

Avaliação de índices de vegetação RGB e o manejo de nitrogênio na cultura do feijão

Victor Breno Cicchella de Macedo^{1*}; Helton Aparecido Rosa¹

¹Curso de Agronomia, Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG), Cascavel, Paraná.

^{1*}brenocicchella@gmail.com

Resumo: A utilização de índices de vegetação no monitoramento agrícola tem se destacado como ferramenta essencial para práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis. Neste contexto objetivou-se para com o estudo, avaliar a relação entre os índices de vegetação MPRI e GLI em diferentes estádios fenológicos da cultura do feijão, considerando a resposta da planta ao manejo do nitrogênio. O experimento foi conduzido em Lindoeste, PR, de 4 de setembro a 28 de novembro de 2024, em delineamento de blocos casualizados (DBC), com esquema fatorial 2 x 5, totalizando 40 parcelas. Os tratamentos envolveram coinoculação (com e sem) e doses de nitrogênio em cobertura (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), com quatro repetições. Foram analisados o MPRI, GLI, altura das plantas, número de vagens e número de grãos por vagem. As variáveis analisadas foram submetidas ao programa SISVAR e ajustadas à modelos de regressão. Os resultados mostraram maior representatividade do MPRI ao longo dos estádios fenológicos, com destaque para os estádios reprodutivos (R5 a R8), onde ambos os índices responderam significativamente às doses de nitrogênio. A coinoculação aumentou a altura das plantas, mas não influenciou os componentes de produtividade. Os modelos dos índices RGB demonstraram relação com a adubação nitrogenada de cobertura na cultura.

Palavra-chave: *Phaseolus vulgaris*; geoprocessamento; agricultura de precisão; fertilização; inoculação.

Evaluation of RGB vegetation index and nitrogen management in bean cultivation

Abstract: The use of vegetation index in agricultural monitoring has emerged as an essential tool for more efficient and sustainable management practices. In this context, the study aimed to evaluate the relationship between the MPRI and GLI vegetation index at different phenological stages of the bean crop, considering the plant's response to nitrogen management. The experiment was conducted at Lindoeste, PR, from September 4th to November 28th, 2024, in a randomized block design (RBD) with a 2 x 5 factorial scheme, totaling 40 plots. The treatments involved coinoculation (with and without) and nitrogen topdressing rates (0, 50, 100, 150, and 200 kg ha⁻¹), with four replications. The MPRI, GLI, plant height, number of pods, and number of grains per pod were analyzed. The analyzed variables were subjected to the SISVAR program and adjusted to regression models. The results showed greater representativity of the MPRI throughout the phenological stages, especially at the reproductive stages (R5 to R8), where both index responded significantly to nitrogen doses. Coinoculation increased plant height but did not influence yield components. The models of the RGB index showed a relationship with nitrogen topdressing in the crop.

Keywords: *Phaseolus vulgaris*; precision agriculture; fertilization; inoculation.

Introdução

As tecnologias associadas à produção de commodities agrícolas, como o feijão, estão cada vez mais difundidas nos campos de produção. Entre elas, o sensoriamento remoto (SR), que possibilita o monitoramento de parâmetros agrônômicos através de imagens capturadas por veículos aéreos não tripulados (VANTs) ou satélites. Derivados dessas imagens, os índices de vegetação (IV) permitem a avaliação das lavouras, indicando o vigor e sanidade das plantas. Sua utilização promove ganhos econômicos e ambientais, pois permite o manejo localizado das áreas contempladas, admitindo o trabalho do campo de forma heterogênea.

O feijão (*Phaseolus vulgaris*) desempenha um papel fundamental para a agricultura brasileira, pois, além de sua importância alimentar, possibilita a produção de até três safras ao ano em decorrência de seu ciclo relativamente curto (BRAGA E SILVA, 2020). De acordo com a CONAB (2024), a safra de 2023/2024, com cerca de 2,85 milhões de hectares cultivados, alcançou a produção de aproximadamente 3,24 milhões de toneladas, representando um aumento de 7% em relação à safra anterior.

Participando da formação de aminoácidos, carboidratos e da clorofila, o nitrogênio (N) é o principal macronutriente para o desenvolvimento da cultura do feijão (ROSA *et al.*, 2020). Além de sua importância vital para os processos biológicos da planta, o N destaca-se como o nutriente mais absorvido pelo feijoeiro, conforme observado por Carvalho e Silveira (2023), podendo ser obtido não apenas pela adubação química, mas também pela decomposição da matéria orgânica do solo e pela fixação biológica realizada por microrganismos. Neste contexto, um estudo conduzido por Brito *et al.* (2011) demonstrou que a fixação biológica é responsável pela maior parte do fornecimento de nitrogênio no feijão comum, e que, quando combinada com a adubação de base, torna desnecessária a adubação de cobertura para alcançar uma produção de grãos viável.

O sensoriamento remoto tem se mostrado uma ferramenta essencial para a agricultura de precisão, utilizando satélites e VANTs que operam com base na interação da radiação eletromagnética com o solo ou planta (SAMPAIO *et al.*, 2020). Utilizado para gerar índices de vegetação, ele fornece dados numéricos que estão diretamente correlacionados com parâmetros biofísicos da vegetação (COUTINHO, 2014). De acordo com Zanzarini *et al.* (2013), os IV são transformações espectrais de duas ou mais bandas, projetados para realçar as propriedades da vegetação, e permitir comparações espaciais e temporais confiáveis da atividade fotossintética terrestre e das variações estruturais no dossel. Dessa forma, Motomiya *et al.* (2009) ressaltam que a deficiência de nitrogênio pode ser identificada pela reflectância foliar no espectro visível ao infravermelho próximo, desde que nenhum outro nutriente esteja em falta na cultura.

O índice MPRI (Modified Photochemical Reflectance Index), proposto por Yang *et al.* (2008), foi desenvolvido com o objetivo de substituir a banda infravermelha pela banda verde na equação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Um estudo realizado por Linhares *et al.* (2013) validou o MPRI como um indicador eficiente da vegetação, demonstrando sua equivalência ao NDVI, especialmente em relação à resposta da vegetação e do solo. Por sua vez, o índice GLI (Green Leaf Index), tem sido utilizado para diferenciar a vegetação que está em processo ativo de fotossíntese, vegetação seca e solo exposto (SILVA *et al.*, 2022). De acordo com Andrade *et al.* (2019), o GLI baseia-se na cor verde da cobertura vegetal, e se ajusta bem a diferentes estádios fenológicos e ao desenvolvimento da vegetação, destacando-se principalmente, na diferenciação da cobertura do solo e na mensuração do teor de solo exposto.

Diante dos índices de vegetação disponíveis para o monitoramento agrícola e dos métodos de fornecimento do nitrogênio aplicados à cultura do feijão, objetiva-se para com o estudo, avaliar a relação entre os índices de vegetação MPRI e GLI em diferentes estádios fenológicos da cultura, considerando a resposta da planta ao manejo do nitrogênio.

Material e Métodos

A pesquisa foi realizada em uma unidade de produção agrícola (UPA), localizada no município de Lindoeste, PR (latitude 25° 12' 16" S, longitude 53° 36' 12" W e altitude 603 m) (Figura 1). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é caracterizado como Cfa, com verão quente sem estação seca e clima temperado úmido (APARECIDO *et al.*, 2016). O experimento foi implantado após a cultura do trigo, em solo classificado como Nitossolo Vermelho Eutrófico (EMBRAPA, 2013).

Previamente, realizou-se a coleta de solo na profundidade de 0 a 20 cm, seguindo as diretrizes do manual de adubação e calagem do estado do Paraná (PAULETTI e MOTTA, 2019). As amostras coletadas foram posteriormente enviadas para análise química em laboratório devidamente credenciado pelo CELA – PR. A análise granulométrica apresentou os teores de 70% de argila, 17,50% de silte e 12,50% de areia. Prontamente, os atributos químicos do solo foram: pH (CaCl₂) = 4,80, MO (matéria orgânica) = 37,41 g dm⁻³, P (fósforo) = 37,10 mg dm⁻³, K (potássio) = 0,70 Cmol_c dm⁻³, Ca (cálcio) = 48 Cmol_c dm⁻³, Mg (magnésio) = 2,44 Cmol_c dm⁻³, H+Al (hidrogênio e alumínio) = 6,69 Cmol_c dm⁻³, CTC (capacidade de troca de cátions em pH 7) = 17,68 Cmol_c dm⁻³, Cu (cobre) = 19,70 mg dm⁻³, Fe (ferro) = 49,40 mg dm⁻³, Mn (manganês) = 115,10 mg dm⁻³ e Zn (zinco) = 25,10 mg dm⁻³.

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados (DBC), estruturado em um esquema fatorial 2 x 5, com quatro repetições. Cada bloco foi composto por 10 tratamentos, totalizando 40 parcelas experimentais (Figura 1). O primeiro fator corresponde à presença ou ausência de coinoculação, enquanto o segundo fator representa as diferentes doses de nitrogênio aplicadas em cobertura (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N). As parcelas experimentais, com área de 9 m² cada, foram compostas por quatro linhas de feijão, com cinco metros de comprimento, mantendo um espaçamento de 1 m entre as parcelas.

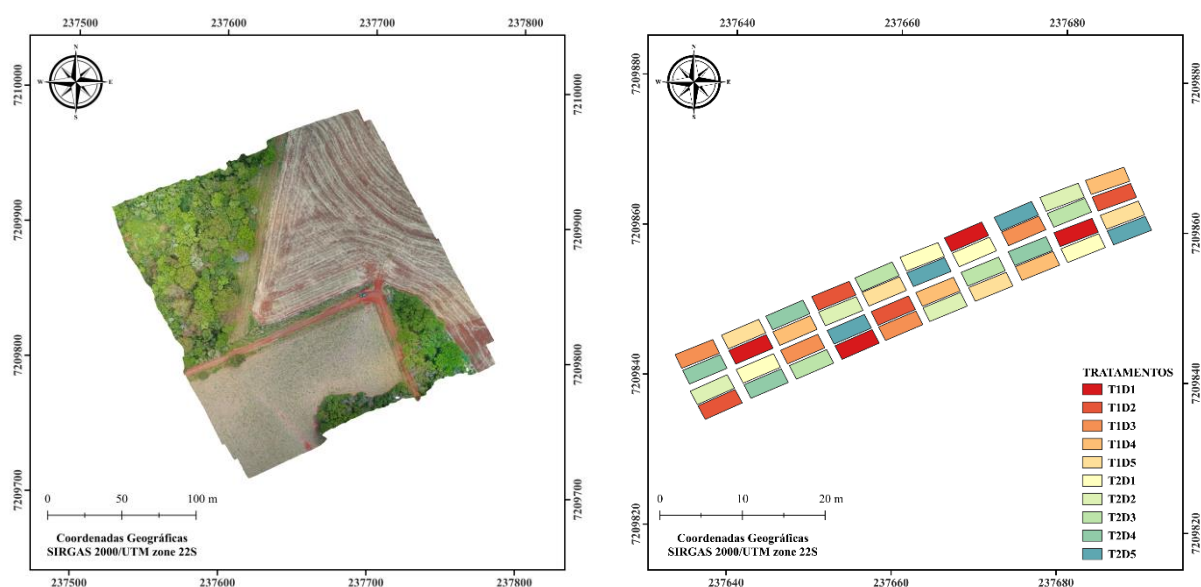


Figura 1 – Ortomosaico da área experimental à esquerda e, à direita, distribuição dos tratamentos (T1 – Sem coinoculação e T2 – Com coinoculação; D1 – 0 kg ha⁻¹ de N, D2 50 kg ha⁻¹ de N, D3 - 100 kg ha⁻¹ de N, D4 - 150 kg ha⁻¹ de N e D5 - 200 kg ha⁻¹ de N).

Fonte: o autor (2024). Lindoeste, PR.

Para a condução do ensaio, foi utilizada a cultivar IPR Curió[®], que possui hábito de crescimento determinado (tipo I), porte ereto, folhas verde-claras e ciclo precoce. A cultivar também se destaca pelo potencial produtivo de 3.892 kg ha⁻¹, e pela resistência a doenças, como ferrugem (*Uromyces phaseoli*), oídio (*Erysiphe polygoni*) e mosaico comum (BCMV e BCMNV). A semeadura foi realizada mecanicamente em 04 de setembro de 2024, com espaçamento de 0,45 m entre linhas e densidade de 14 sementes viáveis por metro linear, resultando em uma população de aproximadamente 311.111 plantas ha⁻¹. Procedeu-se a irrigação por aspersão na cultura, com uma lâmina de água de 20 mm aplicada semanalmente, tendo início no dia da semeadura e encerramento após a adubação de N em cobertura.

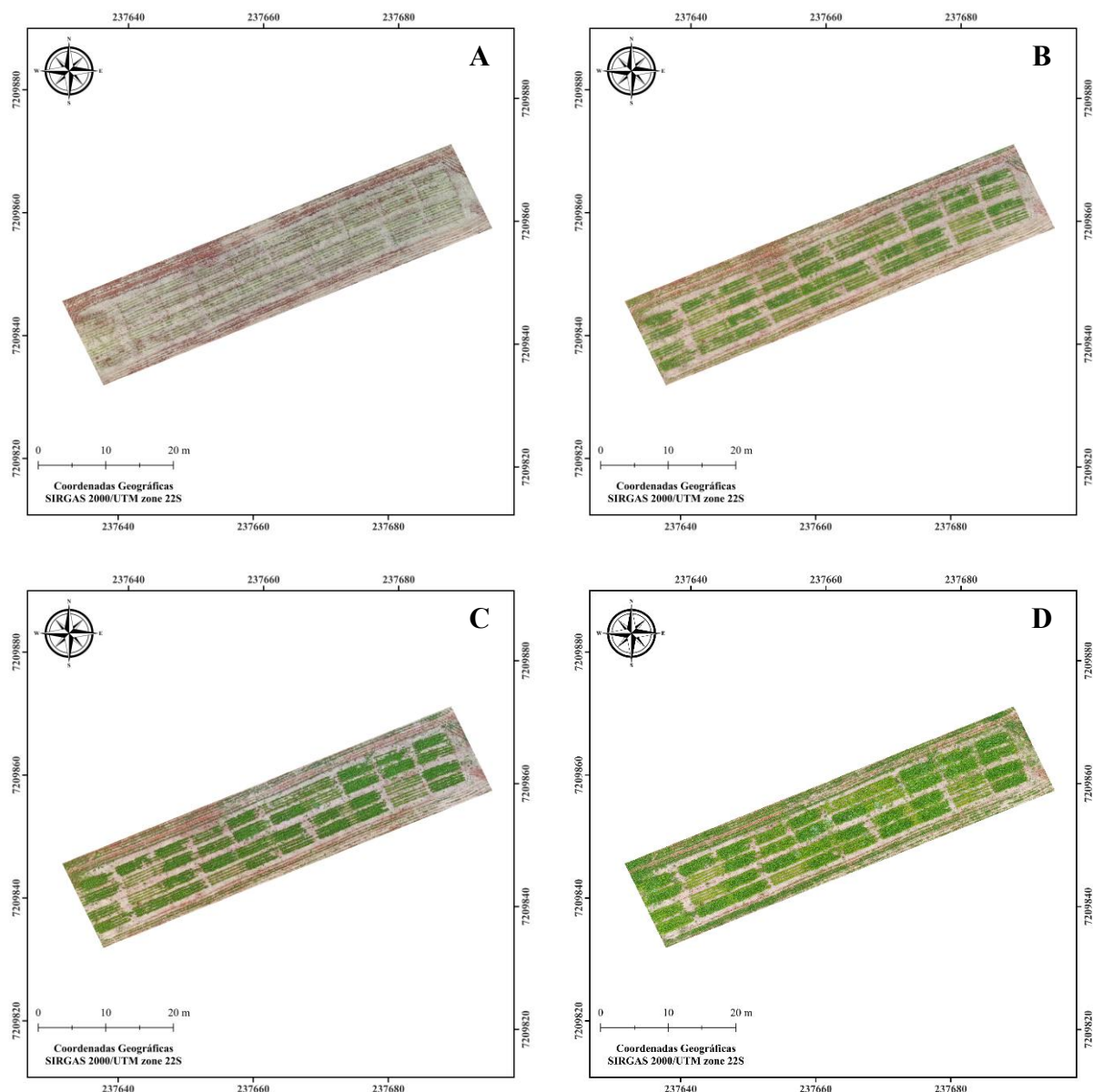
A coinoculação decorreu-se diretamente nas sementes, pela associação dos microrganismos *Rhizobium tropici* e *Azospirillum brasilense*, das estirpes SEMIA 4077 e 4088, e SEMIA AbV5 e AbV6, respectivamente. Para a aplicação do *Rhizobium tropici*, com garantia de 3×10^9 unidades formadoras de colônia (UFC) mL⁻¹, utilizou-se a dose recomendada pelo fabricante de 2,5 mL kg⁻¹ de sementes. Em seguida, adicionou-se a bactéria *Azospirillum brasilense*, com concentração de 2×10^8 UFC mL⁻¹, também na dose indicada pelo fabricante, de 2 mL kg⁻¹.

A adubação de base, realizada no momento da semeadura, foi composta pelo fertilizante mineral misto com 4% de N, 30% de P e 10% de K, aplicado na dose de 300 kg ha⁻¹. As adubações de cobertura para o feijoeiro foram realizadas à lanço, no dia 03 de outubro de 2024, quando mais de 50% das plantas atingiram o estágio V4, caracterizado pela terceira folha trifoliada completamente aberta (FERNÁNDEZ *et al.*, 1985). Para a cobertura, utilizou-se como fonte o sulfato de amônio e ureia, provenientes de um fertilizante mineral com 33% de N e 11% de S (enxofre). Após a adubação nitrogenada em cobertura, a área foi irrigada com uma lâmina de água de 10 mm para prevenir perdas por volatilização do nutriente, conforme recomendado por Viero *et al.* (2015).

Durante o período de cultivo, decorreu-se o controle de plantas daninhas e pragas quando necessário, pelo manejo químico, utilizando-se de pulverizador costal. As variáveis analisadas foram os índices MPRI (índice de reflectância fotoquímica modificado), o GLI (índice de folha verde), a altura das plantas, número de vagens e o número de grãos por vagem. O sensoriamento remoto foi realizado em quatro estádios fenológicos da cultura: emissão da sétima folha trifoliada (V4.7), aparecimento de botões florais (R5), florescimento pleno (R6) e enchimento de grãos (R8), de acordo com a escala fenológica de Fernández *et al.* (1985) (Figura 2).

Para a aquisição das imagens, utilizou-se um veículo aéreo não tripulado (VANT), tipo quadricóptero, marca DJI®, modelo Mavic 2 Pro (DJI, Nanshan District, Shenzhen, China). A captura das imagens ocorreu 34 dias após a semeadura (DAS), 48 DAS, 62 DAS e 76 DAS, entre os horários de 12:00 a 13:00 h. Os voos foram planejados, utilizando o software Pix4D Capture® (www.pix4d.com) e duraram cerca de 11 a 13 minutos. Os planos de voo foram criados garantindo que a captura fosse feita com sobreposições lateral e frontal de 90%, mantendo-se a linha de voo a 60 m acima do nível do solo.

Figura 2 – Imagens aéreas da cultura do feijão obtidas a partir dos voos realizados durante os estádios fenológicos de V4.7 (A), R5 (B), R6 (C) e R8 (D).

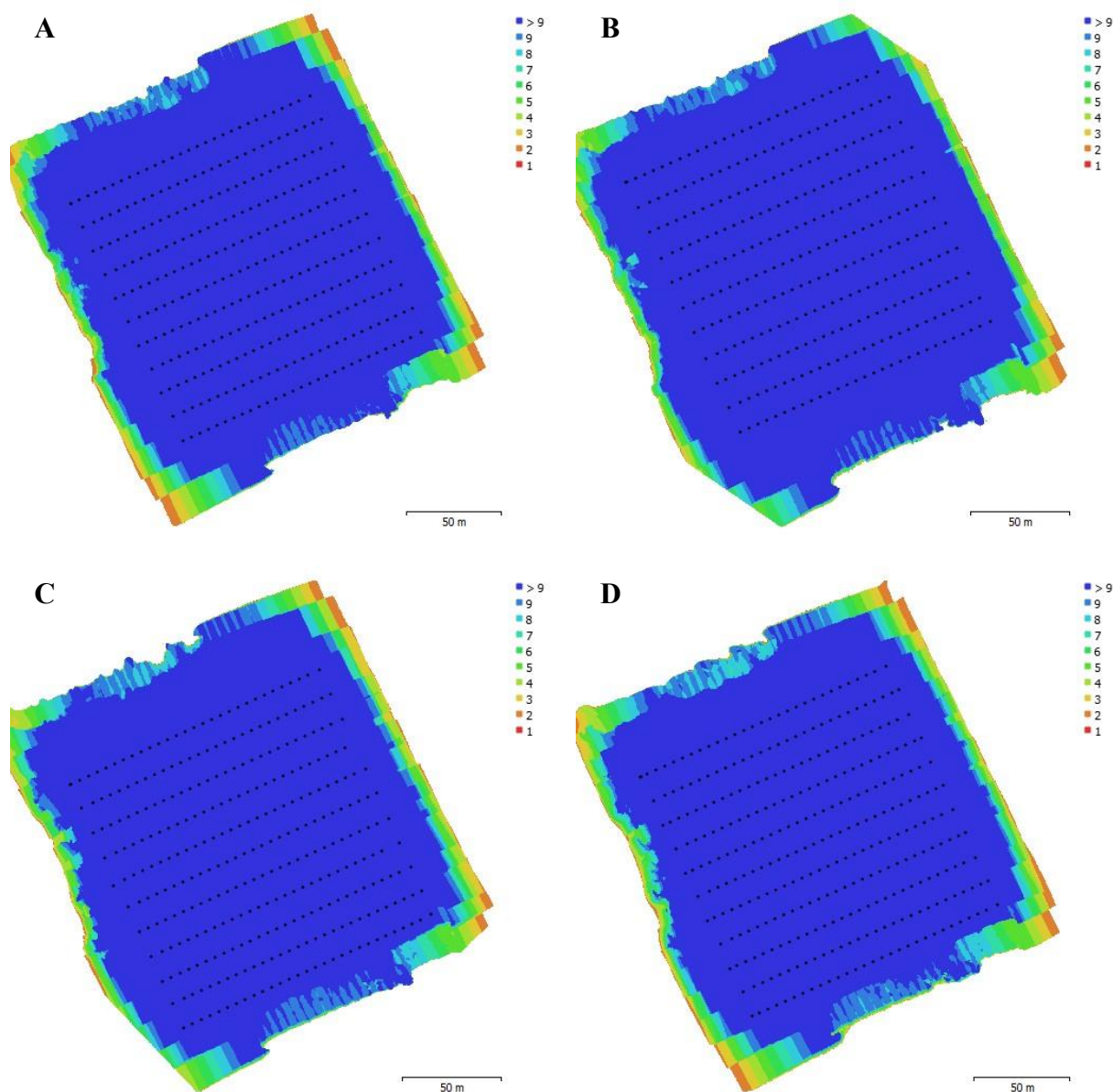


Fonte: o autor (2024). Lindoeste, PR.

As imagens RGB foram adquiridas por um sensor marca Hasselblad®, modelo L1D-20c, abertura f/2.8-f/11, resolução de 5472×3648 pixels (20 MP), capaz de capturar três bandas espectrais: Red (668 nm), Green (560 nm) e Blue (475 nm). As configurações adotadas por ocasião do voo foram: ISO 100, velocidade de abertura de 1/400 s e abertura f/5.6. Para os ajustes de configuração da câmera, usou-se o software DJI GO 4® (www.dji.com). As imagens foram salvas em formato JPEG de 24 bits. Para assegurar a criação dos ortomosaicos com qualidade adequada, a sobreposição lateral e frontal de 90%, resultou em 320 fotografias aéreas com GSD (ground sample distance) de aproximadamente $1,41 \text{ cm pixel}^{-1}$.

A geração dos ortomosaicos das imagens aéreas, foi efetuada com o software Agisoft Metashape (Agisoft LLC®). A configuração do software permitiu a geração dos ortomosaicos com resoluções espaciais de 1,41 cm pixel⁻¹. O procedimento compreendeu as etapas de alinhamento das fotos, de geração das nuvens de pontos, de modelos digitais de superfície, de modelos digitais de elevação e por fim os ortomosaicos. A sobreposição das imagens adotada, proporcionou que os ortomosaicos fossem gerados com sobreposição de mais de nove imagens aéreas em cada ponto, principalmente na região central onde encontrava-se a área experimental (Figura 3).

Figura 3 - Número de imagens sobrepostas para geração dos ortomosaicos da área experimental nos estádios fenológicos V4.7 (A), R5 (B), R6 (C) e R8 (D).



Fonte: o autor (2024). Lindoeste, PR.

Para obtenção dos índices de vegetação (IV), MPRI e GLI, utilizou-se as bandas espectrais vermelha, verde e azul da camada raster dos ortomosaicos gerados, processadas pela ferramenta calculadora raster do QGIS v. 3.34.10, segundo a equação 1 para o MPRI e a equação 2 dada para o GLI, em que RED = reflectância na região do vermelho (668 nm), GREEN = reflectância na região do verde (560 nm) e BLUE = reflectância na região do azul (475 nm).

$$(1) \quad \text{MPRI} = \frac{(\text{GREEN} - \text{RED})}{(\text{GREEN} + \text{RED})}$$

$$(2) \quad \text{GLI} = \frac{(2 \times \text{GREEN} - \text{RED} - \text{BLUE})}{(2 \times \text{GREEN} + \text{RED} - \text{BLUE})}$$

Após geração dos IV, realizou-se o corte da camada raster por meio de uma camada vetorial com a delimitação das parcelas experimentais, visando a obtenção dos dados de cada unidade experimental individualmente. Para extração dos valores dos índices MPRI e GLI, utilizou-se o plugin “Processing Saga NextGen Provider” do QGIS v. 3.34.10, que permite a obtenção dos valores de cada pixel da camada raster, com base na camada vetorial das parcelas experimentais, que incluem 44.527 pixels. A camada vetorial de polígonos com os valores de cada unidade experimental, foi obtida por meio da ferramenta “Add raster values to features”, presente no menu “Caixa de Ferramentas de Processamento” > “SAGA Next Gen” > “Vector < - > raster”. Os valores médios dos 44.527 pixels, foram calculados utilizando o método de reamostragem por interpolação de Spline Bicúbica (Bicubic Spline Interpolation), que cria uma distribuição empírica de estatísticas estimadas a partir de múltiplas amostras geradas da amostra original. Essa abordagem não depende de distribuições de probabilidade assumidas, mas utiliza o poder computacional para estimar estatísticas, que admitem a realização de testes de normalidade, construção de intervalos de confiança e realização de testes de hipóteses (HAIR *et al.*, 2009).

Uma vez estabelecida a maturação fisiológica (R9), procedeu-se a colheita manual das parcelas 84 DAS, onde foram consideradas apenas as duas linhas centrais das parcelas, desconsiderando 0,5 m de cada extremidade, a fim de evitar o efeito da bordadura. Para avaliar os parâmetros de produtividade, decorreu-se à mensuração das variáveis biofísicas no dia 28/11/2024. No levantamento dos parâmetros de altura das plantas (AP), número de vagens (NV) por planta e número de grãos por vagem (NGV), foram selecionadas cinco plantas de cada parcela colhida e considerada a média aritmética dessas medições. Para obter a AP,

considerou-se o primeiro nó acima do nó cotiledonar e a inserção do último trifólio aberto. Quanto ao levantamento da média de grãos por vagem, foram avaliadas cinco vagens de cada planta.

Os valores das variáveis MPRI, GLI, AP, NV e NGV em função dos fatores empregados, foram submetidos ao teste de normalidade dos dados (Shapiro-Wilk) e análise de regressão (com 5% de probabilidade). Com a finalidade de verificar a presença de interação entre os fatores doses de N e coinoculação, os parâmetros avaliados foram encaminhados para a análise de variância (ANOVA) no programa SISVAR (FERREIRA, 2010). Para adequar os modelos matemáticos de regressão, foram considerados o coeficiente de determinação (R^2) e a utilização das parcelas sem e com coinoculação em separado na análise dos modelos, totalizando 20 dados para cada manejo empregado, estágio fenológico e variável biofísica avaliada.

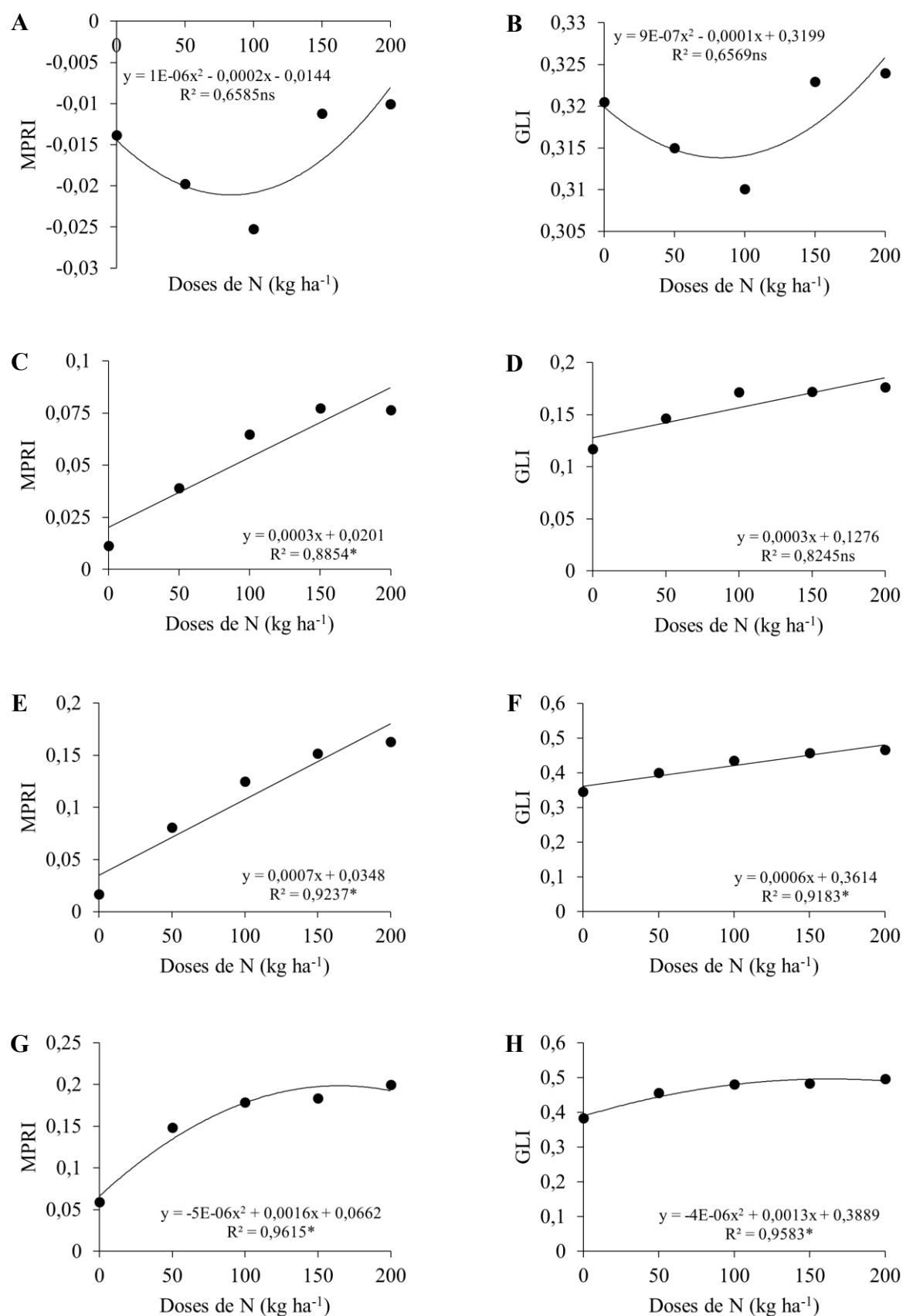
Resultados e Discussão

Após a coleta e a confirmação da normalidade dos dados obtidos durante o experimento, a análise estatística considerou as diferenças entre os tratamentos, assim como os fatores investigados e seus efeitos nas variáveis analisadas. O manejo de N utilizado no cultivo do feijoeiro mostrou-se eficiente apenas em relação à aplicação do nutriente em cobertura, não apresentando respostas significativas à coinoculação realizada. Assim, a resposta das variáveis quanto a presença ou ausência de coinoculação, associadas às diferentes doses de N em cobertura, foi apresentada de maneira individual.

A Figura 4 ilustra os modelos de regressão das doses de N em relação aos índices de vegetação RGB (MPRI e GLI), com o objetivo de apresentar o comportamento das variáveis em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro sem coinoculação. A representatividade dos modelos de regressão para as diferentes doses de N em cobertura, com e sem inoculação, aumentou ao longo do ciclo da cultura, em ambos índices de vegetação avaliados. Sandrini *et al.* (2019), na cultura do feijão, ao avaliarem os índices de vegetação NDVI e IRVI em diferentes estádios fenológicos, observaram que o coeficiente de determinação (R^2) dos modelos de regressão, também aumentou com o desenvolvimento da cultura.

Desta forma, identificou-se no presente estudo, que os modelos com menor R^2 foram obtidos durante a emissão da sétima folha trifoliada (V4.7), onde ambos os índices não foram significativos a 5% de probabilidade, indicando grande variabilidade devido ao subdesenvolvimento do dossel da cultura e ao curto intervalo entre a adubação nitrogenada e o estágio em questão, impossibilitando a percepção de alterações visíveis na ocasião do voo.

Figura 4 - Variação dos valores de MPRI e GLI em função das doses de nitrogênio sem a coinoculação, nos estádios fenológicos V4.7 (A e B), R5 (C e D), R6 (E e F) e R8 (G e H).



Fonte: o autor (2024). ns – não significativo; *significativo a 5% de probabilidade.

Em um estudo conduzido por Scherer *et al.* (2023), na cultura do trigo sob diferentes doses de cobertura de N, notou-se que no início do ciclo das culturas, o solo exposto e a cobertura morta na superfície das parcelas tendem a reduzir os índices de vegetação, e por consequência podem vir a causar variabilidade.

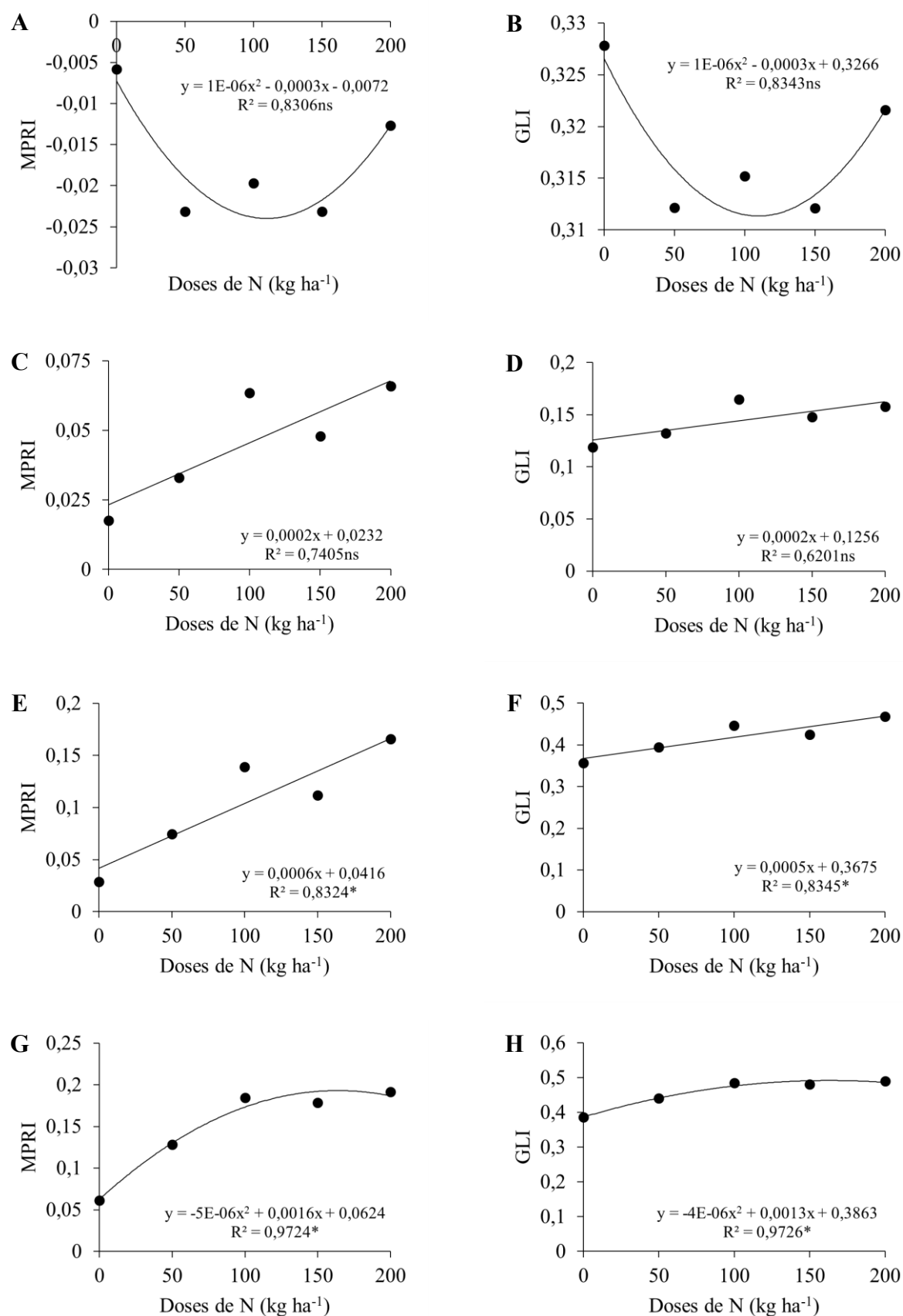
Embora não tenham sido representativos, os modelos dos IV em V4.7 (Figuras 4A e 4B), ajustados em uma parábola, apresentaram os maiores valores médios com a dose de 200 kg ha⁻¹ de N em cobertura, sendo -0,01 para o MPRI e 0,32 para o GLI. Em contrapartida, durante a fase reprodutiva, em R5 e R6, os índices de vegetação ajustaram-se a um modelo de regressão linear em relação às doses de N aplicadas no feijoeiro. Os valores de R² para o MPRI e GLI foram, respectivamente, 88,54% e 82,45% no início da floração, e com o florescimento pleno, os valores aumentaram para 92,37% e 91,83%. Eventualmente, com o enchimento dos grãos, em R8, ambos os índices de vegetação, se ajustaram a uma parábola conforme o aumento das doses de N aplicada no solo, com valores do R² de 96,15% para o MPRI e 95,83% para o GLI (Figuras 4G e 4H).

Pode-se constatar que, apesar de ambos os índices responderem de maneira semelhante às variações na tonalidade de verde das folhas, ocasionadas pelas diferentes doses de N, o MPRI apresentou maior representatividade na maioria dos estádios fenológicos avaliados. Contudo, nos estádios R5 e R6, tanto o MPRI quanto o GLI alcançam seus valores máximos com a aplicação de 200 kg ha⁻¹ de N. Os maiores valores observados para o MPRI nos estádios R5 e R6 foram, respectivamente, 0,08 e 0,18, e para o GLI foram 0,18 e 0,47.

No estudo conduzido por Scherer *et al.* (2023), observou-se que o desenvolvimento da cultura do trigo, resulta no aumento da biomassa e no crescimento do dossel, promovendo a elevação dos valores dos índices de vegetação, mesmo em doses nulas ou baixas de nitrogênio. O mesmo pode ser evidenciado no feijoeiro, que no estágio R8, apresenta seu valor máximo de MPRI com a aplicação de 160 kg ha⁻¹ de N, correspondente a 0,19, e o GLI alcança seu valor máximo de 0,49, com a aplicação de 162,5 kg ha⁻¹ de N.

Os IV das plantas conduzidas com coinoculação estão contidos na Figura 5, mostrando modelos com comportamento semelhante às plantas acompanhadas sem coinoculação. No estágio fenológico V4.7, também foi observado o ajuste do modelo de regressão quadrática para ambos os índices, que não foi significativo, apresentando um R² de 83,06% para o MPRI e 83,43% para o GLI.

Figura 5 - Variação dos valores de MPRI e GLI em função das doses de nitrogênio com a coinoculação, nos estádios fenológicos V4.7 (A e B), R5 (C e D), R6 (E e F) e R8 (G e H).



Fonte: o autor (2024). ns – não significativo; *significativo a 5% de probabilidade.

Com o objetivo de relacionar o sensoriamento remoto e a produtividade da cultura do feijão, MONTEIRO *et al.* (2011) avaliaram diversos estágios fenológicos da cultura, e descartaram os estádios iniciais, devido à baixa resposta espectral da vegetação em comparação com a do solo, que nesses estádios tem a quantidade de biomassa verde reduzida e o solo mais exposto, influenciando significativamente a resposta espectral do dossel. O mesmo pode-se atribuir ao presente estudo, onde não há relação entre os IV e as diferentes doses de N aplicadas no estágio vegetativo da cultura (V4.7).

Dado o início do florescimento (R5) da cultura com coinoculação, não foi possível estabelecer uma relação entre os índices MPRI e GLI em função das doses de N aplicadas. Os dados foram ajustados ao modelo de regressão linear, que apresentou R^2 de 74,05% e 62,20%, respectivamente (Figura 5C e 5D). Para Sandrini *et al.* (2019), as respostas das leguminosas aos manejos agrícolas são mais variáveis devido ao processo de fixação biológica do nitrogênio (FBN), o que pode ser observado nos estádios iniciais do feijão coinoculado. Entretanto, no florescimento pleno (R6), foram identificados modelos de regressão linear significativos, com R^2 de 83,24% para o MPRI e 83,45% para o GLI.

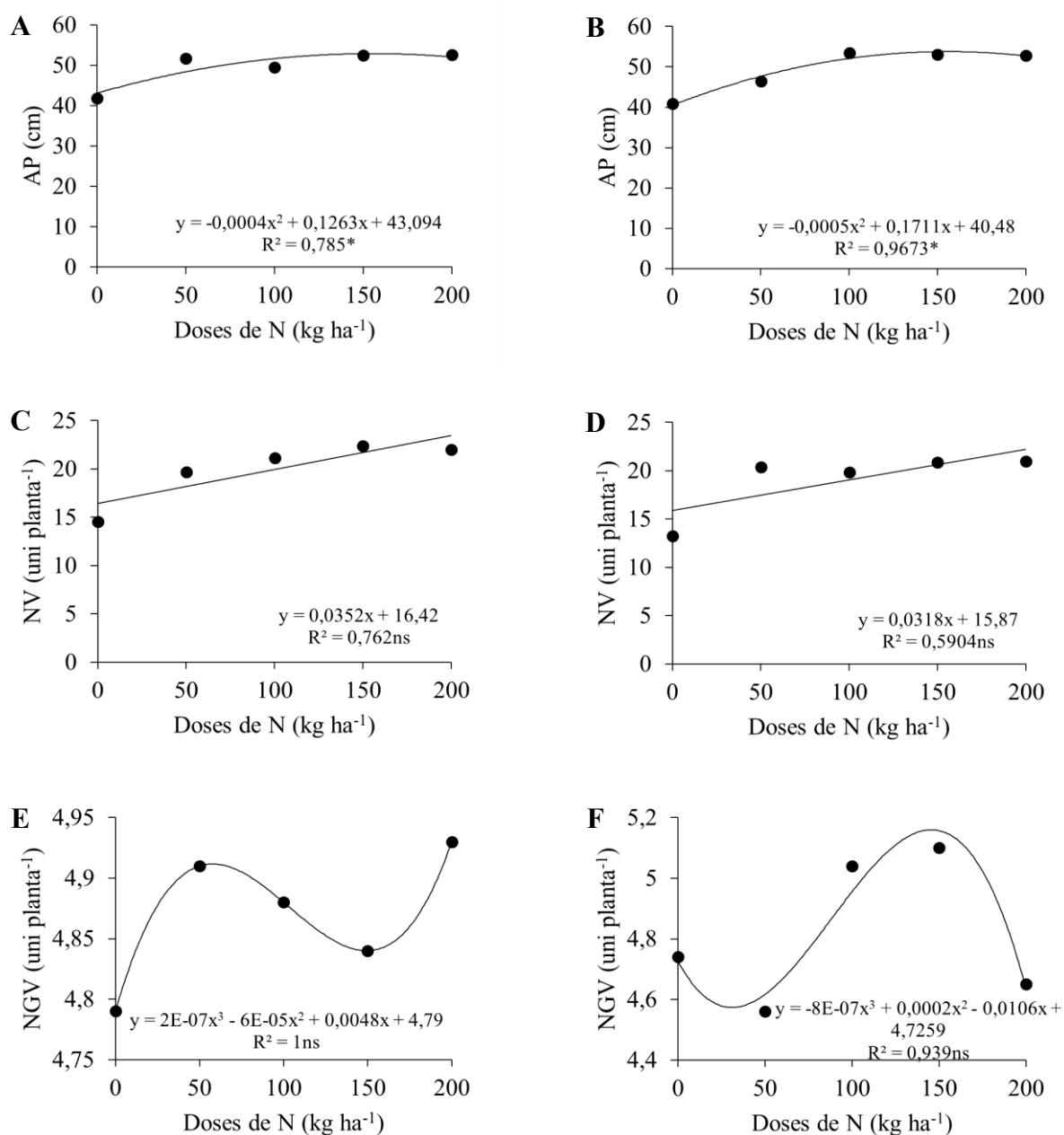
A partir do estágio R8 (enchimento dos grãos), foram obtidos os melhores modelos para representar a interação entre os IV e as doses de N associadas à coinoculação. Os valores das variáveis foram ajustados a uma parábola, apresentando coeficiente de determinação de 97,24% para o MPRI e 97,26% para o GLI. Apesar de o GLI ter demonstrado o melhor R^2 em comparação com o MPRI, ambos os índices apresentaram coeficientes satisfatórios, especialmente nos estágios de R6 e R8.

Em relação as regressões para o estágio fenológico de V4.7, o máximo valor de MPRI (-0,006540) e GLI (0,327172) foi obtido com a dose de N de 0 kg ha⁻¹ para os dois índices de vegetação. Esses valores confirmam a influência significativa da exposição do solo na obtenção das variáveis, destacando que essa influência é maior do que a do dossel da cultura no estágio vegetativo estudado. Além disso, Sandrini *et al.* (2019) destacam que nos estágios iniciais do ciclo, a demanda de recursos pelas plantas é menor, o que pode dificultar a detecção da variabilidade pelas plantas nesse período.

O período de florescimento (R5 a R6), assim como observado nas plantas sem inoculação, proporcionou o maior valor dos índices de vegetação (IV) avaliados, com a dose de 200 kg ha⁻¹ de N. Os valores estimados para a maior dose de N no estágio R6 foram 0,16 para o MPRI e 0,46 para o GLI. Já em R8, onde ambos índices tiveram o melhor ajuste, o pico do MPRI ocorreu na dose de 160 kg ha⁻¹, com o valor de 0,19, e para o GLI, o valor de 0,49 foi observado com 162,5 kg ha⁻¹ de N.

A resposta das variáveis biofísicas em relação aos diferentes manejos de nitrogênio empregados na cultura do feijão está apresentada na Figura 6. Verifica-se que a altura final das plantas foi a única variável a responder significativamente às doses de N aplicadas em cobertura, ajustando-se a uma equação quadrática com R^2 de 78,50% para o feijão sem coinoculação e 96,73% para o feijão coinoculado.

Figura 6 – Representação dos modelos de regressão para as variáveis biofísicas do feijoeiro em função das doses de nitrogênio sem (A, C e E) e com coinoculação (B, D e F). AP (altura de plantas), NV (número de vagens) e NGV (número de grãos por vagem).



Fonte: o autor (2024). ns – não significativo; *significativo a 5% de probabilidade.

As variáveis relacionadas à produtividade, como número de vagens (NV) e número de grãos por vagem (NGV), não apresentaram uma relação significativa com os diferentes manejos de nitrogênio empregados, mostrando grande variabilidade, principalmente no que diz respeito ao NGV. O melhor ajuste para representar a relação entre essas variáveis foi a regressão linear para o NV, com R^2 de 76,20% e 59,04% e uma equação cúbica para o NGV, com R^2 de 100% e 93,90%.

As plantas mais altas sem coinoculação, foram obtidas na dose de aproximadamente 157,8 kg ha⁻¹ de N, atingindo 53,05 cm, conforme o modelo da Figura 6A. Já aquelas que foram coinoculadas chegaram a 55,10 cm na dose de cerca de 171,1 kg ha⁻¹ (Figura 6B). Quanto ao NV, este teve seu acréscimo linear com o aumento das doses de N em cobertura, em ambos os manejos (com e sem coinoculação). O número de vagens por planta é o principal componente na determinação da produtividade do feijão, não sendo controlado apenas geneticamente, uma vez que fatores ambientais e de manejo também influenciam essa característica (JUNIOR *et al.*, 2005).

Ao avaliar o número de grãos por vagem da cultivar IPR Curió, Bettiol (2019) concluiu que, quando submetida à associação das bactérias *Rhizobium tropici* e *Azospirillum brasilense* e a doses de N (90 kg ha⁻¹), houve um aumento tanto no número de grãos por vagem quanto na produtividade. O mesmo não foi verificado no presente estudo, em que tanto as plantas coinoculadas como as não inoculadas, não apresentaram resposta significativa, variando entre 4,72 e 4,93 grãos vagem⁻¹.

Conclusão

A análise dos resultados revelou que o índice de vegetação MPRI apresentou maior representatividade ao longo dos estádios fenológicos do feijoeiro, destacando-se especialmente nos estádios reprodutivos (R5 a R8).

Ambos os índices, MPRI e GLI, responderam significativamente às doses de nitrogênio aplicadas. Embora a coinoculação tenha promovido um aumento na altura das plantas, ela não impactou os componentes de produtividade, assim como as plantas não coinoculadas.

Além disso, os modelos baseados nos índices RGB confirmaram a relação com a adubação nitrogenada de cobertura, sugerindo que esses índices podem ser utilizados para auxiliar na recomendação da aplicação de nitrogênio no cultivo do feijoeiro.

Referências

ANDRADE, R. G.; HOTT, M. C.; JUNIOR, W. C. P. M.; OLIVEIRA, P. S. D.; OLIVEIRA, J. S. E. **Uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) como plataforma para monitoramento da produção agropecuária: estudo de caso para o milho forrageiro**. Embrapa Gado de Leite, Documentos, n. 233, 2019.

APARECIDO, L. E. O.; ROLIM, G. S.; RICHETTI, J.; SOUZA, P. S.; JOHANN, J. A. Köppen, Thornthwaite and Camargo climate classifications for climatic zoning in the State of Paraná, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 40, n. 4, p. 405-417, 2016.

BETTIOL, J. V. T. **Produção sustentável do feijão comum: inoculação, coinoculação e adubação mineral em cultivares de ciclo precoce**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2019.

BRAGA E SILVA, M. P. **Importância do potássio na cultura do feijão**. Monografia (Bacharelado em Agronomia) – Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA, Goiás, GO, 2020.

BRITO, M. M. P.; MURAOKA, T.; SILVA, E. C. **Contribuição da fixação biológica de nitrogênio, fertilizante nitrogenado e nitrogênio do solo no desenvolvimento de feijão e caupi**. Campinas, SP, v. 70, n. 1, p. 206-215, 2011.

CARVALHO, M. C. S.; SILVEIRA, P. M. **Adubação**. Embrapa Arroz e Feijão, 2023. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/producao/adubacao>>. Acesso em: 20 nov. 2024.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**. Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 12 décimo segundo levantamento, setembro 2024.

COUTINHO, L. M. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, RJ, v. 9, n. 1, p. 45-60, 2014.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos** - 3ed. rev. ampl. 353p. Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

FERNÁNDEZ, F.; GEPTS, P.; LÓPEZ, M. **Etapas de desarrollo en la planta del frijol**. In: López, M.; Fernández, F.; Schoonhoven, A. van. Frijol: investigación y producción. Cali: CIAT, p.61-78, 1985.

FERREIRA, D. F. **Sistema de análises estatísticas – Sisvar 5.6**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2010.

HAIR, J. F. J.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise Multivariada de Dados**. 6ª ed. p.688. Porto Alegre: Bookman, 2009.

JUNIOR, E. U. R.; LEMOS, L. B.; SILVA, T. R. B. **Componentes da produção, produtividade de grãos e características tecnológicas de cultivares de feijão**. Bragantia, Campinas, v.64, n.1, p.75-82, 2005.

LINHARES, M. M. A.; ROCHA, N. C. C.; AMARAL, B. A. S. Análise do índice MPRI como indicador vegetativo através da correlação do mesmo com o índice NDVI. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, n.16, 2013, Foz do Iguaçu, PR: INPE, p. 1190-1197, 2013.

MONTEIRO, P. F. C.; ANGULO FILHO, R.; XAVIER, A. C.; MONTEIRO, R. O. C. **Análise de dados de sensoriamento remoto na estimativa da produtividade e altura final do feijão**. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio, INPE, p. 8645-8651, 2011.

MOTOMIYA, A.V. A.; MOLIN, J. P.; CHIAVEGATO, E. J. Utilização de sensor óptico ativo para detectar deficiência foliar de nitrogênio em algodoeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Piracicaba, SP, v. 13, n. 2, p. 137-145, 2009.

PAULETTI, V.; MOTTA, A. C. V. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná**. Paraná: Editora da SBCS, p.289, 2019.

ROSA, W. B; JÚNIOR, J. B. D.; COSTA, A. C. T.; LANA, M. C.; QUEIROZ, S. B.; PEREGO, I.; ABRAÃO, P. C. Desempenho agrônomo e viabilidade econômica da adubação nitrogenada e molíbdica no feijão comum. **Brazilian Journal of Development**. Curitiba, PR, v. 6, n. 9, p. 65815-65831, set. 2020.

SAMPAIO, H. S.; BOURSCHIEDT, V.; SARRACINI, L. H.; JORGE, L. A. C.; BETTIOL, G. M.; BERNARDI, A. C. C. Comparação entre índices de vegetação obtidos por imagens aéreas com veículo aéreo não tripulado (VANT) e satélite. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 14, n. 2, p. 111-124, 2020.

SANDRINI, F. O. T.; LEAL, F. T.; COELHO, A. P.; LEMOS, L. B.; ROSALEN, D. L. Índices de Vegetação na Estimativa da Produtividade do Feijoeiro Cultivado sob Doses de Nitrogênio. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.14, n.4, e7310, 2019.

SCHERER, G. L.; FELDMANN, N. A.; RHODEN, A. C.; GABRIEL, V. J.; MÜHL, F. R.; PAVAN, D. Índice de vegetação baseado no espectro visível para monitoramento de cultivares de trigo submetidas a diferentes doses de nitrogênio. **Revista Inovação**, v. 2, p. 1-28, 2023.

SILVA, M. H; ELIAS, A. R; ROSÁRIO, L. L. Análise da cultura da soja a partir de índices de vegetação (ExG – TGI – GLI - VEG) advindos de imagens RGB obtidas com ARP. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 10, n. 2, p. 140-154, 2022.

VIERO, F.; BAYER, C.; VIEIRA, R.C.B.; CARNIEL, E. Management of irrigation and nitrogen fertilizers to reduce ammonia volatilization. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.6, p.1737-1743, 2015.

YANG, Z.; WILLIS, P.; MUELLER, R. Impact of Band-Ratio Enhanced AWIFS Image to Crop Classification Accuracy. In: Pecora – The Future of Land Imaging... Going Operational, 17. 2008, Denver, Colorado, USA. **Proceedings...** Maryland, NY: (ASPRS), 2008.

ZANZARINI, F. V.; PISSARRA, T. C. T.; BRANDÃO, F. J. C.; TEIXEIRA, D. D. B. Correlação espacial do índice de vegetação (NDVI) de imagem Landsat/ETM+ com atributos

do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Jaboticabal, SP, v. 17, n. 6, p. 608–614, 2013.