um recurso estratégico para convivência com a escassez hídrica, porém, apresenta sensibilidade ao bombeamento excessivo. A aplicação excessiva de água na irrigação, sem o devido controle e monitoramento de sua salinidade podem acarretar em concentrações excessivas de sais na superfície do solo, causando posteriormente a lixiviação dos sais para os aquíferos e a salinização das águas subterrâneas (Zhao et al., 2025). Desta forma, a qualidade das águas subterrâneas pode ser comprometida, de tal modo a acelerar a salinização de vales aluviais (Almeida et al., 2024).

Entretanto, o acompanhamento sistemático das dinâmicas hídricas por campanhas de campo, medições esporádicas e observações pontuais, possuem limitações que dificultam o acompanhamento contínuo da dinâmica hídrica (Ogilvie et al., 2018). Os custos elevados associados à instrumentação e manutenção de redes de monitoramento em conjunto com a vasta extensão territorial do Brasil torna o processo muitas vezes inacessível. Embora seja crucial o conhecimento da dinâmica hídrica, a obtenção de dados de maneira tradicional e esporádica não atende as necessidades de manejo (Almeida et al., 2024).

Deste modo, as observações precisam ter sua capacidade ampliada por técnicas que consigam reduzir custos, aumentem a precisão e viabilizem análises que consigam compreender os desafios ambientais em escalas adequadas ao semiárido (Crioni et al., 2024). Essas lacunas possibilitam a aplicação de tecnologias modernas, capazes de coletar dados em intervalos regulares, cobrindo grandes extensões territoriais e fornecer indicadores úteis para a gestão hídrica. Partindo deste cenário, o sensoriamento remoto torna-se uma via estratégica para compreender as dinâmicas do semiárido (Badapalli, 2025).

Nesse sentido, os métodos tradicionais de monitoramento têm suas limitações reduzidas com o sensoriamento remoto. Ao utilizar satélites ou drones para captar informações do solo, vegetação e da água, é possível ampliar a compreensão das dinâmicas hídricas no semiárido (Duarte et al., 2024). Essa abordagem é essencial para realização de acompanhamentos regulares, preenchendo as lacunas existentes de forma robusta (Mliyah et al., 2025).

Como resultado, índices derivados de imagens remotas referentes a vegetação, temperatura da superfície, umidade do solo e refletância espectral auxiliam a detectar processos de desertificação e estimar parâmetros ambientais relevantes para o manejo apropriado (Huang et al., 2025). No entanto, pequenas propriedades não conseguem se beneficiar do sensoriamento remoto via satélite diretamente, por sua baixa resolução espacial. Por exemplo, imagens disponibilizadas gratuitamente como as do Landsat tem uma resolução de 30 m, considerada inadequada para propriedades de pequeno porte. Esta limitação atinge a agricultura de base familiar, que, segundo o Censo Agropecuário de 2017 realizado pelo IBGE, constitui cerca de 77% das propriedades agrícolas do país (IBGE, 2017).

Desta forma, os drones são uma alternativa que viabiliza o acesso do pequeno produtor ao sensoriamento remoto, tornando possível o monitoramento do vigor vegetativo das culturas e da cobertura do solo, dentre outros fatores (Gokool et al., 2023). A geração de mapas com riqueza de detalhes proporciona identificar padrões invisíveis a olho nu, orientando práticas de manejo mais eficientes. Além disso, diferentes sensores podem ser utilizados como sensores RGB e multiespectrais, ampliando a gama de aplicações possíveis (Abrahams et al., 2023).

Essas plataformas oferecem flexibilidade operacional, sendo a demanda da cultura o norteador para o estabelecimento do horário adequado para voos, repetições de levantamento de maneira estratégica. Os drones quando comparados aos métodos tradicionais, reduzem custos e aumentam a precisão com análises rápidas (Yacoob et al., 2024). Essa agilidade evita perdas, utilização mais racional dos recursos, fator essencial para culturas sensíveis como hortaliças (Makam et al., 2024).

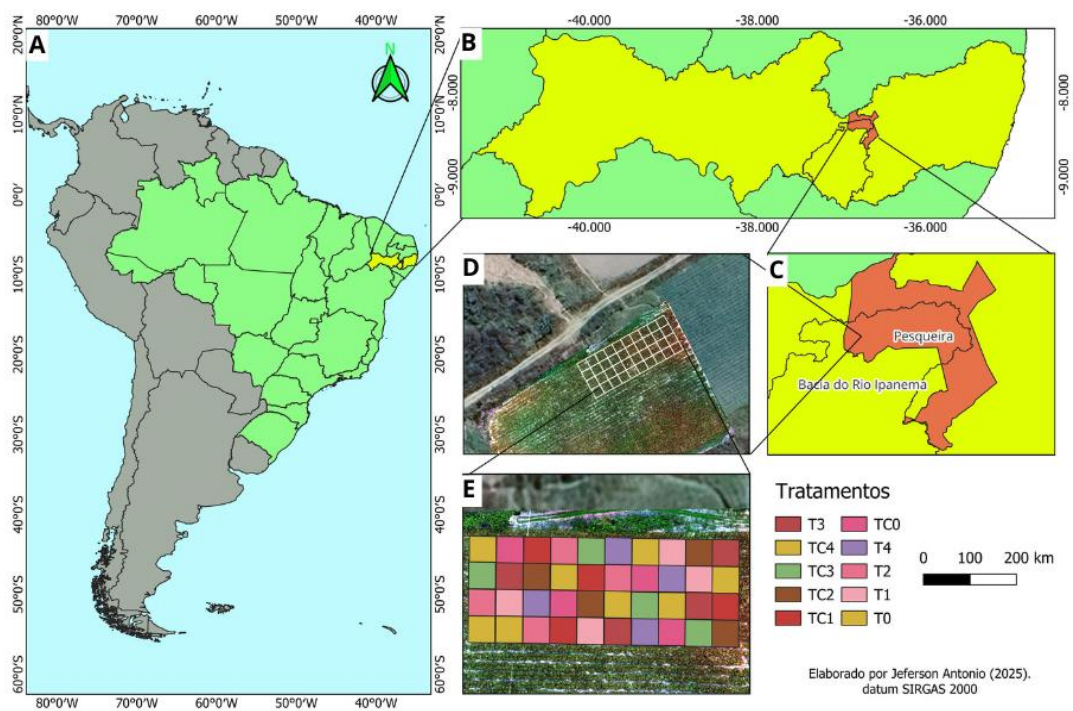
Os drones se consolidam como uma solução tecnológica capaz de romper as barreiras impostas aos pequenos produtores, viabilizando o monitoramento preciso capaz de fortalecer a gestão dos recursos naturais, promovendo assim a sustentabilidade e agregando valor à produção (McCarthy et al., 2023). Desta maneira, constituem uma tecnologia central para o futuro da agricultura em regiões de clima adverso. Segundo Santos et al. (2024), o monitoramento preciso das culturas é crucial para otimizar o manejo, além de garantir a sustentabilidade.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1. Área de Estudo

A pesquisa foi realizada no o Vale Aluvial do Mimoso (VAM), localizado na Bacia do Alto Ipanema (BAI), no município de Pesqueira, situada na região do Agreste pernambucano, Brasil (Figura 1). Sendo o mesmo, parte constituinte das nascentes do Rio Ipanema, afluente da Bacia do Rio São Francisco. Nesta região do VAM existe a predominância da agricultura familiar, prática adotada pelos agricultores do assentamento Nossa Senhora do Rosário que se localiza nas redondezas. O clima na área experimental é classificado segundo Köppen como BSh (extremamente quente e semiárido), com temperatura média de 23°C e precipitação média anual de 630 mm (Carvalho et al., 2018; Almeida et al., 2025).

**Figura 1** - Localização da área de estudo.

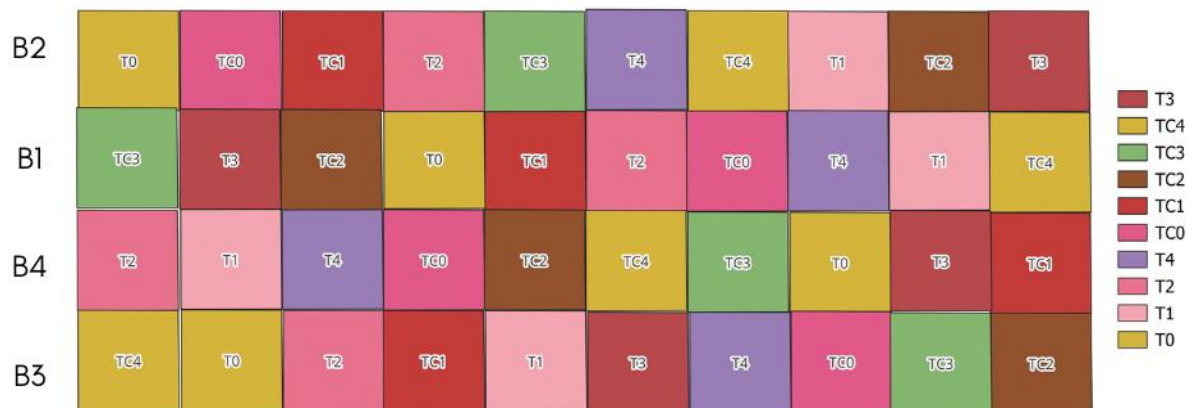


Fonte: Autoral, 2025. América do Sul e Brasil (A); Estado de Pernambuco (B); município de Pesqueira com demarcação da Bacia do Rio Ipanema (C); demarcação da área de estudo (D); o layout do experimento de campo com quatro repetições por tratamento e dez tratamentos (E).

## 5.2. Arranjo Experimental

Na área experimental foi implementado o cultivo de repolho (*Brassica oleracea* var. capitata) em fileira dupla com espaçamento entre si de 0,30 m e entre ruas de 0,7 m com delineamento de blocos inteiramente casualizados, com dimensões de 3 x 3 m (9 m<sup>2</sup>). Utilizando biochar produzido a partir de podas de cajueiro através do processo de pirólise, o qual foi aplicado em diferentes doses no solo com e sem associação de cobertura morta na área de estudo, conforme ilustrado pela Figura 2.

**Figura 2** - Croqui da área experimental por tratamentos.



(T0) Testemunha absoluta; (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

Os tratamentos foram:

(T0): Testemunha absoluta, apenas manejo convencional; (T1) a (T4): Manejo convencional com doses de biochar 10, 20, 30 e 40 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente; (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC1) a (TC4): Doses de biochar de 10, 20, 30 e 40 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente, combinadas com 8 Mg ha<sup>-1</sup> de cobertura morta, sendo totalizado 10 tratamentos com 4 repetições conforme apresentado na Figura 2.

## 5.3. Monitoramento das Variáveis do Solo

A umidade gravimétrica foi determinada, obtendo-se a relação entre a massa úmida (Mu) existente no solo e a massa seca após secagem em estufa a 105°C por 24 h até massa constante. Os cálculos foram realizados por meio da Equação 1.

$$Ug = \frac{Mu - Ms}{Ms - R} \quad (1)$$

em que: Mu: Massa do solo úmida. Ms: Massa do solo seca em estufa. R: Massa do recipiente (ou material utilizado na pesagem).

A densidade do solo (Ds) foi determinada através da relação entre a massa de solo seca e volume, de acordo com Equação 2, sendo os resultados expressos em g cm<sup>-3</sup>.

$$Ds = \frac{Ms}{V} \quad (2)$$

em que: Ds: Densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>). Ms: Massa do solo seca em estufa (g). V: volume do anel volumétrico (cm<sup>3</sup>).

A densidade de partículas foi determinada através do método do balão volumétrico pela relação entre a massa da amostra seca e o volume que ela desloca em um balão volumétrico pela Equação 3. A amostra de 20 gramas é seca a 105 °C até peso constante, transferida para o balão volumétrica, coberta com álcool etílico para eliminar bolhas e o volume é completado até a marcação volumétrica, de acordo com a metodologia (Teixeira e Donagemma, 2017).

$$Dp = \frac{ma}{(Vt - Va)} \quad (3)$$

em que: Dp: Densidade de partículas, em g cm<sup>-3</sup>. Ma: Massa de amostra seca a 105 °C, em gramas. Vt: Volume total aferido do balão, em mL. Vu: Volume utilizado para completar o balão com a amostra em mL.

A análise granulométrica do solo foi realizada pelo método do densímetro. Inicialmente, adicionou-se solução dispersante às amostras, as quais permaneceram em repouso para permitir a completa dispersão das partículas. Em seguida, as amostras foram submetidas à agitação mecânica e, posteriormente, procedeu-se à separação das frações granulométricas, com a determinação das frações areia por peneiramento e silte e argila por sedimentação, utilizando densímetro, conforme metodologia descrita pela Embrapa (2017).

Os parâmetros hidráulicos do solo foram caracterizados por meio de ensaios de infiltração associados a dados de textura do solo, permitindo a estimativa da condutividade hidráulica saturada e da curva de retenção de água no solo. O método de infiltração adotado no presente trabalho foi o de Beerkan, realizado em campo

por meio de um anel simples com raio de 11 cm.

Os parâmetros hidráulicos foram estimados por meio do algoritmo BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters). A infiltração acumulada foi descrita pela equação implícita no algoritmo utilizado:

$$I(t) = S\sqrt{t} + K_s t \quad (4)$$

em que:  $I(t)$ : infiltração acumulada no tempo  $t(L)$ ;  $t$ : tempo decorrido desde o início do ensaio de infiltração;  $S$ : sorvidade do solo, parâmetro relacionado à capacidade do solo em absorver água por ação capilar, dominante nos estágios iniciais da infiltração;  $K_s$ : condutividade hidráulica saturada do solo, associada ao fluxo de água sob regime gravitacional em condição de saturação.

A curva de retenção de água no solo foi descrita pelo modelo de van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m} \quad \text{com} \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (5)$$

em que:  $\theta(h)$ : conteúdo volumétrico de água no solo em função do potencial matricial em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ;  $h$ : potencial matricial da água no solo;  $\theta_r$ : conteúdo volumétrico de água residual do solo;  $\theta_s$ : conteúdo volumétrico de água na saturação do solo;  $\alpha$ : parâmetro relacionado à pressão de entrada de ar no solo;  $n$ : parâmetro de forma da curva;  $m$ : parâmetro de forma adimensional, dependente de  $n$ , que controla a inclinação da curva de retenção.

A função condutividade hidráulica foi representada pelo modelo de Brooks e Corey (1964):

$$K(\theta) = K_s \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (6)$$

em que:  $K(\theta)$ : condutividade hidráulica não saturada do solo;  $K_s$ : condutividade hidráulica saturada do solo;  $\theta$ : conteúdo volumétrico de água no solo;  $\theta_r$ : conteúdo volumétrico de água residual;  $\theta_s$ : conteúdo volumétrico de água na saturação do solo;  $\eta$ : parâmetro empírico adimensional, relacionado à conectividade e tortuosidade dos poros do solo.

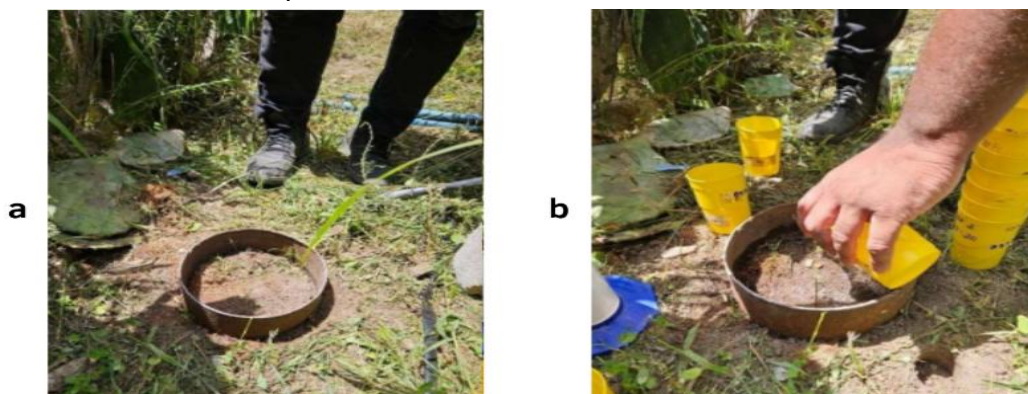
No local do ensaio, a superfície do solo foi previamente limpa, com a remoção de empecilhos grosseiros, mantendo-se as raízes e a cobertura aplicada, desde que

não interferissem na correta implantação do anel, de modo a evitar escoamento lateral na parcela experimental. Antes do início do experimento, foi coletada uma amostra de solo para determinação da umidade inicial e da densidade aparente.

O cilindro é alocado na superfície do solo, com penetração de aproximadamente 1 cm, visando minimizar o escoamento lateral da água aplicada. Em seguida, um volume de água previamente determinado é vertido no interior do cilindro, o tempo de infiltração é registrado, até que a lâmina de água seja completamente infiltrada. O procedimento é repetido até alcançar tempo constante, criando uma série de repetições. Com o solo saturado, no final do experimento é coletada uma amostra para determinação da umidade final.

A partir dos dados provenientes do método Beerkan é possível proceder com a modelagem dos parâmetros hidráulicos, por meio da estimativa da curva de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica. O método faz uso dos modelos propostos por Van Genuchten (1980), para a curva de retenção de água  $\theta(h)$ , e Brooks e Corey (1964), para a curva de condutividade hidráulica  $K(\theta)$ , podendo descrever as curvas através de cinco parâmetros: dois de forma,  $m$  ou  $n$  e  $\eta$ , relacionado principalmente com a textura, e três de normalização  $\theta_s$ ,  $K_s$  e  $h_g$ , dependentes da estrutura do solo (Souza et al., 2008; Macêdo e Soares, 2020). Os parâmetros de forma e normalização foram obtidos por meio da utilização do algoritmo de análise de dados BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters) desenvolvido por Lassabatère et al. (2006), chamado por BEST-Slope (BSL).

**Figura 3** – Procedimento experimental do método Beerkan.



Fonte: Autorial, 2025. (a) Alocação do infiltrômetro de anel; (b) Aplicação pré-determinadas de água.

#### 5.4. Monitoramento com Uso de Drone

A coleta das imagens foi realizada com drone do modelo DJI Phantom 4 Multiespectral, seguindo todo rigor estabelecidos pela Agência Brasileira de Aviação Civil (ANAC) para operação com aeronave remotamente pilotada (RPA). O equipamento possui um sistema de câmeras que englobam cinco bandas multiespectrais, sendo elas: Azul; Verde; Vermelho; Borda vermelha e Infravermelho próximo. O voo foi conduzido a uma altitude de 40 m, gerando imagens com resolução de aproximadamente 1,6 cm por pixel e com 75% de sobreposição entre as imagens. Um painel de calibração radiométrico foi empregado na operação, para realização dos ajustes de refletância necessários para o processamento dos índices de vegetação. Foi utilizado o software Agisoft Metashape para o processamento da imagem ortomosaico. Os índices de vegetação e mapas relacionados foram processados no software QGIS onde foram calculados o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e o VARI (Visible Atmospherically Resistant Index), para determinar por diferentes combinações de bandas o vigor vegetativo.

O NDVI é um índice multiespectral constituído com base nas bandas do Infravermelho Próximo e Vermelho, foi proposto por Rouse et al. (1973). Tem como objetivo identificar o vigor vegetativo das plantas, sua determinação é com base na seguinte Equação 4:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad (7)$$

em que: NIR: Banda do Infravermelho Próximo; R: Banda do Vermelho.

O VARI se utiliza apenas de bandas RGB (Vermelho, Verde, Azul) para analisar a saúde das plantas (Equação 5), sendo aplicado na detecção de estresse, cobertura foliar e outros parâmetros vegetativo.

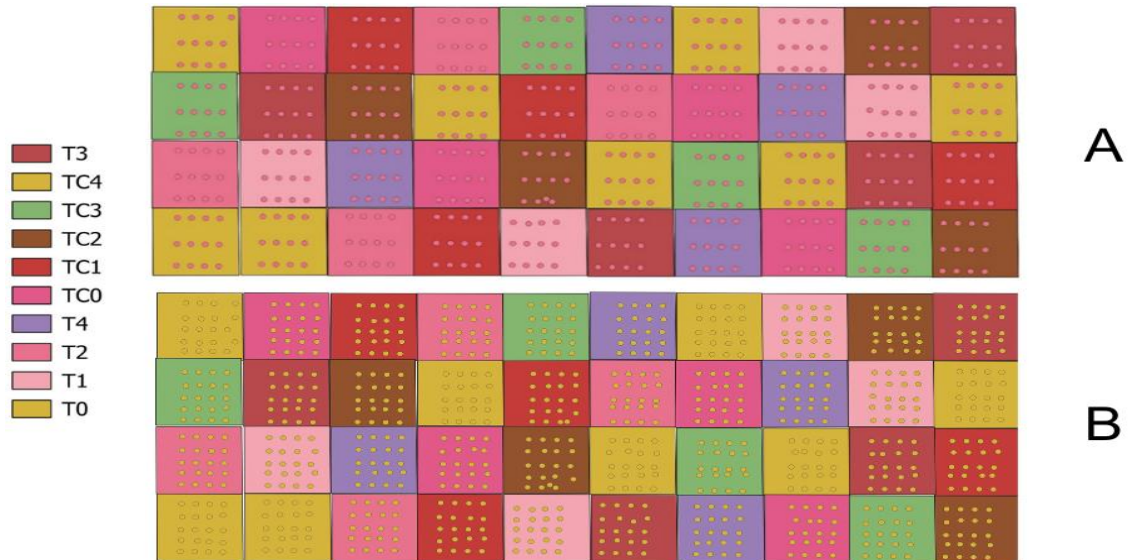
$$\text{VARI} = \frac{(G - R)}{(G + R - B)} \quad (8)$$

em que: G: Banda do Verde; R: Banda do Vermelho; B: Banda do Azul.

A Figura 4 apresenta as malhas de pontos utilizadas para extração dos índices de cada parcela do experimento, após 79 dias do plantio. Os pontos da Figura 4A foram distribuídos buscando capturar valores oriundo do repolho, ou seja, linhas de cultivo com 12 pontos de coleta por parcela, gerando uma malha de 480

pontos ao todo, enquanto a Figura 4B teve sua distribuição de pontos em linhas e entrelinhas de cultivo tendo 20 pontos por parcela, gerando uma malha de 800 pontos.

**Figura 4** - Malha de pontos para extração dos índices.



(A) malha para linhas de cultivo, (B) malha para linhas e entrelinhas de cultivo; (T0) Testemunha absoluta; (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

## 5.5. Análise Estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro–Wilk e à análise de variância (ANOVA), por meio do teste F, a fim de avaliar os efeitos dos tratamentos de diferentes doses de biochar com e sem cobertura. Para identificar a existência ou não de diferença significativa, em caso de diferença significativa constatada as médias seriam comparadas pelo teste de Tukey.

A variabilidade dos dados foi classificada com base nos valores do coeficiente de variação (CV), segundo Warrick e Nielsen (1980), em baixa (CV ≤ 12%), média (12% < CV ≤ 60%) e alta (CV > 60%). A identificação de dados discrepantes foi realizada conforme o critério proposto por Hoaglin et al. (1992), considerando-se como discrepantes os valores inferiores ao limite inferior (Li) ou superiores ao limite superior (Ls), estimados pelas Equações (9) e (10).

$$Li = Qi - 1,5AP \quad (9)$$

$$Ls = Qs + 1,5AP \quad (10)$$

em que: Li: limite inferior; Ls: limite superior; Qi: quartil inferior; Qs: quartil superior; AP: amplitude entre o 1<sup>a</sup> e o 3<sup>a</sup> quartil.

A remoção dos valores discrepantes foi avaliada caso a caso, sendo realizada apenas quando tais valores não representaram a variabilidade natural do fenômeno e não alteraram a interpretação estatística dos resultados. Nos casos em que os valores extremos refletiram a heterogeneidade inerente ao sistema avaliado e não estiveram associados a erros de medição, processamento ou falhas instrumentais, estes foram mantidos na análise estatística (Agathokleous et al., 2025).

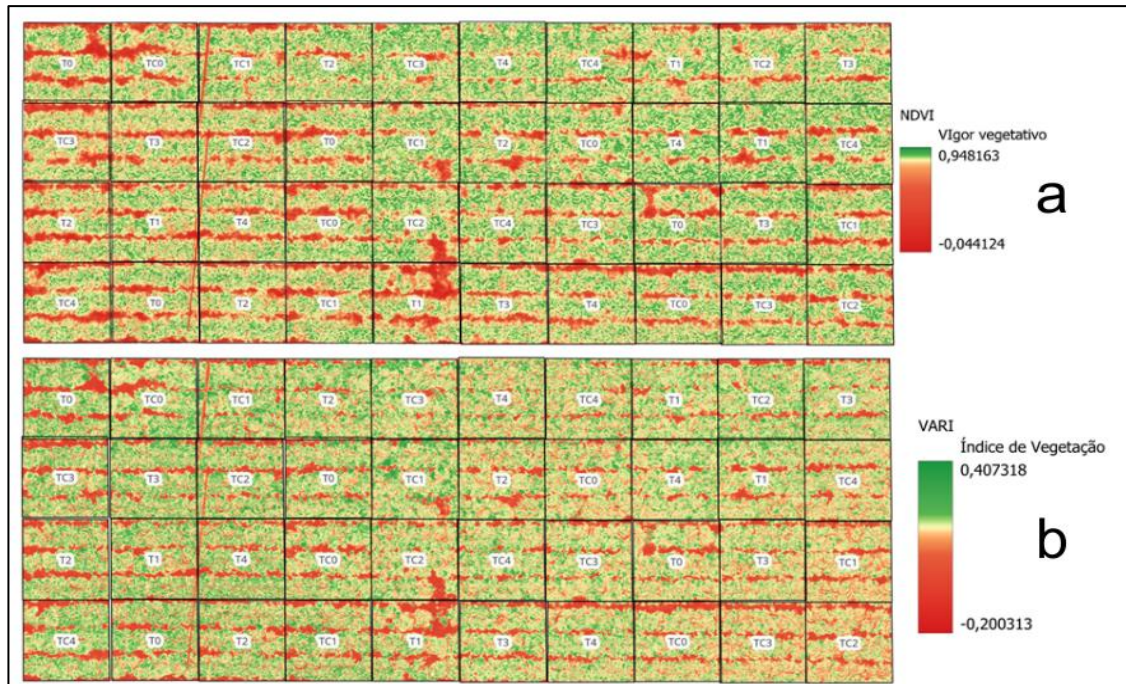
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar de forma integrada e não destrutiva, a influência da aplicação de biochar, associado ou não à cobertura morta, sobre os atributos hidrofísicos do solo e sobre o vigor vegetativo da cultura do repolho, utilizando índices espectrais obtidos a partir de imagens de aeronave remotamente pilotada. Além das análises do comportamento espectral da cultura, o estudo também contemplou a avaliação da condutividade hidráulica do solo, variável fundamental para compreensão da dinâmica da água no sistema solo-planta, especialmente em ambientes semiáridos.

De modo geral, os procedimentos metodológicos adotados permitiram alcançar os objetivos propostos, uma vez que foi possível coletar, organizar e analisar um conjunto consistente de dados, aplicando ferramentas estatísticas e técnicas de sensoriamento remoto adequada ao tipo de estudo. A análise das variáveis possibilitou compreender o comportamento médio do sistema solo-planta, bem como sua variabilidade espacial. O conjunto de dados não sofreu alteração com a remoção de valores extremos por terem sido considerado como parte do fenômeno analisado.

A espacialização dos índices NDVI e VARI apresentada na Figura 5 constitui um ponto de partida importante para a compreensão dos resultados obtidos ao longo deste estudo. Essas imagens possibilitam uma visão integrada do comportamento da cultura na área experimental, evidenciando, de forma clara, que o desenvolvimento das plantas não ocorreu de maneira totalmente uniforme, mesmo dentro de parcelas submetidas ao mesmo tratamento. O predomínio de áreas em tons esverdeados indica que, de modo geral, a cultura apresentou bom vigor vegetativo e condições fisiológica satisfatória em ambos os índices analisados (Nitu et al., 2025; Das et al., 2025).

**Figura 5 – Espacialização dos índices NDVI e VARI sobre a área de estudo.**



a: espacialização do NDVI; b: espacialização do VARI; (T0) Testemunha absoluta; (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

## 6.1. Malha A

### 6.2. Vigor Vegetativo do Repolho Obtido por Índices Espectrais

Os resultados obtidos para a malha apresentada na Figura 4A estão apresentados por meio da estatística descritiva dos índices NDVI e VARI, sintetizados na Tabela 1. Nesta tabela, são apresentados os valores médios, os desvios padrão, bem como os valores mínimos e máximos observados para cada tratamento.

**Tabela 1.** Estatística descritiva NDVI e VARI para malha A.

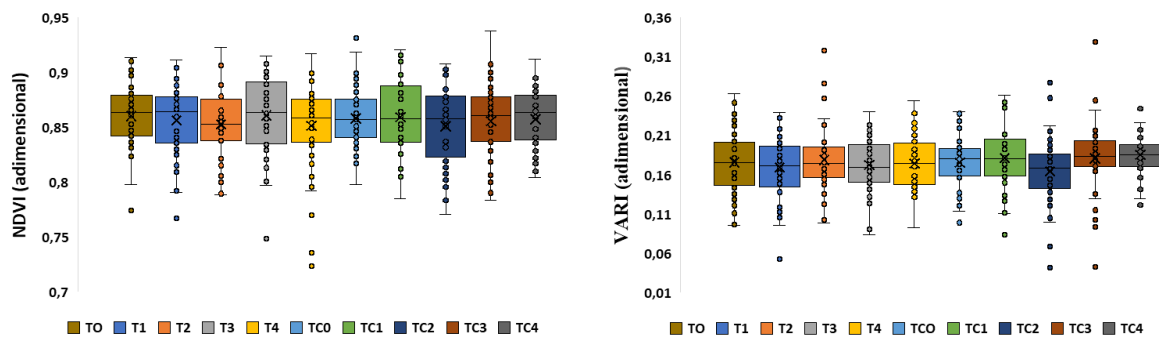
		T0	T1	T2	T3	T4	TC0	TC1	TC2	TC3	TC4
NDVI	Média	0,862351	0,858438	0,853055	0,863577	0,85887	0,856857	0,85927	0,851184	0,85585	0,857739
	Desvio Padrão	0,025161	0,028864	0,030954	0,030559	0,027983	0,025527	0,031254	0,033839	0,033044	0,02558
	Máximo	0,91361	0,91131	0,92309	0,91549	0,91723	0,91864	0,92057	0,90818	0,9381	0,91201
	Mínimo	0,7981	0,7905	0,78882	0,79736	0,79245	0,79771	0,78488	0,77096	0,78348	0,80438
VARI	Média	0,175852	0,172052	0,175365	0,172673	0,174311	0,177058	0,181732	0,164956	0,186253	0,18541
	Desvio Padrão	0,039769	0,036066	0,024539	0,034475	0,03215	0,029754	0,041024	0,029017	0,022244	0,019252
	Máximo	0,26352	0,23969	0,2313	0,24023	0,25448	0,24032	0,26131	0,22212	0,24204	0,22611
	Mínimo	0,09585	0,0955	0,12295	0,08373	0,09247	0,11355	0,08383	0,09941	0,12967	0,14134

(T0) Testemunha absoluta; (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

A análise da Tabela 1 evidencia que os valores médios de NDVI se mantiveram elevados em todos os tratamentos, indicando bom vigor vegetativo da cultura na área correspondente à malha apresentada na Figura 4A. Além disso, observa-se que as diferenças entre as médias foram pequenas e acompanhadas de desvios padrão relativamente baixos, o que sugere baixa variabilidade dos dados. Para o índice VARI, comportamento semelhante foi observado, com valores médios próximos entre os tratamentos e amplitude de variação moderada, tendo como valor mínimo 0,08373 para o tratamento T3 (manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>) e máximo de 0,26352 para o tratamento T0 (testemunha absoluta) (Mota et al., 2025).

A Figura 6 representa os resultados da malha A por meio de boxplots, referente aos índices de NDVI e VARI, respectivamente. A representação gráfica permite avaliar a distribuição dos dados, a dispersão e a sobreposição entre os tratamentos, sendo fundamental em situação nas quais não há diferença estatística significativa, como nos resultados encontrados.

**Figura 6** – Boxplots dos índices NDVI e VARI para os tratamentos aplicados ao repolho na malha A.



(T0) Testemunha absoluta; (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

Os índices espectrais NDVI e VARI indicaram, de modo geral, bom desenvolvimento vegetativo em todos os tratamentos avaliados, indicando condições favoráveis de crescimento ao longo do experimento. As diferenças entre os tratamentos foram pequenas, com medianas bastantes próximas, sugerindo que nenhum dos tratamentos promoveu mudanças drásticas no vigor vegetativo do repolho (Zhang et al., 2022)

A distribuição dos dados de NDVI revelou, na maioria dos tratamentos, baixa a moderada variabilidade, indicando certa uniformidade no desenvolvimento das plantas. No entanto, alguns tratamentos apresentaram maior dispersão e pontos discrepantes, essencialmente com valores mais baixos. Esses casos podem estar relacionados a situações pontuais no campo, como variações naturais do solo, diferenças na disponibilidade de água ou mesmo falhas localizadas de manejo, fatores comuns em experimentos agrícolas (Nugraha et al., 2024).

O índice VARI apresentou valores compatíveis com uma vegetação saudável, concentrando as suas médias principalmente entre 0,15 e 0,19. Comparado ao NDVI, o VARI mostrou maior variação entre os tratamentos, o que é esperado, já que esse índice é mais sensível às condições de iluminação, à presença de sombras e à estrutura do dossel. Ainda assim, foi possível observar uma leve tendência de melhores resultados nos tratamentos TC1, TC3 e TC4, sugerindo plantas com coloração mais intensas e, possivelmente, melhor condição fisiológica.

Quando analisado em conjunto, NDVI e VARI apresentaram comportamentos coerentes, especialmente nos tratamentos TC1 e TC4, nos quais ambos os índices indicaram melhor desempenho da cultura. Isso sugere que esses tratamentos contribuíram não apenas para maior crescimento do repolho, mas também para melhor qualidade fisiológica das plantas. Em alguns casos, no entanto, valores elevados de NDVI acompanhados de VARI mais baixo podem indicar plantas com bom volume de biomassa, mas com eficiência fisiológica reduzida.

### **6.3. Malha B**

#### **6.4. Vigor Vegetativo do Repolho Obtido por Índices Espectrais**

Para malha B, foi adotado a mesma abordagem utilizada na malha A, a estatística descritiva dos índices NDVI e VARI, estão apresentadas na Tabela 2. Nesta malha observou-se maior amplitude de variação dos índices, essencialmente para o NDVI, com valores mínimos mais baixos e desvios padrão mais elevados quando comparado aos resultados da malha A.

**Tabela 2.** Estatística descritiva NDVI e VARI para malha B.

		T0	T1	T2	T3	T4	TC0	TC1	TC2	TC3	TC4
NDVI	Média	0,761279	0,780545	0,797192	0,781492	0,790185	0,801644	0,811358	0,803383	0,801099	0,79906
	Desvio Padrão	0,161411	0,148106	0,118076	0,137247	0,123732	0,109807	0,114884	0,101199	0,113151	0,108123
	Máximo	0,91361	0,91131	0,92309	0,91549	0,91723	0,93158	0,92057	0,90818	0,9381	0,91201
	Mínimo	0,33591	0,30725	0,31948	0,29503	0,40857	0,42214	0,32286	0,49235	0,39529	0,4251
VARI	Média	0,125791	0,135016	0,152751	0,131743	0,142247	0,146515	0,16124	0,144243	0,15084	0,155462
	Desvio Padrão	0,096945	0,077634	0,070488	0,078947	0,071569	0,071725	0,070954	0,06977	0,072799	0,066428
	Máximo	0,28637	0,23969	0,31823	0,25531	0,29266	0,28242	0,29438	0,27738	0,32948	0,24476
	Mínimo	-0,10246	-0,04386	-0,04708	-0,07882	-0,04426	-0,07219	-0,04728	-0,02906	-0,02604	-0,01854

(T0) Testemunha absoluta; (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

De modo geral, observou-se que os valores médios de NDVI na malha B foram inferiores aos registrados na malha A, além de apresentarem maior amplitude de variação. Esse comportamento está diretamente relacionado à presença de solo exposto e à maior heterogeneidade da superfície, fatores que influenciam a resposta espectral e aumentam a variabilidade dos dados. Ainda assim, as médias entre os tratamentos permaneceram próximas, não sendo observados padrões consistentes que indiquem efeito diferenciado das abordagens avaliados.

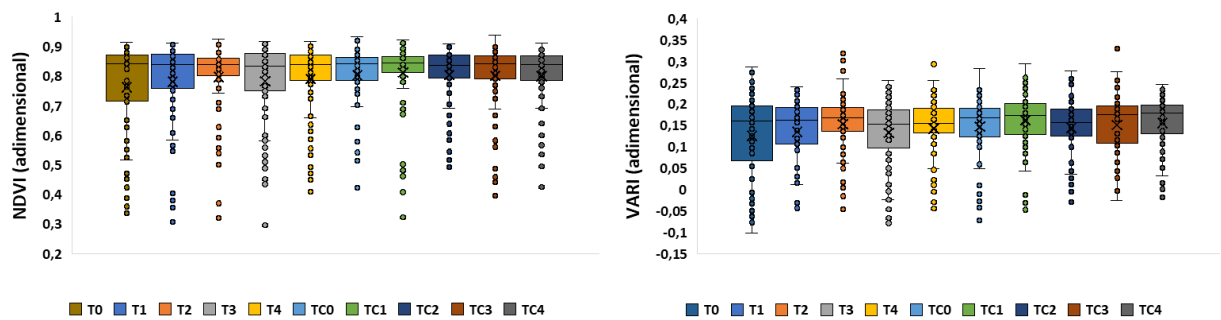
Para o VARI, comportamento semelhante foi identificado. Embora a malha B apresente maior dispersão dos valores, especialmente devido à interferência do solo exposto no espectro do visível, as médias dos tratamentos mantiveram-se próximas, sem tendência clara de incremento ou redução associada às doses de biochar ou à presença de cobertura morta. Esse resultado reforça que, mesmo em condições de maior variabilidade superficial, os tratamentos não promoveram respostas espectrais contrastantes (Nitu et al., 2025; Delaney et al., 2025).

A interpretação baseada exclusivamente na estatística descritiva indica, portanto, que os índices NDVI e VARI na malha B apresentaram comportamento geral semelhante entre os tratamentos, com variações atribuídas principalmente à heterogeneidade da superfície e não aos efeitos diretos do biochar ou da cobertura morta. Essa constatação reforça a importância de considerar os valores mínimos, máximos e desvios padrão, e não apenas as médias, na análise de dados espectrais em áreas heterogêneas.

Os boxplots apresentados na Figura 7 refaçam essa interpretação, evidenciando maior dispersão dos dados em comparação à malha A, porém com elevada sobreposição entre os tratamentos. Esse padrão gráfico indica que a

variabilidade observada está mais associada às características da superfície e à heterogeneidade espacial do que, propriamente ao efeito dos tratamentos.

**Figura 7** – Boxplots dos índices NDVI e VARI para os tratamentos aplicados ao repolho na malha B.



(T0) Testemunha absoluta; (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

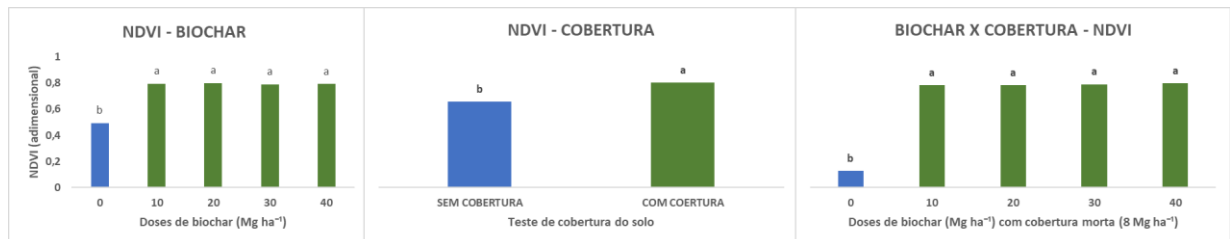
No caso do NDVI, observa-se uma ampla faixa de variação, com valores que vão aproximadamente de 0,30 até próximos de 0,90. Apesar da presença de valores mais baixos, as medianas da maioria dos tratamentos concentram-se acima de 0,75, indicando que, em média, o repolho mante-se bem desenvolvido. A ocorrência frequente de pontos abaixo do intervalo interquartil evidencia a presença de solo exposto. Ainda assim, tratamentos como TC1, TC2 e TC4 apresentaram medianas ligeiramente superiores e menor dispersão, o que sugere maior estabilidade no desenvolvimento das plantas (Zhang et al., 2024).

Em relação ao VARI, os valores se distribuíram aproximadamente entre -0,10 e 0,30, com medianas concentradas em torno de 0,15 a 0,18, faixa compatível com vegetação ativa e saudável. A presença de valores negativos ou próximos de zero em alguns tratamentos indica áreas com menor cobertura vegetal, influência de solo exposto ou sombreamento o que é esperado em análises baseadas na refletância do espectro visível. Assim como observado no NDVI, o VARI apresentou maior dispersão em alguns tratamentos, evidenciando sua maior sensibilidade às condições de iluminação e à estrutura do dossel.

A análise conjunta dos dois índices mostra coerência nos resultados, uma vez que os tratamentos que apresentaram melhores medianas de NDVI tendem também

a apresentar valores mais elevados de VARI. Isso indica que esses tratamentos possivelmente promoveram não apenas maior crescimento da biomassa, mas também maior qualidade fisiológica da vegetação. No entanto, a elevada variabilidade observada em ambos os índices sugere que os efeitos dos tratamentos não foram homogêneos, sendo influenciados por fatores externos.

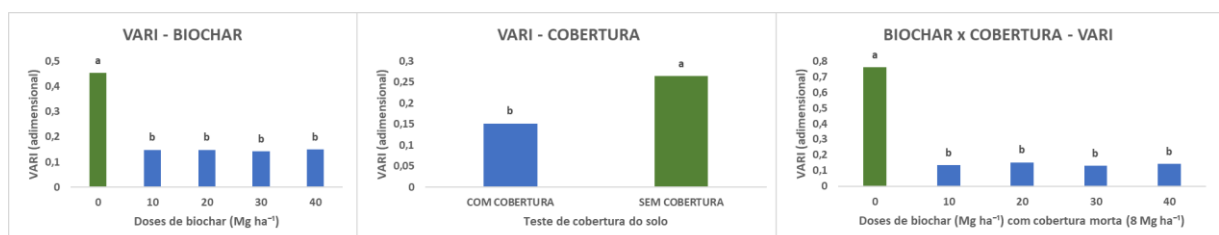
**Figura 8** – Análise estatística do NDVI em relação aos diferentes tratamentos.



Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, enquanto médias seguidas por letras diferentes apresentam diferença significativa, de acordo com o teste de comparação de médias aplicado, ao nível de 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Os resultados estatísticos indicam que o NDVI foi positivamente influenciado tanto pela aplicação de biochar quanto pela presença de cobertura do solo. A ausência de biochar resultou em valores significativamente menores de NDVI, enquanto todas as doses aplicadas apresentaram comportamento semelhante, indicando aumento do vigor vegetativo independentemente da dose. A cobertura do solo promoveu elevação significativa do NDVI em relação ao solo descoberto, evidenciando seu papel na melhoria das condições microambientais, como maior retenção de umidade e proteção térmica do solo. Na análise conjunta, observou-se que, na presença de cobertura morta, as diferentes doses de biochar não diferiram entre si, sugerindo que o manejo combinado biochar–cobertura é eficiente e pode reduzir a necessidade de altas doses para alcançar bons níveis de desenvolvimento vegetal.

**Figura 9** – Análise estatística do VARI em relação aos diferentes tratamentos.

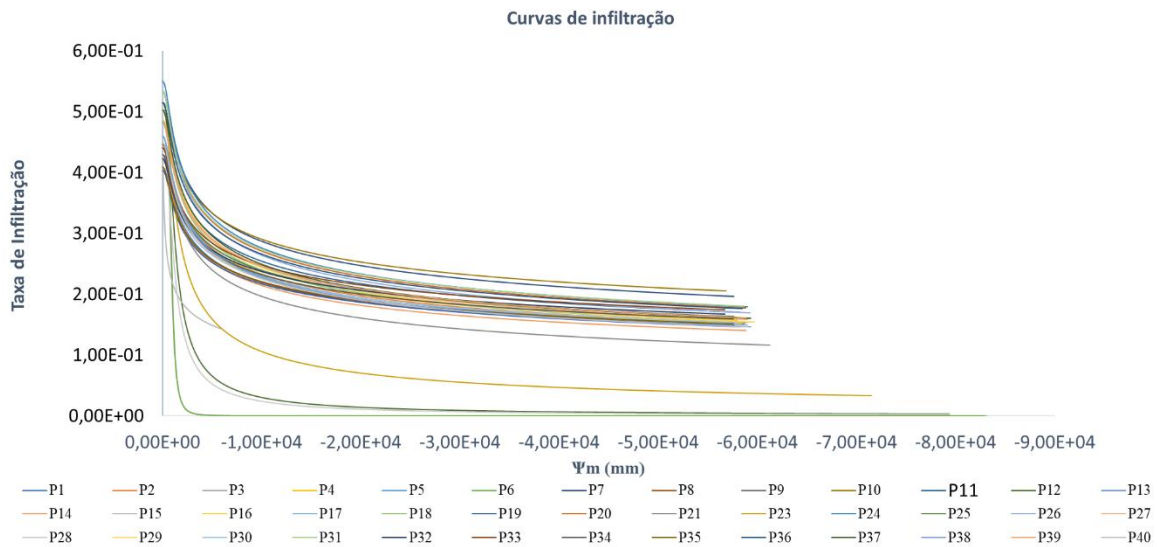


Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si, enquanto médias seguidas por letras diferentes apresentam diferença significativa, de acordo com o teste de comparação de médias aplicado, ao nível de 5% de probabilidade ( $p \leq 0,05$ ).

Os valores de VARI indicam resposta distinta em relação ao NDVI. No fator biochar isolado, a ausência de aplicação apresentou valores significativamente superiores de VARI em comparação às demais doses, as quais não diferiram entre si. Esse comportamento sugere maior influência do solo exposto na resposta espectral do índice, uma vez que o VARI é mais sensível às variações da reflectância no visível. Quanto ao fator cobertura do solo, o tratamento sem cobertura apresentou VARI significativamente maior, enquanto a presença de cobertura reduziu os valores do índice, indicando menor interferência do solo no sinal espectral da vegetação. Na análise conjunta biochar × cobertura, observou-se que, na presença de cobertura morta, todas as doses de biochar apresentaram valores semelhantes e inferiores ao tratamento sem biochar, reforçando que a cobertura do solo reduz a influência do fundo do solo e torna o VARI mais estável e representativo do dossel vegetal.

#### **6.5. Modelagem de Parâmetros Hidrofísicos pelo Algoritmo BEST- Slope**

No tocante às curvas de infiltração representadas na Figura 8, obtidas a partir do método Beerkan em diferentes pontos da área experimental (P1 a P40), foi possível observar comportamento hidráulico distinto entre os tratamentos, indicando a influência das práticas de manejo adotadas na capacidade de infiltração do solo. As curvas apresentaram comportamento que se inicia com taxa de infiltração elevada, decrescendo ao decorrer do tempo até atingir estabilização em uma taxa de infiltração básica, conforme esperado para condições de saturação progressiva (Coutinho et al., 2020).

**Figura 10** – Curvas de infiltração por ponto amostral.

P32, P28, P14 e P1 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T0) Testemunha absoluta; P35, P22, P19 e P8 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; P33, P21, P16 e P4 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; P29, P12 e P36 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; P37, P23, P18 e P6 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; P38, P24 e P17 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; P34 e P15 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; P9, P40, P25 e P13 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; P11, P39 e P5 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; P31, P26 e P7 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

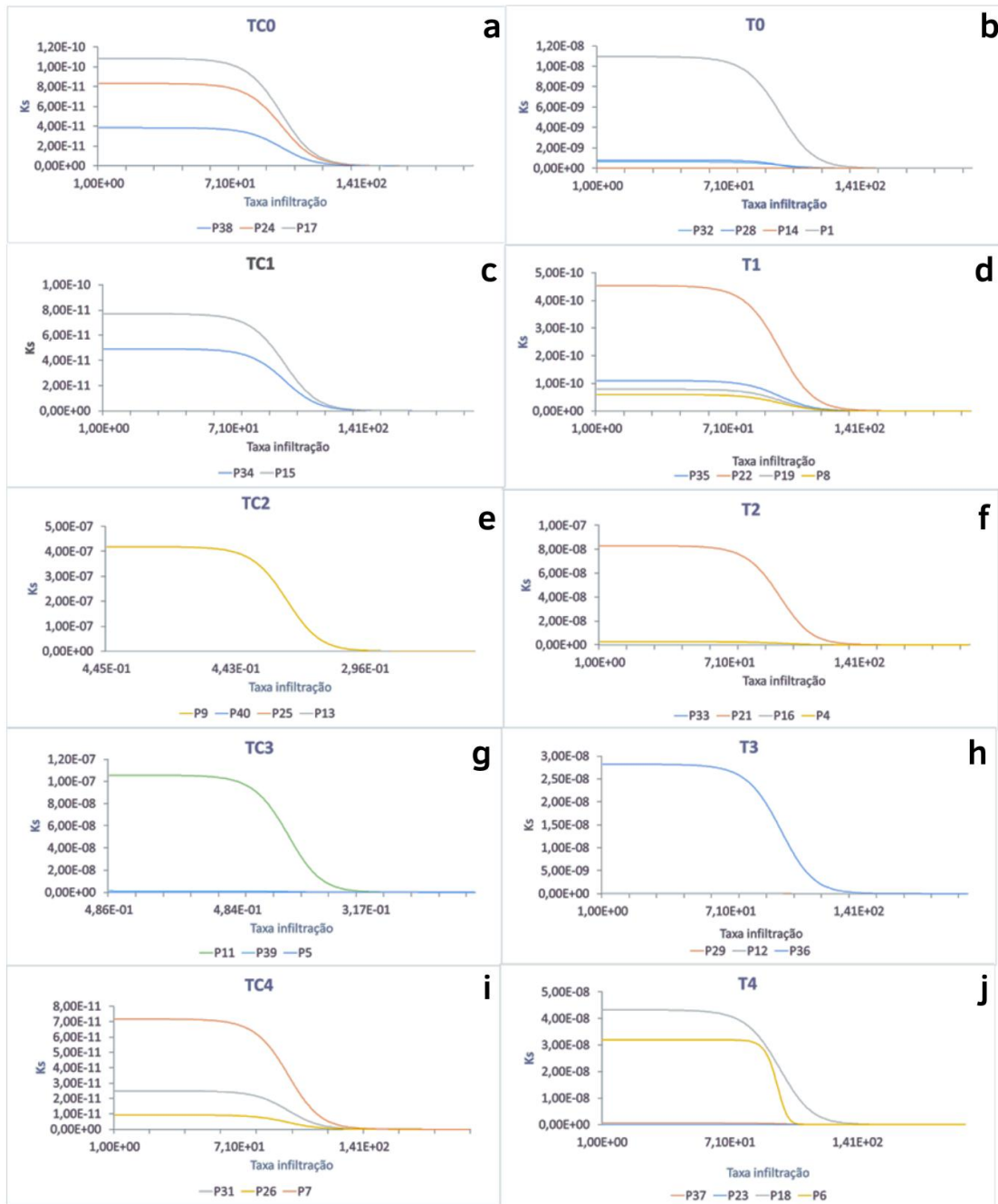
Os tratamentos submetidos a aplicação de cobertura morta e o biochar (TC0 e TC4) exibiram curvas de infiltração com maior volume total infiltrado e maior taxa inicial quando analisados em conjunto com os tratamentos sem cobertura (T0 e T4), conforme a Figura 8. Esse comportamento se relaciona à melhoria da estrutura do solo promovida pela cobertura morta em associação com o biochar, aumentando a porosidade e reduzindo a temperatura no solo, e, por consequência, aumentando a percolação (Canedo et al., 2025).

As curvas geradas pelo algoritmo BEST-Slope estimaram valores de Ks mais elevados para os tratamentos com associação entre cobertura morta e biochar. Esses valores indicam uma correlação positiva com os índices de vegetação NDVI e VARI, especialmente nos tratamentos TC2, TC3 e TC4, que apresentaram valores mais elevados tanto na condutividade hidráulica quanto no vigor vegetativo (Ramezanzadeh et al., 2023).

A variação espacial da infiltração entre os pontos amostrados dentro de um mesmo tratamento, evidência que apesar do preparo da terra e manejo do solo,

zonas com diferentes capacidades de infiltração ainda são encontradas. Este resultado, amplifica a relevância do mapeamento geoespacial para identificar zonas de baixa infiltração que possam limitar a disponibilidade hídrica para as plantas. Essa heterogeneidade induz a ocorrência de outliers nas análises dos índices (Hassen et al., 2023).

Figura 11 – Curvas de infiltração por tratamento.



a: P38, P24 e P17 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; b: P32, P28, P14 e P1 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T0) Testemunha absoluta; c: P34 e P15 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; d: P35, P22, P19 e P8 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; e: P9, P40, P25 e P13 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; f: P33, P21, P16 e P4 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; g: P11, P39 e P5 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; h: P29, P12 e P36 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; i: P31, P26 e P7 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; j: P37, P23, P18 e P6 pontos de infiltração nas parcelas do tratamento (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

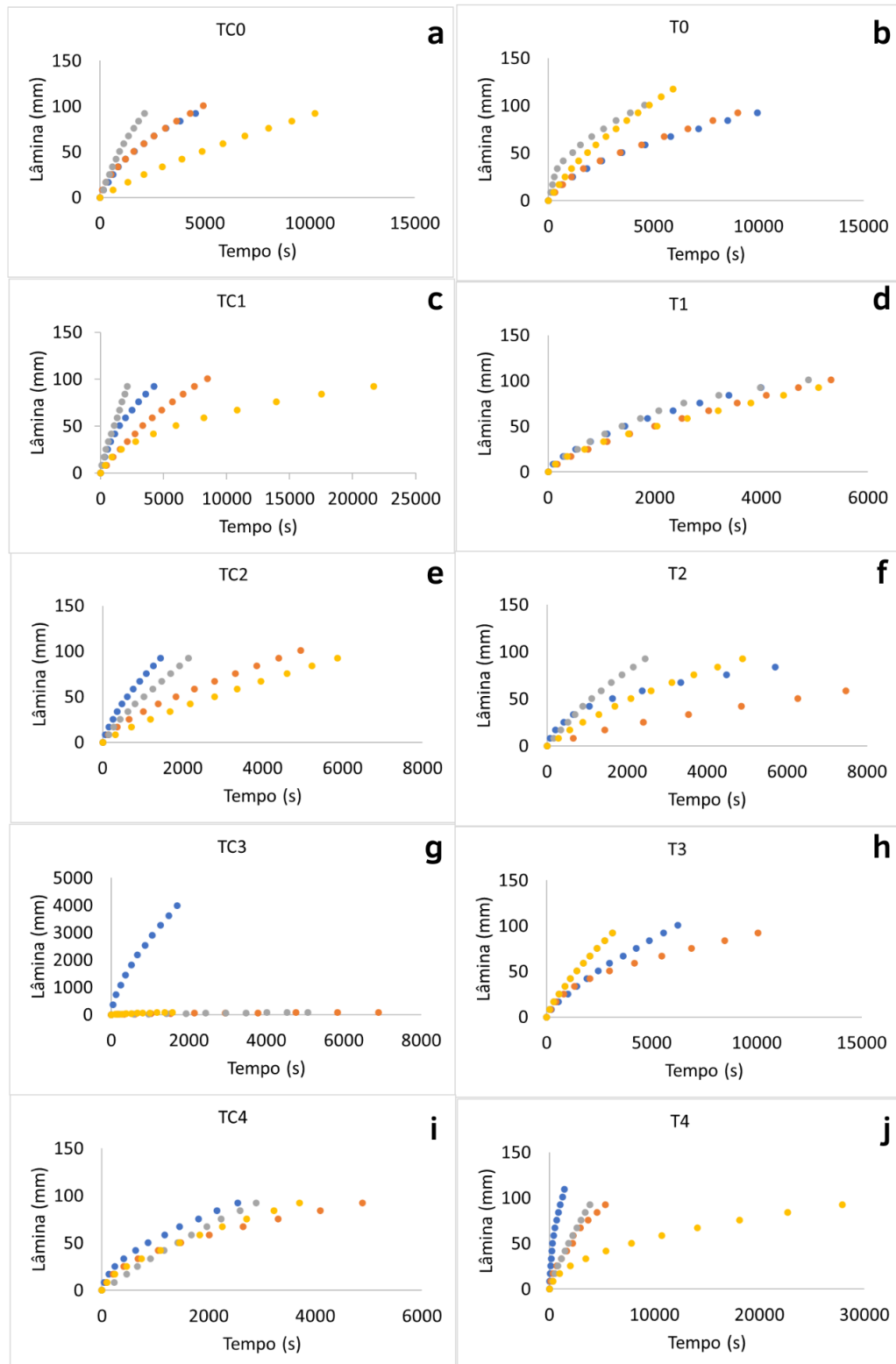
A análise da curva de infiltração acumulada em função do tempo, conforme apresentada na Figura 9, demonstra o comportamento da dinâmica da água no solo sob os diferentes tratamentos. Em linhas gerais, a infiltração apresentou rápido incremento inicial da lâmina infiltrada, seguido por uma tendência de estabilização da velocidade de infiltração, característica do regime quase permanente de infiltração. Os tratamentos com cobertura morta apresentaram, de modo geral, maiores lâminas acumuladas e menor dispersão entre as repetições, obtendo maior homogeneidade hídrica do solo. Esse desempenho indica que a cobertura morta favoreceu as dinâmicas de infiltração da água devido à redução do selamento superficial e à maior continuidade dos poros (Khan et al., 2016).

No entanto, os tratamentos sem a presença de cobertura morta expressaram menores valores de lâminas infiltradas e maior variabilidade entre as curvas. Tal comportamento é reflexo do solo exposto sobre a dinâmica da infiltração, com possível ocorrência de compactação na camada superficial e tendência de maior sensibilidade à variabilidade microestrutural do solo, evidenciando que o solo exposto é mais sujeito a processos de degradação física, reduzindo a conectividade entre os poros e limitando o fluxo de água no perfil do solo (Li et al., 2025).

Desta forma, os resultados corroboram a importância da adoção de práticas conservacionistas, como a utilização de cobertura morta, no manejo hídrico do solo, especialmente em ambientes semiáridos. Com infiltração adequada e baixa variabilidade espacial do fluxo de água, o solo favorece o desenvolvimento saudável do sistema radicular das plantas, fator que se reflete no vigor vegetativo da cultura. Além disso, potencializa a eficiência do uso da água, fator essencial para sistemas agrícolas sustentáveis, sobretudo em regiões com vulnerabilidade hídrica (Kader et al., 2019).

Em síntese, o uso da cobertura morta é refletido de maneira positiva na análise das curvas de infiltração, evidenciando o desempenho fundamental da utilização dessa técnica, que contribui para a regulação da dinâmica da água no solo e menor heterogeneidade espacial. Esses efeitos são fatores determinantes para o desempenho produtivo, fortalecendo a agricultura no semiárido brasileiro.

**Figura 12** – Curvas de infiltração acumulada em função do tempo.



a:(TC0): Cobertura morta de 8 Mg ha<sup>-1</sup>; b: (T0) Testemunha absoluta; c: (TC1): Cobertura morta com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; d: (T1) Manejo convencional com dose de biochar de 10 Mg ha<sup>-1</sup>; e: (TC2): Cobertura morta com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; f: (T2) Manejo convencional com dose de biochar de 20 Mg ha<sup>-1</sup>; g: (TC3): Cobertura morta com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; h: (T3) Manejo convencional com dose de biochar de 30 Mg ha<sup>-1</sup>; i: (TC4): Cobertura morta com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>; j: (T4) Manejo convencional com dose de biochar de 40 Mg ha<sup>-1</sup>.

## 7. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo reforçam que a associação entre cobertura morta e biochar melhoram o vigor do repolho e a cobertura do solo. Além de impulsionar o crescimento das plantas, essas técnicas conservacionistas aumentaram a capacidade do solo em absorver e reter água. A análise conjunta das curvas de infiltração e dos mapas de vigor vegetativo gerados a partir de imagens de aeronave remotamente pilotada (RPA) possibilitou identificar áreas que precisam de uma maior atenção no manejo da irrigação.

Desta forma, o uso do biochar e da cobertura morta associados são estratégias fundamentais para a convivência produtiva com a escassez hídrica no semiárido, auxiliando o produtor rural no alcance de uma produção agrícola com segurança alimentar, tornando a agricultura familiar mais sustentável e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 2 – Fome Zero e 6 – Água Potável e Saneamento (ONU, 2015), ao promover sistemas agrícolas mais resilientes e produtivos, mesmo em condições de restrição hídrica.

A utilização de drones para a avaliação do vigor vegetativo do repolho em sistemas de base familiar mostrou-se uma ferramenta eficiente ao longo do estudo. Entre os índices avaliados, o VARI destacou-se por apresentar sensibilidade e capacidade de resposta semelhantes às do NDVI, indicando padrões consistentes de vigor vegetativo, apesar de operarem em escalas. Esses resultados indicam que o VARI é capaz de representar adequadamente o vigor das plantas, consolidando-se como uma alternativa robusta e financeiramente mais acessível para o pequeno produtor. Assim, seu uso pode contribuir de forma direta para o manejo da cultura e para um planejamento produtivo mais eficiente.

### 7.1. Limitações e Perspectivas

O presente estudo alcança seu objetivo, em avaliar de forma não destrutiva, a influência da SbN na condutividade hidráulica do solo e a efetividade de índices aplicados à cultura do repolho a partir de imagens obtidas por drone. Embora os resultados sejam promissores, destaca-se a necessidade de validação em diferentes condições e em larga escala. Os outliers (valores discrepantes) expressos no NDVI e VARI indicam fatores não controlados, com potencial para influenciar os resultados.

Estudos futuros deverão incorporar variáveis adicionais, tais como temperatura foliar e taxa de infiltração do solo em mais pontos, para aprimorar a robustez dos modelos e aplicar diferentes tipos de malhas para análises dos índices, afim de ampliar o entendimento de sua variabilidade. Além disso, a barreira de acessibilidade técnica e financeira dos drones ainda representa um desafio para a agricultura familiar do semiárido. Políticas públicas de capacitação e financiamento, aliadas à disseminação de protocolos simplificados de análise, são essenciais para a popularização dessa tecnologia.

## REFERÊNCIAS

- Abbas, K.; Li, J.; Gong, B.; Lu, Y.; Wu, X.; Lü, G.; Gao, H. Drought stress tolerance in vegetables: the functional role of structural features, key gene pathways, and exogenous hormones. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, p. 13876, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241813876>.
- Abrahams, M.; Sibanda, M.; Dube, T.; Chimonyo, V. G. P.; Mabhaudhi, T. Uma revisão sistemática das aplicações de UAVs para mapear a distribuição espacial e a saúde de espécies de culturas negligenciadas e subutilizadas. **Remote Sensing**, v. 15, 4672, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15194672>.
- Agathokleous, E., Xu, T. & Yu, L. Outlier management in data analysis: a checklist for authors and reviewers. **J. For. Res.** **37**, 28 (2026). <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01967-z>
- Al-Khreisat, A.; Al-Bakri, J.; Atiyat, M.; Al-Kilani, M. R.; Farhan, I.; Zucca, C.; Khudairat, W. Soil analytical capabilities for sustainable land management across national soil services in the Mediterranean. **Sustainability**, v. 17, p. 8228, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17188228>.
- Almeida, G. S. S.. **Modelagem agrometeorológica da alface (*Lactuca sativa*) cultivada em diferentes condições edafoclimáticas no estado da Paraíba**. 2022. 84 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.
- Almeida, T.A.B.; Montenegro, A.A.A.; de Lima, J.L.M.P.; Farias, C.W.L.A.; Carvalho, A.A.; de Paiva, A.L.R. **Spatiotemporal Variability of Groundwater Quality for Irrigation: A Case Study in Mimoso Alluvial Valley, Semiarid Region of Brazil**. **Water** 2025, 17, 410. <https://doi.org/10.3390/w17030410>
- Almeida, T. A. B.; Montenegro, A. A. d. A.; Mackay, R.; Montenegro, S. M. G. L.; Coelho, V. H. R.; de Carvalho, A. A.; da Silva, T. G. F. Hydrogeological trends in an alluvial valley in the Brazilian semiarid: impacts of observed climate variables change and exploitation on groundwater availability and salinity. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 53, p. 101784, 2024.
- Almalki, R.; Khaki, M.; Saco, P. M.; Rodriguez, J. F. Monitoring and Mapping Vegetation Cover Changes in Arid and Semi-Arid Areas Using Remote Sensing Technology: A Review. **Remote Sensing**, v. 14, p. 5143, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14205143>.
- Araújo, D. C. S. dos; Montenegro, S. M. G. L.; Neto, A. R.; Silva, S. F. da. Evaluation of satellite-based soil moisture for agricultural drought monitoring in the Brazilian semiarid region. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 33, p. 101111, 2024. DOI: 10.1016/j.rsase.2023.101111.
- Badapalli, P. K. Integrating multi-temporal remote sensing and advanced drought modeling to assess desertification dynamics in semi-arid Andhra Pradesh, India: A framework for sustainable Land management. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 39, p. 101654, 2025. DOI: 10.1016/j.rsase.2025.101654.

Bennett, G. Analysis of methods used to validate remote sensing and GIS-based groundwater potential maps in the last two decades: A review. **Geosystems and Geoenvironment**, v. 3, n. 1, p. 100245, 2024. DOI: 10.1016/j.geogeo.2023.100245.

Brasil. Ministério da Saúde. **Recomendações para o aumento do consumo de frutas, legumes e verduras**. Brasília: Ministério da Saúde, 2022. 20 p. ISBN 978-65-5993-324-2.

Canedo, J. N. G. V.; Coelho, L.; Castro, L.; Verheijen, F. G. A.; Prats, Sergio. Biochar and Mulch: Hydrologic, Erosive, and Phytotoxic Responses Across Different Application Strategies and Agricultural Soils. **Agronomy**, v. 15, n. 4, p. 926, 2025. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040926>

Carvalho, A. A.; Montenegro, A.A.A.; Teodoro, E. V. D.; Batista, V. H. A.. **Dinâmica hidro-salina em aquífero aluvial durante período de escassez hídrica e chuvoso no semiárido pernambucano**. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste – SRHNE, 14., 2018, Maceió. Anais... Maceió: ABRHidro, 2018. ISSN 2359-1900.

Carvalho, J. F. de; Montenegro, A. A. A.; Soares, T. M.; Silva, Ê. F. F. e; Montenegro, S. M. G. L. Produtividade do repolho utilizando cobertura morta e diferentes intervalos de irrigação com água moderadamente salina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 256-263, 2011.

Coutinho, A. P.; França, E. G.; Ribeiro Neto, A.; Melo, T. A. T.; Santos Neto, S. M.; Barros, V. H. O.; Alcântara, L. R. P.; Antonino, A. C. D. Behavior of water infiltration phenomenon in soil in an urban park. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 17, p. e7, 2020. <https://doi.org/10.21168/reg.a.v17e7>

Crioni, P. L. B. **Aplicação do Sensoriamento Remoto com imagens do satélite Sentinel-2 no estudo e validação de recursos hídricos no Brasil**. 2024. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 2024.

Das, N., Rawat, R.K. & Selvakumar, S. Geospatial multi-criteria decision analysis for vegetation health index mapping and landslide susceptibility assessment. **Discov Geosci** **3**, 197 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00317-0>

Delaney, B.; Tansey, K.; Whelan, M. Satellite remote sensing techniques and limitations for identifying bare soil. **Remote Sensing**, v. 17, n. 4, p. 630, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs17040630>. Acesso em: 13 dez. 2025.

Dieguez, H. et al. Family farming stands out for its environmental performance in Uruguay's agricultural sector. **Agricultural Systems**, v. 229, p. 104440, 2025. DOI: 10.1016/j.agsy.2025.104440.

Dong, M.; Jiang, M.; He, L.; Zhang, Z.; Gustave, W.; Vithanage, M.; Niazi, N. K.; Chen, B.; Zhang, X.; Wang, H.; He, F. Challenges in safe environmental applications of biochar: identifying risks and unintended consequence. **Biochar**, v. 7, n. 1, p. 12, 14 jan. 2025. DOI: 10.1007/s42773-024-00412-4.

Duarte, E.; Hernandez, A. Uma revisão sobre o monitoramento da dinâmica da umidade do solo em ecossistemas semiáridos: métodos, técnicas e ferramentas aplicadas em diferentes escalas. **Applied Sciences**, v. 14, p. 7677, 2024. DOI: 10.3390/app14177677.

El Fartassi, I.; Metcalfe, H.; El Alami, R.; Diarra, A.; Alonso-Chavez, V.; Waine, T. W.; Zawadzka, J.; Milne, A. E.; Corstanje, R. Adaptations in agricultural water management in

arid regions: Modelling farmer behaviour and cooperation on irrigation sustainability in Morocco. **Agricultural Water Management**, v. 319, p. 109789, 2025.

Farias, G. D.; Bremm, C.; Bredemeier, C.; Menezes, J. de L.; Alves, L. A.; Tiecher, T.; Martins, A. P.; Fioravanço, G. P.; Silva, G. P. da; Carvalho, P. C. de F. Normalized difference vegetation index (NDVI) for soybean biomass and nutrient uptake estimation in response to production systems and fertilization strategies. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, p. 959681, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.959681>. Acesso em: 12 dez. 2025.

Fonseca, C. K. L.; Sales, A. T.; Fernandes, J. G.; Sampaio, E. V. S. B.; Silva, A. S. A.; Menezes, R. S. C. Uso de sensores RGB em drones para estimar biomassa vegetal em uma região semiárida. **Geociências (UNESP)**, v. 43, n. 4, p. 527-536, 2024.

Foster, S.; Pulido, A.; Vallejos, A.; Sánchez, L.; Llop, A.; Macdonald, A. Impact of irrigated agriculture on groundwater-recharge salinity: a major sustainability concern in semi-arid regions. **Hydrogeology Journal**, v. 26, p. 2781-2791, 2018. DOI: 10.1007/s10040-018-1830-2.

Gokool, S.; Mahomed, M.; Kunz, R.; Clulow, A.; Sibanda, M.; Naiken, V.; Chetty, K.; Mabhaudhi, T. Crop Monitoring in Smallholder Farms Using UAV: A Scoping Review and Bibliometric Analysis. **Sustainability**, v. 15, p. 3557, 2023. DOI: 10.3390/su15043557.

Guebsi, R.; El Wai, R. Leveraging Drone Technology for Precision Agriculture: A Comprehensive Case Study in Sidi Bouzid, Tunisia. **Drones and Autonomous Vehicles**, v. 2, p. 10006, 2025. DOI: 10.70322/dav.2025.10006.

Hassan, S. B. M.; Dragonetti, G.; Comegna, A.; Lamaddalena, N.; Coppola, A.. Analyzing the role of soil and vegetation spatial variability in modelling hydrological processes for irrigation optimization at large scale. **Irrigation Science**, v. 42, p. 1–19, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-023-00882-7>. Acesso em: 12 dez. 2025.

Huang, J.; Sehgal, V.; Alvarez, L. V.; Brocca, L.; Cai, S.; Cheng, R.; Cheng, X.; Du, J.; El Masri, B.; Endsley, K. A.; Fang, Y.; Hu, J.; Jampani, M.; Kibria, M. G.; Koren, G.; Li, L.; Liu, L.; Mao, J.; Moreno, H. A.; Rigden, A.; Shi, M.; Shi, X.; Wang, Y.; Zhang, X.; Fisher, J. B. Remotely Sensed High-Resolution Soil Moisture and Evapotranspiration. **Water Resources Research**, v. 61, e2024WR037929, 2025. DOI: 10.1029/2024WR037929.

IBGE. **Em 11 anos, agricultura familiar perde 9,5% dos estabelecimentos e 2,2 milhões de postos de trabalho**. Rio de Janeiro: Agência de Notícias, 25 out. 2019. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/>. Acesso em: 19 nov. 2025.

Jin, N.; Jin, L.; Luo, S.; Tang, Z.; Liu, Z.; Wei, S.; Liu, F.; Zhao, X.; Yu, J.; Zhong, Y. Comprehensive Evaluation of Amino Acids and Polyphenols in 69 Varieties of Green Cabbage. **Molecules**, v. 26, p. 5355, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26175355>.

Kader, M.A., Singha, A., Begum, M.A. *et al.* Mulching as water-saving technique in dryland agriculture: review article. **Bull Natl Res Cent** 43, 147 (2019). <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0186-7>

Karunathilake, E.; Le, A. T.; Heo, S.; Chung, Y. S.; Mansoor, S. The Path to Smart Farming. **Agriculture**, v. 13, p. 1593, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13081593.

Kouadio, L.; Byrareddy, V. M.; Sawadogo, A.; Newlands, N. K. Probabilistic yield forecasting of robusta coffee. **Agricultural and Forest Meteorology**, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 16 nov. 2025.

Khan, Muhammad Naeem, Yuanbo Gong, Tingxing Hu, Rattan Lal, Jiangkun Zheng, Meta Francis Justine, Muhammad Azhar, Mingxuan Che, and Haitao Zhang. 2016. "Effect of Slope, Rainfall Intensity and Mulch on Erosion and Infiltration under Simulated Rain on Purple Soil of South-Western Sichuan Province, China." **Water** 8, no. 11: 528. <https://doi.org/10.3390/w8110528>

Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I. and Haverkamp, R. (2006), Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 70: 521-532. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>

Li, X.; López-Vicente, M.; Lucas-Borja, M. E.; Wilcox, B. P.; Wu, G.-L. *Grass Clippings Mulching Improves Infiltrability of Low-Permeability Dryland Soils*. **Air, Soil and Water Research**, v. 18, 2025. doi:10.1177/11786221251341609.

Liu, S.; Dong, F.; Liu, D.; Qu, Z.; Wang, L. Integration of policy assessment and Budyko framework. **Journal of Hydrology**, 2025. DOI: 10.1016/j.j-hydrol.2025.113551.

Liu, Y.; Guo, Y.; Long, L.; Lei, S. Soil Water Behavior of Sandy Soils Under Semiarid Conditions. **Water**, v. 14, p. 2159, 2022. DOI: 10.3390/w14142159.

Li, W.; Pan, K.; Liu, Wenrong; X., Weihua; N., Shijian; S., Peng; C., Xiuyue; Li, T.. Monitoring Maize Canopy Chlorophyll Content throughout the Growth Stages Based on UAV MS and RGB Feature Fusion. **Agriculture**, v. 14, n. 8, p. 1265, 2024. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081265>.

Lima, J. R. S.; Goes, M. C. C.; Hammecker, C.; Antonino, A. C. D.; Medeiros, E. V.; Sampaio, E. V. S. B.; Leite, M. C. B. S.; Silva, V. P.; Souza, E. S.; Souza, R. Effects of Poultry Manure and Biochar on Acrisol Soil Properties and Yield of Common Bean. A Short-Term Field Experiment. **Agriculture**, v. 11, n. 4, p. 290, 2021.

Marengo, J. A.; Galdos, M. V.; Challinor, A.; Cunha, A. P.; Marin, F. R.; Vianna, M. d. S.; Alvares, R. C. S.; Alves, L.; Moraes, O. L.; Bender, F. Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, e17, 2022. DOI: 10.1002/cli2.17.

Mao, J.; Li, Y.; Zhang, J.; Zhang, K.; Ma, X.; Wang, G.; Fan, L. Organic carbon and silt determining subcritical water repellency. **Frontiers in Environmental Science**, v. 10, 1031237, 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1031237.

McCarthy, C.; Nyoni, Y.; Kachamba, D. J.; Banda, L. B.; Moyo, B.; Chisambi, C.; Banfill, J.; Hoshino, B. Can drones help smallholders in Sub-Saharan Africa? **Agriculture**, v. 13, 1075, 2023. DOI: 10.3390/agriculture13051075.

Melo, D. C. D.; Anache, J. A. A.; Almeida, C. d. N.; Coutinho, J. V.; Ramos Filho, G. M.; Rosalema, L. M. P.; Pelinson, N. S.; Ferreira, G. L. R. A.; Schwambach, D.; Calixto, K. G.; Siqueira, J. P. G.; Duarte-Carvajalino, J. C.; Jhuniior, H. C. S.; Nóbrega, J. D.; Morita, A. K. M.; Leite, C. M. C.; Guedes, A. C. E.; Coelho, V. H. R.; Wendland, E. The big picture of field hydrology studies in Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 8, p. 1262-1280, 2020. DOI: 10.1080/02626667.2020.1747618.

Mliyeh, M. M.; Aqnouy, M.; Laaraj, M.; Bouizrou, I.; Tariq, A.; Benaabidate, L.; Kraiem, H.; Shitu, K. Assessing drought dynamics in a semi-arid basin. **Environmental Sciences Europe**, v. 37, n. 180, p. 1-19, 2025. DOI: 10.1186/s12302-025-01240-4.

Mantovani, E. C.; Bernardo, S.; Palaretti, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009. 355 p.

Mohan, V. R.; Macdonald, M. T.; Abbey, L. Impact of Water Deficit Stress on Brassica Crops. **Plants**, v. 14, p. 1942, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants14131942>.

Montenegro, A. A. A.; Ragab, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use. **Hydrological Processes**, v. 24, n. 19, p. 2705-2718, 2010.

Mota, J. C. A.; Santos, E. B.; Queiroz, A. S.; Ferreira, O. P.; Souza Filho, A. G.; Fregolente, L. G.; Silva, F. G.; Pereira, A. P.A.; Sousa, H. H. F.; Costa, M. C. G.; Nascimento, I. V. Cashew residue biochar enhances the pore network of cohesive soil in the Brazilian Coastal Tablelands. **Geoderma Regional**, v. 42, p. e00979, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00979>. Acesso em: 12 dez. 2025.

Nițu, A.; Florea, C.; Ivanovici, M.; Racoviteanu, A. NDVI and beyond: vegetation indices as features for crop recognition and segmentation in hyperspectral data. **Sensors**, v. 25, n. 12, p. 3817, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s25123817>. Acesso em: 12 dez. 2025.

Nugraha, M; Mutiara, L.; Maulana, A.; Yulianto, R. **Application of NDVI and VARI in vegetation monitoring using GIS and remote sensing on Patuha Geothermal Area**. [s.l.: s.n.], 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com>. Acesso em: 12 dez. 2025.

Organização das Nações Unidas (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. 41 p. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 13 dez. 2025.

Ogilvie, A. Ogilvie, A.; Belaud, G.; Massuel, S.; Mulligan, M.; Le Goulven, P.; Calvez, R. Surface water monitoring in small water bodies. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 22, p. 4349-4380, 2018. DOI: 10.5194/hess-22-4349-2018.

Oliveira, F. É. R.; Ferreira, E. d. A.; Fernandes, R.; Tavares, V. N. S.; Araújo, Y. d. A.; Lima, J. L.; Antunes, L. F. d. S.; Chagas, N. R. d. C.; Freitas, P. L. N. d.; Lemos, C. T.; Fernandes, A. d. N.; Silva, E. F. d. Droughts, livestock expansion, and forest degradation. **Science of The Total Environment**, v. 986, 179733, 2025. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.179733.

Pádua, L.; Marques, P.; Hruška, J.; Adão, T.; Peres, E.; Morais, R.; Sousa, J. J. Multi-Temporal Vineyard Monitoring through UAV-Based RGB Imagery. **Remote Sensing**, v. 10, n. 12, p. 1907, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10121907>.

Panday, U. S.; Pratihast, A. K.; Aryal, J.; Kayastha, R. B. A Review on Drone-Based Data Solutions for Cereal Crops. **Drones**, v. 4, n. 41, 2020. DOI: 10.3390/drones4030041.

Pereira, R. M.; Guidinelle, R. B.; Ferraz, D. R.; Ulisses, A. F.; Fonseca, R. S.; Silva, M. V. S.; Martineli, L.; Vieira, G. H. S. **Determinação da capacidade de campo por método “in situ” e determinação da densidade do solo, visando melhorias no manejo de irrigação no IFES – campus de Alegre**. In: XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VII Encontro de Iniciação à Docência – Universidade do Vale do Paraíba, 2017.

Qubaa, A.; Aljawwadi, T.; Hamdon, A.; Researcher, R. Using UAVs/Drones and Vegetation Indices in the Visible Spectrum to Monitor Agricultural Lands. **Iraqi Journal of Agricultural Science**, v. 52, n. 3, p. 601-610, 2021.

Ramezanzadeh, H.; Zarehaghi, D.; Baybord, A.; Bouket, A.C.; Oszako, T.; Alenezi, F. N.; Belbahri, L. The Impacts of Biochar-Assisted Factors on the Hydrophysical Characteristics of

Amended Soils: A Review. **Sustainability**, v. 15, n. 11, p. 8700, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15118700>.

Rouse, J. W., Jr.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W.; Harlan, J. C. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Green wave effect) of natural vegetation**. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 1973.

Rodrigues, R. A. S.; Lima, J. L. M. P.; Montenegro, A. A. A.; Almeida, T. A. B.; Silva, J. R. L. Avaliação das flutuações de temperatura e umidade do solo sob cultivo de banana irrigada (*Musacultivo spp.*) em resposta à cobertura morta de fibra de coco. **Revista DYNA**, Bogotá, v. 90, n. 226, p. 50–57, abr./jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.15446/dyna.v90n226.105969>.

Santos, W. M. d.; Martins, S. D. C. d. S.; Bezerra, A. C.; Souza, L. S. B. d.; Jardim, A. M. d. R. F.; Silva, M. V. d.; Souza, C. A. A. d.; Silva, T. G. F. d. Uso de Veículos Aéreos Não Tripulados para Monitoramento de Pastagens. **Drones**, v. 8, p. 585, 2024. DOI: 10.3390/drones8100585.

Silva, P. S.; Santos, M.; Lira, M.; Cunha, M.; Mello, A.; Ferraz, A.; Dubeux Jr, J.; Silva, M.; Cordeiro, D.; Camelo, D. Morphological, productive, and pest susceptibility characteristics of forage cactus clones. **Rangeland Ecology & Management**, v. 103, p. 329–340, 2025.

Sousa, J. S. d.; Almeida, G. L. P. d.; Pandorfi, H.; Santos, J. A.; Montenegro, A. A. d. A.; Marinho, G. d. P. A.; Sousa, A. M. O. d.; Silva, M. V. d. Geotechnologies in the identification of areas suitable for the construction of underground dams in the Brazilian semiarid. **Journal of Hydrology**, 2025. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2025.113551.

Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. pt. 1, cap. 10, p. 95–116.

Tucker, Compton J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0). Acesso em: 12 dez. 2025.

Warrick, A.W. and Nielsen, D.R. (1980) **Spatial Variability of Soil Physical Properties in the Field**. In: Hillel, D., Ed., Applications of Soil Physics, Academic Press, New York. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>

Velleman, P. F.; Hoaglin, D. C. Data analysis. In: Hoaglin, D. C.; Moore, D. S. (Ed.). **Perspectives on Contemporary Statistics**. Washington, D.C.: Mathematical Association of America, 1992. p. 19–39.

Yacoob, A.; Gokool, S.; Clulow, A.; Maomé, M.; Mabhaudhi, T. Leveraging UAV Technologies to Facilitate Precision Water Management. **Drones**, v. 8, 476, 2024. DOI: 10.3390/drones8090476.

Zhang, W.; Niu, W.; Luo, H.. Effect of Biochar Amendment on the Growth and Photosynthetic Traits of Plants Under Drought Stress: A Meta-Analysis. **Agronomy**, v. 14, n. 12, p. 2952, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122952>.

Zhang, Z.; Zhang, Z.; Feng, G.; Lu, P.; Huang, M.; Zhao, X. Biochar amendment combined with straw mulching increases winter wheat yield by optimizing soil water-salt condition under saline irrigation. **Agriculture**, v. 12, n. 10, p. 1681, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/10/1681>.

Zhao, Q.; Xin, M.; Ai, P.; Ma, Y. Effects of Continuous Saline Water Irrigation on Soil Salinization Characteristics and Dryland Jujube Tree. **Agronomy**, v. 15, p. 1898, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15081898.