

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JORDAN LUIS CAMPOS MODESTO PEREIRA

USO DE SENSORES PASSIVOS PARA AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE  
*Pinus* SUBMETIDOS À ADUBAÇÃO

CURITIBA

2025

JORDAN LUIS CAMPO MODESTO PEREIRA

USO DE SENSORES PASSIVOS PARA AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE  
*Pinus* SUBMETIDOS À ADUBAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Paula Dalla Corte

Coorientador: Prof. Dr. Álvaro Luís Pasquetti Berghetti

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ / SISTEMA DE BIBLIOTECAS  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

Pereira, Jordan Luis Campos Modesto

Uso de sensores passivos para avaliação do crescimento de Pinus submetidos à adubação / Jordan Luis Campos Modesto Pereira. - Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Paula Dalla Corte

Coorientador: Prof. Dr. Álvaro Luís Pasquetti Berghetti

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 09/05/2025.

1. Adubação. 2. Fertilizantes fosfatados. 3. Pinus taeda - Crescimento. 4. Pinus taeda - Adubos e fertilizantes. 5. Florestas - Manejo. 6. Florestas - Sensoriamento remoto. 7. Índices de vegetação. I. Dalla Corte, Ana Paula. II. Berghetti, Álvaro Luís Pasquetti. III. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD - 634.9

CDU - 631.85

GFDC - 634.0.232.42

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga – CRB9/424



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
FLORESTAL - 40001016015P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JORDAN LUIS CAMPOS MODESTO PEREIRA**, intitulada: **USO DE SENSORES PASSIVOS PARA AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE PINUS SUBMETIDOS À ADUBAÇÃO**, sob orientação da Profa. Dra. ANA PAULA DALLA CORTE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 09 de Maio de 2025.

Assinatura Eletrônica

13/05/2025 10:50:33.0

ANA PAULA DALLA CORTE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

14/05/2025 16:29:12.0

GUSTAVO BRUNETTO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA)

Assinatura Eletrônica

13/05/2025 07:29:29.0

ALEXANDRE BEHLING

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me conceder saúde, forças e perseverança ao longo desta caminhada acadêmica.

À minha família, em especial aos meus pais, Maria do Socorro e Jorge Modesto, pelo amor, incentivo incondicional e apoio em todas as etapas da minha vida acadêmica. Tudo o que sou e tudo o que almejo ser é, profundamente, por eles e para eles.

À minha orientadora, Professora Dra. Ana Paula Dalla Corte, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Álvaro Luís Pasquetti Berghetti, pela orientação técnica, apoio constante, paciência e dedicação ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. A confiança e o comprometimento de ambos foram essenciais para a minha formação acadêmica e profissional.

Aos membros da banca examinadora, pela disponibilidade em contribuir com sugestões valiosas para o aprimoramento desta dissertação.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), pelo ensino de qualidade e pela estrutura oferecida para a realização deste projeto.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal e ao CNPq, pelo suporte financeiro por meio da bolsa de estudos, que viabilizou minha dedicação à pesquisa.

À minha namorada, Amanda Oliveira, por toda a compreensão, companheirismo e apoio incondicional ao longo desta jornada. A sua presença constante, palavras de incentivo e colaboração nos momentos mais desafiadores foram fundamentais para a concretização deste trabalho.

Aos amigos Washington e Ana Paula, que caminham ao meu lado desde a graduação, sempre me encorajando e oferecendo palavras de incentivo. A amizade e apoio constante foram fundamentais em cada etapa dessa trajetória.

Aos colegas de laboratório e de campo, Kauana e Tatiane, pelo companheirismo, pela valiosa troca de experiências e pelos momentos compartilhados ao longo dos desafios e conquistas desta jornada.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

## RESUMO

A possibilidade do *Pinus* para se desenvolver em solos ácidos favoreceu a expansão significativa de sua área cultivada, tornando-se uma das espécies mais utilizadas em programas de reflorestamento., mas estudos indicam que a adubação adequada pode proporcionar ganhos significativos em crescimento. O estudo objetivou avaliar o desenvolvimento de *Pinus taeda* em solo submetido a adubação fosfatada e óxido de Ca e Mg, através de índices de vegetação (VI), construídos com bandas oriundas de sensores passivos. O experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso, com três repetições, testando cinco doses de P (0, 20, 40, 80 e 160 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) e cinco doses de óxido de Ca e Mg (0; 0,5; 1; 2; 4 t ha<sup>-1</sup> de Ca e Mg). As variáveis dendrométricas, diâmetro a altura do colo (DAC) e altura total (Ht), foram mensuradas em campo aos 6, 12, 18 e 24 meses, sendo utilizadas para o ajuste de modelos de crescimento não linear (Weibull, Gompertz e logístico), dos quais o modelo logístico apresentou o melhor desempenho estatístico para descrever o desenvolvimento das plantas. Também foram utilizados os índices NDVI, GNDVI e LCI para comparar o desenvolvimento das plantas entre os tratamentos. A adubação com P proporcionou maior crescimento em altura ao longo do estudo, com destaque para as dosagens de 20 kg/ha e 160 kg/ha. Para o diâmetro a altura do colo, as diferenças tornaram-se evidentes aos 24 meses, com a dosagem de 4 t/ha de óxido de Ca e Mg apresentando os melhores resultados. Os índices de vegetação permitiram interpretar as respostas aos tratamentos de forma visual e quantitativa, evidenciando variações espaciais e temporais no vigor vegetativo. Os resultados deste estudo demonstraram que os tratamentos de adubação influenciaram significativamente o crescimento das mudas de *Pinus taeda*. Observou-se que o fósforo esteve mais associado ao incremento em altura, enquanto o óxido de Ca e Mg apresentou maior efeito sobre o diâmetro do colo

**Palavras-chave:** Manejo florestal, adubação fosfatada, índice de vegetação.

## ABSTRACT

The ability of *Pinus* to grow in acidic soils has favored a significant expansion of its cultivated area, making it one of the most widely used species in reforestation programs. However, studies indicate that proper fertilization can lead to significant gains in growth. This study aimed to evaluate the development of *Pinus taeda* in soil subjected to phosphorus and calcium-magnesium oxide fertilization, using vegetation indices (VIs) derived from passive sensor bands. The experiment was conducted in a randomized block design with three replicates, testing five phosphorus doses (0, 20, 40, 80, and 160 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) and five doses of Ca and Mg oxide (0, 0.5, 1, 2, and 4 t ha<sup>-1</sup>). Dendrometric variables—collar diameter (CD) and total height (Ht)—were measured in the field at 6, 12, 18, and 24 months and used to fit nonlinear growth models (Weibull, Gompertz, and logistic). Among these, the logistic model showed the best statistical performance in describing plant development. The NDVI, GNDVI, and LCI vegetation indices were also used to compare plant development across treatments. Phosphorus fertilization resulted in greater height growth throughout the study, with the 20 kg/ha and 160 kg/ha doses showing the most notable performance. For collar diameter, differences became evident at 24 months, with the 4 t/ha Ca and Mg oxide dose yielding the best results. The vegetation indices enabled both visual and quantitative interpretation of treatment responses, highlighting spatial and temporal variations in vegetative vigor. The results of this study demonstrated that fertilization treatments significantly influenced the growth of *Pinus taeda* seedlings. Phosphorus was more strongly associated with height increment, while Ca and Mg oxide had a greater effect on collar diameter.

**Keywords:** Forest management, fertilization, vegetation index.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da área do estudo.....	22
Figura 2. Esquema de aplicação da adubação de arranque (AA) – 45 dias pós plantio, sendo que os desenhos em verde representam a muda e a linha tracejada em amarelo a aplicação do óxido de Ca.....	23
Figura 3. Crescimento em diâmetro do colo (A) e altura total (B) de mudas de <i>Pinus taeda</i> . ao longo do tempo em função de doses de óxido de Ca e Mg. ....	28
Figura 4. Crescimento em altura total (A) e diâmetro do colo (B) de mudas de <i>Pinus taeda</i> ao longo do tempo em função de doses de fósforo. ....	30
Figura 5. Curvas de crescimento em altura (cm) ao longo do tempo em plantas de <i>Pinus taeda</i> , cultivadas em diferentes doses de óxido de Ca e Mg (A). Nos gráficos da direita (B), apresenta-se a diferença em altura em relação ao tratamento controle ao longo do temp.....	36
Figura 6. Curvas de crescimento em diâmetro a altura do colo (mm) ao longo do tempo em plantas de <i>Pinus taeda</i> , no gráfico da esquerda (A), estão representadas as médias de DAC por dose; no gráfico da direita (B), apresenta-se a diferença de crescimento em relação ao tratamento controle ao longo do tempo.....	37
Figura 7. No gráfico da esquerda estão representadas as médias de altura por tratamento para fósforo (A); no gráfico da direita (B), apresenta-se a diferença em altura em relação ao tratamento controle ao longo do tempo.....	37
Figura 8. No gráfico da esquerda (A), estão representadas as médias de DAC por tratamento; nos gráficos da direita (B), apresenta-se a diferença de crescimento em relação ao tratamento controle ao longo do tempo.....	38
Figura 9. Avaliação inicial do NDVI, realizada aos 6 meses.....	39
Figura 10. Segunda análise do NDVI, realizada aos 12 meses. ....	40
Figura 11. Terceira análise do NDVI, realizada aos 18 meses.....	41
Figura 12. Análise final do NDVI, realizada aos 24 meses.....	42
Figura 13. Avaliação inicial com GNDVI, realizada aos 6 meses. ....	43
Figura 14. Segunda avaliação com GNDVI, realizada aos 12 meses. ....	44
Figura 15. Terceira avaliação com GNDVI, realizada aos 18 meses. ....	45
Figura 16. Avaliação final com GNDVI, realizada aos 24 meses.....	46
Figura 17. Avaliação inicial com LCI, realizada aos 6 meses.....	47
Figura 18. Segunda avaliação com LCI, realizada aos 12 meses.....	48
Figura 19. Terceira avaliação com LCI, realizada aos 18 meses. ....	49
Figura 20. Avaliação final com LCI, realizada aos 24 meses. ....	50
Figura 21. Respostas da evolução do índice de NDVI em plantas de <i>Pinus taeda</i> cultivadas em experimentos testando doses de óxido de Ca e Mg e doses de P. ....	51
Figura 22. Respostas da evolução do índice de GNDVI para adubação com óxido de Ca e Mg e fósforo nas doses testadas. ....	52
Figura 23. Respostas da evolução do índice de LCI para adubação com óxido de Ca e Mg e fósforo nas doses testadas. ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos utilizados para ajuste dos dados de Ht e DAC.....	25
Tabela 2. Parâmetros espectrais e configurações de voo utilizados na aquisição de imagens multiespectrais.....	26
Tabela 3. Índices de vegetação utilizados no estudo e suas equações matemáticas.....	26
Tabela 4. Modelos ajustados para altura em função da adubação com óxido de Ca e Mg e suas dosagens. ....	31
Tabela 5. Modelos ajustados para diâmetro a altura do colo em função da adubação com óxido de Ca e Mg e suas dosagens. ....	32
Tabela 6. Modelos ajustados para altura em função da adubação com fósforo e suas dosagens.	33
Tabela 7. Modelos ajustados para diâmetro a altura do colo em função da adubação com fósforo e suas dosagens. ....	34
Tabela 8. Resumo dos testes multivariados (MANOVA) para os fatores e interações.....	54
Tabela 9. Teste de igualdade das médias das variáveis discriminantes entre grupos formados por combinações entre adubo e dose. ....	55
Tabela 10. Melhores resultados encontrados pela manova a análise descritiva a para combinação de adubo e dosagem. ....	55

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Weibull.....	25
Equação 2. Modelo Logístico .....	25
Equação 3. Modelo de Gompertz.....	25
Equação 4. NDVI.....	26
Equação 5. GNDVI.....	26
Equação 6. LCI.....	26

# Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	13
2. OBJETIVOS .....	15
2.1. Objetivo geral.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. HIPÓTESES.....	15
4. REFERENCIAL TEÓRICO .....	16
4.1. O gênero Pinus spp. e a espécie Pinus taeda L.....	16
4.2. Efeito da adubação na sobrevivência e crescimento em espécies florestais.....	18
4.3. Índices de vegetação.....	19
5. MATERIAL E MÉTODOS .....	21
5.1. Localização da área de estudo .....	21
5.2. Descrição experimental e tratamentos.....	22
5.3. Levantamento de dados biométricos .....	24
5.4. Avaliação temporal dos tratamentos .....	24
5.5. Aquisição de imagens multiespectral .....	25
5.6. Índices de vegetação.....	26
5.7. Espacialização temporal dos índices de vegetação nos tratamentos .....	27
5.8. Análises dos Dados Biométricos.....	27
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
6.1. Estatística descritiva.....	28
6.1.1. Óxido de CaMg .....	28
6.1.2. Fósforo .....	29
6.2. Análise dos modelos ajustados.....	31
6.2.1. Óxido de CaMg .....	31
6.2.2. Fósforo .....	33
6.3. Curvas de crescimento .....	35
6.3.1. Óxido de CaMg .....	35
6.3.2. Fósforo .....	37
6.4. Avaliação espacial dos índices de vegetação .....	38
6.4.1. NDVI.....	39
6.4.2. GNDVI.....	42
6.4.3. LCI .....	46
6.5. Espacialização temporal dos índices de vegetação .....	50
6.5.1. NDVI.....	50
6.5.2. GNDVI.....	51
6.5.3. LCI .....	53
6.6. MANOVA e análise discriminante.....	54
7. CONCLUSÃO .....	56

8. PESPECTIVAS DE ESTUDOS FUTUROS .....	57
9. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO .....	60

## 1. INTRODUÇÃO

A cultura do *Pinus* foi introduzida no Brasil em 1880, porém os estudos experimentais se iniciaram somente a partir de 1936, pelo Serviço Florestal Brasileiro no estado de São Paulo (SHIMIZU, 2006). Devido ao *Pinus* apresentar um desenvolvimento acelerado e um amplo emprego da sua madeira, resultou na expansão das plantações florestais (TOMAZELLO FILHO et al., 2017). Os plantios do gênero *Pinus* spp. ocupam 1,93 milhões de hectares no Brasil, sendo utilizado para produtos madeireiros e não madeireiros, além de contribuir para a conservação de florestas nativas (IBÁ, 2023).

Uma das características que favoreceram a expansão do cultivo de *Pinus* em diferentes regiões do Brasil foi sua capacidade de desenvolvimento em solos ácidos e com baixo teor nutricional disponível (FERREIRA et al., 2001). No entanto, pesquisas mais recentes demonstram que o manejo nutricional adequado, por meio da adubação, pode proporcionar ganhos significativos de produtividade nos povoamentos, sobretudo quando são supridas as demandas por nutrientes com baixa disponibilidade natural no solo (MORO et al., 2023).

Pesquisas experimentais têm evidenciado que a adição de fósforo (P), potássio (K) e corretivos como o calcário, fonte de cálcio (Ca) e magnésio (Mg) — pode resultar em incrementos superiores a 20% no volume de madeira (FERREIRA et al., 2004; ELY et al., 2021). Essa resposta positiva à adubação é especialmente relevante em solos ácidos, nos quais o fósforo tende a ser fortemente fixado por alumínio e ferro, tornando-se pouco disponível para absorção pelas plantas. A aplicação prévia de calcário, com o objetivo de elevar o pH do solo, é fundamental para reduzir essa fixação e aumentar a eficiência da adubação fosfatada, promovendo uma utilização mais racional dos fertilizantes (MATELELE et al., 2024; REGASA et al., 2025).

Devido às características dos solos brasileiros, nos quais P é encontrado em baixa disponibilidade, geralmente é necessário aplicar uma quantidade maior desse nutriente para suprir as exigências das plantas (SCHUMACHER, 2003). Contudo, essa estratégia é ineficiente quando a acidez do solo não é previamente corrigida, uma vez que o fósforo aplicado é rapidamente imobilizado, tornando-se indisponível para as plantas. Diversos estudos demonstram que a simples aplicação de P em solos ácidos é tecnicamente inadequada e pode levar ao desperdício de insumos (HAYNES, 1982; DE OLIVEIRA et al., 2020).

O fornecimento adequado de cálcio e magnésio é essencial para o crescimento e desenvolvimento das plantas, desempenhando funções estruturais, fisiológicas e bioquímicas relevantes. Em muitas situações, a reposição desses nutrientes é feita por meio da aplicação de óxidos de CaMg os quais atuam como fontes altamente concentradas e solúveis desses cátions. Diferentemente dos corretivos tradicionais como a calagem, os óxidos não têm como principal finalidade a neutralização da acidez do solo, sendo utilizados especialmente em condições em que o pH já se encontra em níveis adequados, mas há deficiência nutricional de Ca ou Mg. (PRADO, 2008; SOUSA & LOBATO, 2004).

Nesse contexto, o cálcio atua na formação e estabilidade das paredes celulares, contribuindo para a coesão dos tecidos, o crescimento das raízes e a tolerância a estresses abióticos. Além disso, participa da divisão celular, da sinalização intracelular e da ativação enzimática. O magnésio, por sua vez, é componente central da clorofila, sendo indispensável à fotossíntese, além de atuar na síntese de proteínas e na translocação de carboidratos. Dessa forma, a aplicação de óxidos de CaMg, quando tecnicamente justificada, pode promover ganhos no desenvolvimento vegetativo, na eficiência fisiológica e na produtividade das culturas (MALAVOLTA, 2006; FAGERIA, 2001).

A fim de compreender melhor os efeitos da adubação correta no desenvolvimento das culturas, o uso de tecnologias, como o sensoriamento remoto, mostra-se uma ferramenta promissora, com a silvicultura de precisão a fim de estabelecer estratégias para orientar nas tomadas de decisões (BHAKTA et al., 2019). Com o avanço tecnológico, as práticas agrícolas têm evoluído, proporcionando soluções que visam otimizar o uso de insumos, aumentar a eficiência produtiva e mitigar os impactos ambientais (SOUSSI et al., 2024).

A aplicação de tecnologias como o uso de imagens multiespectrais permite um monitoramento preciso do status nutricional das culturas e das condições do solo, promovendo uma gestão mais sustentável dos recursos naturais e minimizando o desperdício. Por meio destas imagens, é possível identificar variações nas respostas espectrais nas regiões do visível e do infravermelho próximo (CANDIAGO et al., 2015).

Ademais, a aplicação de índices de vegetação (VI), amplamente utilizados como indicadores para representar e interpretar o crescimento da vegetação, tem se mostrado eficaz. De modo geral, os valores de VI são empregados para monitorar o desenvolvimento das culturas e prever seus rendimentos (NIU et al., 2023).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. Objetivo geral

Avaliar a resposta de crescimento de *Pinus taeda* em solo submetido a adubação fosfatada e óxido de Ca e Mg, através de índices de vegetação (VI), construídos com bandas oriundas de sensores passivos.

### 2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a altura total e diâmetro na altura do colo em *Pinus taeda*, cultivados com diferentes fontes de adubação;
- Determinar as respostas fisiológicas de *Pinus taeda*, por meio de índices de vegetação (IV), obtidos com sensores multiespectrais embarcados em drones;
- Avaliar a diferença nos padrões de respostas dos índices de vegetação, em relação ao crescimento de cada tratamento de adubação.

## 3. HIPÓTESES

- O *Pinus taeda* apresenta padrão de desenvolvimento uniforme independente do tratamento de adubação analisados no estudo;
- Todas as dosagens de adubação fósfatada resultaram em respostas semelhantes no crescimento da altura total e do diâmetro à altura do colo das plantas.
- Todas as dosagens de adubação com óxido de cálcio e magnésio resultaram em respostas semelhantes no crescimento da altura total e do diâmetro à altura do colo das plantas.
- Os índices de vegetação (VI) gerado com imagens multiespectrais apresentam eficiência em monitorar o desenvolvimento e vigor das plantas;
- Os índices de vegetação são úteis para diferenciar qual dosagem e fonte da adubação estão sendo mais eficiente, se diferenças foram identificadas.

## 4. REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1. O gênero *Pinus* spp. e a espécie *Pinus taeda* L.

O cultivo de espécies do gênero *Pinus* no Brasil remonta a mais de cem anos. Inicialmente, muitas dessas espécies foram introduzidas por imigrantes europeus, com objetivos ornamentais e também para a produção de madeira. Os primeiros registros de introdução datam da década de 1880, no estado do Rio Grande do Sul, com o plantio de *Pinus canariensis*, originário das Ilhas Canárias (SHIMIZU, 2008).

Em 1948, o Serviço Florestal do Estado de São Paulo promoveu a introdução de espécies norte-americanas conhecidas como “pinheiros amarelos”, entre elas *Pinus palustris*, *P. echinata*, *P. elliottii* e *P. taeda*. Destas, *P. elliottii* e *P. taeda* se destacaram por apresentarem rápido crescimento, alta capacidade reprodutiva e facilidade de manejo, especialmente nas regiões Sul e Sudeste do país. Com o passar dos anos, novas espécies também foram introduzidas, oriundas não apenas dos Estados Unidos, mas também do México, América Central, Caribe e Ásia (SHIMIZU, 2008).

A espécie *Pinus taeda* L. é originária dos Estados Unidos, ocorrendo nos estados de Nova Jersey, Flórida, Texas, Arkansas, Oklahoma, Vale do Mississippi e Tennessee (PIVA; DLUGOSZ, 2018). Essa espécie é considerada subtropical, sendo uma das mais cultivadas no sul do Brasil, tornando a escolha da procedência genética e do local de plantio fatores essenciais para a produtividade do *Pinus* (LOPES; STROPARO, 2022) Segundo os dados da SBS (2008), o estado que mais planta *Pinus* no Brasil, é o Paraná, totalizando 702.000 ha, seguido por Santa Catarina com 548.000 ha e Rio Grande do Sul com 182.000 ha.

Devido ao pinus apresentar um desenvolvimento acelerado e um amplo emprego da sua madeira, resultou na expansão das plantações florestais (TOMAZELLO FILHO et al., 2017). A implementação de sistemas silviculturais com espécies exóticas tem se destacado como uma alternativa economicamente sustentável, reduzindo a pressão sobre os ecossistemas naturais, já que permite ofertas de produtos madeiráveis e não madeiráveis (CASTRO et al., 2010).

A partir da década de 1960, a população brasileira passou a conviver mais intensamente com o gênero *Pinus*, tendo o plantio em larga escala de *P. elliottii* e *P. taeda* nas regiões Sul e Sudeste. Como resultado, o público em geral passou a associar as características desse gênero às qualidades e limitações dessas duas espécies. Ambas apresentam resistência relativa a geada e alto rendimento em madeira, sendo que *P. taeda* se adapta melhor ao planalto da Região Sul até o norte do Paraná, enquanto *P. elliottii* é

mais comum em toda a Região Sul, em partes do Sudeste, como o Estado de São Paulo, e nas áreas serranas do sul de Minas Gerais (SHIMIZU, 2008).

Através disso, o cultivo de *Pinus* no Brasil tem ganhado cada vez mais espaço, sendo uma matéria-prima essencial para diversos setores produtivos, tornando notável a importância da cultura. Atualmente, há cerca de 1,8 milhão de hectares plantados no país, que visam suprir diferentes setores de produção, atendendo indústrias de celulose e papel, embalagens, painéis, compensados, móveis e produção de resina para a indústria química (LOPES; STROPARO, 2022).

Com o aumento da demanda por madeira, empresas florestais têm expandido suas áreas de plantio. No entanto, quando esses plantios são implantados e conduzidos sem práticas silviculturais adequadas, como a escolha correta da espécie, manejo do solo, adubação, desbastes e desramas, os povoamentos tornam-se estressados devido à alta competição, contribuindo para o surgimento de pragas florestais. Uma dessas pragas encontrada, que também acaba dificultando a cultura do *Pinus* e ocasionado perdas em produtividade é a vespa-da-madeira, que ataca diretamente essa cultura (VIEIRA, 2021).

O *Pinus* é globalmente reconhecida como uma das espécies mais importantes no estabelecimento de plantações comerciais de rápido crescimento (VAN ZONNEVELD et al. 2009, ZANELLA et al. 2018). Na América do Sul, o gênero *Pinus* tem sido plantado frequentemente em solos pobres, com deficiência de minerais, geralmente de fósforo e boro (IREN-CORFO 1964; INTA 2018).

À medida que os empreendimentos florestais vêm sendo implantados em solos de baixa fertilidade natural e sem reposição dos nutrientes após a colheita, cresce a importância de estudos a respeito das exigências nutricionais do *Pinus* (VOGE e JOKELA, 2011; CONSALTER et al., 2021). Estudos alegam que com adubação adequada os povoamentos apresentam ganho de produtividade, onde evidenciam que o incremento em volume pode atingir 20% ou mais, com a aplicação de fósforo (P), Potássio (K), e óxido de Ca e Mg (FERREIRA et al., 2004).

O desenvolvimento em diâmetro e altura estão diretamente ligadas com as condições do solo, portanto, isso demonstra o quanto a adubação é uma prática importante. Entretanto, essa prática ainda não é amplamente adotada no Brasil. Assim, identificar o teor ideal de nutrientes podem ser estratégias para garantir o equilíbrio nutricional das plantas, possibilitando uma recomendação da quantidade de fertilizantes adequados, reduzindo custos de produção e potencial de contaminação de águas (DE SOUZA KULMANN, et al. 2023).

#### 4.2. Efeito da adubação na sobrevivência e crescimento em espécies florestais

Grande parte dos solos do Brasil são altamente intemperizados, resultando em um solo com pH baixo e altos níveis de alumínio e ferro. Essas características dificultam a produção de algumas culturas e aumentam os custos, devido a necessidade do uso de insumos agrícolas e realizar práticas de manejo do solo (WINAGRASKI, 2014).

Espécies como o *Pinus taeda* e o *Pinus elliottii* var. *elliottii* são menos exigentes e não mostram sinais de deficiência nutricional nas primeiras rotações, fazendo com que não precisem de fertilização mineral (SILVA, 2018). Por conta disso, a maioria das florestas de *Pinus* costumam ser implantadas sem fertilização, embora isso possa limitar a produtividade devido à baixa fertilidade dos solos (KNIGHT *et al.*, 1994).

Mesmo o Brasil apresentando grandes áreas de reflorestamento, é necessário aumentar e acelerar o cultivo florestal para atender tanto a demanda interna, as exportações de madeira e também a preservação das florestas naturais (RUDOLPH; SIMOES; JAMES, 1978). Porém, apesar da expansão das áreas cultivadas, grande parte ocorre em solos com pouca disponibilidade de nutrientes, limitando o potencial do *Pinus* (DE SOUZA KULMANN *et al.*, 2023).

Estudos sobre a adubação, tanto em plantios novos quanto em áreas já estabelecidas, são fundamentais para compreender como isso pode beneficiar a produtividade das plantações e a fertilidade do solo. Além de ajudar a esclarecer a relação entre solo e planta, o que é útil na hora de decidir as melhores formulações e doses de fertilizantes a serem utilizadas, assim como épocas de aplicação (MORO *et al.*, 2016).

Segundo estudo de Simões *et al.* (1970), descrevem que em um plantio inicial de *Pinus*, foi observado uma influência positiva referente à adubação mineral com N, P e K, além de óxido de Ca e Mg, durante o primeiro ano. Os maiores crescimentos foram proporcionados pelo fósforo e pelo óxido de Ca e Mg.

O fósforo (P) é um dos nutrientes de extrema importância para o desenvolvimento das plantas, sendo um componente obrigatório em processos de fotossíntese e respiração, além de fazer parte de compostos transportadores de energia (PARMES, 2013).

Os solos brasileiros, em geral, apresentam deficiência de fósforo, além de fixação em formas indisponíveis para as plantas, o que demanda um cuidado especial no manejo deste nutriente nos cultivos agrícolas, tem como funções na planta: participação nos processos de trocas de energia (ATP), na divisão celular (DNA/RNA) e constituição de

estruturas dos vegetais (PES; ARENHARDT, 2015). Além disso, em níveis adequados ele aumenta a eficiência de uso da água e de outros nutrientes incrementando a produtividade (CARVALHO et al., 2023).

Em ecossistemas florestais, especialmente nos solos tropicais e subtropicais, o fósforo (P) é frequentemente o nutriente mais limitante ao crescimento das árvores, devido à sua baixa mobilidade e à intensa fixação por óxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al). Essa condição é ainda mais acentuada em solos fortemente intemperizados, como os Latossolos, que apresentam alta capacidade de adsorção de P. Em plantações de *Pinus spp.*, diversos estudos têm demonstrado que a deficiência de fósforo pode comprometer significativamente o desenvolvimento radicular e a produção de biomassa aérea, reduzindo a eficiência do uso da água e a produtividade do povoamento (JIAN, et al., 2022).

Na silvicultura, o uso de cálcio e magnésio tem sido adotado em situações específicas, como em solos arenosos com baixa saturação por bases ou em viveiros. A aplicação de Ca e Mg em solos de baixa fertilidade melhora a estrutura do solo e favorece o crescimento de mudas de *Eucalyptus* e *Pinus*. Esses nutrientes auxiliam na estabilidade estrutural e no desenvolvimento radicular. Embora o calcário ainda seja mais utilizado no campo, os óxidos podem ser alternativa viável em estágios iniciais, desde que tecnicamente justificados e com pH adequado (ROCHA et al., 2019; ZANON et al., 2024).

Brumat *et al.* (2013) ressaltam que a adubação aumenta o estoque de nutrientes nas acículas de *Pinus*. Acículas com bons teores nutricionais contribuem para o incremento do volume de madeira e influenciam positivamente o processo de ciclagem de nutrientes, especialmente quando retornam ao solo agregando a serrapilheira.

### **4.3. Índices de vegetação**

A utilização de imagens de satélite para monitorar e gerenciar o meio ambiente tem se tornado cada vez mais comum, isso ocorre devido a busca por resultados melhores e, para isso, diversas técnicas digitais têm sido propostas para aprimorar a qualidade das informações que essas imagens oferecem (LOURENÇO; LANDIM, 2004).

O sensoriamento remoto está sendo aplicado em várias áreas do conhecimento, principalmente por conta do fácil acesso aos dados de sensores remotos, à disponibilidade de equipamentos adequados para processar essas informações e à necessidade de entender

como funcionam os diferentes sistemas da Terra (EPIPHANIO *et al.*, 1996). É considerada uma ferramenta que apresenta grandes vantagens, possibilitando analisar grandes áreas de forma rápida e eficiente, e de baixo custo.

Puliti *et al.* (2017), consideram que o uso de dados obtidos por meio de VANTs são eficazes no inventário florestal, pois a combinação de dados espaciais com dados de campo aumenta a precisão das estimativas, e oferece uma alternativa econômica para avaliação de recursos florestais em larga escala, portanto, as imagens multiespectrais embarcadas em VANT's se tornam uma ferramenta ótima para análises o desenvolvimento do plantio com a aplicação da adubação.

Dentre as técnicas utilizadas no processamento de imagens obtidas por sensoriamento remoto, destacam-se os índices de vegetação (IVs). Esses índices exploram as propriedades espectrais da vegetação, analisando o comportamento da sua reflectância nas regiões do visível e infravermelho próximo. Isso é muito útil para monitorar áreas como matas ciliares e plantios, sendo uma ferramenta útil para análises desses espaços (DA SILVA JUNIOR *et al.*, 2021). Através disso, os índices de vegetação estão sendo cada vez mais usados como indicadores da presença e do estado da vegetação, devido sua associação com parâmetros biofísicos como biomassa e índice de área foliar (PINTO *et al.*, 2016).

A resposta espectral das vegetações, é determinada pela absorção, transmissão e reflexão da radiação, a qual é influenciada por fatores químicos, como os pigmentos, a fotossíntese e a presença de água, além de aspectos estruturais, como os tecidos das folhas. Essa resposta pode ser estudada tanto em folhas isoladas quanto no dossel das plantas. Para análise, são utilizados índices que combinam dados espectrais de duas ou mais bandas, com o intuito de aprimorar a relação entre esses dados e os parâmetros biofísicos das plantas (DE ABREU; COUTINHO *et al.*, 2014).

Para reduzir a variação causada por fatores externos, a reflectância espectral é transformada e combinada em diversos índices de vegetação (Ponzoni, 2001). O índice mais conhecido é o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*). Porém, também é possível utilizar métodos como, o GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), e o LCI (*Leaf Chlorophyll Index*).

O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada) é um indicador bastante utilizado para avaliar a saúde da vegetação. Ele é calculado a partir da diferença de reflectância entre o infravermelho próximo (NIR) e a banda vermelha do espectro eletromagnético. A vegetação saudável absorve grande parte da luz nas faixas do

vermelho, verde e azul (RGB) e reflete significativamente no NIR (NOGUEIRA *et al.*, 2020).

As plantas que estão em estresse ou doentes tendem a absorver menos luz no espectro visível e refletem menos no infravermelho próximo. Essa característica é considerada útil para a realização de análises qualitativas e quantitativas da vegetação. Porém, ao interpretar o NDVI, é importante levar em conta alguns fatores como, a saturação do pixel em áreas com vegetação densa, a geometria do sol em relação ao alvo e ao sensor, além do ângulo da luz solar, podem afetar os resultados (NOGUEIRA *et al.*, 2020).

O GNDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde) é uma ferramenta útil para avaliar as variações na biomassa verde nas copas das árvores. Ele utiliza a luz verde em vez da vermelha, o que proporciona maior sensibilidade à clorofila. Esse índice é bastante utilizado para monitorar áreas e verificar a saúde das plantas e os níveis de estresse (DA SILVA JUNIOR *et al.*, 2021).

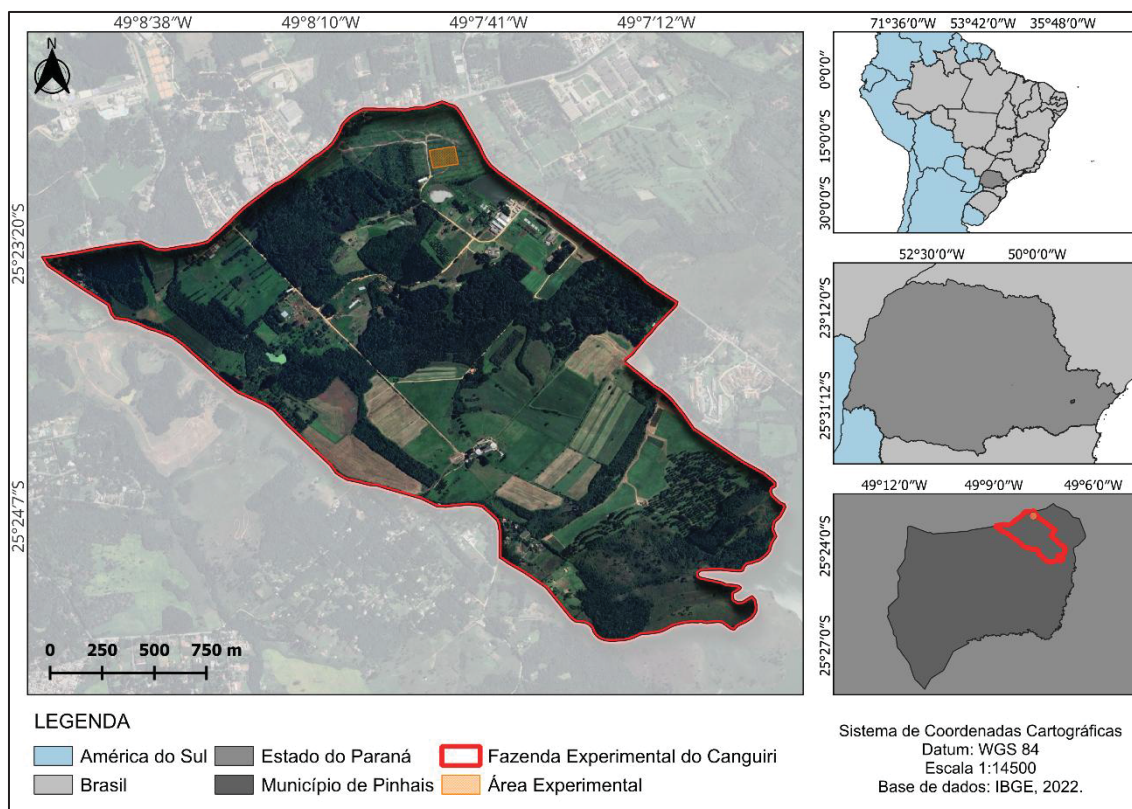
Segundo Gil *et al.* (2002), estudos na literatura destacam a eficiência de índices espectrais como NDVI e LCI, por conta da forte correlação entre a intensidade da cor verde, o teor de clorofila e as concentrações de nitrogênio foliar. Através disso, essa relação permite estimar, em tempo real, o teor de nitrogênio das plantas. Assim, esses índices podem ser utilizados para prever a necessidade de fertilizantes nitrogenados, em oposição às análises destrutivas.

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1. Localização da área de estudo**

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental do Canguiri, gerenciada pelo Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR), está localizada no município de Pinhais, Estado do Paraná (PR), na região metropolitana do município de Curitiba, distante 18 km ao norte dessa capital (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização da área do estudo.



Fonte: Autor (2025).

De acordo com a classificação climática de Köppen, a região possui um clima temperado (ou subtropical) úmido mesotérmico (Cfb), caracterizado pela ausência de estação seca, verões frescos e invernos com geadas frequentes, ocasionalmente acompanhados de precipitações de neve (ALVARES et al., 2013). Segundo o sistema de Holdridge, o clima local é classificado como Bosque Úmido Subtropical Montano Baixo.

A precipitação média anual, é de 1436 mm, conforme registros do SIMEPAR (2025). Quanto à vegetação, a região abriga as unidades fitogeográficas de Floresta Ombrófila Mista e Estepe, de acordo com os critérios do Sistema de Classificação da Vegetação Brasileira proposto pelo IBGE em 1992.

## 5.2. Descrição experimental e tratamentos

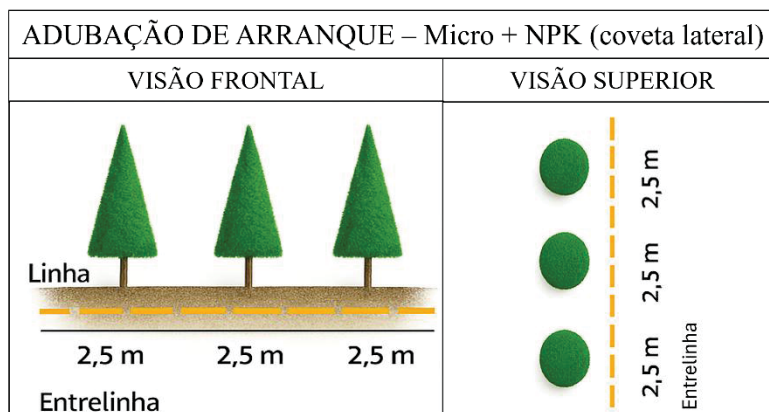
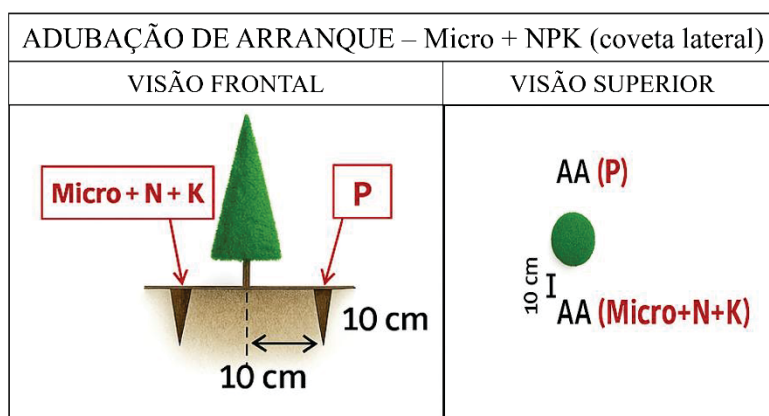
Os experimentos foram conduzidos em delineamento blocos ao acaso, com três repetições, testando cinco doses de  $P_2O_5$  (0, 20, 40, 80, 160,  $kg P_2O_5 kg.ha^{-1}$ ) e cinco doses de Ca e Mg (0; 0,5; 1; 2; 4  $t.ha^{-1}$ ). A fonte de  $P_2O_5$  foi o fertilizante comercial Zarphós (20 % de  $P_2O_5$ ), e a fonte de Ca e Mg foi o fertilizante comercial Zyrmag (35 %

de Ca e 11% de Mg). Cada uma das unidades experimentais (UEs) é composta por 48 plantas (8 linhas x 6 plantas), mantida a bordadura entre as parcelas e área útil de 24 plantas.

O material genético utilizado na implantação dos experimentos foi *Pinus taeda* de PCS 2ª geração. O plantio das mudas foi realizado em agosto de 2023 em covas abertas de forma manual num espaçamento de 3 m x 2 m.

A aplicação dos tratamentos (adubação de arranque) foi realizada 45 dias após o plantio, conforme tabela de descrição abaixo, em uma cova lateral (AA) a 10 cm de distância e 10 cm de profundidade (Figura 2), sendo que em uma cova será aplicado os micronutrientes + nitrogênio (N) + potássio (K) e na outra coveta apenas o fósforo (P). Além disso, o óxido de Ca e Mg foi ser aplicado em file contínuo, conforme ilustra Figura 2.

Figura 2. Esquema de aplicação da adubação de arranque (AA) – 45 dias pós plantio, sendo que os desenhos em verde representam a muda e a linha tracejada em amarelo a aplicação do óxido de Ca.



### 5.3. Levantamento de dados biométricos

As variáveis dendrométricas, Diâmetro a altura do colo (DAC) e altura total (Ht), foram mensuradas em campo aos 6 meses, 12 meses, 18 meses e 24 meses. A coleta foi realizada utilizando métodos tradicionais, empregando um paquímetro digital para determinar o DAC e uma régua topográfica para mensurar a altura total. Esses dados foram obtidos individualmente para cada planta nos cinco tratamentos avaliados.

Essas variáveis são indicadores fundamentais do crescimento e da saúde das plantas, proporcionando dados essenciais para avaliar os efeitos dos tratamentos aplicados.

### 5.4. Avaliação temporal dos tratamentos

A relação entre a idade, o diâmetro a altura do colo e a altura das plantas foi modelada pela equação de Weibull (Equação 1) (WEIBULL, 1951), além dos modelos logístico (Equação 2) (VERHULST, 1838) e de Gompertz (Equação 3) (GOMPertz, 1825) (Tabela 2). Os ajustes foram realizados separadamente para cada tipo de tratamento.

Os parâmetros de suavidade foram definidos com quatro graus de liberdade, garantindo um equilíbrio entre suavidade e aderência aos dados. A análise foi conduzida no software R, com validação cruzada para ajustes mais precisos, resultando em curvas que capturam as tendências gerais dos dados.

A partir desses modelos, foram calculados o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{\text{ajustado}}$ ), o erro padrão absoluto ( $S_{yx}$ ), o erro padrão relativo ( $S_{yx(\%)}$ ) e o critério de informação de Akaike (AIC) para comparar seu desempenho. O  $R^2_{\text{ajustado}}$  avaliou a qualidade do ajuste, enquanto o  $S_{yx}$  forneceu medidas de erro residual. O AIC foi utilizado para selecionar o modelo que melhor se adequa aos dados.

Tabela 1. Modelos utilizados para ajuste dos dados de Ht e DAC.

Equação	Formulação	Onde:
Equação 1 Weibull Weibull (1951)	$y(t) = a * (1 - e^{-b*t^c})$	$y(t)$ : variável de interesse (como altura, diâmetro, biomassa etc.) no tempo $t$ ; $a$ : assíntota (valor máximo que a variável pode atingir); $b$ : parâmetro relacionado à taxa de crescimento; $c$ : parâmetro de forma que determina a curvatura; $e$ : base do logaritmo natural.
Equação 2 Modelo Logístico Verhulst (1838)	$y(t) = \frac{K}{1 + e^{-r(t-t_0)}}$	$y(t)$ : valor da variável dependente no tempo $t$ . $K$ : capacidade máxima (assíntota superior). $r$ : taxa de crescimento. $t_0$ : tempo no qual a curva atinge metade da capacidade máxima ( $K/2$ ).
Equação 3 Modelo de Gompertz Gompertz (1825)	$y(t) = K * e^{-e^{-r(t-t_0)}}$	$y(t)$ : valor da variável dependente no tempo $t$ . $K$ : capacidade máxima (assíntota superior). $r$ : taxa de crescimento. $t_0$ : tempo no qual a curva atinge $K/e$ (aproximadamente 37% da capacidade máxima).

Fonte: Autor (2025).

### 5.5. Aquisição de imagens multiespectral

Para a aquisição das imagens multiespectrais aéreas foi utilizado o drone Mavic 3M. O planejamento de voo foi realizado pelo software PIX4D, o que permitiu a predefinição da altura de voo, recobrimento lateral e longitudinal, e a velocidade de deslocamento da aeronave. As imagens foram processadas com a técnica de fotogrametria, no software PIX4D mapper, para gerar nuvens de pontos, ortomosaico, bandas multiespectrais separadas e índices de vegetação. As características das bandas espectrais utilizadas no levantamento estão detalhadas na Tabela 3.

Tabela 2. Parâmetros espectrais e configurações de voo utilizados na aquisição de imagens multiespectrais.

<b>Banda</b>	<b>Comprimento de onda (nm)</b>	<b>Características de voo</b>	
Azul (B)	450		
Verde (G)	560	<b>Horário de voo</b>	12-14h
Vermelho (R)	650	<b>Altura do voo</b>	50 metros
Borda do vermelho (RE)	730	<b>FOV</b>	90°
Infravermelho próximo (NIR)	840		

Fontes: Autor (2025).

### 5.6. Índices de vegetação

Os índices de vegetação NDVI, GNDVI e LCI foram calculados, conforme a Tabela 4, para comparar os diferentes tratamentos. Derivados de imagens multiespectrais, esses índices ajudam a identificar variações espaciais nas respostas das plantas aos tratamentos, fornecendo informações valiosas sobre a eficácia das práticas de manejo e auxiliando na otimização da produtividade por meio da aplicação adequada de insumos (BANNARI et al., 1995).

Tabela 3. Índices de vegetação utilizados no estudo e suas equações matemáticas.

<b>Índice de vegetação</b>	<b>Nome completo</b>	<b>Equação</b>	<b>n°</b>
NDVI	Índice de vegetação da diferença normalizada	$(NIR - R) / (NIR + R)$	4
GNDVI	Índice de vegetação da diferença normalizada verde	$(NIR - G) / (NIR + G)$	5
LCI	Índice de clorofila foliar	$(NIR - RE) / (NIR + R)$	6

Fontes: Autor (2025).

### **5.7. Espacialização temporal dos índices de vegetação nos tratamentos**

Para avaliar a variação espaço-temporal dos índices de vegetação (NDVI, GNDVI e LCI) ao longo do período de avaliação do experimento, foram realizadas espacializações temporais próxima as datas de coletas em campo. Essas espacializações possibilitaram a análise das variações nos valores dos índices dentro dos limites estabelecidos pelos tratamentos.

A aplicação da espacialização temporal permitiu identificar padrões de desenvolvimento da vegetação e respostas diferenciadas aos tratamentos ao longo do tempo, fornecendo informações detalhadas sobre a dinâmica espacial e temporal dos índices avaliados.

### **5.8. Análises dos Dados Biométricos**

Para entender como a adubação e a dosagem influenciam o desenvolvimento das plantas, foi realizada uma análise de variância multivariada (MANOVA) e a análise discriminante. Os dados foram processados e analisados no software SPSS, com um nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ).

A MANOVA foi aplicada para avaliar os efeitos principais e as interações entre os tipos de adubo e suas doses sobre variáveis como NDVI, GNDVI, LCI, DAC e HT das plantas. A análise considerou tanto os efeitos individuais do tipo de adubo e da dose quanto a interação entre esses dois fatores.

Por fim, para determinar qual combinação de adubo e dose resultou no melhor desenvolvimento das plantas, foram analisados os valores das variáveis dependentes em cada tratamento. As combinações que apresentaram os maiores valores de NDVI, LCI, GNDVI, diâmetro a altura do colo e altura total foram consideradas as mais eficazes para promover o crescimento e a saúde das plantas.

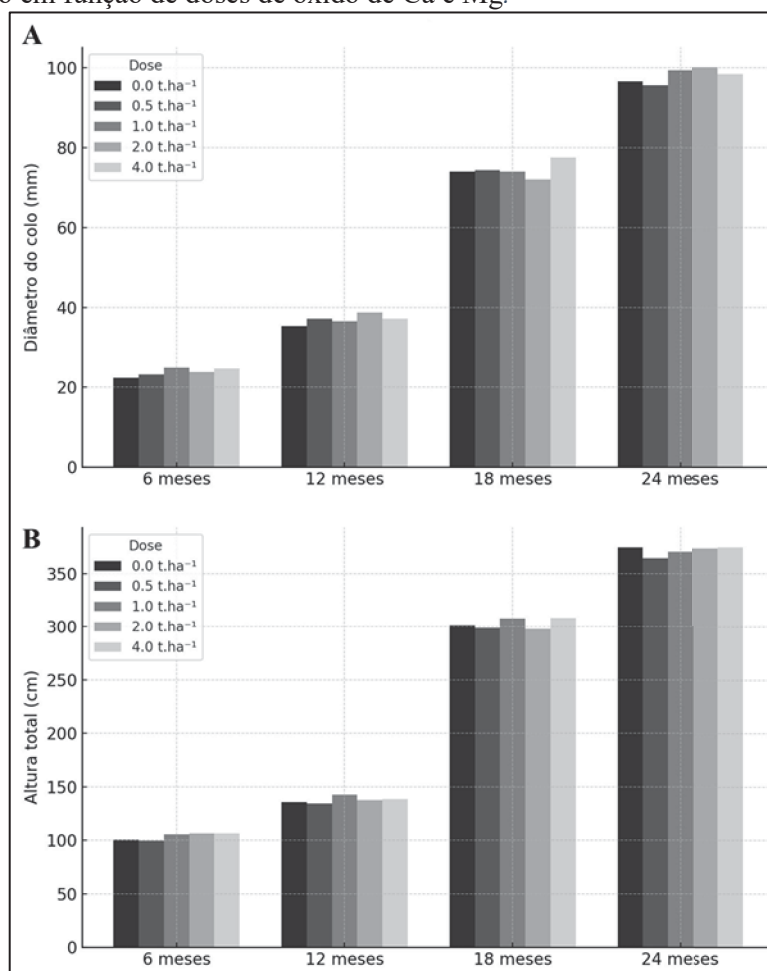
## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1. Estatística descritiva

#### 6.1.1. Óxido de CaMg

A análise descritiva das médias e desvios padrão da altura total e do diâmetro a do colo das plantas ao longo dos 24 meses (Figura 3), mostra um aumento no desenvolvimento tanto em altura quanto diâmetro do colo, das plantas cultivadas no solo com aplicação de todas as doses de óxido de Ca e Mg. No que se refere à aplicação, observa-se um crescimento constante da altura total das plantas ao longo dos 24 meses. Aos 6 meses, a média de altura (Figura 3B) variou entre 99,6 cm e 106,7 cm entre as diferentes dosagens, aumentando significativamente para valores entre 364,3 cm e 374,6 cm aos 24 meses.

Figura 3. Crescimento em diâmetro do colo (A) e altura total (B) de mudas de *Pinus taeda*, ao longo do tempo em função de doses de óxido de Ca e Mg.



Fonte: Autor (2025).

Em relação ao diâmetro à altura do colo nos tratamentos com óxido de Ca e Mg, também se observou incremento progressivo ao longo do tempo. Aos 6 meses, os valores

médios estavam entre 22,4 mm e 24,9 mm, atingindo entre 95,6 mm e 100,2 mm aos 24 meses. Esse aumento no diâmetro é coerente com o desenvolvimento vigoroso das plantas, resultante da maior disponibilidade de cálcio e magnésio, além da melhoria na estrutura e capacidade de troca catiônica do solo após a aplicação do óxido de Ca e Mg.

Nos tratamentos com óxido de Ca e Mg, observou-se um desempenho consistente nas variáveis de crescimento. Aos 24 meses, as médias de diâmetro do colo foram elevadas em todos os tratamentos, porém com diferenças pouco expressivas entre as doses, o que indica uma resposta limitada à adição do nutriente nas condições avaliadas.

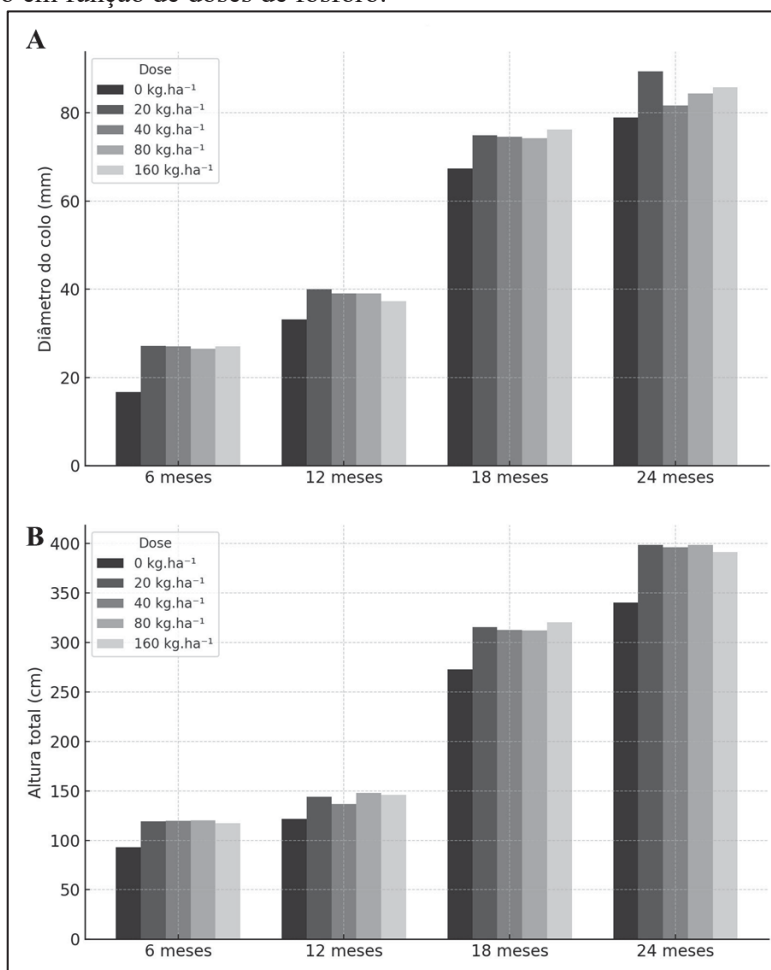
Resultados semelhantes foram observados por Rocha et al. (2008) em estudo com adubação de eucalipto, no qual se verificou que o aumento no diâmetro do colo depende da aplicação de doses adequadas de óxido de Ca e Mg. A baixa resposta observada neste experimento pode estar associada às características do solo, classificado como Latossolo Húmico, que, por sua profundidade e maior teor de argila, tende a demandar quantidades mais elevadas de corretivos para a correção da acidez ao longo do perfil (SILVA et al., 2016).

#### 6.1.2. Fósforo

Nos tratamentos com aplicação de P, a altura total das plantas apresentou aumento expressivo ao longo dos meses, com médias iniciais entre 92,9 cm e 120,2 cm aos 6 meses, e atingindo entre 340,2 cm e 398,8 cm aos 24 meses (Figura 4A). As doses de 20 kg.ha<sup>-1</sup> e 80 kg.ha<sup>-1</sup> apresentaram os maiores ganhos em altura, especialmente após os 12 meses, indicando uma resposta positiva à adubação fosfatada.

Por fim, o diâmetro do colo também foi positivamente influenciado pela adubação fosfatada, com valores médios variando de 16,7 mm a 27,2 mm aos 6 meses e alcançando entre 78,9 mm e 89,4 mm aos 24 meses (Figura 4B). Vale destacar que o P é fundamental nos processos de divisão celular e desenvolvimento radicular, o que pode ter contribuído para o bom desempenho observado, sobretudo em combinação com outros nutrientes disponíveis no solo (JIAN, et al., 2022).

Figura 4. Crescimento em altura total (A) e diâmetro do colo (B) de mudas de *Pinus taeda* ao longo do tempo em função de doses de fósforo.



Fonte: Autor (2025).

No experimento com doses de fósforo, observa-se que as médias de altura aumentaram ao longo do período de coleta, indicando um possível efeito positivo dessa fonte de adubação na promoção do crescimento em altura. Esse achado corrobora os resultados de Ros et al. (2019), que, ao avaliar a adubação fosfatada em mogno-africano, observaram um efeito positivo e crescente da dosagem desse nutriente no desenvolvimento da altura.

O diâmetro do colo apresentou crescimento contínuo ao longo dos meses. Entre os tratamentos com fósforo, destaca-se a dose de 80 kg.ha<sup>-1</sup>, que obteve o maior diâmetro médio, atingindo 100,2 mm.

## 6.2. Análise dos modelos ajustados

### 6.2.1. Óxido de CaMg

A análise dos modelos ajustados para a altura das plantas em função da adubação com óxido de Ca e Mg revela que o modelo logístico apresentou o melhor desempenho na maioria dos tratamentos, com os maiores valores de  $R^2_{aj}$  e os menores erros absolutos (Syx) e relativos (Syx%). Na dose 4 t.ha<sup>-1</sup>, por exemplo, o modelo logístico obteve um  $R^2_{aj}$  de 0,866, Syx de 43,21 e Syx% de 18,63, representando o melhor ajuste entre todos os tratamentos. Esse padrão de superioridade do modelo logístico também se reflete nos menores valores de AIC, indicando maior parcimônia e qualidade do ajuste (Tabela 5).

Tabela 4. Modelos ajustados para altura em função da adubação com óxido de Ca e Mg e suas dosagens.

Doses (t.ha <sup>-1</sup> )	Modelos	$R^2_{aj}$	Syx	Syx%	AIC
0	Logístico	0,863	44,50	19,52	2841,67
	Gompertz	0,856	45,61	20,00	2855,00
	Weibull	0,848	46,81	20,53	2869,20
0,5	Logístico	0,846	46,14	20,49	2840,27
	Gompertz	0,838	47,27	20,99	2853,40
	Weibull	0,830	48,38	21,49	2865,95
1	Logístico	0,842	46,81	20,23	2879,68
	Gompertz	0,835	47,89	20,70	2892,16
	Weibull	0,840	41,88	20,36	2880,55
2	Logístico	0,840	47,62	20,67	2952,42
	Gompertz	0,833	48,66	21,12	2964,46
	Weibull	0,825	49,88	21,65	2978,34
4	Logístico	0,866	43,21	18,63	2950,09
	Gompertz	0,859	44,41	19,15	2965,63
	Weibull	0,850	45,74	19,72	2982,40
<b>Modelo Geral</b>		0,855	45,10	19,68	14413,16

Apesar de o modelo de Gompertz apresentar desempenho próximo ao logístico em algumas dosagens, seus valores de erro foram ligeiramente superiores. O modelo Weibull mostrou os piores ajustes em praticamente todos os tratamentos, com os menores  $R^2_{aj}$  e maiores Syx e AIC. De modo geral, o modelo logístico também se destaca no ajuste

geral, com  $R^2_{aj}$  de 0,855, Syx de 45,10 e AIC de 14.413,16, confirmando sua robustez para representar o crescimento em altura das plantas sob diferentes dosagens de óxido de Ca e Mg ao longo do tempo.

Os modelos ajustados para o diâmetro à altura do colo também apresentaram bom desempenho com a adubação com óxido de Ca e Mg, revelando padrões semelhantes aos observados para a altura das plantas. Em todos os tratamentos, o modelo logístico demonstrou superioridade estatística, com coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{aj}$ ) variando de 0,821 a 0,889. O erro padrão absoluto variou entre 9,60 e 11,80, enquanto o erro relativo permaneceu quase sempre abaixo dos 20% (Tabela 6). Esses resultados indicam não apenas melhor capacidade explicativa, mas também maior precisão e estabilidade nas estimativas, atributos desejáveis para representar o desenvolvimento do diâmetro à altura do colo ao longo do tempo.

Tabela 5. Modelos ajustados para diâmetro a altura do colo em função da adubação com óxido de Ca e Mg e suas dosagens.

Doses (t.ha <sup>-1</sup> )	Modelos	$R^2_{aj}$	Syx	Syx%	AIC
0	Logístico	0,871	11,33	19,85	2097,21
	Goumpertz	0,866	11,54	20,22	2107,33
	Weibull	0,861	11,76	20,61	2117,67
0,5	Logístico	0,875	10,83	18,72	2057,49
	Goumpertz	0,870	11,03	19,07	2067,54
	Weibull	0,865	11,24	19,44	2077,74
1	Logístico	0,875	11,12	18,97	2095,14
	Goumpertz	0,871	11,27	19,22	2102,19
	Weibull	0,864	11,60	19,78	2117,97
2	Logístico	0,865	11,82	20,13	2174,68
	Goumpertz	0,862	11,96	20,37	2181,39
	Weibull	0,857	12,20	20,79	2192,56
4	Logístico	0,889	10,45	17,55	2143,58
	Goumpertz	0,883	10,71	17,99	2157,70
	Weibull	0,877	10,98	18,44	2171,98
<b>Modelo Geral</b>		0,888	10,55	18,07	6496,70

Essa consistência reforça a versatilidade e robustez do modelo logístico para descrever padrões de crescimento sigmoidal, típicos de características morfológicas como o diâmetro à altura do colo, geralmente melhor descritas por modelos não lineares devido ao seu padrão de desenvolvimento, com crescimento acelerado nas fases iniciais e estabilização posterior (FINGER, 1992; FRUHAUF et al., 2022).

### 6.2.2. Fósforo

Os modelos ajustados para a altura das plantas em função da adubação com fósforo mostram melhor desempenho do modelo logístico na maioria dos tratamentos. Nas plantas cultivadas submetidas a adubação com 80 kg.ha<sup>-1</sup> foram observados os melhores resultados, com R<sup>2</sup>aj de 0,876, erro absoluto (Syx) de 44,25 e erro relativo (Syx%) de 18,33, além do menor valor de AIC (2880,26), indicando que a resposta da altura ao fósforo foi bem representada por esse modelo (Tabela 7).

Tabela 6. Modelos ajustados para altura em função da adubação com fósforo e suas dosagens.

Dose (kg.ha <sup>-1</sup> )	Modelos	R <sup>2</sup> aj	Syx	Syx%	AIC
0	Logístico	0,792	52,28	25,28	2907,78
	Goumpertz	0,786	53,00	25,62	2915,12
	Weibull	0,778	53,98	26,10	2925,10
20	Logístico	0,863	46,86	19,50	2943,46
	Goumpertz	0,858	47,84	19,90	2954,98
	Weibull	0,849	49,23	20,48	2971,03
40	Logístico	0,851	49,80	21,03	2956,15
	Goumpertz	0,845	50,86	21,48	2967,78
	Weibull	0,837	52,15	22,02	2981,65
80	Logístico	0,876	44,25	18,33	2880,26
	Goumpertz	0,870	45,18	18,72	2891,69
	Weibull	0,862	46,50	19,26	2907,64
160	Logístico	0,849	49,58	20,41	2900,44
	Goumpertz	0,842	50,65	20,85	2912,06
	Weibull	0,834	51,87	21,35	2924,97
<b>Modelo Geral</b>		0,840	50,40	21,63	14729,62

O modelo de Gompertz apresentou desempenho intermediário em todos os tratamentos, enquanto o modelo de Weibull teve os piores ajustes, com maiores erros e AICs mais elevados. De forma geral, os modelos tiveram desempenho estável, embora com maior variabilidade, como evidenciado pelo  $R^2_{aj}$  geral (0,840) e Syx de 50,40. Esses resultados indicam que o crescimento em altura das plantas sob adubação fosfatada apresenta resposta positiva, exigindo atenção na escolha da dose ideal e na modelagem adequada para representar esse crescimento ao longo do tempo.

Para o diâmetro à altura do colo, os modelos ajustados também evidenciaram o bom desempenho do modelo logístico em todos os tratamentos com fósforo. O modelo apresentou os maiores coeficientes de determinação ajustados ( $R^2_{aj}$ ) e os menores valores de erro padrão absoluto e relativo, com exceção da dose 0  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , onde o Syx% ultrapassou os 20% (Tabela 8). Esses resultados indicam melhor capacidade de estimar o desenvolvimento da variável ao longo do tempo, assegurando maior precisão nas inferências.

Tabela 7. Modelos ajustados para diâmetro a altura do colo em função da adubação com fósforo e suas dosagens.

Dose ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ )	Modelos	$R^2_{aj}$	Syx	Syx%	AIC
0	Logístico	0,821	11,80	24,06	2103,80
	Gompertz	0,813	12,05	24,57	2115,13
	Weibull	0,811	12,13	24,74	2118,74
20	Logístico	0,887	9,60	17,11	2058,80
	Gompertz	0,881	9,85	17,56	2073,17
	Weibull	0,878	10,00	17,82	2081,64
40	Logístico	0,861	10,09	18,82	2071,81
	Gompertz	0,851	10,45	19,47	2090,83
	Weibull	0,850	10,51	19,58	2094,00
80	Logístico	0,847	10,88	19,93	2105,73
	Gompertz	0,839	11,16	20,45	2119,89
	Weibull	0,836	11,26	20,62	2124,79
160	Logístico	0,852	11,09	19,96	2085,74
	Gompertz	0,842	11,44	20,60	2102,89
	Weibull	0,838	11,60	20,89	2110,43
<b>Modelo Geral</b>		0,861	10,53	19,58	6474,28

Assim como observado na altura, a aplicação do modelo logístico para o diâmetro à altura do colo sob adubação fosfatada confirma sua robustez para descrever padrões de crescimento sigmoidal ao longo do tempo. A escolha desse modelo contribui para uma representação mais fiel do comportamento da variável em resposta às diferentes dosagens de fósforo.

### **6.3. Curvas de crescimento**

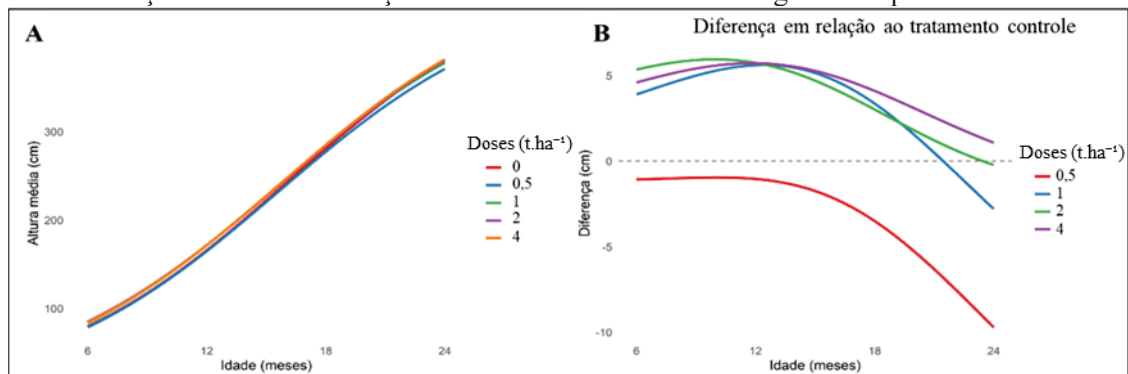
#### **6.3.1. Óxido de CaMg**

As curvas de crescimento são ferramentas fundamentais para a avaliação do desenvolvimento de plantas sob diferentes condições de tratamentos silviculturais, como a adubação. Esses modelos descrevem a dinâmica do crescimento ao longo do tempo, permitindo identificar períodos de maior incremento e estabilização (WOLFF et al., 2019).

Observa-se que as plantas cultivadas nas doses de óxido de Ca e Mg apresentaram crescimento semelhante, com aumento progressivo da altura média ao longo do tempo (Figura 5A). A dose de 4 t.ha<sup>-1</sup> apresentou ligeira superioridade ao final do período, seguida pelas dosagens de 1 t.ha<sup>-1</sup> e 2 t.ha<sup>-1</sup>. Na Figura 5B, que mostra a diferença em relação ao tratamento com dose de 0 t.ha<sup>-1</sup>, evidencia-se que os demais tratamentos apresentaram crescimento levemente superior até os 12 meses.

Com o avanço da idade, a dose de 0 t.ha<sup>-1</sup> passou a ter desempenho inferior, especialmente em relação a dose de 4 t.ha<sup>-1</sup>, que apresentou até 5 cm de diferença positiva. Já a dose 0,5 t.ha<sup>-1</sup>, após um pequeno ganho inicial, demonstrou declínio em relação a dose de 0 t.ha<sup>-1</sup>, chegando a uma diferença negativa próxima de 10 cm aos 24 meses, sugerindo uma menor eficiência dessa dose específica no longo prazo.

Figura 5. Curvas de crescimento em altura (cm) ao longo do tempo em plantas de *Pinus taeda*, cultivadas em diferentes doses de óxido de Ca e Mg (A). Nos gráficos da direita (B), apresenta-se a diferença em altura em relação ao tratamento controle ao longo do tempo.

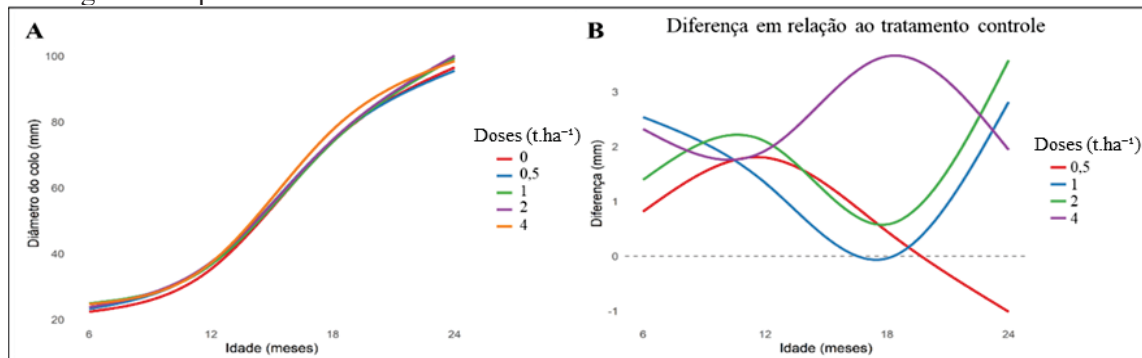


Fonte: Autor (2025).

O efeito do óxido de Ca e Mg sobre o crescimento em altura foi discreto, com curvas bastante semelhantes entre os tratamentos e variações modestas em relação ao tratamento controle. Embora alguns tratamentos tenham apresentado ganhos pontuais, essas diferenças tenderam a se estabilizar ou até mesmo regredir ao longo do tempo. Isso sugere que, nas condições do presente experimento, a calagem não resultou em um incremento direto expressivo no crescimento aéreo das plantas. Resultados semelhantes foram relatados por Da Costa Filho et al. (2022), que observaram ausência de efeito significativo da aplicação de óxido de Ca e Mg sobre a altura e outras características morfológicas das plantas.

Quanto ao diâmetro à altura do colo, o efeito da adubação com óxido de Ca e Mg também foi pouco expressivo ao longo do período avaliado (Figura 6A). As curvas dos diferentes tratamentos apresentaram comportamento semelhante, com variações muito pequenas entre si. A diferença em relação ao tratamento controle manteve-se inferior a 3 mm (Figura 6B) e não indicou uma tendência consistente de resposta positiva ao aumento das doses. Em alguns momentos, a diferença entre os tratamentos foi oscilante, sugerindo que, sob as condições experimentais, o óxido de Ca e Mg teve papel secundário no incremento direto do crescimento em espessura.

Figura 6. Curvas de crescimento em diâmetro a altura do colo (mm) ao longo do tempo em plantas de *Pinus taeda*, no gráfico da esquerda (A), estão representadas as médias de DAC por dose; no gráfico da direita (B), apresenta-se a diferença de crescimento em relação ao tratamento controle ao longo do tempo.

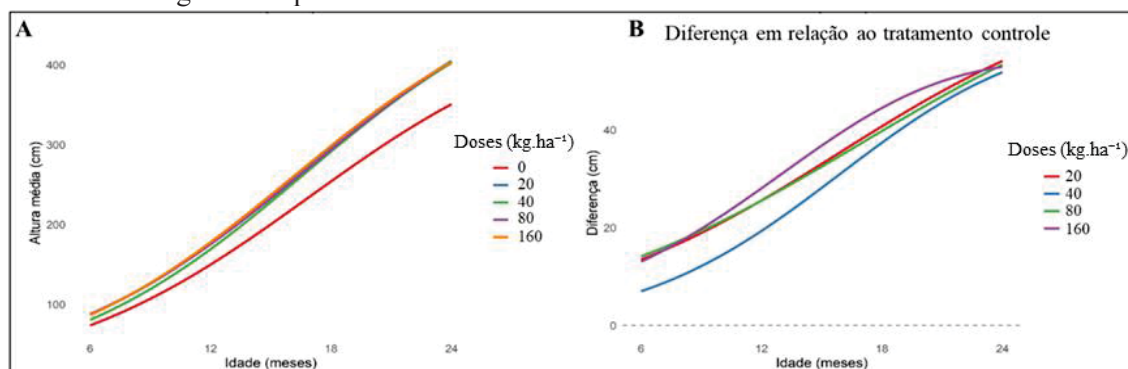


Fonte: Autor (2025).

### 6.3.2. Fósforo

As figuras 7A e 7B mostram respostas mais expressivas à adubação com fósforo. O gráfico A evidencia que a dose 0 kg.ha<sup>-1</sup> teve o menor desempenho em altura ao longo de todo o período, enquanto a dose 20 kg.ha<sup>-1</sup> e 160 kg.ha<sup>-1</sup> resultaram nas maiores alturas médias, ultrapassando os 390 cm aos 24 meses. No caso da Figura 5B, as diferenças acumuladas em relação ao tratamento controle são marcantes: os demais tratamentos apresentaram vantagens crescentes com o tempo, atingindo diferenças superiores a 35 cm.

Figura 7. No gráfico da esquerda estão representadas as médias de altura por tratamento para fósforo (A); no gráfico da direita (B), apresenta-se a diferença em altura em relação ao tratamento controle ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2025).

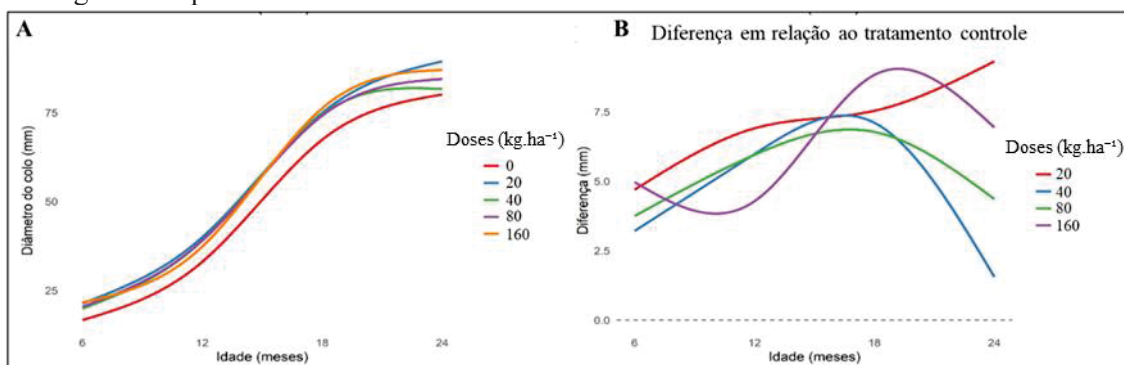
Observa-se um padrão de crescimento sigmoidal, caracterizado por um aumento acelerado na altura após uma fase inicial de crescimento lento, seguido por uma estabilização (FRUHAUF et al., 2022). As diferenças de desenvolvimento em altura entre os tratamentos indicam variações claras na resposta das plantas. A aplicação de fósforo

resultou em um incremento expressivo no crescimento em altura ao longo do tempo, como evidenciado na Figura 7A.

Embora os tratamentos tenham apresentado comportamento de crescimento semelhante, a dose de 20 kg.ha<sup>-1</sup> destacou-se por proporcionar o maior ganho em altura em relação ao controle (Figura 7B), atingindo uma diferença de aproximadamente 50 cm aos 24 meses. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por Silva et al. (2022) e Schumacher et al. (2003), que observaram efeitos positivos da adubação fosfatada no crescimento de espécies florestais. Em ambos os estudos, a aplicação adequada de fósforo contribuiu significativamente para o desenvolvimento das plantas, reforçando o papel essencial desse nutriente no incremento vegetativo.

Em relação ao diâmetro à altura do colo, a aplicação de fósforo resultou em aumento significativo, como demonstrado na Figura 8A. Os tratamentos com doses crescentes apresentaram desempenho superior ao controle, sendo a dose 20 kg.ha<sup>-1</sup> a mais eficiente, com diferença de aproximadamente 8 mm aos 24 meses (Figura 8B). Esse padrão sugere uma resposta positiva e dose-dependente à adubação fosfatada. Resultados semelhantes foram relatados por Silva et al. (2022) e Schumacher et al. (2003), os quais destacam que o fósforo exerce papel fundamental no desenvolvimento inicial de espécies florestais, atuando na formação do sistema radicular e na divisão celular, o que favorece o crescimento em espessura e altura.

Figura 8. No gráfico da esquerda (A), estão representadas as médias de DAC por tratamento; nos gráficos da direita (B), apresenta-se a diferença de crescimento em relação ao tratamento controle ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2025).

#### 6.4. Avaliação espacial dos índices de vegetação

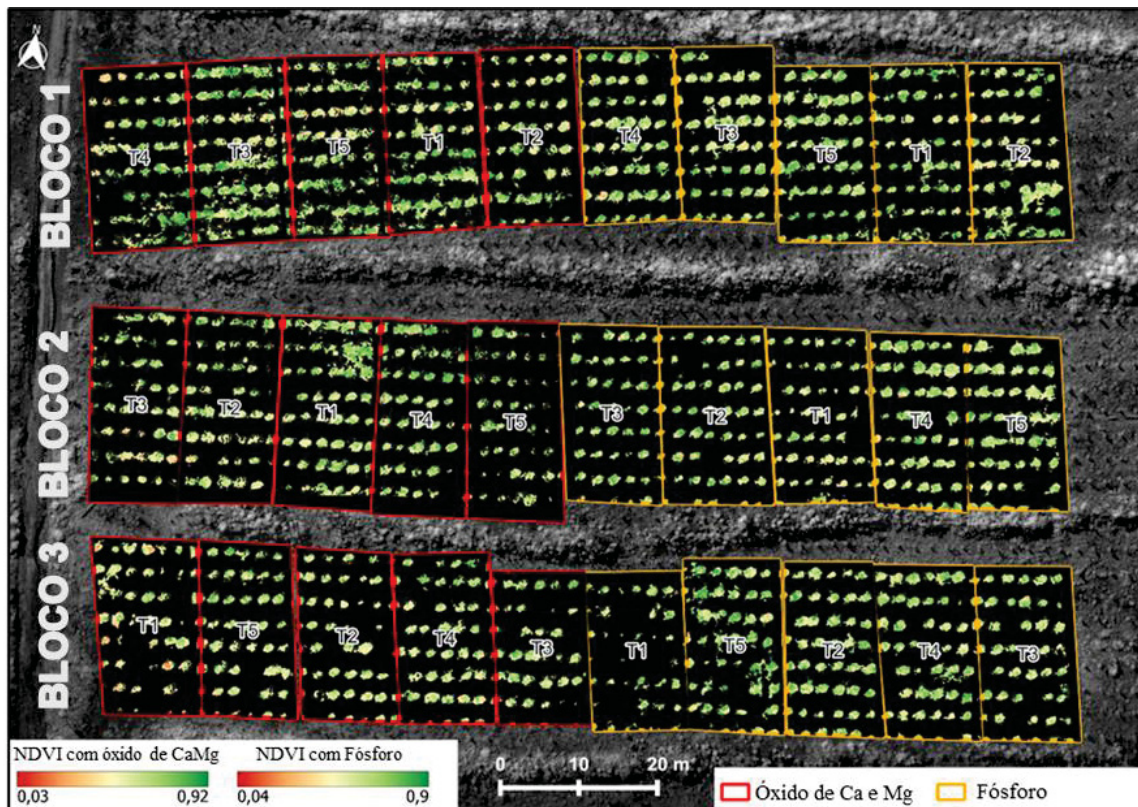
As imagens dos índices de vegetação (NDVI, GNDVI e LCI) analisadas no tempo evidenciam variações no desenvolvimento das plantas em resposta aos tratamentos de adubação com óxido de Ca e Mg e fósforo, bem como às diferentes doses aplicadas.

#### 6.4.1. NDVI

O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) obtido por imagem multiespectral na primeira avaliação, realizada aos 6 meses após a aplicação dos tratamentos (Figura 9). Os polígonos delineados correspondem às parcelas experimentais, as quais foram submetidas a dois tipos de adubação: com óxido de Ca e Mg (contorno em vermelho) e com fósforo (contorno em amarelo). Observa-se a variação espacial do NDVI dentro e entre todas as dosesagens, refletindo diferenças no vigor vegetativo das plantas em resposta aos manejos adotados.

A imagem de referente aos 6 meses (Figura 9) demonstrou uma uniformidade significativa nas parcelas tratadas com fósforo e óxido de Ca e Mg, independentemente das doses aplicadas, indicando que a resposta inicial a esses tratamentos é pouco perceptível até o momento. Essa resposta é comum em estágios iniciais do desenvolvimento da vegetação, quando a área foliar ainda é reduzida e há alta influência do solo exposto na reflectância registrada. De acordo com Xue e Su (2017), o NDVI apresenta limitação para distinguir diferenças de vigor nesse período, sendo mais sensível a partir do momento em que a vegetação cobre uma porção maior do solo.

Figura 9. Avaliação inicial do NDVI, realizada aos 6 meses.

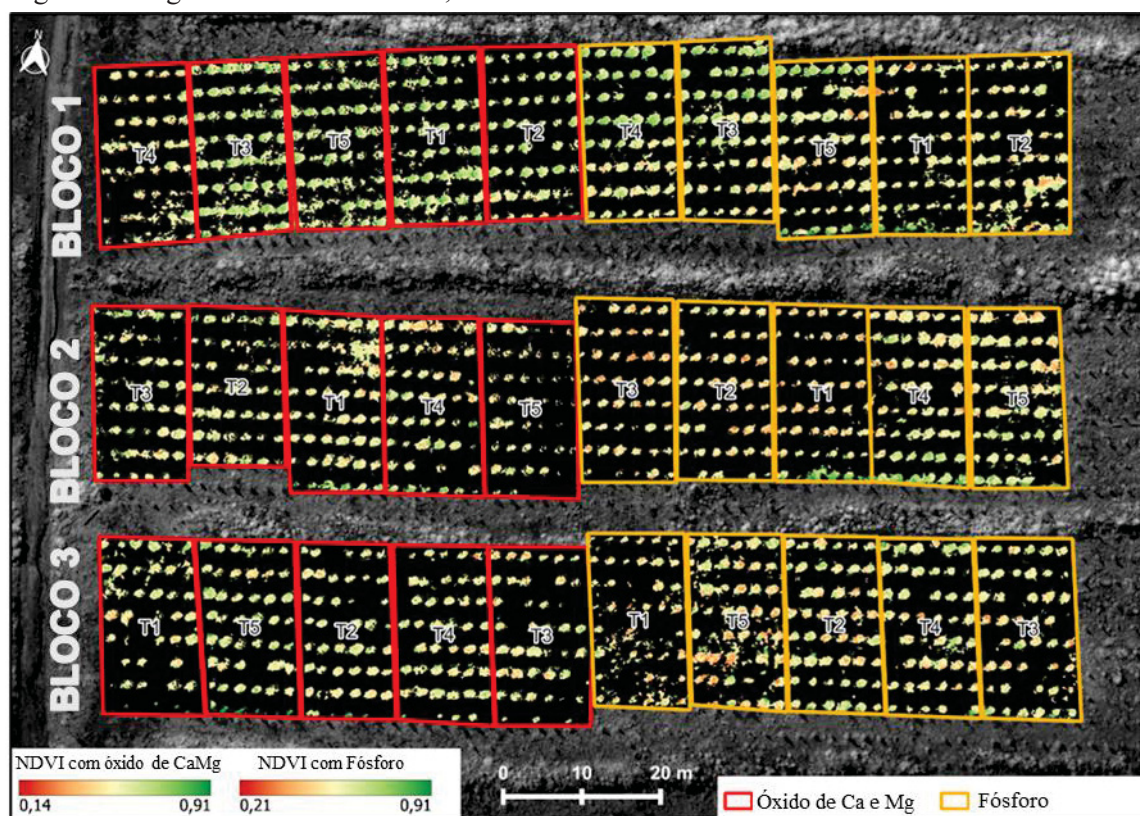


Fontes: Autor (2025).

Na imagem dos 12 meses (Figura 10), observa-se um avanço no desenvolvimento da cobertura vegetal, refletindo um aumento nos valores de NDVI, auxiliando na distinção visual entre os tratamentos. Essa resposta está relacionada ao aumento da atividade fotossintética, estimulado pelo maior desenvolvimento foliar, elevação na concentração de clorofila e acúmulo de biomassa, fatores que indicam melhorias no estado nutricional e na saúde das plantas (HUETE et al., 2002).

Esta resposta ao índice é esperada em fases de crescimento da planta, especialmente em espécies florestais, onde o aumento do dossel afeta diretamente os índices espectrais. Nesse sentido, Delegido et al. (2015) destacam que o NDVI se torna progressivamente mais eficaz na detecção de variações na área foliar e no conteúdo de clorofila à medida que o dossel se desenvolve, o que corrobora os padrões observados nesta fase do experimento.

Figura 10. Segunda análise do NDVI, realizada aos 12 meses.



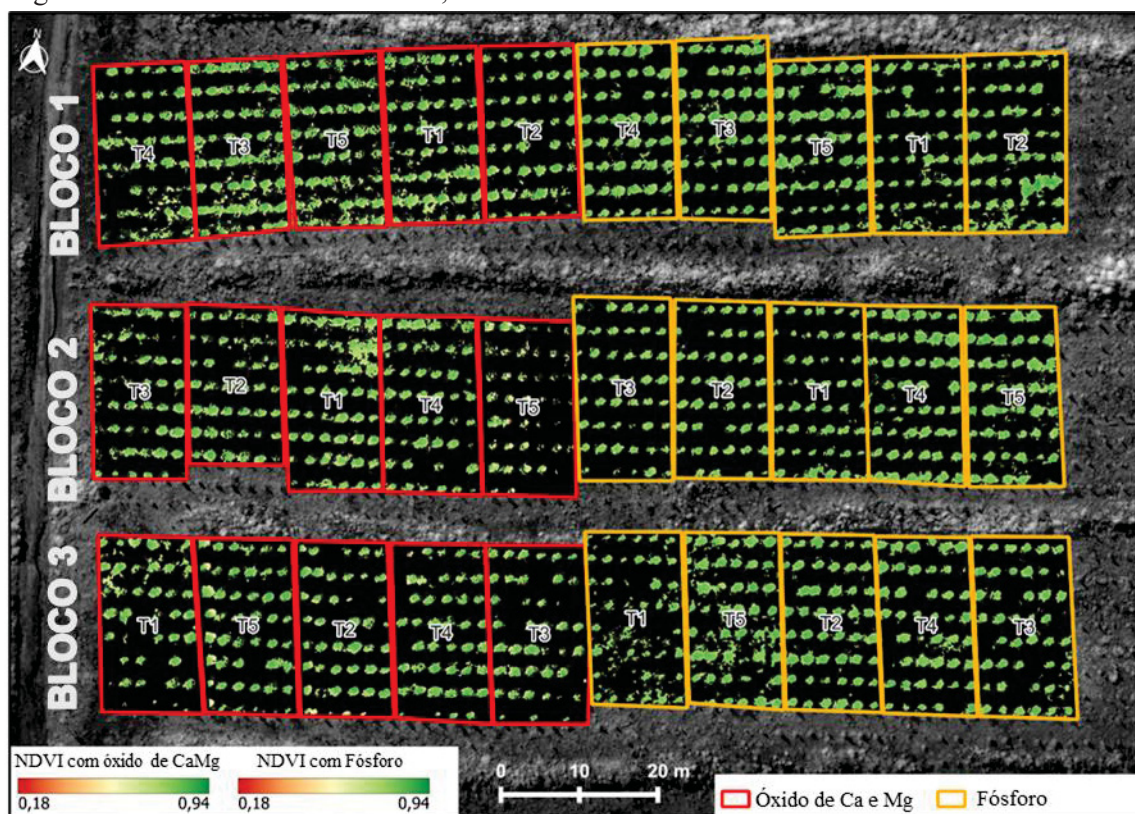
Fonte: Autor (2025).

Na análise de 18 meses (Figura 11), observou-se um aumento expressivo nos valores de NDVI, refletindo um avanço significativo no desenvolvimento vegetativo das plantas. De acordo com o padrão já identificado em avaliações anteriores, as parcelas que

receberam doses mais elevadas de fósforo, especialmente nas dosagens de  $20 \text{ kg.ha}^{-1}$  e  $160 \text{ kg.ha}^{-1}$ , apresentaram maior vigor vegetativo, com cobertura mais densa e uniforme. Esses resultados estão em concordância com os dados obtidos pelas curvas de crescimento, que indicaram, nesse mesmo período, maior desenvolvimento em altura e diâmetro a altura do colo.

Por outro lado, essa imagem evidenciou de forma clara o contraste entre o tratamento controle ( $0 \text{ kg.ha}^{-1}$ ) e os demais no experimento de P. As áreas sob o controle apresentaram cobertura vegetal bastante reduzida e elevada mortalidade de indivíduos, especialmente no bloco 3. Esse padrão reforça o papel fundamental da adubação inicial no estabelecimento do povoamento.

Figura 11. Terceira análise do NDVI, realizada aos 18 meses.



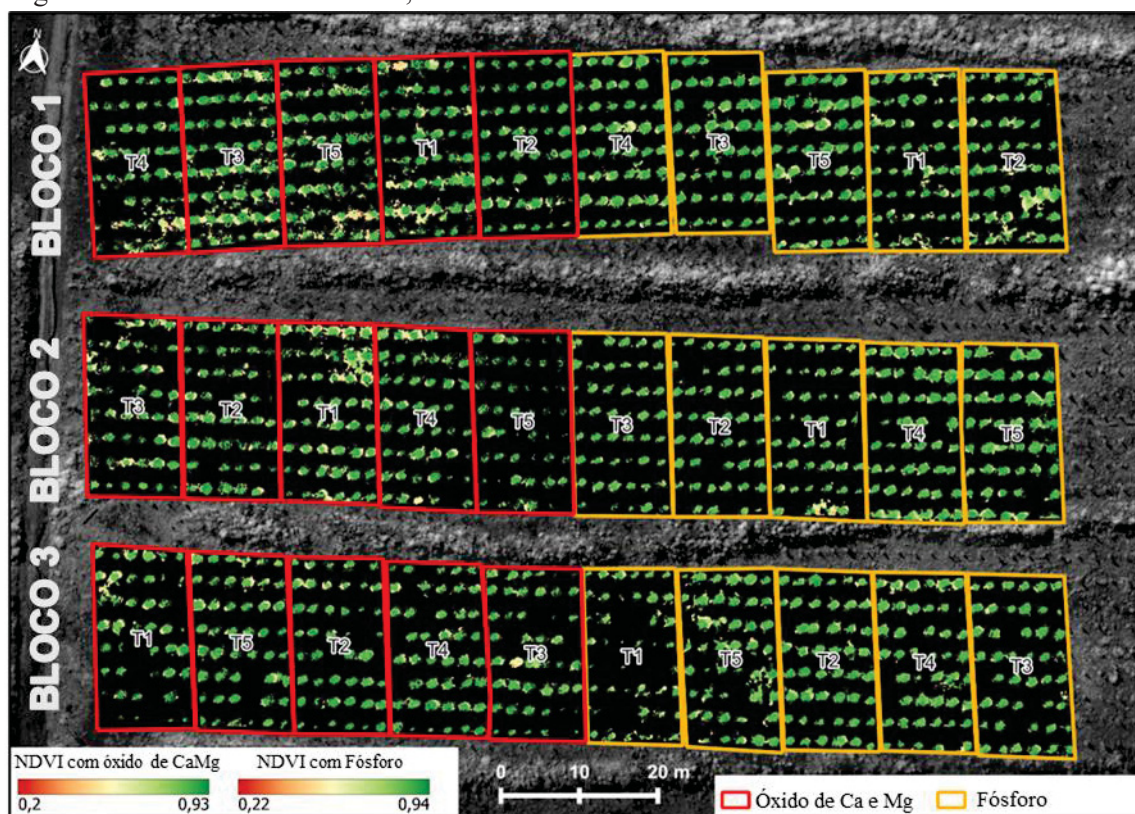
Fontes: Autor (2025).

Na imagem referente aos 24 meses (Figura 12), os valores de NDVI mantiveram a tendência de aumento observada nas avaliações anteriores, refletindo a continuidade do crescimento vegetativo. As parcelas que receberam as maiores doses de óxido de Ca e Mg apresentaram, de forma consistente, maior cobertura vegetal, indicando o efeito positivo do tratamento na sustentação do vigor das plantas ao longo do tempo.

Para os tratamentos com fósforo, verificou-se desempenho semelhante entre as dosagens de  $20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  e  $160 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Esse resultado confirma a análise das curvas de crescimento, nas quais os dois tratamentos apresentaram valores bastante próximos aos 24 meses.

Além disso, os resultados observados reforçam o padrão identificado nas avaliações anteriores em relação ao tratamento 1 (dose  $0 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), onde continuam apresentando baixa cobertura vegetal e elevado índice de mortalidade. A ausência de adubação neste tratamento comprometeu o estabelecimento e o desenvolvimento das plantas, resultando em menor vigor vegetativo ao longo do ciclo. Esses achados estão alinhados com os resultados apresentados por Stahl et al. (2017), os quais indicam que plantas de *Pinus spp.* submetidas à adubação fosfatada apresentaram, em média, um incremento de 10% no diâmetro e 6,3% na altura em comparação àquelas cultivadas sem adubação, evidenciando o papel essencial do fósforo no crescimento inicial da espécie.

Figura 12. Análise final do NDVI, realizada aos 24 meses.



Fontes: Autor (2025).

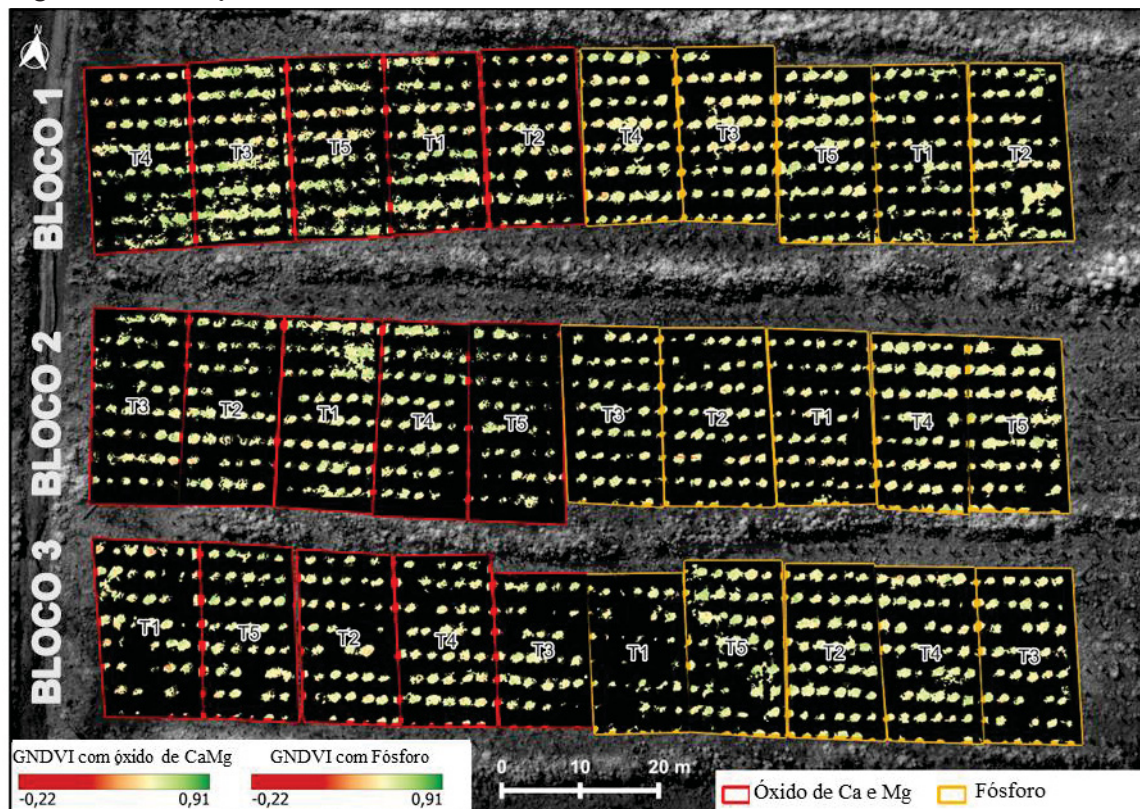
#### 6.4.2. GNDVI

Na imagem referente aos 6 meses (Figura 13), o GNDVI apresentou comportamento semelhante ao observado com o NDVI, com valores ainda baixos e pouca

diferenciação visual entre os tratamentos. Esse padrão é compatível com o estágio inicial da cultura, em que a cobertura vegetal é reduzida e a presença de gramíneas podem interferir na resposta espectral. Embora o GNDVI seja teoricamente mais sensível ao conteúdo de clorofila foliar por utilizar a banda do verde em sua formulação, essa sensibilidade tende a ser limitada em condições de baixa biomassa, como nos primeiros meses após o plantio.

Segundo Nguy-Robertson et al. (2015), a eficácia dos índices espectrais no monitoramento do crescimento vegetal depende diretamente da densidade foliar, sendo comum que diferenças entre tratamentos só se tornem mais perceptíveis em estágios posteriores, com maior desenvolvimento do dossel. Assim, neste momento inicial, o GNDVI funciona mais como linha de base para comparações futuras.

Figura 13. Avaliação inicial com GNDVI, realizada aos 6 meses.

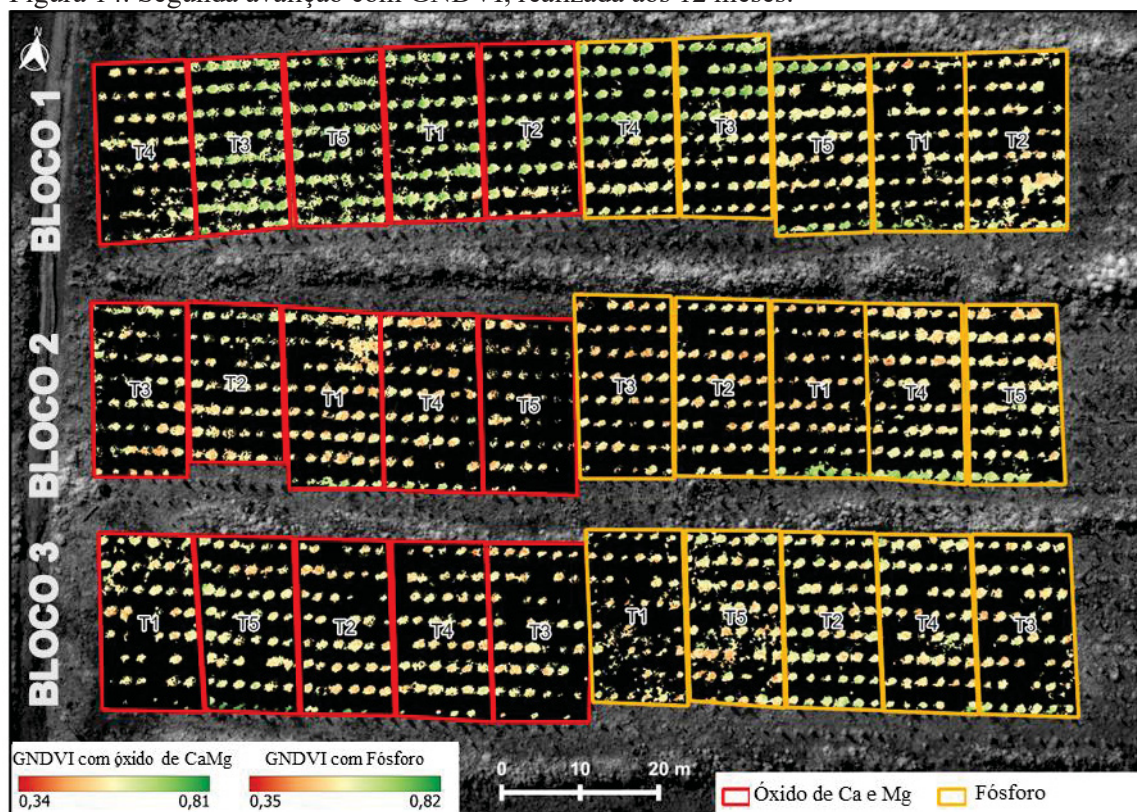


A avaliação feita aos 18 meses (Figura 14), os valores de GNDVI apresentaram uma leve elevação em relação ao mês anterior, destacando levemente o vegetal em relação ao solo, porém ainda sem distinções visuais marcantes entre os tratamentos, onde em alguns blocos se destacam tratamentos com doses menos e em outros se destacam as

maiores doses. Embora seja esperado que o índice comece a refletir o acúmulo de biomassa e os efeitos da adubação a partir deste período, a densidade de acículas ainda não parecia suficiente para gerar contraste espectral claro entre os diferentes níveis de adubação.

Essa limitação pode estar relacionada à baixa cobertura do dossel e à interferência do solo nas assinaturas espectrais. Conforme observado por Nguy-Robertson et al. (2015), a sensibilidade do GNDVI a variações de clorofila foliar depende da densidade da vegetação, sendo mais expressiva em estágios de crescimento mais avançado. Portanto, nesta fase, o índice ainda não se mostrou capaz de distinguir com clareza as respostas aos tratamentos, reforçando a importância de análises multitemporais para avaliação espectral do vigor vegetal.

Figura 14. Segunda avaliação com GNDVI, realizada aos 12 meses.



Fontes: Autor (2025).

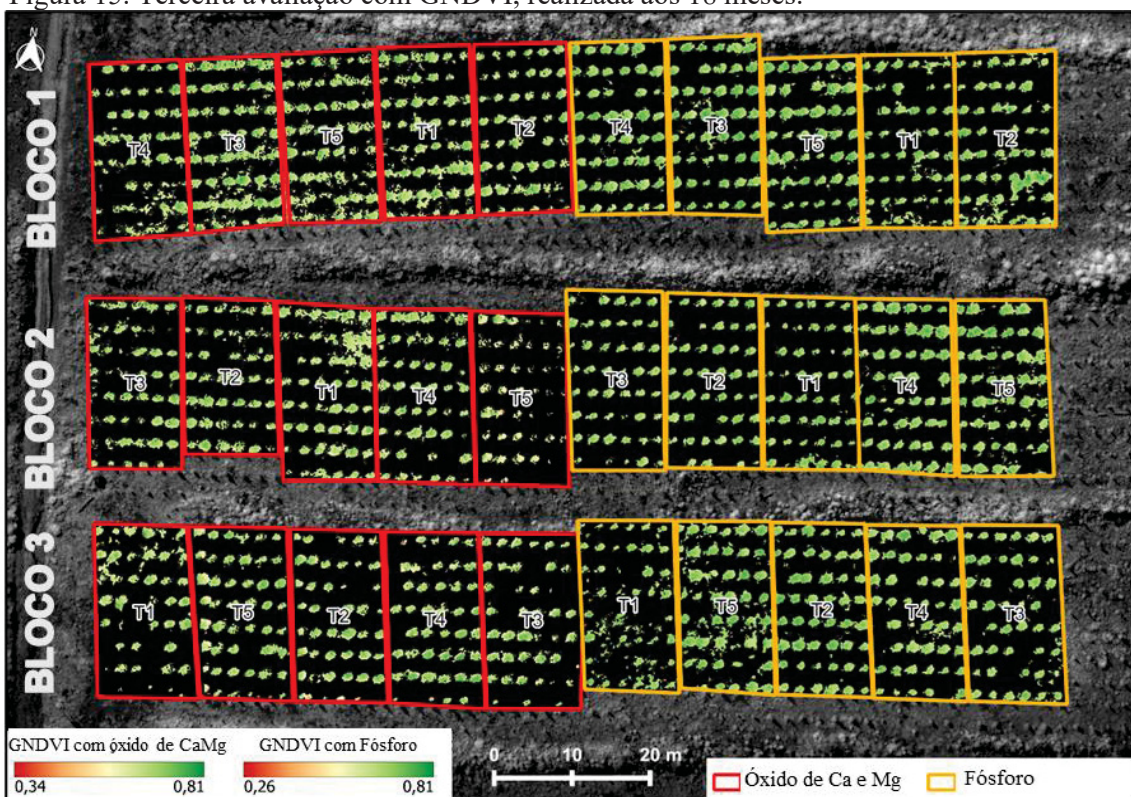
Na análise realizada aos 18 meses (Figura 15), o GNDVI apresentou valores mais elevados nas parcelas adubadas com fósforo, refletindo maior vigor vegetativo. Esse padrão está em consonância com os resultados observados nas curvas de crescimento e nas estatísticas descritivas, nas quais adose  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  apresentou os maiores valores

médios de altura e diâmetro a altura do colo. Essa correspondência se manifesta visualmente no índice espectral, uma vez que essa dosagem exibe maior cobertura vegetal em comparação aos demais tratamentos.

Nessa mesma época, a média de altura das plantas sob adubação fosfatada apresentou incremento expressivo, evidenciando o efeito positivo do fósforo sobre o desenvolvimento estrutural das plantas. Esse comportamento está de acordo com os resultados de Stahl et al. (2017), que destacaram a importância do fósforo no crescimento inicial de *Pinus* spp., especialmente em condições de baixa fertilidade do solo.

Para as dosagens com óxido de Ca e Mg apresentaram valores de GNDVI homogêneos e com menor variação entre si, o que também se reflete nas curvas de crescimento. Aos 18 meses, as trajetórias desses tratamentos permanecem próximas, indicando uma resposta mais uniforme, essa tendência é coerente com os achados de Brasil e Nascimento (2009), que demonstraram que a adição dos nutrientes contribui para o equilíbrio nutricional do solo, mas seus efeitos sobre o crescimento são menos imediatos quando comparados à adubação fosfatada.

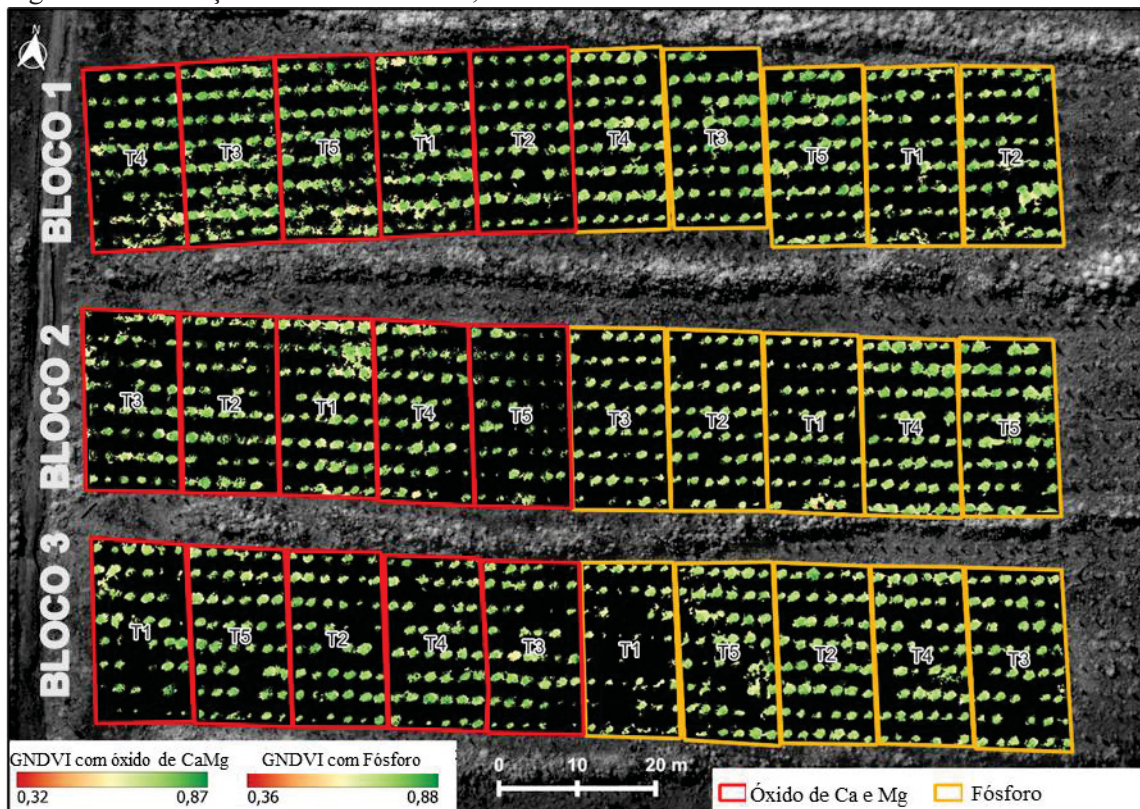
Figura 15. Terceira avaliação com GNDVI, realizada aos 18 meses.



Fontes: Autor (2025).

Na imagem de avaliação aos 24 meses (Figura 16), observa-se coloração mais intensa nas parcelas adubadas com fósforo, refletindo maior vigor vegetativo detectado pelo GNDVI. Esse resultado pode estar associado à atuação do fósforo nos processos fotossintéticos, uma vez que esse nutriente participa diretamente da produção de ATP e NADPH, compostos essenciais para a conversão de energia luminosa e assimilação de  $\text{CO}_2$ . A deficiência de fósforo, por outro lado, pode comprometer esses mecanismos, afetando negativamente o crescimento e o vigor das plantas (KHAN et al., 2023).

Figura 16. Avaliação final com GNDVI, realizada aos 24 meses.

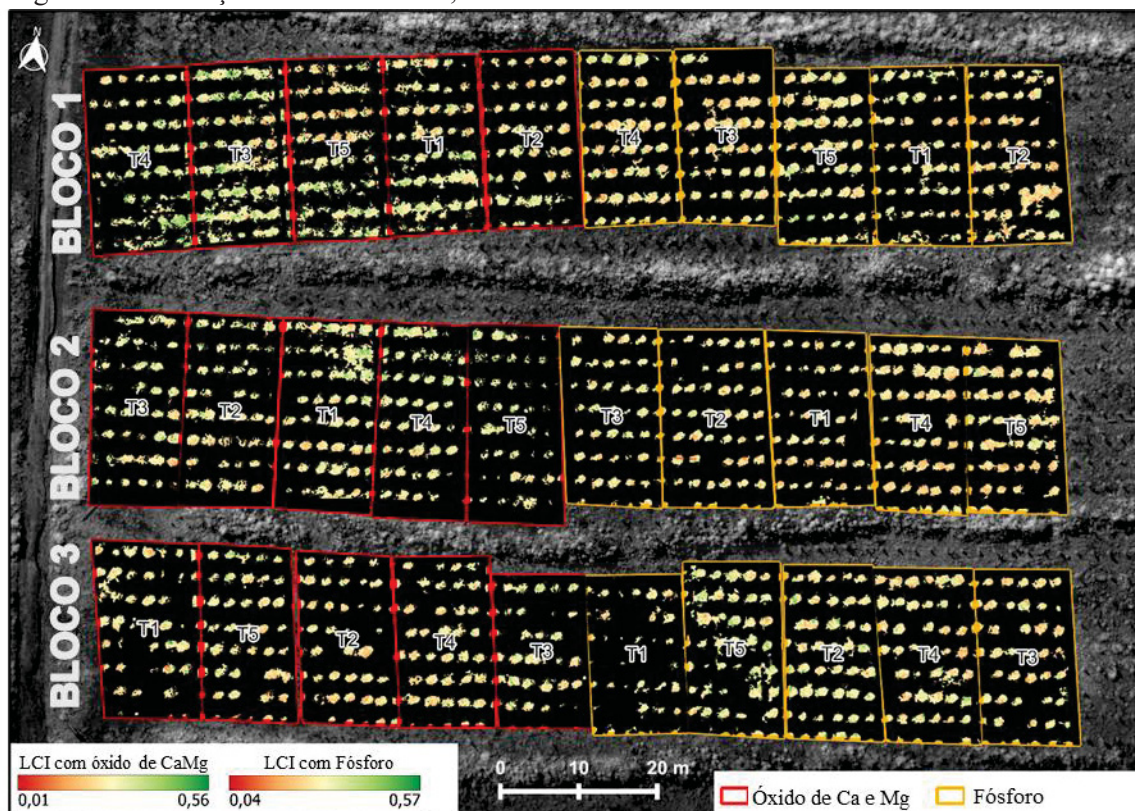


Fontes: Autor (2025).

#### 6.4.3. LCI

Na avaliação aos 6 meses (Figura 17), o índice LCI apresentou valores baixos e bastante irregulares entre as parcelas. Esse comportamento é compatível com o estágio inicial da cultura, em que a quantidade de biomassa verde ainda é reduzida e a cobertura do dossel é insuficiente para refletir diferenças nutricionais de forma confiável. A presença de solo exposto e a baixa densidade foliar interferem na resposta espectral do índice, resultando em uma distribuição espacial pouco informativa.

Figura 17. Avaliação inicial com LCI, realizada aos 6 meses.

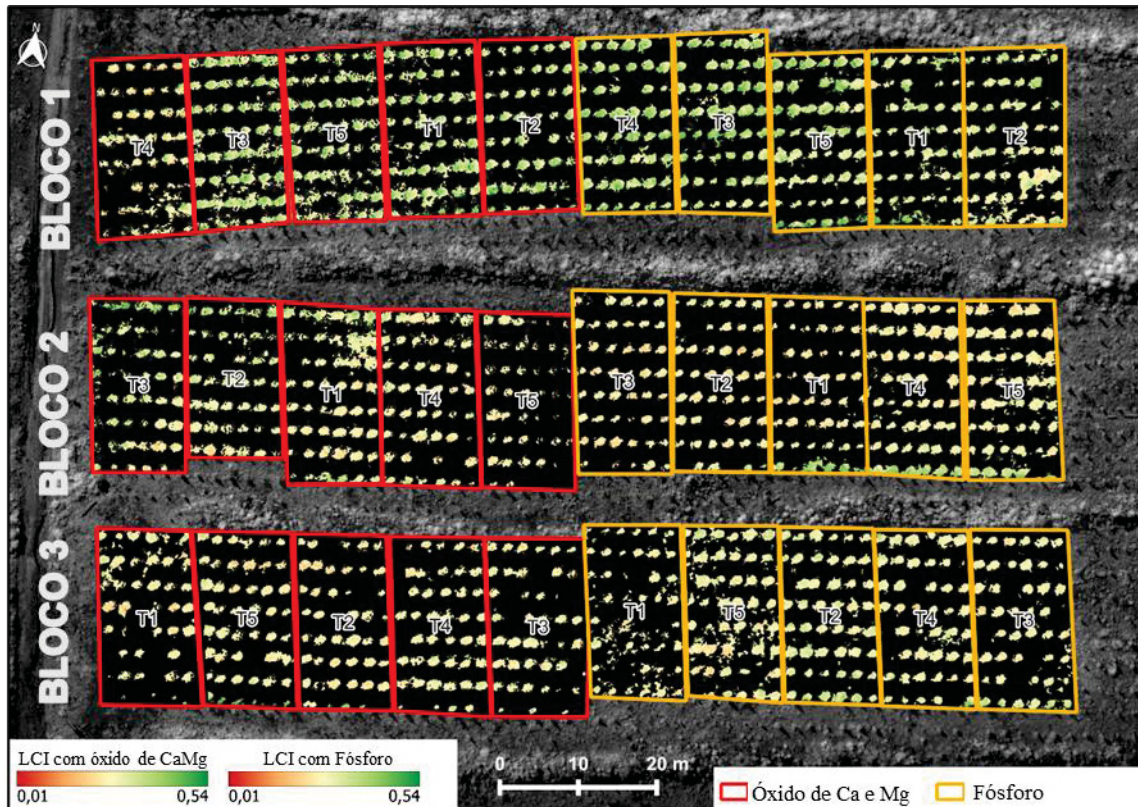


Fontes: Autor (2025).

Nas imagens obtidas aos 12 meses (Figura 18), observou-se o início das respostas fisiológicas das plantas às adubações, evidenciado por um incremento mais expressivo da massa foliar e pela maior definição na formação das copas. Nesse período, destacaram-se as dosagens intermediárias de óxido de Ca e Mg nos tratamentos com dosagem de 0,5 t.ha<sup>-1</sup> e 1 t.ha<sup>-1</sup> do bloco 2, que apresentaram os maiores valores médios de LCI, correspondendo a 0,322 e 0,338, respectivamente.

No caso da adubação com fósforo, o aumento da densidade foliar foi mais pronunciado no tratamento controle com dose de 0 kg.ha<sup>-1</sup> e no de 20 kg.ha<sup>-1</sup> do bloco 1, que apresentaram médias de LCI de 0,353 e 0,332, respectivamente. Esses resultados sugerem que, neste estágio de desenvolvimento, tanto a ausência de adubação quanto as doses intermediárias foram favoráveis à maior concentração de clorofila nas plantas, possivelmente em função de uma melhor relação entre absorção nutricional e demanda fisiológica.

Figura 18. Segunda avaliação com LCI, realizada aos 12 meses.

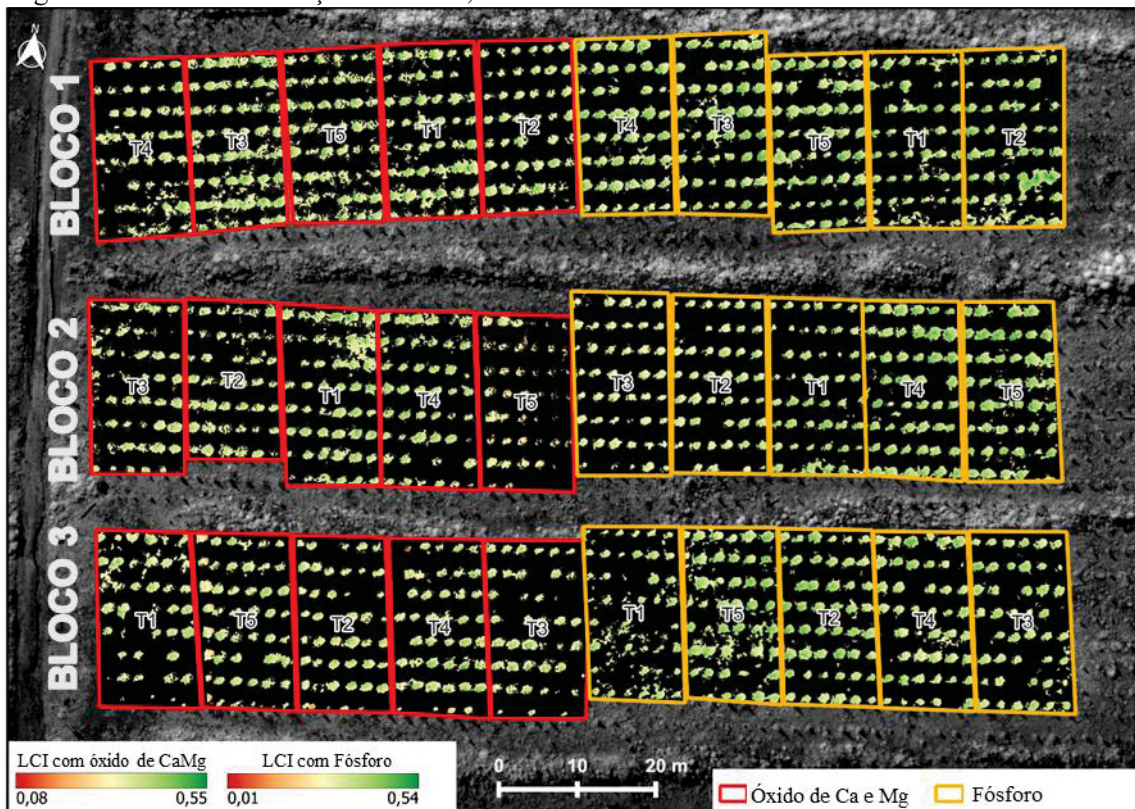


Fontes: Autor (2025).

Na imagem de avaliação dos 18 meses (Figura 19), o índice LCI apresentou respostas consistentes, com boa sensibilidade para identificar variações no desenvolvimento vegetativo entre os tratamentos. A formação das copas aparece bem definida e com excelente contraste entre áreas de maior e menor vigor, o que facilitou a distinção visual entre os tratamentos.

Em comparação aos demais índices, o LCI demonstrou maior sensibilidade na representação da clorofila foliar. Essa característica permitiu identificar com mais clareza os efeitos das diferentes doses de adubação, especialmente com fósforo, sendo a dose  $160 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$  o que mais se destacou visualmente, ao apresentar maior desenvolvimento de copa e evidenciar uma resposta nutricional mais expressiva neste estágio. Esse desempenho reforça a utilidade do LCI como ferramenta eficaz para o monitoramento do estado nutricional da cultura em fases intermediárias.

Figura 19. Terceira avaliação com LCI, realizada aos 18 meses.



Fontes: Autor (2025).

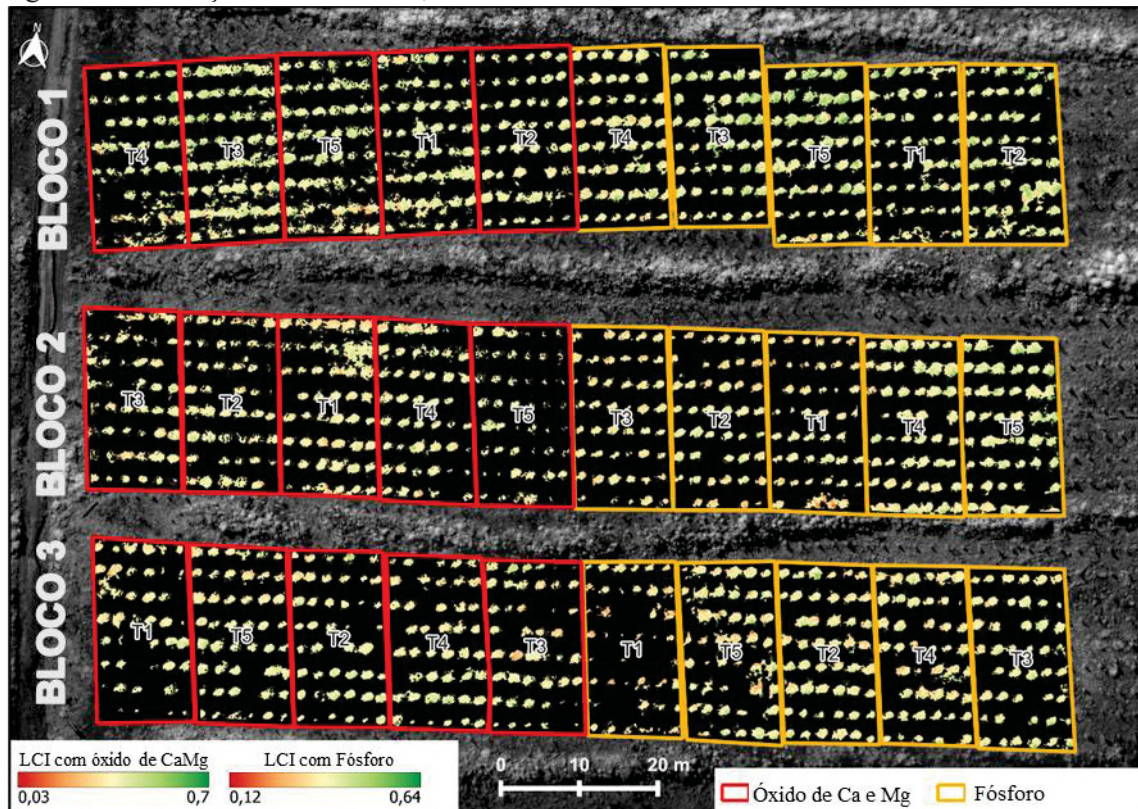
Na avaliação realizada aos 24 meses (Figura 20), os valores de LCI indicaram maior uniformidade entre os tratamentos. Destacou-se o aumento expressivo nas áreas adubadas com fósforo, especialmente no tratamento com a dose mais elevada (dose 160 kg/ha), que apresentou as maiores médias de LCI nos blocos 1 e 2, com valores de 0,441 e 0,414, respectivamente. Embora os tratamentos intermediários também tenham demonstrado bons resultados, a dose mais elevada evidenciou o maior incremento no desenvolvimento foliar, refletindo uma resposta mais acentuada à adubação fosfatada.

Um aspecto notável foi o desempenho do tratamento controle ( $0 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) com fósforo no bloco 3, que apresentou baixo desenvolvimento foliar e elevada taxa de mortalidade, com apenas 18 das 24 árvores permanecendo vivas. Esse cenário reforça a importância do fósforo para o incremento do conteúdo de clorofila e o vigor das plantas.

Em relação à adubação com óxido de Ca e Mg, os tratamentos apresentaram comportamento mais estável, com leves incrementos em comparação aos períodos anteriores e pouca diferença entre o tratamento controle e os demais. Essa discrepância entre as respostas ao fósforo e ao óxido de Ca e Mg destaca a necessidade de considerar

o tempo de resposta e a eficácia de cada nutriente no planejamento do manejo nutricional da cultura.

Figura 20. Avaliação final com LCI, realizada aos 24 meses.



Fontes: Autor (2025).

## 6.5. Espacialização temporal dos índices de vegetação

### 6.5.1. NDVI

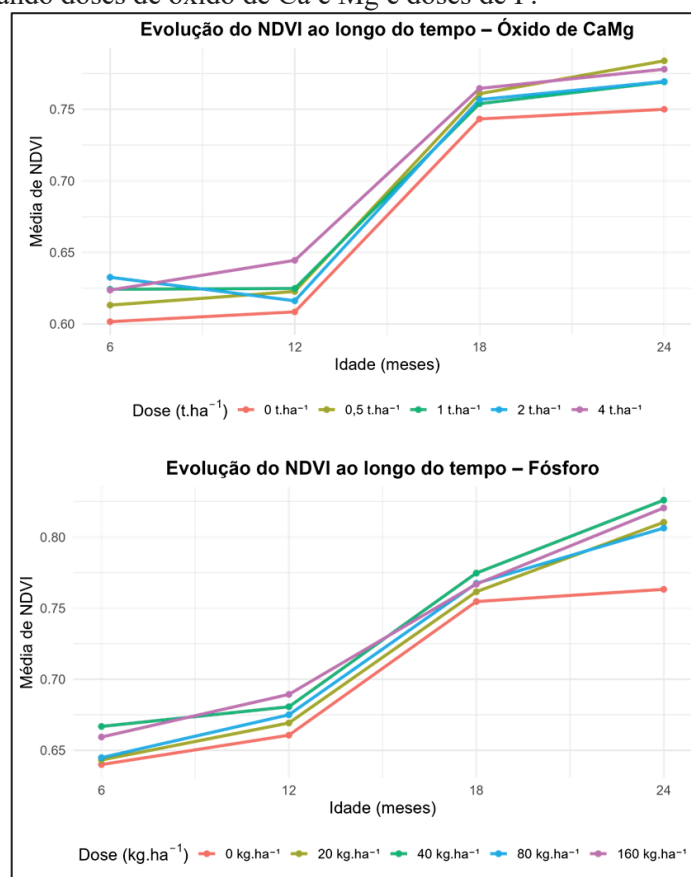
O NDVI é amplamente utilizado para detectar e quantificar a presença de vegetação verde, sendo um indicador da atividade fotossintética e do vigor das plantas. No presente estudo, observou-se que o NDVI aumentou ao longo do tempo em todos os tratamentos, refletindo o crescimento e o desenvolvimento das árvores de *Pinus*. A Figura 20 evidencia a evolução do NDVI para os diferentes tratamentos testados, com destaque para as respostas observadas sob aplicação de óxido de Ca e Mg (figura à esquerda) e fósforo (figura à direita).

As áreas adubadas apresentaram variações nos valores de NDVI ao longo do tempo, indicando diferenças na atividade fotossintética em função das doses aplicadas. Essa variação demonstra o potencial do NDVI em monitorar o efeito dos tratamentos nutricionais sobre o vigor da vegetação. Esses resultados estão alinhados com os

encontrados por Ramos et al. (2023), que destacam a eficácia do uso de índices de vegetação para o monitoramento nutricional em plantas, permitindo um controle mais preciso da sanidade florestal e, conseqüentemente, maior produtividade.

Farias et al. (2023) também enfatizam que o NDVI é sensível às variações nutricionais da vegetação, sendo capaz de detectar diferenças significativas na resposta da biomassa aérea em função de diferentes manejos de adubação, refletindo diretamente no desempenho das culturas.

Figura 21. Respostas da evolução do índice de NDVI em plantas de *Pinus taeda* cultivadas em experimentos testando doses de óxido de Ca e Mg e doses de P.

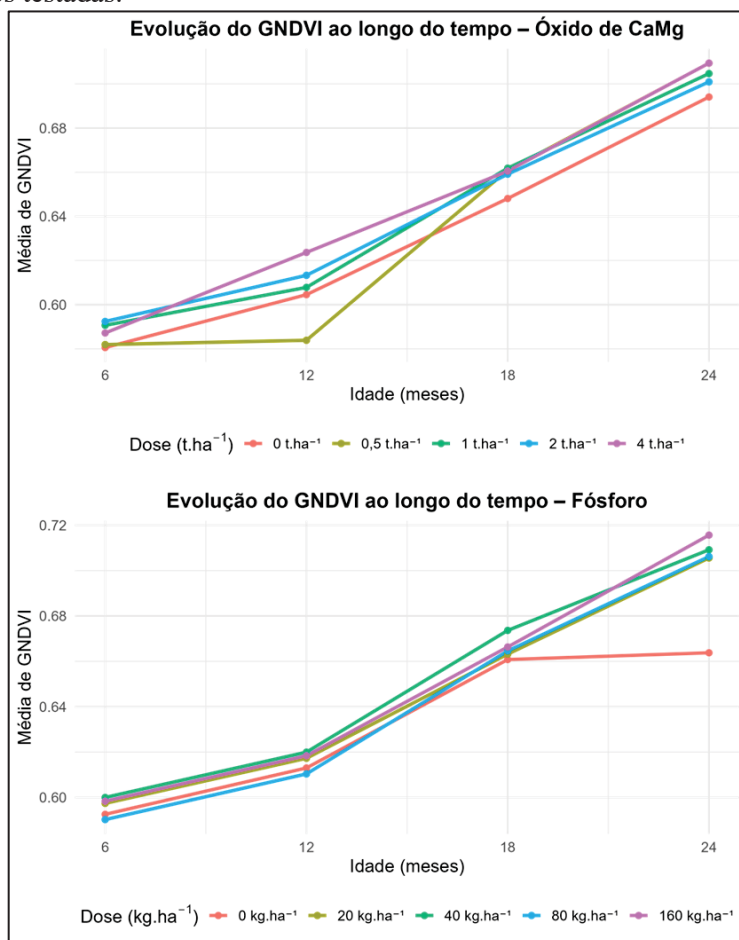


Fonte: Autor, 2025.

### 6.5.2. GNDVI

O GNDVI, por sua sensibilidade ao teor de clorofila, refletiu a eficiência nutricional ao longo do tempo (GITELSON; MERLYAK, 1997). Em ambos os adubos, as maiores doses mantiveram os valores mais elevados, sugerindo que a adubação mais intensa favoreceu a manutenção da atividade fotossintética, possivelmente pelo suporte à formação de estruturas foliares e maior interceptação de radiação (Figura 21).

Figura 22. Respostas da evolução do índice de GNDVI para adubação com óxido de Ca e Mg e fósforo nas doses testadas.



Fonte: Autor, 2025.

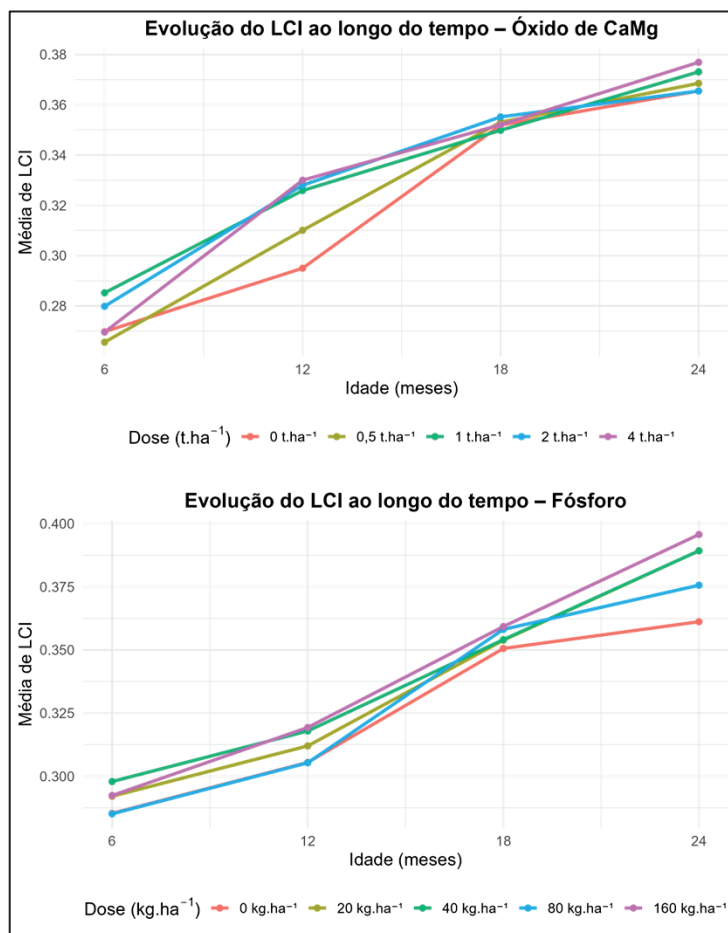
Os valores de GNDVI apresentaram uma tendência semelhante aos observados para o NDVI, com aumentos progressivos ao longo do tempo. No entanto, destacou-se uma diferença significativa entre as doses de fósforo, especialmente aos 24 meses, quando o tratamento controle apresentou os menores valores do índice. Esses resultados evidenciam que a omissão do fósforo comprometeu o desenvolvimento das plantas, refletindo em menor acúmulo de biomassa foliar e, conseqüentemente, em menor atividade fotossintética.

Essa resposta indica que a adubação fosfatada contribuiu para maiores teores de clorofila, resultando em melhor desempenho fotossintético e maior vigor vegetativo. Resultados semelhantes foram encontrados por Nugmanov et al., (2023), que observaram correlações positivas entre o índice de vegetação, estado nutricional e as condições de solo, auxiliando no monitoramento do desenvolvimento de plantas.

### 6.5.3. LCI

No presente estudo, o LCI apresentou incremento ao longo do tempo, com diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 22). As maiores doses de fósforo resultaram em valores superiores de LCI, sugerindo que a disponibilidade adequada desse nutriente está diretamente relacionada ao aumento da clorofila foliar.

Figura 23. Respostas da evolução do índice de LCI para adubação com óxido de Ca e Mg e fósforo nas doses testadas.



Fonte: Autor, 2025.

De acordo com Eitel et al. (2011), índices espectrais derivados da borda do vermelho, como o LCI, são altamente sensíveis ao conteúdo de clorofila e, portanto, eficientes para avaliar o vigor vegetativo e os efeitos da adubação sobre o dossel. Essa sensibilidade permite monitorar com precisão o impacto das diferentes doses aplicadas ao longo do tempo, evidenciado pela resposta espectral associada ao teor de clorofila nas folhas. De forma semelhante, Gallardo-Salazar et al., (2023), observou em estudos com

*Pinus* sob estresse, que o LCI apresentou bom desempenho na identificação de diferenças fisiológicas entre tratamentos, reforçando seu valor como ferramenta diagnóstica.

Embora ambos os tipos de adubação tenham mostrado tendência de aumento do LCI ao longo do tempo, os tratamentos com fósforo demonstraram maior sensibilidade à dose, evidenciando respostas mais expressivas nos teores de clorofila. No caso do óxido de Ca e Mg, o aumento foi mais uniforme entre as doses, indicando um efeito menos pronunciado sobre a clorofila foliar, possivelmente por seu efeito indireto via correção da acidez do solo.

### 6.6. MANOVA e análise discriminante

Os resultados obtidos por meio da análise multivariada (MANOVA) demonstraram que os fatores época (datas das avaliações), adubo e dose, bem como as interações entre esses fatores, exerceram efeitos significativos sobre as variáveis dependentes avaliadas (altura, diâmetro do colo, NDVI, GNDVI e LCI) (Tabela 9).

Tabela 8. Resumo dos testes multivariados (MANOVA) para os fatores e interações.

Fator / Interação	Lambda de Wilks	F	gl	p-valor	Interpretação
Época	0,005	2994,4	15	<0,001	Muito significativo
Adubo	0,781	152,3	5	<0,001	Significativo
Dose	0,752	40,4	20	<0,001	Significativo
Época * Adubo	0,649	84,58	15	<0,001	Significativo
Época * Dose	0,728	14,82	60	0,253	Não significativo
Adubo * Dose	0,856	21,51	20	<0,001	Significativo
Época * Adubo * Dose	0,801	10,25	60	<0,001	Significativo

Fontes: Autor (2025).

O fator época apresentou o maior efeito isolado, com valores elevados das estatísticas multivariadas, demonstrando que as variáveis mudaram significativamente ao longo do período experimental. A interação entre época e adubo também se destacou significativamente, indicando forte influência da combinação entre tipo de adubo e data de avaliação. As interações Adubo \* Dose e Época \* Adubo \* Dose também foram relevantes, evidenciando que os efeitos dos tratamentos dependem simultaneamente do tipo de adubo, da dose utilizada e das datas das avaliações.

A estatística F proposta por FISHER (1925), associada à análise discriminante mede a razão entre a variabilidade explicada pelo modelo e a variabilidade residual. Quanto maior o valor de F, maior a separação entre os grupos, indicando que a variável tem um bom poder discriminativo.

Na análise discriminante, foram identificadas diferenças significativas entre os grupos formados pelas combinações de adubo e dose (Tabela 10). As variáveis com maior poder discriminante foram o Diâmetro a altura do colo (DAC), NDVI, GNDVI e altura (H).

Tabela 9. Teste de igualdade das médias das variáveis discriminantes entre grupos formados por combinações entre adubo e dose.

Variável	Lambda de Wilks	p-valor
DAC	0,99	0,001
Ht	0,993	0,029
NDVI	0,966	<0,001
GNDVI	0,985	<0,001
LCI	0,981	<0,001

Fontes: Autor (2025).

Com base nas médias das variáveis analisadas em cada grupo Adubo × Dose, foi possível identificar claramente a combinação mais eficaz. A combinação da adubação com fósforo na dose 5 destacou-se consistentemente, apresentando valores médios superiores em altura (242,01 cm), NDVI (0,669), GNDVI (0,624) e LCI (0,319) (Tabela 11).

Tabela 10. Melhores resultados encontrados pela manova a análise descritiva a para combinação de adubo e dosagem.

Grupos	Ht (cm)	DAC (mm)	NDVI	GNDVI	LCI
--------	---------	----------	------	-------	-----

Fósforo 160 kg.ha <sup>-1</sup>	242,01	55,34	0,728	0,659	0,342
Fósforo 80 kg.ha <sup>-1</sup>	241,38	54,57	0,724	0,643	0,331
Fósforo 20 kg.ha <sup>-1</sup>	240,35	56,09	0,720	0,645	0,336
Fósforo 40 kg.ha <sup>-1</sup>	236,79	53,63	0,738	0,651	0,340
Ca e Mg 4 t.ha <sup>-1</sup>	231,94	59,52	0,703	0,645	0,331

Fontes: Autor (2025).

A coerência desses resultados foi reforçada pela análise gráfica das curvas de crescimento, tanto para altura quanto para o diâmetro a altura do colo, os gráficos mostram que o tratamento com fósforo na dose de 160 kg.ha<sup>-1</sup> apresentou as maiores médias ao longo do tempo, destacando-se de forma consistente em relação às demais combinações. Esse padrão foi evidente especialmente nas curvas de diferença em relação ao tratamento controle, nas quais o grupo manteve desempenho superior ao longo de toda a faixa etária avaliada.

## 7. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstraram que os tratamentos de adubação influenciaram significativamente o crescimento das mudas de *Pinus taeda*. Observou-se que o fósforo esteve mais associado ao incremento em altura, enquanto o óxido de Ca e Mg apresentou maior efeito sobre o diâmetro do colo. Esses efeitos distintos reforçam que diferentes nutrientes podem impactar variáveis de crescimento de maneira específica.

Os índices de vegetação NDVI, GNDVI e LCI mostraram-se eficazes no monitoramento do vigor das plantas ao longo do tempo, permitindo a diferenciação entre os tratamentos. O NDVI foi o índice que apresentou maior sensibilidade, evidenciando variações no desenvolvimento vegetativo. O GNDVI e o LCI também foram úteis nesse monitoramento, ainda que com menor amplitude de resposta.

A análise dos dados demonstrou que a aplicação de fósforo resultou em efeitos mais consistentes sobre os índices de vegetação, sobretudo em fases mais avançadas de crescimento. No entanto, a alternância nos desempenhos médios entre diferentes doses

em diversos momentos indica que, mais do que a quantidade aplicada, a presença do nutriente parece ser determinante para o desenvolvimento inicial das mudas. Assim, não foi possível estabelecer uma dose ideal, visto que os ganhos de crescimento não seguiram um padrão linear ou constante em relação ao aumento da adubação.

Quanto às hipóteses do estudo, verificou-se que os tratamentos de adubação geraram respostas diferenciadas no crescimento das plantas, refutando a ideia de desenvolvimento uniforme entre os tratamentos. A variabilidade observada tanto entre as fontes quanto entre as doses avaliadas reforça que a resposta das plantas é dependente do tipo de nutriente aplicado e das condições específicas de cada variável de crescimento.

A utilização de fósforo e de óxido de Ca e Mg mostrou-se promissora no estímulo ao crescimento de mudas de *Pinus taeda*. Além disso, os índices de vegetação derivados de imagens multiespectrais se confirmaram como ferramentas eficientes e não destrutivas para monitorar o impacto dos tratamentos ao longo do tempo. O uso dessas tecnologias pode contribuir significativamente para o aprimoramento do manejo nutricional em viveiros e sistemas de produção florestal.

## 8. PERSPECTIVAS DE ESTUDOS FUTUROS

Recomenda-se para trabalhos futuros, um acompanhamento mais prolongado dos efeitos da adubação, para que seja possível inferir o comportamento do crescimento de forma mais detalhada, principalmente em relação a adubação fosfatada que apresentou os melhores resultados em doses bem distintas, sendo uma dose mediana e outra a dose mais elevada, e verificar a tendência de crescimento desses indivíduos até o momento que elas podem se diferenciar, assim, possibilitando inferir qual a melhor dosagem. Adicionalmente, torna-se necessário correlacionar as informações obtidas com sensores passivos com teores nutricionais, atributos fisiológicos e biomassa.

Recomenda-se também a adoção de outras tecnologias, como o LiDAR, que permite analisar com maior precisão o desenvolvimento aéreo das plantas, a partir do índice de área foliar (LAI). Essa ferramenta pode complementar os resultados deste estudo, especialmente na comparação entre os tratamentos com dose de 20 kg.ha<sup>-1</sup> e 160 kg.ha<sup>-1</sup> da adubação com fósforo, como o mais eficiente. O LiDAR pode ajudar a confirmar essa superioridade ao detalhar diferenças na parte aérea, reforçando os dados obtidos pelos índices de vegetação.

## 9. REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 799-806, 2003.

BANNARI, A. et al. A review of vegetation indices. **Remote Sensing Reviews**, v. 13, n. 1-2, p. 95-120, 1995.

BHAKTA, I. et al. State-of-the-art technologies in precision agriculture: a systematic review. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 99, n. 11, p. 4878-4888, 2019.

BRASIL, E. C.; NASCIMENTO, E. V. S. do. Influência de calcário e fósforo no desenvolvimento e produção de variedades de maracujazeiro-amarelo. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 32, p. 892-902, 2010.

BURNHAM, K. P.; ANDERSON, D. R. Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. **Sociological Methods and Research**, p. 261-304, 2021.

BUTIERRES, M. F. M. Efeito do Calcário e fosfato de potássio no ponto de zero carga (PZC) e grau de flocculação de três solos do Rio Grande do Sul. 1980. 59 p. Dissertação **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Santa Maria.

CARVALHO, H. W. P. de et al. **Nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: CENA/USP; LIN; GEFEN, 2023. Recurso digital. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003151658>. Acesso em: 25 abril 2025.

CASTRO, F. da S. et al. Zoneamento agroclimático para espécies do gênero Pinus no estado do Espírito Santo. 2010.

CANDIAGO, S. et al. Evaluating multispectral images and vegetation indices for precision farming applications from UAV images. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4026-4047, 2015.

DA COSTA FILHO, R. T. et al. Adubação fosfatada associada à calagem para produção de mudas de *Astronium fraxinifolium* Schott. em latossolo vermelho-amarelo. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, p. e5411829681, 2022.

DA SILVA JUNIOR, U. J. et al. Sensibilidade espectral dos índices de vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na Mata Ciliar do Reservatório de Serrinha II-PE, Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, p. 17-35, 2021.

DA SILVA, A. D. Espaçamento e adubação em *Pinus elliotti* var. *elliotti* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* sob delineamento anel de Nelder. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**.

DA SILVA, J. A. A. et al. Modelagem do crescimento volumétrico de clones de eucalipto (*Eucalyptus urophylla*) no Polo Gesseiro do Araripe-PE. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 13, p. 173-190, 2016.

DE OLIVEIRA, J. S. et al. Soil properties governing phosphorus adsorption in soils of Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 22, p. e00318, 2020.

DE SOUZA KULMANN, M. S. et al. Aspects of soil fertility and nutrition of *Pinus taeda* L: A review. **Revista Ecologia e Nutrição Florestal - ENFLO**, v. 11, p. e02, 2023.

DELEGIDO, J. et al. Evaluation of sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content. **Sensors**, v. 11, n. 7, p. 7063-7081, 2011.

EITEL, J. U. et al. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 12, p. 3640-3646, 2011.

ELY, L. V. et al. Avaliação de diferentes dosagens de fertilizantes de liberação lenta no crescimento inicial de clones de *Pinus taeda*. 2021.

EPIPHANIO, J. C. N. et al. Índices de vegetação no sensoriamento remoto da cultura do feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 6, p. 445-454, 1996.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **Journal of plant nutrition**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.

FARIAS, G. D. et al. 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.

FERREIRA, C. A. et al. Nutrição de *Pinus* no sul do Brasil: diagnóstico e propriedades de pesquisa. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2001. (Documentos, 60).

FINGER, C. A. G. Fundamentos de biometria florestal. 1992.

FISHER, R. A. Statistical methods for research workers. Edinburgh: Oliver & Boyd, 1925.

FRUHAUF, A. C. et al. Descrição do crescimento em altura de clones híbridos de *Eucalyptus* em região semiárida utilizando modelos não lineares. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 40, n. 2, 2022.

GALLARDO-SALAZAR, J. L. et al. Analysis of the Vigor of *Pinus hartwegii* Lindl. along an Altitudinal Gradient Using UAV Multispectral Images: Evidence of Forest Decline Possibly Associated with Climatic Change. **Forests**, v. 14, n. 6, p. 1176, 2023.

GIL, P. T. et al. Índice SPAD para o diagnóstico do estado de nitrogênio e para o prognóstico da produtividade da batata. **Horticultura Brasileira**, v. 20, n. 4, p. 611-615, 2002.

GITELSON, Anatoly A.; MERZLYAK, Mark N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. **International journal of remote sensing**, v. 18, n. 12, p. 2691-2697, 1997.

GOMPERTZ, B. On the Nature of the Function Expressive of the Law of Human Mortality, and on a New Mode of Determining the Value of Life Contingencies. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 115, p. 513–585, 1825.  
HAYNES, R. J. Effects of liming on phosphate availability in acid soils: a critical review. **Plant and soil**, v. 68, n. 3, p. 289-308, 1982.

HUETE, A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002.

**IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores**. Relatório IBÁ 2023: Ano base 2022. Brasília, 2023.

JIAN, Z. et al. Phosphorus is the key soil indicator controlling productivity in planted Masson pine forests across subtropical China. **Science of the Total Environment**, v. 822, p. 153525, 2022.

KHAN, F. et al. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. **Plants**, v. 12, n. 15, p. 2861, 2023.

KNIGHT, Dennis H. et al. Contrasting patterns in pine forest ecosystems. **Ecological Bulletins**, p. 9-19, 1994.

LOURENÇO, Roberto Wagner; LANDIM, Paulo Milton Barbosa. Estudo da variabilidade do "índice de vegetação por diferença normalizada/NDVI" utilizando krigagem indicativa. **Holos Environment**, v. 4, n. 1, p. 38-55, 2004.

MALAVOLTA, Eurípedes. Manual de nutrição mineral de plantas. **Agronômica Ceres**, 2006.

MATELELE, L. A. et al. Impact of long-term fertilization, straw incorporation and liming on phosphorus fractions, availability and their interactions with soil properties in red soil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 24, n. 11, p. 3541-3555, 2024.

MORELLI, M.; FERREIRA, E. B. Efeito do carbonato de cálcio e do fosfato diamônico em propriedades eletroquímicas e físicas de um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 1-6, 1987.

MORO, L. et al. Avaliação do procedimento dris para a diagnose nutricional de povoamentos adubados de Pinus taeda. **Revista Valore**, v. 8, p. 156-168, 2023.

MORO, L. et al. Resposta de Pinus taeda com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1181-1189, 2014.

NGUY-ROBERTSON, A. et al. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. **Agronomy Journal**, v. 104, n. 5, p. 1336-1347, 2012.

NIU, Xiaoyun et al. Prediction of needle physiological traits using UAV imagery for breeding selection of slash pine. **Plant Phenomics**, v. 5, p. 0028, 2023.

NUGMANOV, A. et al. Quantitative assessment of soil condition, basic environmental factors and productivity of *Linum usitatissimum* in the steppe zone of Kazakhstan using the remote sensing method. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e277283, 2023.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná. Curitiba: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Estadual Paraná**, 2017. 482 p.

PES, L. Z.; ARENHARDT, M. H. **Fisiologia vegetal**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2015. Disponível em: [https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/11/09\\_fisiologia\\_vegetal.pdf](https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/11/09_fisiologia_vegetal.pdf). Acesso em: 25 abril 2025.

PIVA, T.; DLUGOSZ, F. Adubação de cobertura na cultura do Pinus taeda com diferentes dosagens de nitrogênio. **TECH & CAMPO**, v. 1, n. 1, p. 48-60, 2018.

PONZONI, F. J.; DISPERATI, A. A. Comportamento espectral da vegetação. In: Sensoriamento remoto: reflectância dos alvos naturais. Brasília, DF: **Universidade de Brasília**, 2001. p. 157–199.

PRADO, R. de M. Cálcio. Nutrição de plantas. São Paulo: UNESP, 2008. p.181-2008.

RAMOS, J. C. B. et al. Índices de vegetação na diagnose nutricional de povoamentos híbridos de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 2, p. e65702, 2023.

REGASA, A. et al. Effects of lime and vermicompost application on soil physicochemical properties and phosphorus availability in acidic soils. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 25544, 2025.

ROS, C. O. da et al. Efeito da calagem e da adubação fosfatada no crescimento inicial e na nutrição das plantas de *Khaya ivorensis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 47, n. 123, p. 430-439, set. 2019.

ROCHA, J. H. T. et al. Ca and Mg nutrition and its application in *Eucalyptus* and *Pinus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 442, p. 63–78, 2019

SCHOENBERG, I. J. Contributions to the Problem of Approximation of Equidistant Data by Analytic Functions. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 4, n. 1, p. 45–99, 1946.

SCHUMACHER, M. V. et al. Influência de diferentes doses de fósforo no crescimento de plantas de *Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 47, p. 99-114, 2003.

SHIMIZU, J. Y. *Pinus na silvicultura brasileira*. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2008.

SILVA, L. da S. et al. Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Núcleo Regional Sul, 2016.

SILVA, O. M. das C. et al. Adubação fosfatada no crescimento inicial de sete espécies florestais nativas destinadas à recuperação de uma área degradada. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 371-394, 2022.

SIMÕES, J. W. et al. A adubação acelera o desenvolvimento inicial de plantações de *Pinus caribaea* var. *bahamensis*. **IPEF**, Piracicaba, v. 1, p. 59-80, 1970.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE SILVICULTURA. Fatos e números do Brasil Florestal. São Paulo, dez. 2008.

SOUSA, D. M. G. de; LOBATO, E. Correção do solo e adubação para culturas anuais e perenes. In: OLIVEIRA, A. J. (org.) *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. rev. e atual. Planaltina, DF: **Embrapa Cerrados**, 2004. cap. 8, p. 183–282.

SOUSSI, A. et al. Smart Sensors and Smart Data for Precision Agriculture: A Review. **Sensors**, v. 24, n. 8, p. 2647, 2024.

STAHL, J. et al. Efeito da adubação fosfatada em *Pinus taeda* L. em Latossolo Vermelho na região de Telêmaco Borba, Paraná, Brasil. **Revista Ecologia e Nutrição Florestal - ENFLO**, v. 5, n. 3, p. 78-86, 2017.

TOMAZELLO FILHO, M. et al. Avaliação da dispersão de sementes de *Pinus taeda* L. pela análise dos anéis de crescimento de árvores de regeneração natural. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

VATRAZ, S.; BORGES, F. Q. Procedimentos de controle do volume de madeira estimado e colhido em um plantio de *Pinus* spp. no Paraná. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 2, p. 445-453, abr./jun. 2014.

VELOSO, C. A. C. et al. Calagem. In: BRASIL, Edilson Carvalho et al. (org.). *Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará*. 2. ed. Brasília, DF: **Embrapa**, 2020. p. 121–131.

VERHULST, P. F. Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. **Correspondance Mathématique et Physique**, v. 10, p. 113–121, 1838.

VIEIRA, F. S. Utilização de armadilhas adesivas para o levantamento das principais ordens de insetos na cultura do *Pinus taeda*. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**.

WILKS, S. S. Certain generalizations in the analysis of variance. **Biometrika**, London, v. 24, n. 3/4, p. 471-494, 1932.

WINAGRASKI, Etienne. Dinâmica de ectomicorrizas em um plantio adulto de *Pinus taeda* submetido a adubação e calagem no município de Jaguariaiva, PR. 2014. **Universidade Federal do Paraná**. (Dissertação de Mestrado).

WOLFF, N. I. et al. Growth and yield modeling of *Pinus taeda* L. through anatro. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 4, n. 1, p. 52-57, 2019.

XUE, Jinru; SU, Baofeng. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of Sensors**, v. 2017, n. 1, p. 1353691, 2017.

ZANON, J. A. et al. Relationship between microbiological, physical, and chemical soil attributes under *Pinus taeda* plantations. **iForest**, v. 17, p. 29–35, 2024.