

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS EDUARDO KARVAT

USO DE SENSOR ÓPTICO ATIVO PARA AJUSTE DA ADUBAÇÃO
NITROGENADA NO CULTIVO DO FEIJOEIRO

CURITIBA

2022

CARLOS EDUARDO KARVAT

USO DE SENSOR ÓPTICO ATIVO PARA AJUSTE DA ADUBAÇÃO
NITROGENADA NO CULTIVO DO FEIJOEIRO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti
Coorientador: Dr. Fabrício Povh

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Karvat, Carlos Eduardo

Uso de sensor óptico ativo para ajuste da adubação nitrogenada no cultivo do feijoeiro / Carlos Eduardo Karvat. – Curitiba, 2022.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Volnei Pauletti

Coorientador: Dr. Fabrício Povh

1. Nitrogenio. 2. Nitratos. 3. Adubação. 4. Feijão. I. Pauletti, Volnei. II. Povh, Fabrício. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. IV. Título.

Bibliotecária: Telma Terezinha Stresser de Assis CRB-9/944



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIA DO SOLO -
40001016014P4

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação CIÊNCIA DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **CARLOS EDUARDO KARVAT** intitulada: **USO DE SENSOR ÓPTICO ATIVO PARA AJUSTE DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NO CULTIVO DO FEIJOEIRO**, sob orientação do Prof. Dr. VOLNEI PAULETTI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no ato 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, 20 de Junho de 2022.

Assinatura Eletrônica

20/06/2022 13:54:33.0

VOLNEI PAULETTI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

21/06/2022 08:04:39.0

JOSE PAULO MOLIN

Avaliador Externo (UNIV. DE SÃO PAULO/ESCOLA SUP. DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ)

Assinatura Eletrônica

21/06/2022 15:38:51.0

GABRIEL BARTH

Avaliador Externo (FUNDAÇÃO ABC)

Aos meus pais, Eronilcia e Rafael
Aos meus irmãos Bruno e Gustavo
A minha namorada Luana
A minha tia Matilde
Com todo meu amor e gratidão, Dedico!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé que me manteve firme nessa longa jornada, e pela oportunidade de chegar até aqui.

À minha família, em especial, meus pais, Eronilcia e Rafael, e meus irmãos Bruno e Gustavo, por todo amor, incentivo e por terem priorizado meus estudos, o esforço de vocês valeu a pena.

À minha namorada Luana, por todo amor e incentivo, amo você.

Ao orientador, Prof. Dr. Volnei Pauletti, pela oportunidade de trabalho conjunto, confiança, por toda orientação e pela relação de amizade, paciência, e experiências que transmitiu e me proporcionou durante o período de Mestrado.

Ao coorientador Dr. Fabricio Pinheiro Povh, por todo auxílio com sua vasta experiência sobre algoritmos e sensores.

À Universidade Federal do Paraná por meio do Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, pela oportunidade de realização deste curso de Mestrado.

À todos os professores do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, vocês foram essenciais no processo de aprendizado.

À Fundação ABC e sua equipe técnica, pela condução dos experimentos, coleta de amostras e fornecimento do sensor.

À instituição de fomento à pesquisa Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado.

Enfim, a todos aqueles que, mesmo indiretamente, me ajudaram durante o percurso de realização deste curso de mestrado, meu MUITO OBRIGADO!

Deus não escolhe os capacitados
capacita os escolhidos.
Fazer ou não fazer algo
só depende de nossa vontade
e perseverança

Albert Einstein

RESUMO

A adubação nitrogenada no feijoeiro como é realizada, apresenta baixa eficiência, promovendo perdas no sistema e aumentando o custo de produção. Deste modo, doses mais precisas de adubos nitrogenados em cobertura que aumentem a eficiência do uso do nitrogênio (N) e diminuam os custos de produção são fundamentais no cultivo do feijoeiro. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do sensor óptico ativo e do nitrato no solo para recomendação de adubação nitrogenada em feijoeiro cultivado em plantio direto. Foram conduzidos quatro experimentos em parcelas instalados em quatro épocas distintas de semeadura (outubro, novembro, dezembro de 2020 e janeiro de 2021) no campo demonstrativo e experimental da Fundação ABC, localizado em Arapoti-PR, sobre Latossolo Vermelho Distrófico típico (LVd), textura franco argilo arenoso e capacidade de água disponível de 62 mm. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso com quatro repetições. Os tratamentos foram doses de 0, 40, 80, 120, 160, 200 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia, aplicados logo após a semeadura, a lanço e sem incorporação. Foram determinadas as curvas de resposta do feijoeiro em produtividade de grãos e de massa seca da parte aérea, acúmulo e estado nutricional de N. Nos estádios fenológicos V4 e V7 foi realizada a leitura do dossel das plantas com o sensor óptico ativo, assim como também foram realizadas amostragens de solo em V7 nas profundidades de 0-10 e 0-30 cm, a fim de avaliar o teor de nitrato no solo. Com base nos resultados, foram desenvolvidos e avaliados modelos para aplicação em taxas variáveis de N. As respostas de produtividade de grãos, de massa seca e o acúmulo de N em função das aplicações crescentes de N em cobertura variaram conforme as condições climáticas de cada época de semeadura. A avaliação dos teores de N na folha índice não se mostrou um método confiável para avaliação do estado nutricional do feijoeiro. A avaliação do teor de nitrato no solo permitiu indicar a disponibilidade de N no solo no estágio fenológico V7, com nível crítico para o ambiente estudado de 33 mg kg⁻¹ para profundidade de 0 – 10 cm e 25 mg kg⁻¹ para profundidade de 0 – 30 cm, porém não contribuiu para melhorar a recomendação da adubação nitrogenada. O sensor óptico ativo aliado as metodologias de faixa de referência e índice de resposta auxiliou na identificação de áreas responsivas à aplicação de N e o modelo de recomendação em taxa variável de N recomendou doses mais eficientes que a dose fixa no ambiente avaliado, melhorando o manejo da adubação nitrogenada do feijoeiro no sistema plantio direto.

Palavras-chave: Nitrogênio. Sensor óptico ativo. Nitrato no solo. Aplicações em taxas variáveis. *Phaseolus vulgaris* L.

ABSTRACT

Nitrogen fertilization in common bean as performed is low, promoting losses in the system and increasing the cost of production, thus, more precision rates of nitrogen fertilization needed in coverage that will increase the efficiency of the use of nitrogen (N) and reduce the costs of production are fundamental in bean cultivation. The work had a objective of evaluate the eficienci of active canopy sensor and of nitrate in soil for recommend nitrogen fertilization in no-tillage soil fields. Were done four experiments in four plots located at four diferente plantig seasons (october, november, dezembro of 2020 and january of 2021). At demonstrative and experimental field of Fundação ABC, located at Arapoti-PR on Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), sandy clay loam texture and available water capacity of 62 mm. The experimental design adopted ws in randomized blocks with four repetition. The treatments were rates of 0, 40, 80, 120, 160, 200 kg ha⁻¹ of N in form of urea, Applied immediately after sowing. The experimental design adopted was in randomized blocks with four. The treatments were doses of 0, 40, 80, 120, 160, 200 kg ha⁻¹ of N in the form of urea, applied immediately after sowing, in coverage without incorporation. It was determined as response curves of bean in grain yield and shoot dry mass, N accumulation and nutritional status. In the phenological stages V4 and V7, the reading of the plant with the active optical sensor was performed, as well as samplings of soil in V7 at depths of 0-10 and 0-30 cm, in order to evaluate the nitrate content in the soil. With results were developed and evaluated models for application of variable rate of N. The leaf of N doses in the index did not demonstrate a reliable method for evaluating the nutritional status of the common bean. The evaluation of the nitrate contend in the soil allowed indicate the availability of N in the soil at the phenological state V7. With a critical level for the studied environment of 33 mg kg⁻¹ for a depth of 0-10 cm and 25 mg kg⁻¹ for a depth of 0-30 cm, but it don't contributed to improve the recommendation of nitrogen fertilization. The active canopy sensor allied to reference range and response index methodologies helped in the identification of resposive areas to N application and the recomendation model was more efficient than fixed rate in the evaluated environment, improving the management of the nitrogen fertilization of the common bean cultivated in no-tillage system.

Keywords: Nitrogen. Active canopy sensor. Nitrate in soil. Variable rare application.

Phaseolus Vulgaris L.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – VISÃO DA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS EXPERIMENTOS E DA ÁREA EXPERIMENTAL.....	19
FIGURA 2 - LEITURA COM SENSOR ÓPTICO ATIVO NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V7 DO FEIJOEIRO.....	21
FIGURA 3 - SENSOR ÓPTICO ATIVO OTMIS GS 6200 – JACTO	22
FIGURA 4 - DIFERENÇA DE CRESCIMENTO ENTRE PLANTAS DE FEIJOEIRO SEMEADAS EM DEZEMBRO E QUE RECEBERAM A APLICAÇÃO DE 160 Kg ha ⁻¹ (ESQUERDA) E 0 Kg ha ⁻¹ (DIREITA) DE NITROGÊNIO	30

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL PARA O FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021, ARAPOTI – PR.....	27
GRÁFICO 2 – PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B), DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DE DOSES CRESCENTES DE NITROGÊNIO APLICADAS LOGO APÓS A SEMEADURA, ARAPOTI – PR.....	29
GRÁFICO 3 – PRODUTIVIDADE DE MASSA SECA DA PARTE AÉREA DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B), DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO DE 2021 (D) EM FUNÇÃO DE DOSES CRESCENTES DE NITROGÊNIO APLICADAS LOGO APÓS A SEMEADURA, ARAPOTI – PR.....	32
GRÁFICO 4 – ACÚMULO DE NITROGÊNIO NA PARTE AÉREA DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DAS DOSES DE NITROGÊNIO APLICADAS, ARAPOTI – PR.....	34
GRÁFICO 5 – TEOR DE NITROGÊNIO NA FOLHA ÍNDICE DO FEIJOEIRO SEMEADO EM NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021, EM FUNÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO APLICADAS, ARAPOTI– PR ...	35
GRÁFICO 6 – TEOR DE NITRATO NO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 – 10CM (A) E DE 0 – 30CM (B) DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO E NOVEMBRO EM FUNÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO APLICADAS, ARAPOTI – PR	36
GRÁFICO 7 – TEOR DE NITRATO NO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 – 10CM (A) E DE 0 – 30CM (B) DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO DE NOVEMBRO EM FUNÇÃO DE DOSES DA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE FEIJOEIRO, ARAPOTI – PR	37
GRÁFICO 8 – DETERMINAÇÃO GRÁFICA DO NÍVEL CRÍTICO DE NITRATO NO SOLO, A PARTIR DA RELAÇÃO ENTRE TEOR DE NITRATO NO SOLO E RENDIMENTO RELATIVO DE GRÃOS DE FEIJÃO, ARAPOTI – PR.....	38
GRÁFICO 9 – ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDRE NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V4 DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B), DEZEMBRO (C) DE	

2020 E JANEIRO DE 2021 (D) EM FUNÇÃO DE APLICAÇÕES CRESCENTES DE N, ARAPOTI – PR.....	39
GRÁFICO 10 – ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDRE NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V7 DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B), DEZEMBRO DE 2020 (C) E JANEIRO DE 2021 (D) EM FUNÇÃO DE APLICAÇÕES CRESCENTES DE N, ARAPOTI – PR.....	40
GRÁFICO 11 – PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B), DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO DE 2021 (D) EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDRE NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V4, ARAPOTI – PR.....	41
GRÁFICO 12 – PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B), DEZEMBRO DE 2020 (C) E JANEIRO DE 2021 (D) EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDRE NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V7, ARAPOTI - PR.....	42
GRÁFICO 13 – PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO SEMEADO EM DEZEMBRO EM FUNÇÃO DO INSEY NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V4 (A) E V7 (B), ARAPOTI – PR.....	45
GRÁFICO 14 – DOSE ÍDEAL E DOSE GERADA PELO MODELO PARA AS ÉPOCAS SEMEADAS EM OUTUBRO, NOVEMBRO E JANEIRO NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS V4 (A) E V7 (B), ARAPOTI – PR.....	47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VARIÁVEIS QUÍMICAS DA CAMADA 0 A 20 CM DO SOLO ANTERIOR A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO	19
TABELA 2 – DOSE DE N PARA MÁXIMA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE FEIJOEIRO E ÍNDICES DE RESPOSTA À ADUBAÇÃO NITROGENADA ESTIMADOS PELO SENSOR ÓPTICO ATIVO NO ESTÁDIO V4 E V7 NAS DIFERENTES ÉPOCAS DE SEMEADURA.....	43
TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE DOSES IDEAIS, DOSE FIXA, E DOSES GERADAS PELO MODELO NO ESTÁDIO V4 E V7 NAS DIFERENTES ÉPOCAS DE SEMEADURA.....	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 MATERIAL E MÉTODOS	18
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E CONDUÇÃO EXPERIMENTAL	18
2.2 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E DE MASSA, ACÚMULO E ESTADO NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO	20
2.3 OBTENÇÃO DOS DADOS COM SENSOR ÓPTICO ATIVO	21
2.4 NITRATO NO SOLO	22
2.5 COLETA DE DADOS CLIMÁTICOS	23
2.6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO PARA APLICAÇÃO EM TAXAS VARIÁVEIS DE NITROGÊNIO.....	24
2.7 AVALIAÇÃO DO MODELO	26
2.8 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	26
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
3.1 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E DE MASSA SECA DA PLANTA	28
3.1.1 Produtividade de grãos	28
3.1.2 Produtividade da matéria seca da parte aérea	32
3.2 NITROGÊNIO NA PLANTA E NO SOLO	33
3.2.1 Acúmulo de nitrogênio na parte aérea	33
3.2.2 Teor de nitrogênio na folha índice	34
3.2.3 Nitrato no solo	35
3.3 DESEMPENHO DO SENSOR ÓPTICO ATIVO	38
3.3.1 Doses de nitrogênio.....	38
3.3.2 Predição de produtividade.....	40
3.4 MODELO PARA APLICAÇÃO DE DOSES VARIÁVEIS DE NITROGÊNIO	42
4 CONCLUSÃO	47
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é considerado a leguminosa mais importante para o consumo humano direto. O Brasil se destaca por ser o quarto maior produtor de grãos desta espécie, sendo essa a principal fonte de proteína na dieta da população brasileira (MAPA, 2019). O estado do Paraná se sobressai no cenário da produção brasileira, participando com 534 mil toneladas ou 18,7% do total de cerca de 2,86 milhões de toneladas produzidas em 2020/2021 (CONAB, 2022).

A deficiência de nitrogênio (N) é um dos principais fatores limitantes do crescimento e desenvolvimento do feijoeiro (PEREZ et al., 2013; FAGERIA et al., 2013). Este nutriente possui função estrutural e é constituinte de muitos compostos na planta, como a clorofila, que possui em seu núcleo quatro átomos de N envolvendo um átomo de magnésio. Este composto é o principal pigmento que dá coloração verde aos tecidos vegetais. Tal fato ocorre, pois durante o processo de fotossíntese a maior parte dos comprimentos de onda na faixa do azul e do vermelho são absorvidos, refletindo com maior intensidade o verde (TAIZ & ZEIGER, 2017).

Em condições de deficiência de N no feijoeiro há amarelecimento das folhas, redução da altura da planta, da formação de ramos e do crescimento de raízes, resultando em menor produtividade de grãos (CRUSCIOL et al., 2007; FAGERIA et al., 2008, SORATTO et al., 2017).

As principais fontes de N para o feijoeiro são a matéria orgânica decomposta no solo, os adubos nitrogenados e a fixação biológica de N₂ pela associação com bactérias do gênero *Rhizobium* (FAGERIA et al., 2015). Entretanto, este processo não é suficiente para atender a demanda da cultura pelo N (LEMOS et al., 2003; SOUZA et al., 2011), necessitando ser suplementada com fertilizantes nitrogenados (BRITO et al., 2011). Para absorção pela planta, o N deve estar nas formas minerais de amônio (NH₄⁺) e nitrato (NO₃⁻), principalmente (OWEN & JONES, 2001 in MARSCHNER, 2012).

Vários trabalhos demonstraram efeito positivo da aplicação de N sobre a leguminosa, que chegou a responder a 180 kg de N ha⁻¹ (CRUSCIOL et al., 2007; BARBOSA FILHO et al., 2009; PELEGIN et al., 2009; FARINELLI & LEMOS,

2010; SORATTO et al., 2017). No entanto, resposta ao N nem sempre é observada no cultivo do feijoeiro (FURTINI et al., 2006; BOERSMA et al., 2021).

Por se tratar de uma cultura de ciclo curto, este nutriente deve estar prontamente disponível durante os períodos de demanda (SILVA & SILVEIRA, 2000). Para isso, estratégias de parcelamento da adubação são adotadas. No estado do Paraná, por exemplo, a recomendação é aplicar de 15 a 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura e de 30 a 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura quando as plantas apresentarem entre dois e quatro trifólios desenvolvidos (NEPAR, 2019). Entretanto, o manejo do N é difícil, pois além de ser exigido em grande quantidade pelo feijoeiro, variando entre 46 e 67 kg para cada tonelada produzida (NEPAR, 2019; PEREZ et al., 2013) possui uma dinâmica complexa no solo (SANTI et al., 2013).

A produção de adubos nitrogenados demanda grande quantidade de energia fóssil em seu processo de fabricação, implicando no aumento dos custos energético e ambiental (MENDES & BUENO, 2015). Por isso, há preocupação com a baixa eficiência da adubação nitrogenada pelo feijoeiro, sendo que a cada 100 kg de adubo nitrogenado aplicado ao solo, aproximadamente 50 kg é aproveitado pela planta (FAGERIA et al., 2013). Considerando diferentes espécies adubadas com N esta eficiência é estimada em 33% (RAUN & JOHNSON, 1999). Dentre os fatores que influenciam está a baixa eficiência do uso de N. Pode-se destacar a aplicação uniforme de fertilizantes em áreas espacialmente variáveis, a ausência de sincronismo entre a exigência da cultura e o fornecimento de N e a utilização da estimativa de produtividade, que nem sempre é atingida, para definir a dose a ser aplicada (SOLARI et al., 2008).

Assim, técnicas mais precisas de adubação nitrogenada em cobertura que aumentem a eficiência do uso do N e diminuam os custos de produção são fundamentais no cultivo do feijoeiro.

Características de solo são utilizadas como indicadores da disponibilidade de N para as plantas, em especial o teor de NO₃⁻, que ocupa a maior proporção do N mineral no solo (NASCENTE et al., 2017). Apesar de pouco frequente, altas correlações entre teor de NO₃⁻ no solo e produtividade foram encontrados em diversas culturas, indicando potencial deste atributo na gestão da adubação nitrogenada (MENGEL et al., 2013; WANG et al., 2015). Contudo, a avaliação do N mineral no solo é dificultada, pois é muito influenciado pelo ambiente e se

modifica rapidamente pelos processos de amonificação, nitrificação, desnitrificação, imobilização entre outros (MENGEL & KIRKBY, 2001).

A avaliação do teor do nitrogênio mineral no solo pouco antes da adubação nitrogenada em cobertura é uma técnica estudada em algumas espécies. Rambo et al. (2008) consideraram esta avaliação como sendo uma ferramenta promissora para a cultura do milho. Segundo os autores, esta técnica consiste em avaliar a quantidade de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) que se encontra no solo até 30 cm de profundidade, em diferentes estádios de desenvolvimento (V3, V6 e V10) do milho, detectando a variação da disponibilidade de N durante o ciclo da cultura indicando doses mais efetivas a serem suplementadas. Esta técnica foi validada e é amplamente utilizada no cultivo do milho em regiões de clima temperado nos Estados Unidos (FERRER et al., 2003; CARLSON et al., 2019; RANDOM et al., 2020). Porém, pouco se conhece sobre essa metodologia no cultivo do feijoeiro.

Outra técnica que se destaca em aumentar a eficiência da adubação nitrogenada, é o uso de sensores ópticos ativos. Estes sensores conseguem estimar parâmetros culturais de interesse medindo a reflectância foliar em faixas espectrais específicas, convertendo-as em índices de vegetação que estão correlacionados ao acúmulo vegetativo, concentração de clorofila nas plantas e produtividade de grãos (PORTZ et al., 2012; AMARAL et al., 2015; ROSA et al., 2015).

O mais comum dos índices de vegetação utilizados é o chamado índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (DORIGO, 2007). O NDVI definido por ROUSEM et al. (1974) é quantificado pela relação $(ivp - v) / (ivp + v)$, onde ivp e v se referem à reflectância do infravermelho próximo e vermelho, respectivamente. Este índice apresenta variação numérica de -1 a +1, em que valores positivos são referentes ao vigor vegetativo da cultura, enquanto os valores negativos indicam a presença de água ou ausência de vegetação (LIU et al., 2006). Recentemente, tem sido utilizado o índice de red-edge por diferença normalizada (NDRE), substituindo a reflectância no vermelho utilizado para obtenção do NDVI pela reflectância em algum comprimento de onda específico da região da rampa do vermelho (red-edge) (MOLIN et al., 2015). Povh et al. (2015) obtiveram melhores resultados com o NDRE quando comparado com o NDVI na cultura do feijoeiro.

Sabe-se que a deficiência de N causa mudanças no comportamento espectral da radiação refletida pelas folhas das plantas, em virtude das alterações sofridas pela falta do nutriente (TARPLEY et al., 2000). Desta forma, a utilização de sensores possibilita realizar aplicações da adubação nitrogenada por meio da mensuração dessas alterações. Isso é muito vantajoso, considerando que a definição da dose passa a se basear na resposta das plantas às condições de suprimento de N a que foram submetidas na própria safra, no período entre a semeadura e a leitura com o sensor. Vários autores comprovaram a eficiência do método no cultivo do trigo (Povh et al., 2008), milho (Bragagnolo et al., 2016), cana-de-açúcar (Molin et al., 2010; Portz et al., 2012), algodão (Motomiya et al., 2012; Trevisan, 2018) e cevada (Pohv et al., 2008). No entanto, para a cultura do feijão pouco se conhece.

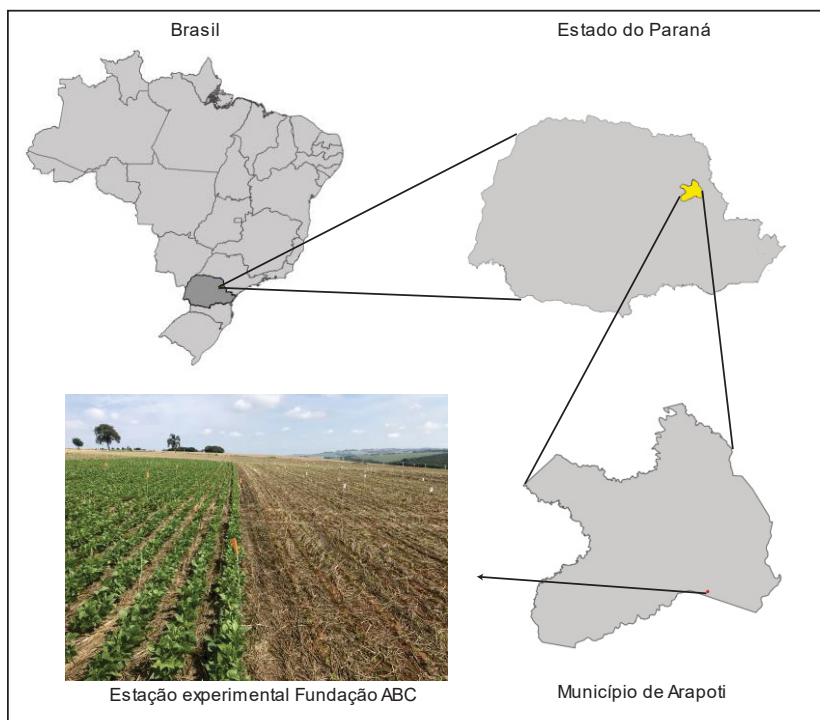
Assim, este estudo foi conduzido em experimentos instalados em quatro épocas de semeadura no mesmo ano agrícola, com o objetivo de determinar a eficiência do sensor óptico ativo e da determinação do nitrato no solo na recomendação de adubação nitrogenada em feijoeiro cultivado em plantio direto no sul do Brasil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA E CONDUÇÃO EXPERIMENTAL

Este trabalho foi conduzido na estação experimental da Fundação ABC, área manejada sob plantio direto há mais de 30 anos, localizada no município de Arapoti - PR (FIGURA 1). O clima da região é classificado como Cfa (Köppen), subtropical úmido com chuvas uniformemente distribuídas, com precipitação média anual de 1553 mm, sem estação seca definida (ALVARES et al., 2013). As coordenadas geográficas do local são 24°11'37.3"S 49°52'25.0"W e 887 m de altitude.

FIGURA 1 - VISÃO DA LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO LOCAL DE INSTALAÇÃO DOS EXPERIMENTOS E DA ÁREA EXPERIMENTAL



FONTE: O autor (2022).

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 2018), textura Franco Argilo-arenoso e capacidade de água disponível (CAD) de 62 mm (Piekarski, 2016). As características químicas do solo anterior a instalação do experimento constam na TABELA 1.

TABELA 1. VARIÁVEIS QUÍMICAS DA CAMADA 0 A 20 CM DO SOLO ANTERIOR A IMPLANTAÇÃO DO EXPERIMENTO

MO	pH	Al ³⁺	H+Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	CTCpH7,0	P Resina	V	m
%	CaCl ₂	cmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³		%		
2	5.1	0	3.5	1.9	1.0	0.23	6.63	47	47	0

MO - Matéria orgânica; CTC - Capacidade de troca catiônica; V - Saturação por bases; m - Saturação por alumínio.

FONTE: Fundação ABC (2020).

Na área experimental foram implantados quatro experimentos em quatro épocas distintas de semeadura, na primeira semana dos meses de outubro, novembro e dezembro de 2020 e janeiro de 2021. O delineamento experimental

adotado em cada experimento foi de blocos ao acaso, com 4 blocos, 6 tratamentos e parcelas com 15 m² (5 m de comprimento por 3 m de largura). Os tratamentos foram doses de N de 0, 40, 80, 120, 160, 200 kg ha⁻¹ aplicadas logo após a semeadura, a lanço e sem incorporação. As sementes de feijão não foram inoculadas com *Rhizobium*, com a finalidade de avaliar a resposta da cultura sem a influência do inoculante.

A semeadura foi realizada em sistema de semeadura direta sobre palhada de aveia preta com a cultivar IPR Campos Gerais do grupo carioca, tipo II, hábito indeterminado, com ciclo médio de 88 dias. O espaçamento foi 0,40 m entre fileiras e população esperada de 250.000 plantas por hectare. A adubação foi de 400 kg ha⁻¹ do formulado 00-20-20 aplicados no sulco de semeadura e o N foi aplicado em cobertura, a lanço e sem incorporação, na forma de ureia (46% de N) para compor os tratamentos.

2.2 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E DE MASSA, ACÚMULO E ESTADO NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO

A determinação da produtividade de massa e do acúmulo de N pelas plantas de feijoeiro foi realizada no estágio V7, momento em que também foi obtida a leitura com o sensor óptico ativo e feita coleta de solo para determinação de NO₃⁻. Em cada parcela foram coletadas seis plantas sequenciais em uma linha, em local aleatório na área útil da parcela e pesadas para determinação da massa fresca. Após a quantificação da massa fresca, as plantas foram submetidas à secagem em estufa com ventilação forçada de ar a 40 – 60°C até atingir massa constante. Posteriormente, as amostras foram pesadas para determinação da massa seca em g planta⁻¹ e moídas em moinho tipo Wiley para determinação o teor de N-Total conforme o método analítico semi-micro Kjendahl por meio de digestão sulfúrica, destilação e titulação com ácido sulfúrico diluído (SARRUGE & HAAG, 1974).

Para determinação da eficiência de cada tratamento no estado nutricional de N das plantas, foram coletadas aleatoriamente 20 folhas-índice de cada parcela, no estágio fenológico R1 (pleno florescimento). A folha índice corresponde ao terceiro trifólio totalmente desenvolvido a partir do ápice da planta (NEPAR, 2019). Em seguida, em estufa, foram secas com ventilação

forçada de ar a 40 – 60°C até atingir a massa constante e analisadas quanto ao teor de N, com mesma metodologia utilizada para as plantas coletadas no estágio V7.

Na colheita das parcelas experimentais foram descartados 0,5 m em cada extremidade das parcelas e colhidas as quatro linhas centrais, totalizando uma área útil de 6,4m². A colheita foi realizada com colhedora de parcelas experimentais. A massa dos grãos foi corrigida para 13% de umidade e os valores convertidos em kg ha⁻¹.

2.3 OBTENÇÃO DOS DADOS COM SENSOR ÓPTICO ATIVO

Ao longo das quatro épocas de cultivo foram realizadas leituras de refletância com o sensor óptico nos estádios fenológicos V4 e V7. O sensor foi posicionado paralelamente às linhas da cultura, em altura de 0,8 m acima do dossel em uma frequência de 5 Hz, sendo avaliadas as 2 linhas centrais de cada parcela (FIGURA 2).

FIGURA 2 - LEITURA COM SENSOR ÓPTICO ATIVO NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V7 DO FEIJOEIRO



FONTE: O autor (2022).

O sensor utilizado foi o Otmis, modelo GS-6200 (JACTO BRASIL) (FIGURA 3), que emite sua própria fonte de luz modulada a partir de um LED (*light emitting diode*). A refletância do alvo é detectada por três fotodetectores que trabalham na região do vermelho (V, 670 nm), na região do red-edge (RE, 730 nm) e na região do infravermelho próximo (IVP, 780 nm). A coleta de dados foi georreferenciada com um receptor GNSS OTMIS 5 (JACTO BRASIL) conectado ao coletor de dados configurado a uma frequência de 5 Hz (5 leituras por segundo). As refletâncias obtidas por cada banda foram coletadas separadamente, possibilitando o cálculo de vários índices de vegetação.

FIGURA 3 – SENSOR ÓPTICO ATIVO OTMIS GS 6200 - JACTO



FONTE: O autor (2022).

2.4 NITRATO NO SOLO

As amostras de solo para determinação de nitrato foram coletadas em duas profundidades 0 a 10 cm e 0 a 30 cm no estágio fenológico V7 das plantas em cada época de cultivo, no momento da leitura com o sensor óptico ativo e determinação da massa das plantas, na entrelinha da cultura com auxílio de trado calador. Cada amostra foi composta por oito subamostras coletadas

aleatoriamente na área útil da parcela. As amostras foram congeladas para análise nos laboratórios do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Paraná.

O nitrato foi determinado por espectrofotometria com adição de zinco metálico (Heinzmann et al., 1984), onde foram preparadas duas soluções, uma com adição de zinco metálico e outra sem adição de zinco metálico. Após a leitura em espectrofotômetro de absorção ultravioleta com comprimento de onda de 210nm, foi subtraído o valor da solução sem zinco da solução com zinco, resultando na concentração de nitrato.

Foram calculados os níveis críticos de $N-NO_3^-$ no solo para as profundidades 0 – 10 e 0 – 30 cm no estágio fenológico V7 no ambiente estudado. Foi considerado o nível crítico de $N-NO_3^-$ no solo os teores mínimos suficientes para obtenção de 90% do rendimento potencial.

2.5 COLETA DE DADOS CLIMÁTICOS

Os dados diários de temperatura máxima, média, mínima e precipitação pluvial durante o período de condução do experimento, foram obtidos a partir de uma estação meteorológica instalada a 100 m do experimento. Para melhor compreensão dos dados climáticos e condição de umidade do solo entre épocas de semeadura, foi calculado o balanço hídrico sequencial em decêndios, com os dados coletados pela estação meteorológica. O balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água no solo e resulta da aplicação do princípio da conservação de massa para a água em um volume de solo. Este sistema permite calcular a dinâmica da água no solo a partir do armazenamento, deficiência e excedentes hídricos. Equacionando as entradas e as saídas de água do sistema, é possível obter a variação de armazenamento de água. Entre as diversas variáveis de entrada, a água proveniente da precipitação é a principal, seguida de outras variáveis de difícil quantificação como orvalho, escoamento superficial e sub-superficial e ascensão capilar. Por sua vez, a principal saída no balanço hídrico é a evapotranspiração, seguida do escoamento superficial, drenagem lateral e drenagem profunda. Os valores de evapotranspiração potencial foram obtidos pelo método de Thornthwaite (1948),

enquanto o valor da capacidade de água disponível foi utilizado do trabalho realizado anteriormente no local (PIEKARSKI, 2016).

2.6 DESENVOLVIMENTO DO MODELO PARA APLICAÇÃO EM TAXAS VARIÁVEIS DE NITROGÊNIO

O desenvolvimento do modelo para aplicação em taxa variável de N no feijoeiro baseou-se na diferença entre as leituras com sensor óptico ativo na área avaliada e na faixa de referência. A faixa de referência é uma área da lavoura com aplicação de dose de N suficiente para garantir que as plantas cultivadas não apresentem deficiência do elemento (RAUN et al., 2002). De maneira simplificada, o objetivo do modelo é converter o índice de vegetação fornecido pelo sensor em um valor de dose de N que proporcione o aumento da produtividade do feijoeiro até a dose alcançada na faixa de referência, onde espera-se a máxima produtividade.

A primeira etapa na construção do modelo foi calcular o índice de vegetação NDRE para todas as parcelas a partir dos dados de refletância obtidos pelo sensor (Eq. [1]).

$$NDRE = \frac{(IVP-RE)}{(IVP+RE)} \quad [1]$$

Onde:

IVP = refletância no infravermelho próximo

RE = refletância no red-edge

Para padronizar as leituras e poder aplicar o modelo em diferentes épocas de semeadura ou lavouras, calculou-se o índice INSEY (*in-season estimate of yield*) ou na tradução livre, produtividade estimada no ciclo de cultivo, proposto por Raun, et al. (2001). O INSEY consiste na divisão do valor de NDRE pelo número de dias com temperatura acima da basal, entre a semeadura e a data de leitura com o sensor óptico (Eq. [2]). Segundo MIRANDA & CAMPELO JÚNIOR (2010) a temperatura basal do feijoeiro é de 10°C. Em razão das temperaturas durante a condução dos experimentos ocorrerem acima da basal, foram considerados todos os dias no cálculo do INSEY.

$$INSEY = \frac{NDRE}{DIAS\ ENTRE\ SEMEADURA\ E\ LEITURA} \quad [2]$$

Com os valores de INSEY avaliou-se a relação entre este índice e a produtividade de grãos por análise de regressão, e havendo significância, adotou-se a equação para utilização no modelo.

A próxima etapa foi determinar se o índice INSEY permite distinguir safras com e sem resposta do feijoeiro ao N, utilizando o índice de resposta (IR), proposta por Raun et al. (2002). O IR foi calculado pela divisão do INSEY médio das parcelas onde utilizou-se a dose mínima de N recomendada para o feijoeiro, pela média do INSEY da parcela com dose de N correspondente a faixa de referência (Eq. [3]). Se o IR for maior que 1,00, estima-se que não haverá resposta à adubação nitrogenada na safra em andamento, enquanto se o IR for menor do que 1,00, espera-se resposta.

$$IR = \frac{INSEY\ parcelas}{INSEY\ refer\ência} \quad [3]$$

Foi considerada dose mínima de 40 kg ha⁻¹ de N. Enquanto como faixa de referência serão consideradas as parcelas do tratamento (dose de N) que proporcionar o maior NDRE nas leituras nos estádios V4 ou V7.

Para melhor ajuste do modelo utilizou-se um fator de multiplicação. Este fator tem por objetivo ajustar tanto a necessidade de N a ser aplicada quanto a eficiência da adubação nitrogenada para a região de cultivo. Este fator foi obtido da seguinte maneira: primeiramente estimou-se a produtividade de grãos utilizando o INSEY médio de cada parcela e a equação de regressão obtida entre o INSEY e a produtividade de grãos; em seguida calculou-se a diferença entre a produtividade estimada na parcela e a produtividade estimada na dose de N para obtenção da máxima produtividade (faixa de referência); por último, dividiu-se a média da diferença de produtividade pela dose de N aplicada na faixa de referência (Eq. [4]).

$$Fator = \frac{DPE}{Dose\ faixa\ de\ refer\ência} \quad [4]$$

Em que:

DPE - Diferença entre produtividade estimada na faixa de referência e em cada parcela.

Como geralmente a equação exponencial é a que melhor se ajusta para a relação produtividade de grãos e dose de N, a equação final que resulta na recomendação da dose N para o feijoeiro é definida como (Eq. [5]):

$$\text{Dose de N} = a \exp(b \times INSEY_{\text{referência}}) - a \exp(b \times INSEY_{\text{parcela}}) \times \text{Fator} \quad [5]$$

Em que:

INSEY – NDRE dividido pelo número de dias entre a semeadura e a leitura com o sensor com temperatura acima da basal.

2.7 AVALIAÇÃO DO MODELO

Para avaliação do modelo de aplicação de N em cobertura foram testadas as equações com ajuste significativo e selecionada a que melhor predisse a produtividade de grãos. A equação compôs o modelo (Eq. [5]) que foi testado utilizando os dados das parcelas das três épocas restantes, visando fazer uma validação cruzada. As doses geradas pelo modelo foram correlacionadas com a dose considerada ideal que deveria ser aplicada, utilizando o erro quadrático médio (RMSE). Esta dose ideal foi obtida pela diferença entre a dose da faixa de referência menos a dose já aplicada na parcela, antes da leitura com o sensor.

2.8 ANÁLISES ESTATÍSTICA

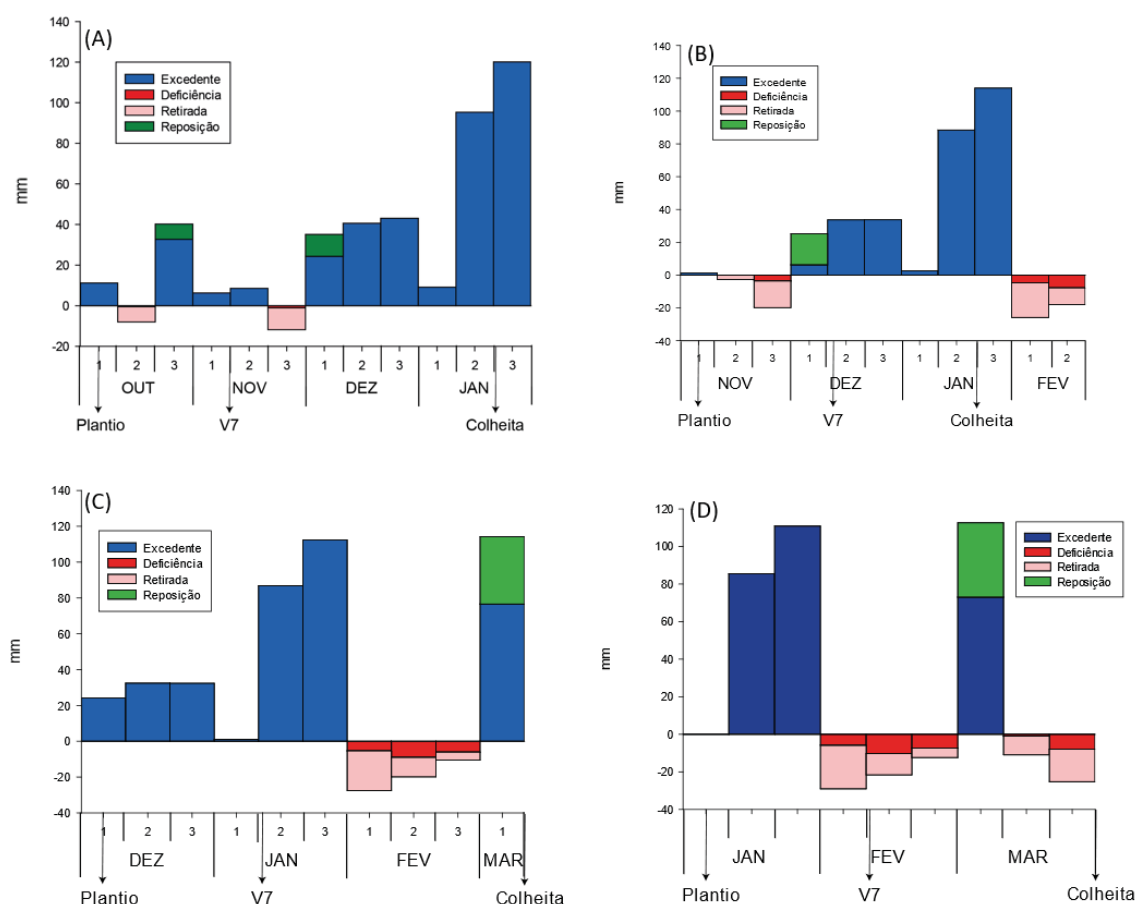
Cada época de semeadura foi avaliada separadamente. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (teste de Bartlett). Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de regressão. Como critério de significância foi adotado o R^2 e a significância dos coeficientes de regressão ao nível de 5% de

probabilidade. Os dados de produtividade de grãos, índice de vegetação NDRE e nitrato no solo foram submetidos a análise de correlação (Teste Pearson).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os quatro períodos de cultivo do feijoeiro ocorreram variações na disponibilidade de água, que explicam parte dos resultados obtidos. As variações nos balanços hídricos sequenciais para as quatro épocas de cultivo se encontram no Gráfico 1.

GRÁFICO 1 – BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL PARA O FEJÓEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021, ARAPOTI - PR



Durante a época de semeadura de outubro (GRÁFICO 1A) houve suprimento adequado de água durante todo o ciclo, sem períodos de déficit hídrico. Enquanto na época semeada em novembro (GRÁFICO 1B), no terceiro

decêndio após a semeadura ocorreu um período de déficit hídrico antecedente ao estágio V7. Na época semeada em dezembro (GRÁFICO 1C), ocorreu um grande período de déficit hídrico durante os estádios reprodutivos do feijoeiro. Em janeiro, houve a presença de déficit hídrico durante os estádios vegetativos e reprodutivos, afetando diversos momentos durante o crescimento e desenvolvimento do feijoeiro (GRÁFICO 1D).

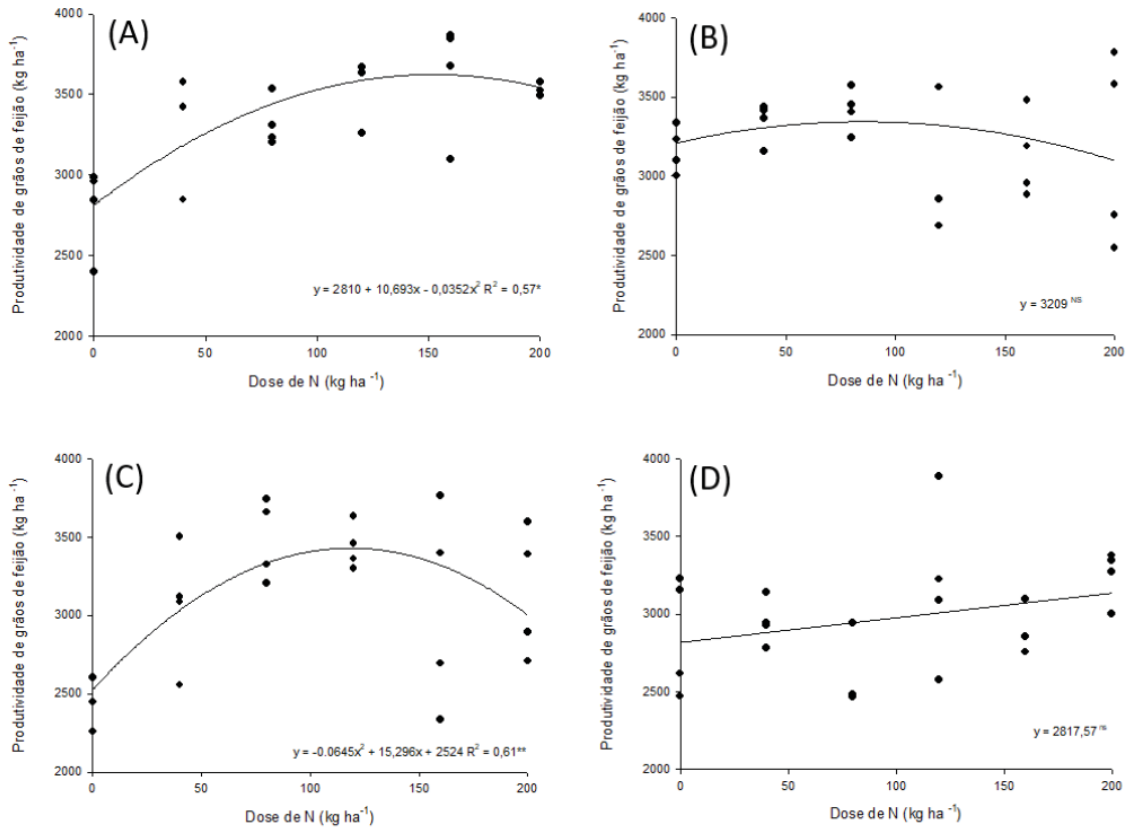
3.1 PRODUTIVIDADE DE GRÃOS E DE MASSA SECA DA PLANTA

3.1.1 Produtividade de grãos

A resposta do feijoeiro à adubação nitrogenada mostrou-se variável nas quatro épocas de semeadura. Nas semeaduras feitas em outubro e dezembro houve efeito da adubação na produtividade de grãos (GRÁFICO 2A, GRÁFICO 2C, FIGURA 4), o que não foi observado quando o feijoeiro foi semeado em novembro e janeiro (GRÁFICO 2B, GRÁFICO 2D).

A adubação nitrogenada aumentou de forma quadrática a produtividade de grãos nas épocas de outubro e dezembro, respondendo até doses de 152 e 118 kg ha⁻¹ de N, representando um aumento de 22,4% e 26,4%, respectivamente, comparando com o tratamento controle (0 kg ha⁻¹ de N). A redução de produtividade em doses elevadas pode ocorrer devido a diminuição da taxa fotossintética ocasionada pela limitação de CO₂ em ambientes com excessivo crescimento vegetal, induzido por doses elevadas de N (SILVA et al., 2014).

GRÁFICO 2 – PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DE DOSES CRESCENTES DE NITROGÊNIO APLICADAS LOGO APÓS A SEMEADURA, ARAPOTI – PR.



** : significativo a 1%; * : significativo a 5%; ns: não significativo.

FONTE: O autor (2022)

FIGURA 4 - DIFERENÇA DE CRESCIMENTO ENTRE PLANTAS DE FEIJOEIRO SEMEADAS EM DEZEMBRO DE 2020 E QUE RECEBERAM A APLICAÇÃO DE 160 (ESQUERDA) E 0 (DIREITA) kg ha⁻¹ DE NITROGÊNIO.



FONTE: O autor (2020)

Esta variação nos efeitos da adubação nitrogenada no feijoeiro é observada na literatura. Furtini et al. (2006) e Boersma et al. (2021) não encontraram resposta do feijoeiro a adubação nitrogenada. Em contra partida, Bernardes et al. (2014) e Soratto et al. (2017) verificaram aumento da produtividade com a aplicação de N em cobertura. Santos & Fageria (2007) e Soratto et al. (2014) atribuem a variabilidade de resposta do feijoeiro ao N à cultivar utilizada, tempo de adoção do sistema de cultivo e disponibilidade de N no solo. Leal et al. (2017) caracterizaram as cultivares do feijoeiro em relação a eficiência e resposta ao N, e a cultivar IPR Campos Gerais utilizada neste experimento está entre as eficientes e responsivas ao N, indicando que a ausência de respostas nos períodos de cultivo iniciados em novembro de 2020 e janeiro de 2021, não foi devido a cultivar.

Na época semeada em novembro o motivo que contribuiu para a falta de resposta foi o período de quatro dias sem chuva após a aplicação do fertilizante nitrogenado (ureia) (GRÁFICO 2B). Segundo Tasca (2011), a volatilização de amônia (NH³⁻) devido a aplicação da ureia em superfície pode chegar a 14 kg

ha⁻¹ de N por dia. Outro motivo pode ter sido a dificuldade da planta em acessar o N disponível no solo devido à pouca umidade no solo. O balanço hídrico sequencial calculado para época semeada em novembro (GRÁFICO 1B), mostra a presença de um déficit hídrico entre os primeiros estádios vegetativos da cultura. Terán & Singh (2002) caracterizaram a cultura do feijoeiro como sensível às condições de deficiência hídrica. Esta sensibilidade ocorre devido ao sistema radicular ser pouco desenvolvido e também pela baixa capacidade de recuperação após o período de déficit hídrico (GUIMARÃES, 1992). Zimmermann et al (1988) ressalta que períodos de estiagem nos estádios iniciais causam efeitos no crescimento da planta e das raízes, devido à redução no tamanho e no número de folhas. Deste modo, a falta de resposta ao N nesta época de semeadura também pode ser atribuída à redução do sistema radicular ocasionado pelo déficit hídrico nos estádios iniciais do ciclo.

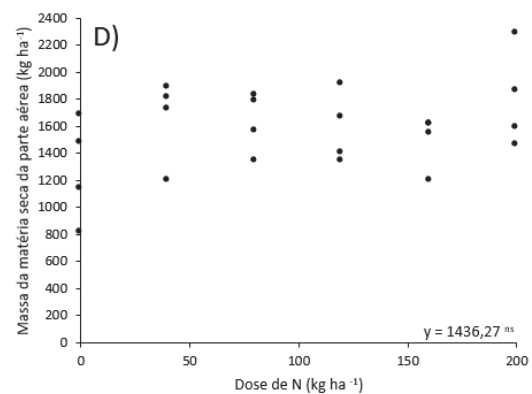
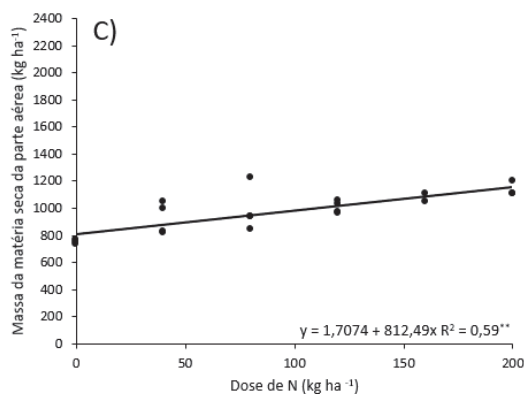
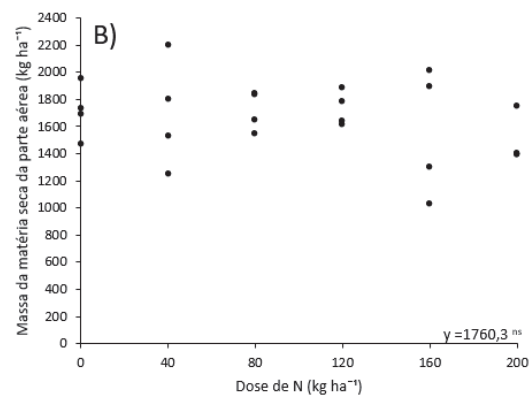
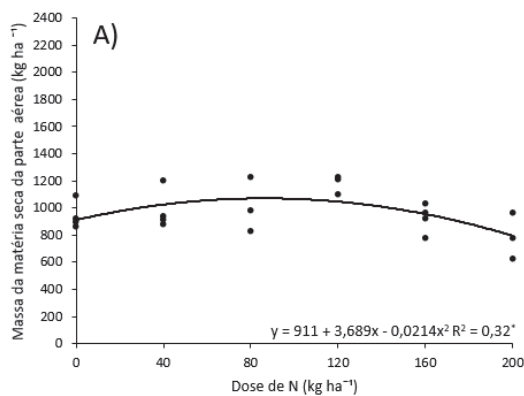
Para as plantas semeadas na época de janeiro também ocorreu déficit hídrico, mas durante os estádios fenológicos vegetativo e reprodutivo (GRÁFICO 1D). Segundo Magalhães et al. (1979) o déficit hídrico nos estádios vegetativos tem efeito no crescimento das raízes e conseqüentemente na capacidade de absorção de nutrientes do solo, assim como nos estádios reprodutivos os efeitos são aborto, queda de flores e de vagens recém-formadas, reduzindo o número de vagens por planta comprometendo a produtividade de grãos. Deste modo, a falta de resposta ao N pode ser atribuída ao potencial de resposta ao N das plantas com sistema radicular comprometido, assim como a redução de produtividade resultante pelo aborto, queda de flores e de vagens.

Na época semeada em outubro, na qual a aplicação de N aumentou a produtividade de grãos, não são verificados períodos com deficiência hídrica (GRÁFICO 1A), indicando que a disponibilidade de água para a planta é importante para que ocorra resposta ao N. Para a época semeada em dezembro (GRÁFICO 1C), onde também houve efeito positivo da adubação na produtividade de grãos, ocorreu um período de déficit hídrico nos estádios iniciais do período reprodutivo, causando um decréscimo na dose de máxima resposta (152 para 118 kg ha⁻¹ de N), entretanto este déficit hídrico não foi suficiente para limitar a resposta em N do feijoeiro.

3.1.2 Produtividade da matéria seca da parte aérea

Assim como a produtividade de grãos, a matéria seca da parte aérea avaliada no estágio fenológico V7, foi influenciada pelas doses de N nas épocas de outubro e dezembro, o que não ocorreu para as épocas de semeadura de novembro e janeiro. Em outubro, a resposta ao N ocorreu até a dose de 86 kg ha⁻¹ e promoveu acréscimo de 14,8% comparado com o tratamento controle (0 kg ha⁻¹ de N). Na época de dezembro o efeito foi linear até a dose de 200 kg ha⁻¹. Segundo Bergonci et al. (2001), o acúmulo de matéria seca é decorrente do mecanismo fotossintético, deste modo, todo e qualquer fator que interfira na fotossíntese irá afetar o acúmulo de matéria seca. Portanto, a falta de resposta ao N na produtividade de massa seca nos períodos de novembro e janeiro pode ser atribuída aos períodos de déficit hídrico que ocorreram durante o período anterior à avaliação (estádio V7) (GRÁFICO 3B e 3D).

GRÁFICO 3 – PRODUTIVIDADE DA MASSA SECA DA PARTE AÉREA DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DE APLICAÇÕES CRESCENTES DE NITROGÊNIO, ARAPOTI – PR



** : significativo a 1%; * : significativo a 5%; ^{ns}: não significativo.

FONTE: O autor (2022).

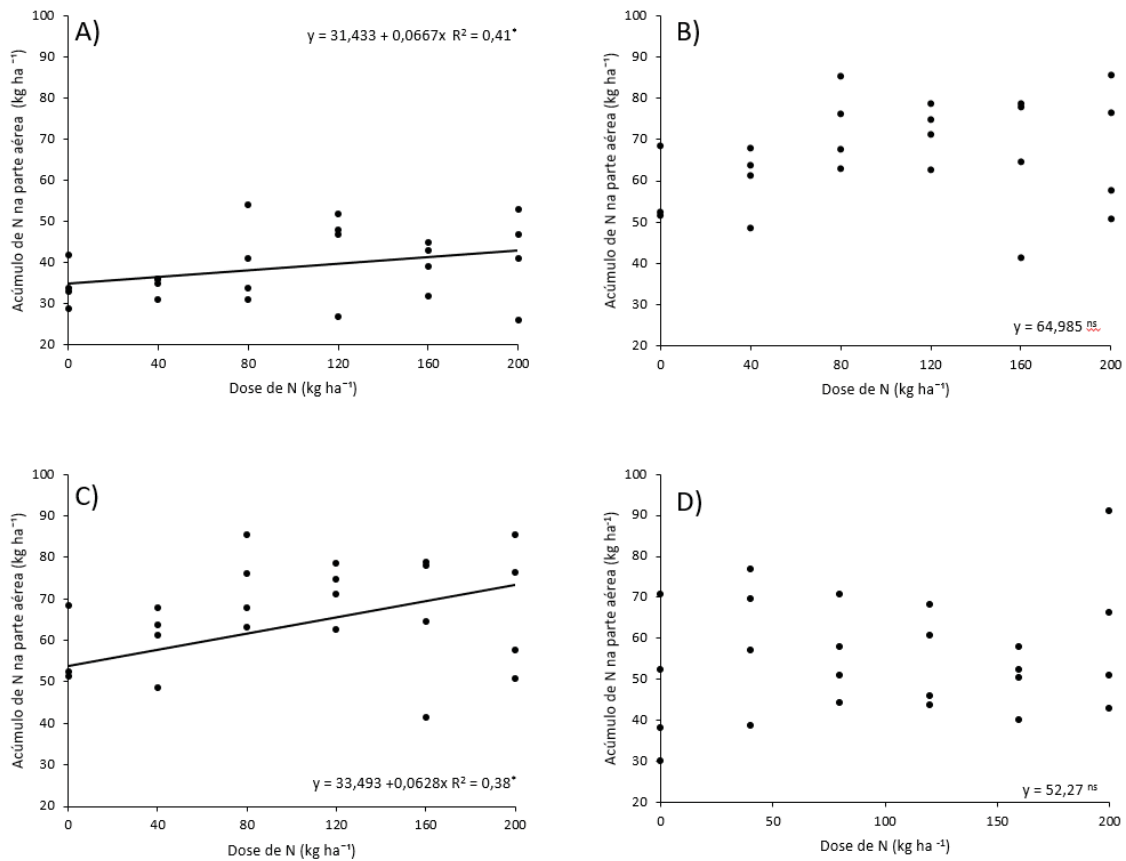
3.2 NITROGÊNIO NA PLANTA E NO SOLO

3.2.1 Acúmulo de nitrogênio na parte aérea

Em outubro e dezembro a aplicação de N em cobertura proporcionou incrementos lineares na quantidade de N acumulada na parte aérea do feijoeiro (GRÁFICO 4A e 4C), refletindo o acúmulo de matéria seca da parte aérea (GRÁFICOS 3A e 3C). Segundo Fageria (2007) e Souza et al. (2011) a acumulação de N na parte aérea em função das doses crescentes de N ocorrem devido ao maior crescimento das plantas e absorção de N do solo. No ciclo completo, o acúmulo pode ser de 46 kg para cada tonelada de grãos produzidos (NEPAR, 2019). Considerando que a produtividade obtida as diferentes épocas de semeadura variou entre 2,5 e 3,8 t (GRÁFICO 1), até o estadio V7, a quantidade absorvida foi aproximadamente 40% da exigida até o final do ciclo.

Uma vez que o acúmulo é obtido pelo teor do N na matéria seca, o aumento linear observado na semeadura de outubro indica que, nas maiores doses, a quantidade absorvida não refletiu em aumento de biomassa aérea (GRÁFICO 3A).

GRÁFICO 4 – ACÚMULO DE NITROGÊNIO NA PARTE AÉREA DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DAS DOSES DE NITROGÊNIO APLICADAS, ARAPOTI – PR.



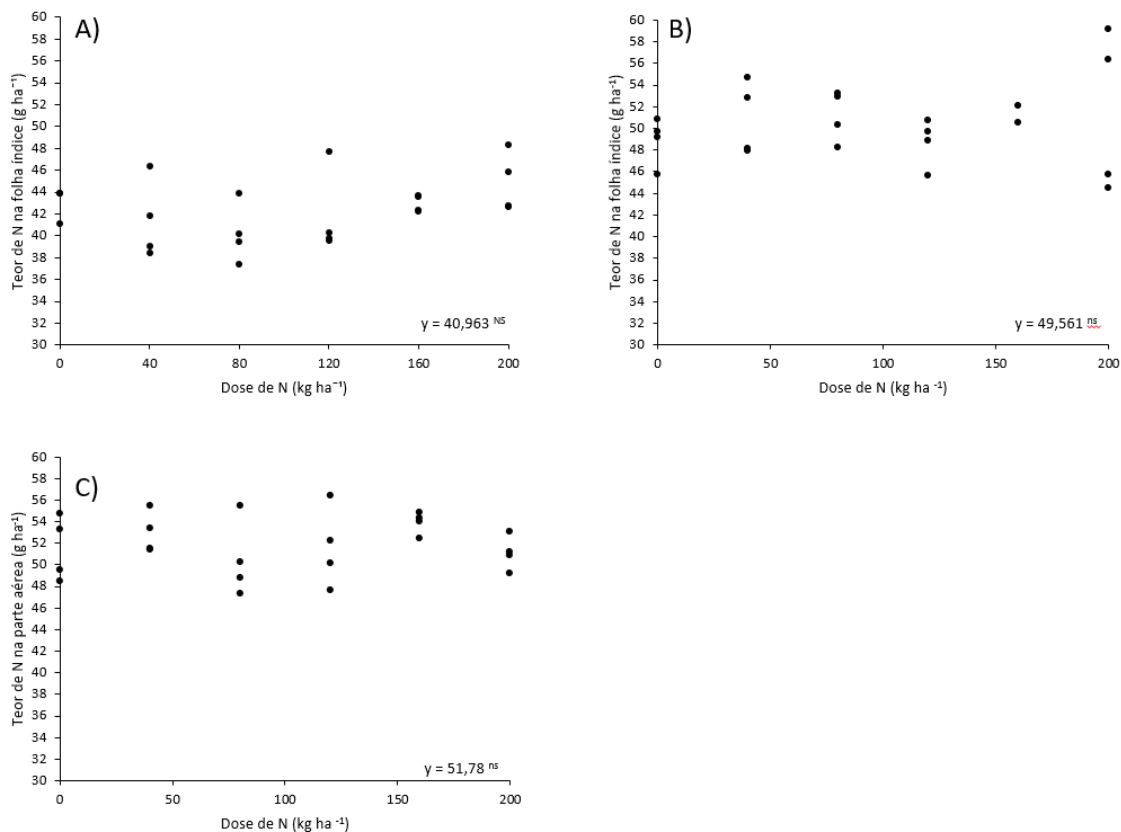
** : significativo a 1%; * : significativo a 5%; ns: não significativo.

FONTE: O autor (2022)

3.2.2 Teor de nitrogênio na folha índice

O teor de N na folha índice do feijoeiro não foi influenciado pelas doses de N em todas as épocas estudadas (GRÁFICO 5B, 5C e 5D), mesmo naquelas em que houve aumento de produtividade com a adição do nutriente (GRÁFICO 5C). Todos os teores são considerados adequados, variando entre 30 – 50 g kg (NEPAR, 2019; AMBROSANO et al., 1997). Estes resultados indicam que apesar dos valores se mostrarem dentro da faixa de referência estipulada como adequada, a avaliação dos teores de N na folha índice não é um método confiável, ou que os níveis precisam de ajustes para melhor expressar o estado nutricional da cultura do feijoeiro.

GRÁFICO 5 – TEOR DE NITROGÊNIO NA FOLHA ÍNDICE DO FEIJOEIRO SEMEADO EM NOVEMBRO (A) E DEZEMBRO (B) DE 2020 E JANEIRO (C) DE 2021, EM FUNÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO APLICADAS, ARAPOTI– PR.



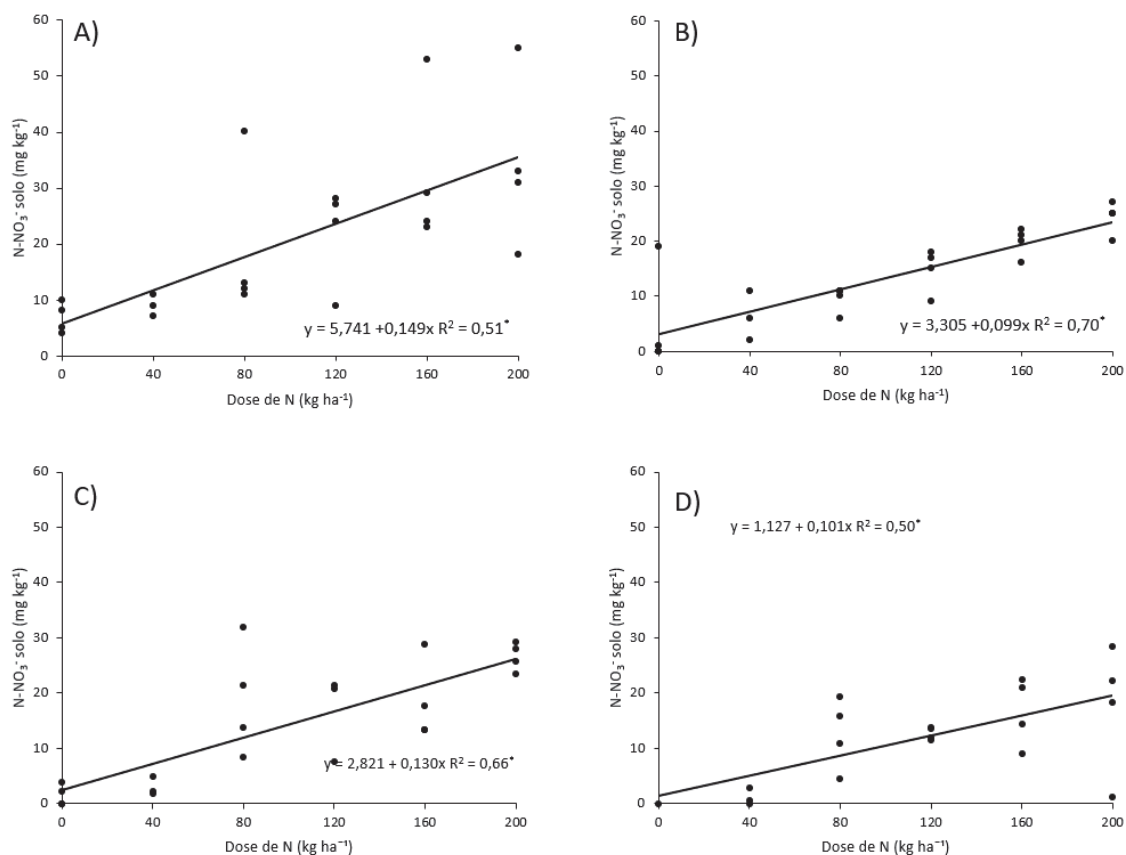
** : significativo a 1%; * : significativo a 5%; ns : não significativo.

FONTE: O autor (2022)

3.2.3 Nitrado no solo

Os teores de nitrato (NO₃⁻) no solo foram analisados somente para as épocas semeadas em outubro e novembro. Houve aumento linear para o nitrato analisado no estágio V7 do feijoeiro na profundidade de 0 – 10 e 0 – 30 cm de profundidade, para as duas épocas em questão (GRÁFICO 6). Estes resultados reforçam que o fato do feijoeiro semeado em novembro não ter respondido à adubação nitrogenada, está ligado a capacidade de absorção do elemento e não à disponibilidade de N no solo.

GRÁFICO 6 – TEOR DE NITRATO NO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 – 10CM NAS ÉPOCAS DE OUTUBRO (A) E NOVEMBRO (C) E NA PROFUNDIDADE DE 0 – 30CM NAS ÉPOCAS DE OUTUBRO (B) E NOVEMBRO (D) DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO E NOVEMBRO EM FUNÇÃO DE DOSES DE NITROGÊNIO APLICADAS, ARAPOTI – PR.

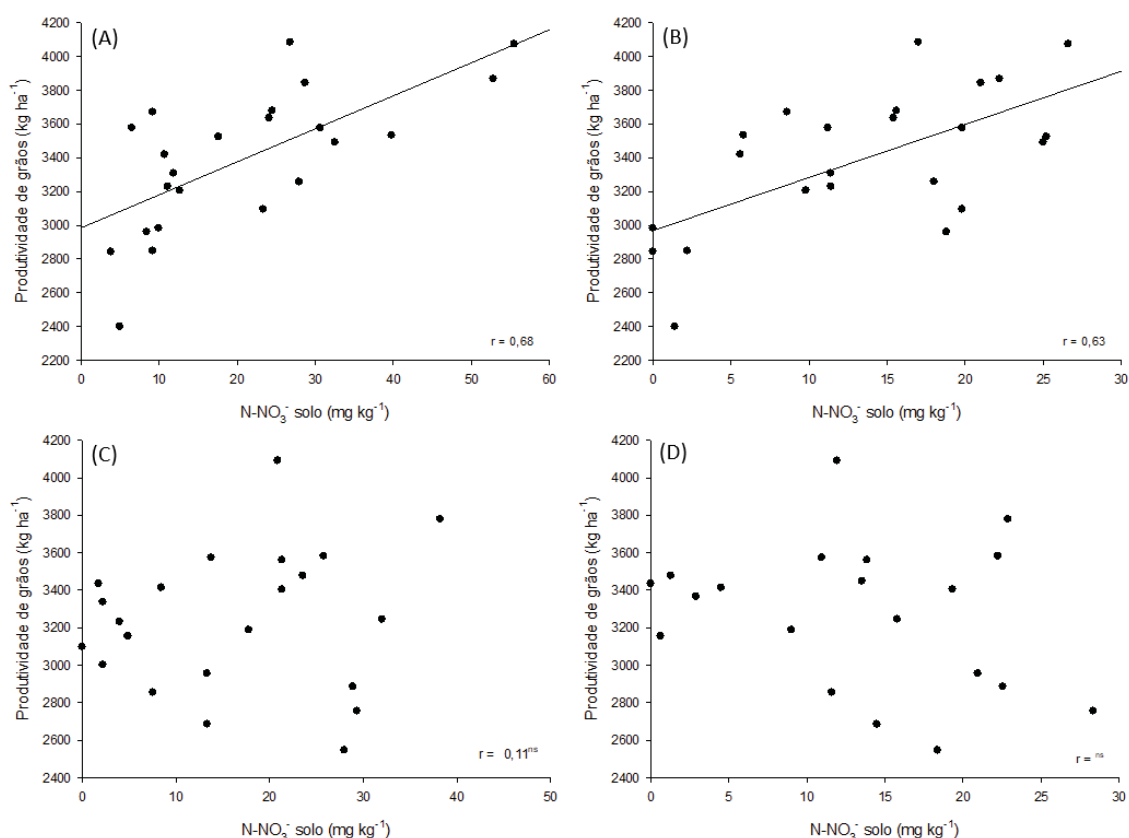


** : significativo a 1%; * : significativo a 5%; ns : não significativo.

FONTE: O autor (2022).

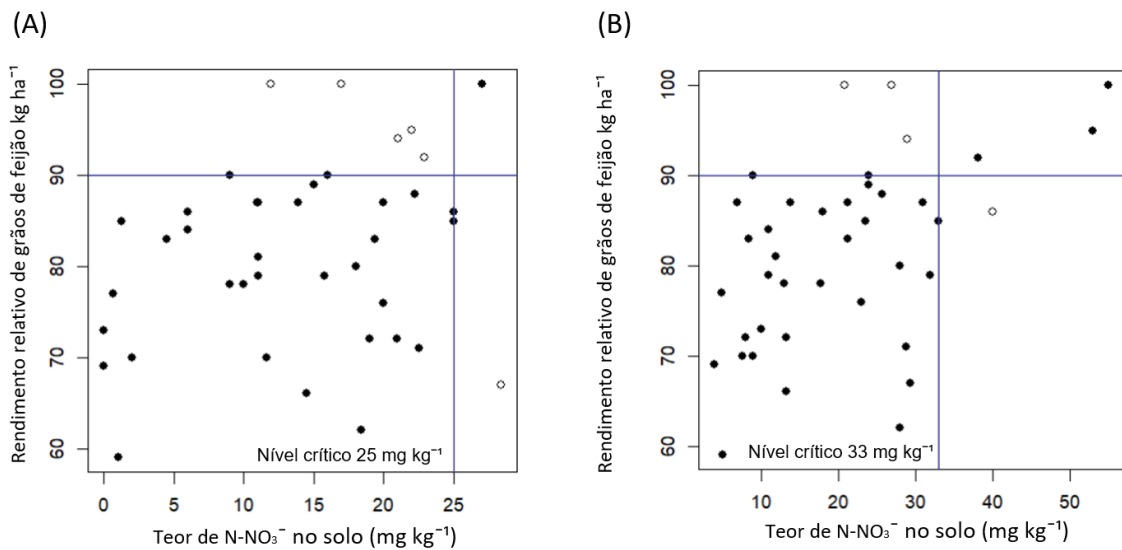
Percebe-se também uma forte correlação entre o teor de nitrato no solo no estádio V7 da cultura com a produtividade de grãos na semeadura de outubro (GRÁFICO 7A e 7B), quando as doses de N aplicadas proporcionaram variação na produtividade de grãos (GRÁFICO 2A). Na época seguinte, quando a produtividade não foi alterada (GRÁFICO 2B), não houve esta relação (GRÁFICO 7C e 7D).

GRÁFICO 7 – TEOR DE NITRATO NO SOLO NA PROFUNDIDADE DE 0 - 10CM NAS ÉPOCAS DE OUTUBRO (A) E NOVEMBRO (C) E NA PROFUNDIDADE DE 0 - 30CM NAS ÉPOCAS DE OUTUBRO (B) E NOVEMBRO (D) EM FUNÇÃO DA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO, ARAPOTI – PR



O nível crítico de N-NO₃⁻ no solo para as profundidades de 0 – 10 e 0 – 30 cm, no estágio fenológico V7 para o ambiente estudado foi de 33 mg kg⁻¹ para profundidade de 0 – 10 cm e 25 mg kg⁻¹ para profundidade de 0 – 30 cm. Rambo (2008) encontrou resultados semelhantes, com nível crítico de NO₃⁻ de 20 mg kg⁻¹ para a cultura do milho. Portanto, o teor de N-NO₃⁻ tem potencial para ser usado como indicador da disponibilidade de N no solo para cultura do feijoeiro.

GRÁFICO 8 – DETERMINAÇÃO GRÁFICA DO NÍVEL CRÍTICO DE NITRATO NO SOLO, A PARTIR DA RELAÇÃO ENTRE TEOR DE NITRATO NO SOLO E RENDIMENTO RELATIVO DE GRÃOS DE FEIJÃO, ARAPOTI – PR.



Considerando os resultados obtidos com as avaliações de N na planta e no solo, pode-se inferir que são ineficientes no auxílio para recomendação deste nutriente no feijoeiro. Houve aumento de produtividade de grãos quando aumentou o teor de NO₃⁻ no solo (GRÁFICO 7A E 7B) quando houve aumento do acúmulo de N na planta em V7 (GRÁFICO 4A). O aumento do N acumulado na planta, no entanto, depende mais do aumento da massa seca produzida do que do teor de N nos tecidos. Mas o aumento de NO₃⁻ no solo não significa necessariamente aumento de N absorvido pela planta. E por fim, a determinação do N na folha índice não permite distinguir situações de resposta ou não à aplicação do nutriente.

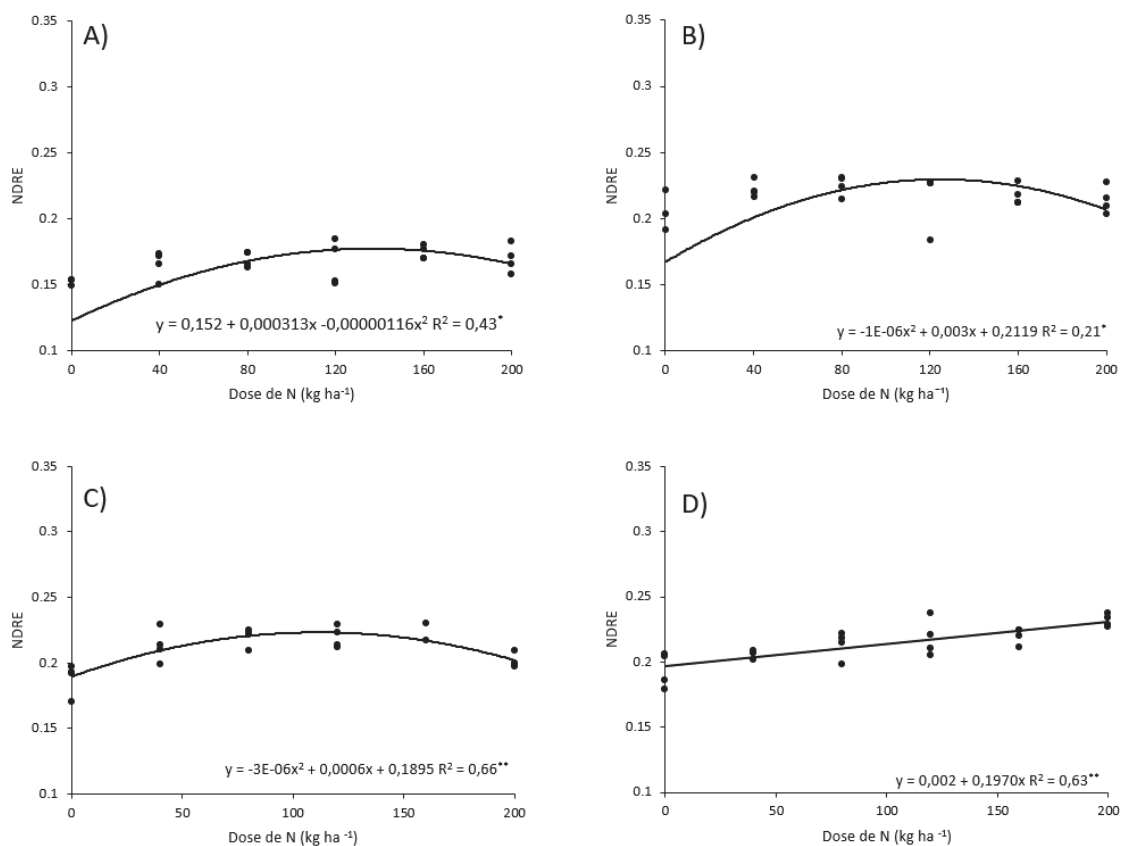
Todas estas variações são decorrentes da dinâmica do N no solo. Segundo Solie et al (1999) o N pode variar no espaço em curtas distâncias, principalmente em função da matéria orgânica, enquanto sua variação no tempo é devida aos seus principais processos de transformação, amonificação, nitrificação, desnitrificação e imobilização (MENGEL & KIRKBY, 2001).

3.3 DESEMPENHO DO SENSOR ÓPTICO ATIVO

3.3.1 Doses de nitrogênio

O índice de vegetação NDRE obtido por meio da leitura no estágio fenológico V4 e V7 permitiu distinguir as doses crescentes de N para todas as épocas avaliadas (GRÁFICOS 9 e 10). A adubação nitrogenada aumentou o NDRE obtido em V4 nas épocas de outubro, novembro e dezembro, até doses de 134 , 103 e 112 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, enquanto a época de janeiro a variação foi linear. Nas leituras realizadas em V7, o NDRE nas plantas semeadas em outubro e dezembro, aumentaram até as doses de N de 129 e 132 kg ha⁻¹. Resposta linear foi observado para leituras em janeiro, enquanto novembro não houve alteração. Povh et al. (2015) avaliando o índice de vegetação NDRE no feijoeiro, encontrou variação linear até a dose de 120 kg ha⁻¹ de N no estágio fenológico V7.

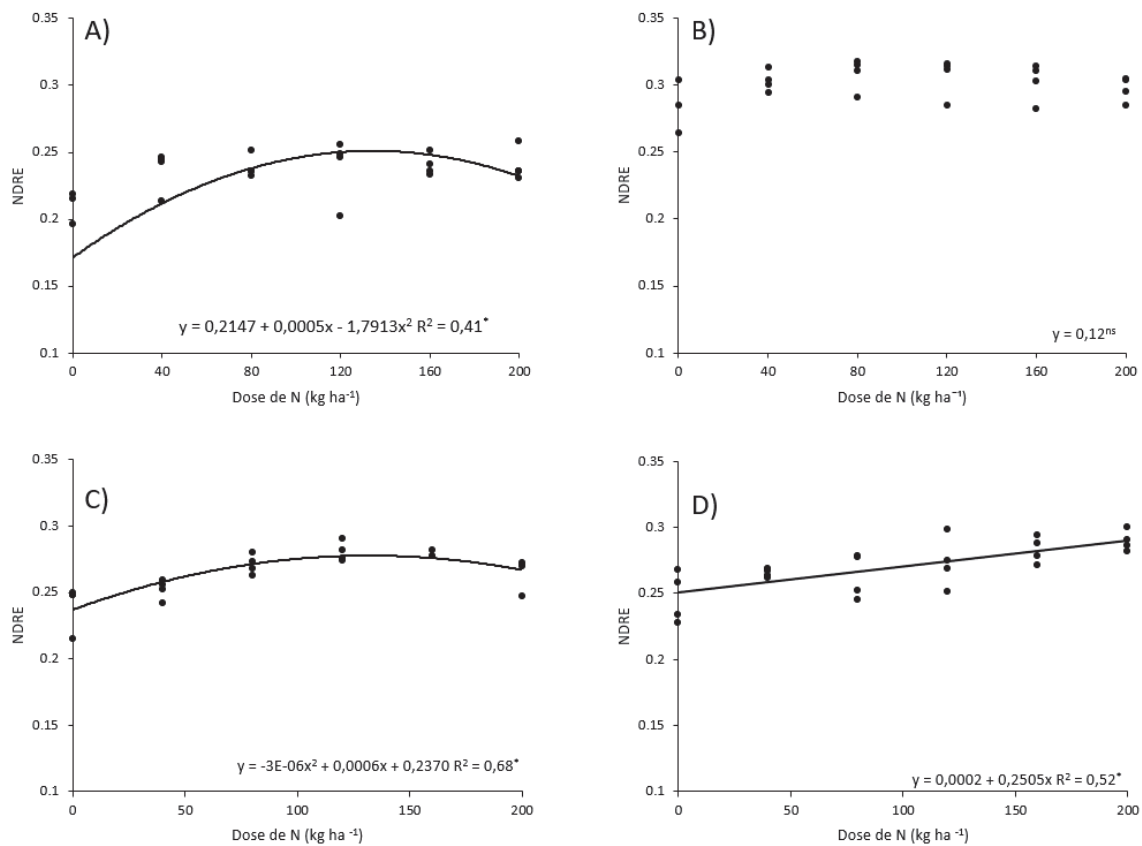
GRÁFICO 9 – ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDRE NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V4 DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DE APLICAÇÕES CRESCENTES DE N, ARAPOTI – PR



** : significativo a 1%; * : significativo a 5%; ns : não significativo.

FONTE: O autor (2022)

GRÁFICO 10– ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDRE NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V7 DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DE APLICAÇÕES CRESCENTES DE N, ARAPOTI – PR



** : significativo a 1%; * : significativo a 5%; ns: não significativo.

FONTE: O autor (2022)

3.3.2 Predição da produtividade

As correlações entre a produtividade de grãos da época semeada em outubro foram moderadas, novembro fraca, enquanto dezembro e janeiro foram fortes com o índice de vegetação NDRE avaliado no estágio fenológico V4 e V7 (GRÁFICO 11 E GRÁFICO 12) Os resultados indicam que o NDRE obtido nos dois estádios de vegetação pelo sensor óptico ativo permite estimar a produtividade de grãos do feijoeiro.

GRÁFICO 11 – PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDRE NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V4, ARAPOTI – PR

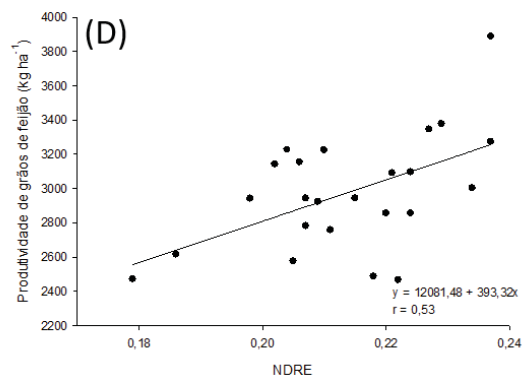
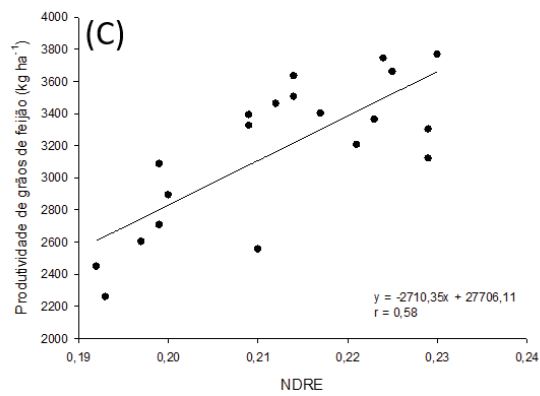
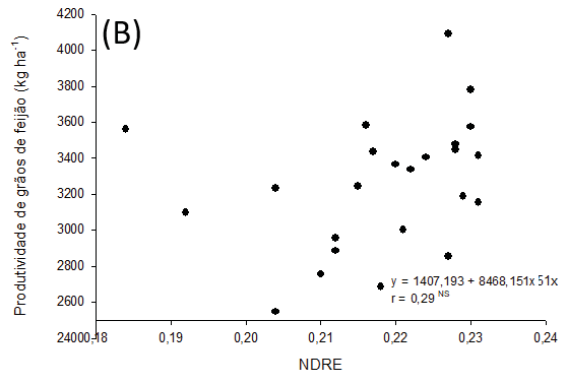
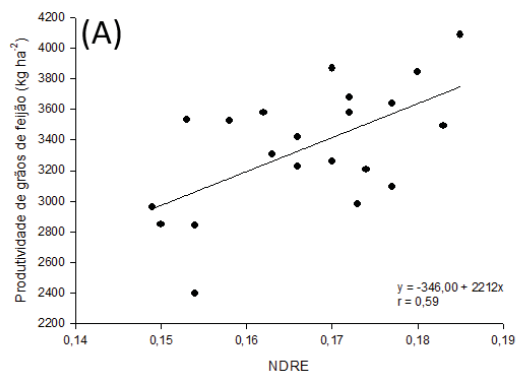
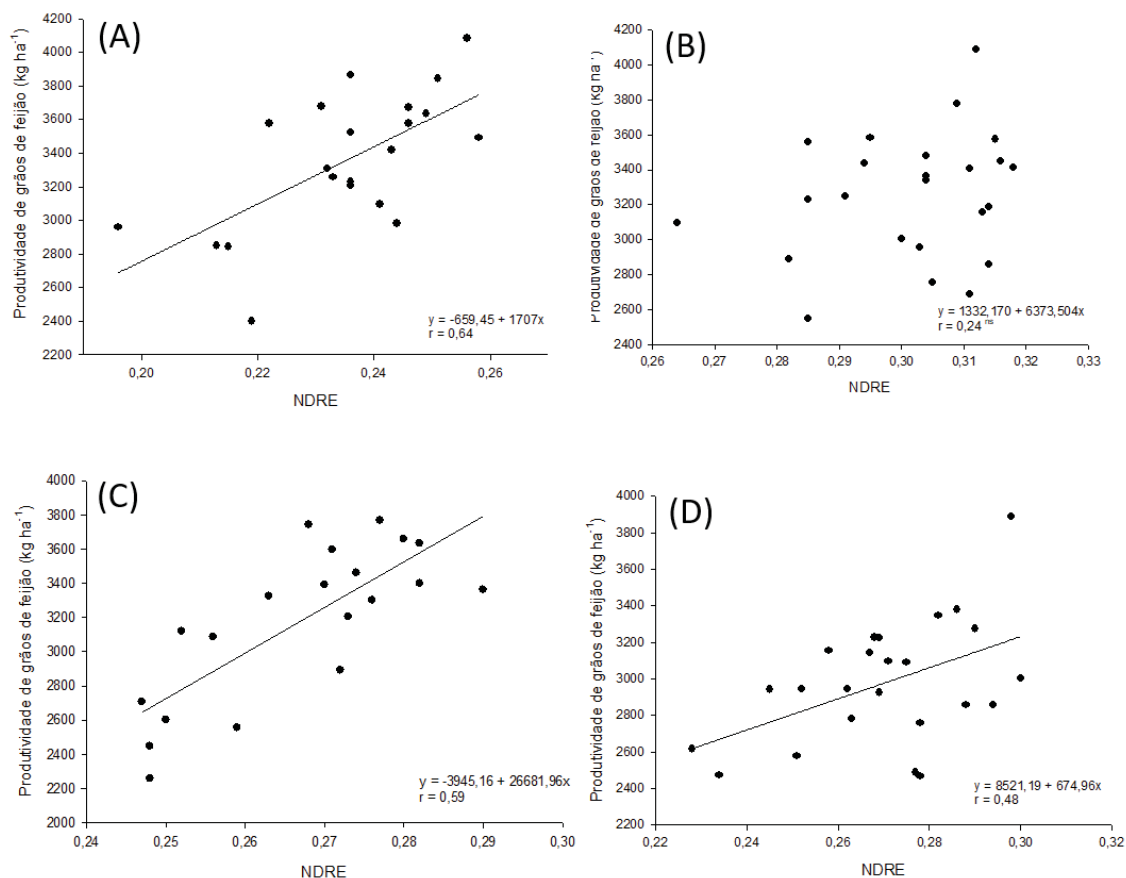


GRÁFICO 12 – PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO SEMEADO EM OUTUBRO (A), NOVEMBRO (B) E DEZEMBRO (C) DE 2020 E JANEIRO (D) DE 2021 EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO NDRE NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V7, ARAPOTI – PR



3.4 MODELO PARA APLICAÇÃO DE DOSES VARIÁVEIS DE NITROGÊNIO

O feijoeiro se mostrou variável à resposta do N, das quatro épocas avaliadas; em duas houve resposta positiva na produtividade de grãos, enquanto em outras duas não houve efeito. Deste modo, para avaliação do potencial do sensor óptico ativo em prever a resposta do feijoeiro ao N utilizando leituras no estágio V4 e V7 em todas as épocas de semeadura foi calculado o IR utilizado como valor da faixa de referência o INSEY obtido nas parcelas que receberam doses de 120 kg ha⁻¹ de N, e o INSEY obtido nas parcelas que receberam dose considerada como do produtor 40 kg ha⁻¹ de N, comumente utilizada na semeadura. Nas épocas de outubro e dezembro avaliadas em V4 o IR foi inferior a 1,00, enquanto nas épocas de novembro e janeiro, onde não houve resposta, os índices foram iguais ou superiores a 1,00 (Tabela 2). Em V7 não foi possível

utilizar o IR para prever a resposta ao N, possivelmente pela saturação do NDRE neste estágio fenológico, dificultando a diferenciação entre tratamentos. Povh et al. (2015), avaliando feijoeiro, encontrou saturação do índice NDVI em V7, esta saturação pode ocorrer devido a alta refletância no infravermelho próximo e grande absorção na região do red-edge em função da biomassa e dos teores de clorofila que elevam o índice de vegetação até o limite. Deste modo, os resultados indicam que esta metodologia consegue prever em V4 a resposta do feijoeiro a adubação nitrogenada. Portanto, é possível indicar que a adubação em cobertura, independente da forma de aplicação, dose fixa ou variável, seja realizada somente quando o IR em V4 for menor que 0,99, garantindo que haverá resposta pelo feijoeiro à dose aplicada. Estes dados validam que o sensor óptico ativo aliado as metodologias de faixa de referência e IR são ferramentas que permitem avaliar com antecedência a resposta do feijoeiro ao N.

TABELA 2 – DOSE DE N PARA MÁXIMA PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DE FEIJOEIRO E ÍNDICES DE RESPOSTA À ADUBAÇÃO NITROGENADA ESTIMADOS PELO SENSOR ÓPTICO ATIVO NO ESTÁDIO V4 E V7 NAS DIFERENTES ÉPOCAS DE SEMEADURA.

Época de semeadura	Dose de resposta kg ha ⁻¹ de N	Índice de resposta	
		V4	V7
outubro	152	0,97	0,99
novembro	0	1,01	0,99
dezembro	118	0,97	0,91
janeiro	0	1,00	0,97

FONTE: O autor (2022).

Os maiores valores de NDRE foram obtidos em doses de 134, 103, 112 e 200 kg ha⁻¹ de N em V4 e 129, 132 e 200 kg ha⁻¹ de N em V7 (GRÁFICOS 10 e 11). Devido ao fato do feijoeiro não responder doses superiores 152 kg ha⁻¹ de N, utilizou-se apenas doses abaixo deste valor. Deste modo, considerou-se suas médias, 120 kg ha⁻¹ como a mais indicada para ser utilizada na faixa de referência, pois reflete o pico de resposta do NDRE. Em doses maiores o NDRE diminui, o que limita a aplicação do modelo quando a planta está com suprimento de N acima do necessário para expressar o máximo de produtividade.

Devido ao IR conseguir prever com antecedência a resposta do feijoeiro a adubação nitrogenada, esta metodologia foi adotada como fator inicial e decisório do modelo. Portanto, inicialmente foi calculado o IR, de tal modo que

para parcelas com IR inferiores a 0,99 foram recomendadas doses em taxa variável conforme o modelo, enquanto parcelas com IR superiores a 1,00 a dose recomendada foi 0 kg ha⁻¹, em função de não apresentar potencial de resposta ao N (Tabela 3).

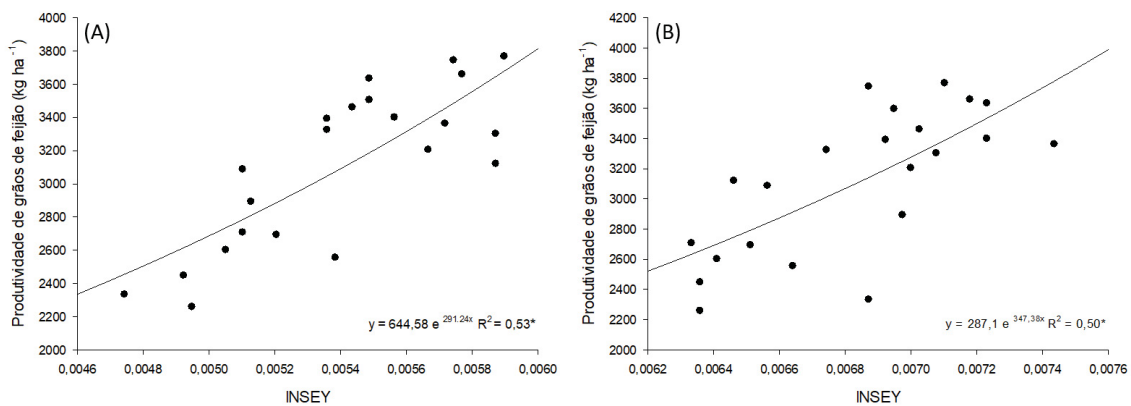
TABELA 3 – COMPARAÇÃO ENTRE DOSES IDEAIS, DOSE FIXA E DOSES GERADAS PELO MODELO NO ESTÁDIO V4 E V7 NAS DIFERENTES ÉPOCAS DE SEMEADURA.

Épocas de semeadura	Dose ideal	Dose fixa	V4		V7	
			Índice de resposta	Dose modelo	Índice de resposta	Dose modelo
OUTUBRO	152	120	0,84	66	0,72	155
	112	120	0,96	16	0,97	18
	72	120	0,92	32	0,86	75
	32	120	1,00	0	1,00	0
	0	120	1,01	0	0,91	51
	0	120	0,92	34	0,88	64
NOVEMBRO	0	120	0,93	34	0,84	103
	0	120	1,02	0	0,97	17
	0	120	1,03	0	1,01	0
	0	120	1,00	0	1,00	0
	0	120	0,98	9	0,93	45
	0	120	0,93	32	0,90	64
JANEIRO	0	120	0,92	33	0,79	95
	0	120	1,01	0	0,94	28
	0	120	1,08	0	0,93	30
	0	120	1,01	0	1,00	0
	0	120	1,13	0	1,11	0
	0	120	1,22	0	1,16	0

FONTE: O autor (2022).

Regressões entre produtividade de grãos e o INSEY foram realizadas para serem utilizadas no modelo de predição (GRÁFICO 14). Foram utilizados os dados da época de semeadura em dezembro, devido ao maior coeficiente de determinação nos estádios V4 e V7. O modelo utilizado foi o exponencial, em razão do melhor ajuste.

GRÁFICO 13 – PRODUTIVIDADE DE GRÃOS DO FEIJOEIRO SEMEADO EM DEZEMBRO EM FUNÇÃO DO INSEY NO ESTÁDIO FENOLÓGICO V4 (A) E V7 (B), ARAPOTI – PR.



Portanto, para a estimativa do potencial produtivo da faixa de referência e das parcelas para os estádios V4 e V7 foram utilizadas as equações (Eq. [6] e [7]).

$$PP (V4) = 644,58 \exp (291,24 INSEY) \quad [6]$$

$$PP (V7) = 287,1 \exp (347,38 INSEY) \quad [7]$$

O fator de multiplicação (Eq. [4]) para ajuste da dose a ser aplicada foi obtido dos resultados de dezembro, mesma época utilizada no modelo de predição, resultando no valor de 7,68.

Definido ao modelo, seu potencial em gerar doses em taxa variável foi avaliado nas épocas de outubro, novembro e janeiro e os resultados podem ser observados na Tabela 3 e no Gráfico 14. A dose ideal indicada na Tabela 3 é referente a dose de máxima resposta subtraindo a dose aplicada inicialmente. Para a dose fixa considerou-se a comumente utilizada pelos produtores da região, 120 kg ha⁻¹.

As doses recomendadas pelo modelo a partir das leituras efetuadas no estádio V4 tiveram forte correlação com a dose ideal e RMSE de 34 kg ha⁻¹ indicando desempenho superior a dose fixa, entretanto na época de outubro, onde houve resposta ao N, as doses foram mais baixas que a dose ideal, limitando o potencial de resposta nesta época (GRÁFICO 14A). As doses

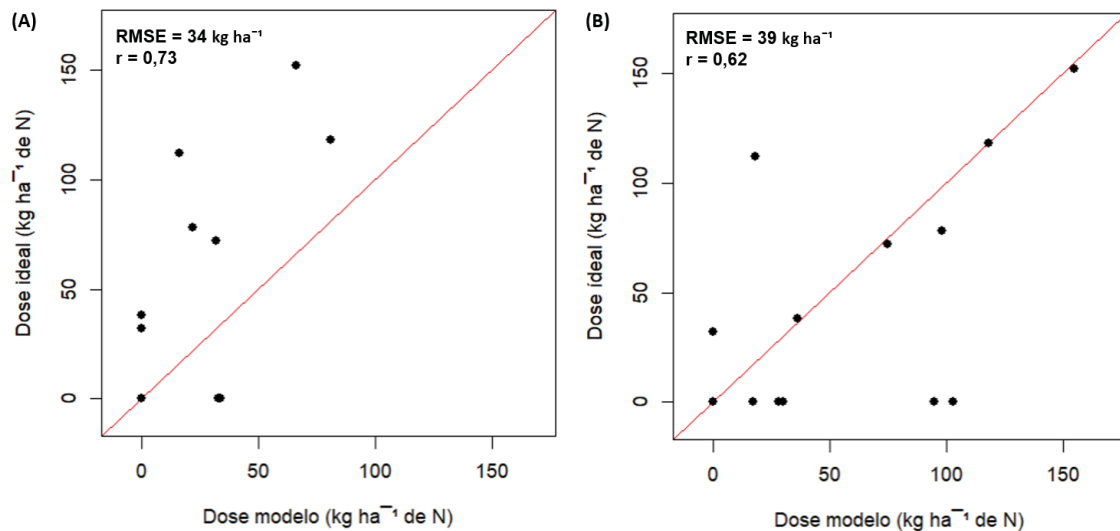
recomendadas a partir das leituras no estágio V7 se mostraram similares com as ideais, com RMSE de 39 kg ha⁻¹. Este erro está associado predominantemente as recomendações de doses excessivas geradas pelo modelo, portanto, sem limitar a resposta do feijoeiro (GRAFICO 14B).

No estágio V4 o IR foi essencial para definir o potencial de resposta ao N. Para as épocas de novembro e janeiro, onde não houve resposta ao N, o IR obtido na maior parte das parcelas foi superior a 0,99. Nestas duas épocas, mesmo quando indicou necessidade de aplicação de N as doses foram baixas em comparação à dose fixa. Alguns destes resultados inconsistentes são devido a limitação do modelo em não recomendar aplicação de N quando o NDRE diminui nos casos de excesso de N, ou seja, quando a dose aplicada superou a dose de pico de resposta do NDRE (120 kg ha⁻¹).

No estágio V7 o IR permitiu definir corretamente algumas parcelas em que não houve resposta ao N, entretanto identificou potencial de resposta em parcelas em que não houve respostas. Este evento ocorre em razão da diminuição do NDRE causada por altas doses de N. Entretanto, mesmo com este erro, as doses do modelo são mais baixas comparadas com a fixa. Deste modo, foi possível evidenciar que as doses geradas pelo modelo em V7 foram mais eficientes que a dose fixa, ou seja, em condições de resposta, o modelo recomendou doses condizentes com as necessárias, enquanto em condições que não houve respostas, a recomendação do modelo foi 0 kg ha⁻¹ ou menor que a recomendada pela dose fixa.

Para validação do modelo de aplicação em taxas variáveis de N na cultura do feijoeiro é necessário a implementação em uma área comercial, com o objetivo de avaliar o modelo em condições de campo. Devido ao N ser bastante variável no tempo e espaço, se faz necessário que a faixa de referência seja instalada no campo de modo que consiga representar o real potencial produtivo para cada área da lavoura.

GRÁFICO 14 – DOSE ÍDEAL E DOSE GERADA PELO MODELO PARA AS ÉPOCAS SEMEADAS EM OUTUBRO, NOVEMBRO DE 2020 E JANEIRO DE 2021 NOS ESTÁDIOS FENOLÓGICOS V4 (A) E V7 (B), ARAPOTI – PR



4 CONCLUSÕES

O sensor óptico ativo aliado às metodologias de faixa de referência e índice de resposta auxilia na identificação de áreas responsivas à aplicação de nitrogênio. O modelo de recomendação em taxa variável de nitrogênio recomenda doses mais eficientes que a dose fixa no ambiente avaliado, melhorando o manejo da adubação nitrogenada do feijoeiro no sistema plantio direto.

A avaliação do teor de nitrato (N-NO_3^-) permite indicar a disponibilidade de N no solo no estágio fenológico V7 do feijoeiro, com nível crítico para o ambiente estudado de 33 mg kg^{-1} para profundidade de 0 – 10 cm e 25 mg kg^{-1} para profundidade de 0 – 30 cm. Porém, não contribuiu para melhorar a recomendação da adubação nitrogenada.

REFERÊNCIAS

- AMBROSANO, E.J.; TAKANA, R.T.; MASCARENHAS, H.A.A.; RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A; CANTARELA, H. Leguminosas e oleaginosas. In RAIJ, B. van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J.A; FURLANI, A.M.C.; eds. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo e Fundação IAC, 285p. 1997.
- AMARAL, L.R.; MOLIN, J.P.; SCHEPERS, J.S.; Algorithm for variable-rate nitrogen application in sugarcane based on active crop canopy sensor. **Agronomy Journal**. v.107, 2015.
- BARBOSA FILHO, M, P.; COBUCCI, T.; FAGERIA, N. K.; MENDES, P. N.; Época de aplicação de nitrogênio no feijoeiro irrigado monitorado com auxílio de sensor portátil. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v.33, n.2, p.425-431, 2009.
- BERGONCI, J. I.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; FRANÇA, S.; RADIN, B. Eficiência da irrigação em rendimento de grãos e matéria seca de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 7, p. 949-956, 2001.
- BERNARDES, T.G.; SILVEIRA, P.M.; MESQUITA, M.A.M.; CUNHA, P.C.R. Resposta do feijoeiro de outono-inverno a fonte e dose de nitrogênio em cobertura. **Biosci. J.**, Uberlândia, v.30, n.2, p.458-468, 2014.
- BOERSMA, S; GILLARD, C; Seed treatment and N rate do not impact dry bean (*Phaseolus vulgaris* L.) plant growth or grain yield in Ontario. **Canadian Journal of Plant Science**. Ontario, Canada. 2020.
- BRAGAGNOLO, J.; AMADO, T. J. C.; BORTOLOTTI, R. P.; Use efficiency of variable rate of nitrogen prescribed by optical sensor in corn. **Rev. Ceres**, Viçosa, v.63, n.1, p.103-111, 2016.
- BRITO, M.M.P; MURAOKA, T; SILVA, E.C Contribuição da fixação biológica de nitrogênio, fertilizante nitrogenado e nitrogênio do solo no desenvolvimento do feijão e caupi. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.1, p.206-215, 2011.
- CALEGARI-JACQUES, S.M. **Bioestatística: Princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artemed, 255p. 2003.
- CARLSON, B.; VETSCH, J.; MILLER, R. Using the pre-sidedress nitrate test to prescribe variable-rate nitrogen in Minnesota. **Crops & Soil**, 52: 24-28, 2019
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra de grãos**. v.9, SAFRA 2020/2021 – N.8 . 2022.
- CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P.; SILVA, L. M. da.; LEMOS, L. B. Fontes e doses de nitrogênio para o feijoeiro em sucessão a gramíneas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.31, n. 6, p. 1545-1552, 2007.

DORIGO, W. A.; MILLA, R. Z.; DE WIT, A.J.W.; BRAZILE, J.; SINGH, R.; SCHAEPMAN, M.E. A review on reflective remote sensing and data assimilation techniques for enhanced agroecosystem modeling. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.9, p.165-193, 2007.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa, 2018.

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A.B. dos. Yield physiology of dry bean. **Journal of Plant Nutrition**, New york, v.31, n.6, p. 983-1004, 2008.

FAGERIA, N. K.; MELO, L. C, OLIVEIRA, J. Nitrogen use efficiency in dry bean genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v.36, p.2179-2190, 2013.

FAGERIA, N.K.; STONE, L.F; SANTOS, A.B; CARVALHO, M.C.S **Nutrição mineral do feijoeiro**. Brasília, DF: Embrapa, 394p, 2015.

FARINELLI, R.; LEMOS, L. B.; Produtividade, eficiência agrônômica, características nutricionais e tecnológicas do feijoeiro adubado com nitrogênio em plantio direto e convencional. **Bragantia**, Campinas, v.69, n.1, p.165-172, 2010.

FERRER, F.; VILLAR, J. M.; STOCKLE, C. O.; VILLAR, P.; ARAN, M. Use of a pre-sidedress soil nitrate test (PSNT) to describe nitrogen fertilizer requirement for irrigated corn. **Agronomie**, v.23, p.561-570, 2003.

FURTINI, I.V.; RAMALHO, M.A.P.; ABREU, A. F.B.; NETO, A.E.F. Resposta diferencial de linhagens de feijoeiro ao nitrogênio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.6, p.1696-1700, 2006.

GUIMARÃES, C.M; **Características morfo-fisiológicas do feijoeiro** (*Phaseolus vulgaris* L.) relacionadas com a resistência à seca. 1992. 131f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, Campinas,1992.

HEINZMANN, F.X.; MIYAZAVA, M.; PAVAN, M.A. Determinação de nitrato por espectrofotometria de absorção ultravioleta. **Revista Brasileira Ciência do Solo**. v.8, p.159-163. 1984.

LEAL, F.T.; NUNES, H. D.; DAMIÃO, V.D.; COUTO JÚNIOR, P.A. Eficiência de uso e resposta ao nitrogênio por cultivares de feijoeiro comum do grupo comercial carioca. UNESP, 2017.

LEMOS, L. B; FORNASIERI FILHO D; CAMARGO, M. B; SILVA, T. R. B; SORATTO, R. P. Inoculação de rizóbio e adubação nitrogenada em genótipos de feijoeiro. **Revista Agronomia**, Seropédica, v. 37, n. 1, p.26-31, 2003.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Portaria nº 99, de 5 de agosto de 2019.

Disponível em: < <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-n-99-de-5-de-agosto-de-2019-209512971>>. Acessado em: 10 de out. 2021.

MENDES, A. A.; BUENO, O. C. Participação da energia fóssil na produção dos fertilizantes industriais nitrogenados com ênfase na ureia. **Energ. Agric**, Botucatu, v.30, n.4, p.442-447, 2015.

MENGEL, K.; KIRKBY, E. **Principles of plant nutrition** 5.ed. Dordrecht / Boston / London: Kluwer Academic Publishers,849p. 2001.

MENGEL, D.; STEWART, W.M.; ASEBEDO, R.; SNYDER, C. S. **Soil testing for nitrate-N**. International Plant Nutrition Institute. 2013. Disponível em: < [http://www.ipni.net/publication/insightsna.nsf/0/9BF24664B24D99C385257CD8007522F1/\\$FILE/INSIGHTS-NA-2013-9.pdf](http://www.ipni.net/publication/insightsna.nsf/0/9BF24664B24D99C385257CD8007522F1/$FILE/INSIGHTS-NA-2013-9.pdf)>. Acessado em: 11 de jan. 2022.

MIRANDA, M.N.; CAMPELO JÚNIOR. Soma térmica para o subperíodo semeadura-maturação de feijão cv. carioca em colorado oeste, Rondônia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.40, n.2, p.180-185, 2010.

MOLIN, J. P.; FRASSON, F. R.; AMARAL, L. R.; POVH, F. P.; SALVI, J. V. Capacidade de um sensor ótico em quantificar a resposta da cana-de-açúcar a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.12, p.1345-1349, 2010.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. F. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MOTOMIYA, A. V. de A.; MOLIN, J. P.; MOTOMIYA, W. R.; Diagnose nutricional com uso de sensor óptico ativo em algodoeiro. **Rev. bras. eng. agríc. Ambiente**. v.16 n.11 2012.

NASCENTE, A. S.; CARVALHO, M. D. C. S.; MELO, L. C.; ROSA, P. H. Nitrogen management effects on soil mineral nitrogen, plant nutrition and yield of super early cycle common bean genotypes. **Acta Scientiarum**. Agronomy, Maringá, v. 39, n. 3, p. 369-378, 2017.

NEPAR – Núcleo Estadual Paraná. **Manual de adubação e calagem para o estado do Paraná**. Curitiba: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2019.

OWEN, A. G; JONES, D. L. Functions of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Mineral nutrition of higher plants**. London: Elsevier, 2012. p 135-189.

PELEGRIN, R. de.; MARCANTE, F. M.; OTSUBO, I. M. N.; OTSUBO, A. A. Resposta da cultura do feijoeiro à adubação nitrogenada e à inoculação com rizóbio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.219-226, 2009.

PIEKARSKI, K.A. **Produtividade de soja e milho estimados com o modelo aquacrop na região dos Campos Gerais**. 2016. 98f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Setor de Ciência Agrária, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

POVH, F. P.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J. V. Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico ativo em cereais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.23, n.8, p.1075-1083, 2008.

POVH, F.P.; ANJOS, W. de P. G. Avaliação de sensor óptico para adubação nitrogenada na cultura do feijoeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, Ponta Grossa, Paraná, 2015.

PORTZ, G.; MOLIN, J.P.; JASPER, J.; Active crop sensor to detect variability of nitrogen supply and biomass on sugarcane fields. **Precision Agric.**13:33-44. 2012.

PEREZ A.A.G; SORATTO, R.P; MANZATTO, N.P; SOUZA, E.F.C. Extração e exportação de nutrientes pelo feijoeiro adubado com nitrogênio, em diferentes tempos de implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.1276-1287, 2013.

RAMBO, L.; SILVA, P.R.F.; BAYER, C.; ARGENTA, G.; STRIEDER, M.L.; SILVA, A.A. Teor de nitrato como indicador complementar da disponibilidade de nitrogênio no solo para o milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.731-738, 2008

RANSOM, C. J.; KITCHEN, N. R.; CAMBERATO, J. J.; CARTER, P. R.; FERGUSON, R. B.; FERNÁNDEZ, F. G.; FRANZEN, D. W.; LABOSKI, C. A. M.; NAFZIGER, E. D.; SAWYER, J. E.; SCHARF, P. C.; SHANAHAN, J. F. Corn nitrogen rate recommendation tools performance across eight US Midwest corn belt states. **Agronomy Journal**, 1-23, 2020.

RAUN, W. R.; JOHNSON, G. V.; Improving nitrogen use efficiency for cereal production, **Agronomy Journal**, v.91, n.3, p.357-363, 1999.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; LUKINA, E.V.; THOMASON, W.E.; SCHEPERS, J.S. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v.93, n.1, p.131-138, 2001.

RAUN, W.R.; SOLIE, J.B.; JOHNSON, G.V.; STONE, M.L.; MULLEN, R.W.; FREEMAN, K.W.; THOMASON, W.E.; LUKINA, E.V. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, n.4, p.815-820, 2002.

ROSA, H. J. A.; AMARAL, L. R.; MOLIN, J. P; CANTARELLA, H.; Sugarcane response to nitrogen rates, measured by a canopy reflectance sensor. **Pesq. agropec. bras.** Brasília, v.50, n.9 p.840-848, 2015.

ROUSEM J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D.W.; HARLAN, J. C. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation, Greenbelt: **NASA**, (NASA/GSFC. Final Report), 1974.

SANTI, A.L.; BASSO, C.J.; LAMEGO, F.P.; FLORA, L.P.D.; AMADO, T.J.C.;

HERUBIN, M.R. Épocas e parcelamentos da adubação nitrogenada aplicada em cobertura na cultura do feijoeiro, grupo comercial preto e carioca, em semeadura direta. **Ciência Rural**, v.43, p.816-822, 2013.

SANTOS, A.B. dos; FAGERIA, N.K. Manejo do nitrogênio para eficiência de uso por cultivares de feijoeiro em várzea tropical. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, n.9, p.1237-1248, 2007.

SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba, ESALQ, 56p. 1974.

SILVA, C. C. da.; SILVEIRA, P. M. da. Influência de sistemas agrícolas na resposta do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) irrigado à adubação nitrogenada em cobertura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiania, v. 30, n. 1, p. 86-96, 2000.

SILVA, J.B.L.; FERREIRA, P.A.; JUSTINO, F.; PIRES, L.C.; AMANDA, S.T.; Leaf concentration of nitrogen and phosphorus in *Phaseolus vulgaris* L. plant under high CO₂ concentration and drought stress. **Eng. Agríc., Jaboticabal**, v.34,n.5, p.935-944, 2014.

SOLARI, F.; SHANAHAN, J.; FERGUSON, R.; SCHEPERS, J.; GITELSON, A. Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. **Agronomy Journal**. v.100, p. 571-579. 2008.

SOLIE, J.B.; RAUN, W.R.; STONE, M.L. Submeter spatial variability of selected soil and Bermuda grass production variables. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, n.6, p.1724-1733, 1999.

SORATTO, R.P.; PEREZ, A.A.G.; FERNANDES, A.M. Age of no-till system and nitrogen management on common bean nutrition and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v.106, n.3, p.809-820, 2014.

SORATTO, R.P.; CATUCHI, T.A.; SOUZA, E.F.C; GARCIA, J.L.N; Plant density and nitrogen fertilization on common bean nutrition and yield. **Revista Caatinga**, v.30, n.3, p.670-678, 2017.

SOUZA, E.F.C; SORATTO, R.P.; PAGANI, F.A. Aplicação de nitrogênio e inoculação com rizóbio em feijoeiro cultivado após milho consorciado com braquiária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.4, p. 370-377, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed., Artmed, 918 p, 2013.

TASCA, F.A.; ERNANI, P.R.; ROGERI, D.A.; GATIBONI, L.C.; Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.493-502, 2011.

TARPLEY, L.; REDDY, K. R.; SASSENATH-COLE, G. F. Reflectance indices with precision and accuracy in predicting cotton leaf nitrogen concentration.

Crop Science, v.1, n.40, p.1814- 1819, 2000.

TÉRAN, H.; SINGH, S.P. Comparison of sources and lines selected for drought resistance in common bean. **Crop Science**, Madison, v.42, n.1, p.64-70, 2002.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. Publication in Climatology, Laboratory of Climatology, **Centerton**, v.6,n.1. 1955.

TREVISAN R.G.; VILANOVA, N.S.J.; EITELWEIN, M.T.; MOLIN, J.P.; Management of plant growth regulators in cotton using active crop canopy sensors. **Agriculture**, 8,101. 2018.

WANG, Z.; MIAO, Y.; LI, SHENG. Effect of ammonium and nitrate nitrogen fertilizers on wheat yield in relation to accumulated nitrate at different depth of soil in drylands of China. **Field Crops Research**, v.183, p.211-224. 2015.

ZIMMERMANN, M.J.de O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 589p. 1988.