

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Adubação nitrogenada à taxa variada em *Brachiaria decumbens* usando sensor multiespectral de baixo custo**

Priscila Pascali da Costa Bandeira  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**PRISCILA PASCALI DA COSTA BANDEIRA**

**Adubação nitrogenada à taxa variada em *Brachiaria decumbens* usando sensor multiespectral de baixo custo**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Flora Maria de Melo Villar

Coorientadores: Paulo Roberto Cecon  
Andre L. de F. Coelho  
Fernanda H. M. Chizzotti

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B214a  
2025  
Bandeira, Priscila Pascali da Costa, 1992-  
Adubação nitrogenada à taxa variada em *Brachiaria  
decumbens* usando sensor multiespectral de baixo custo / Priscila  
Pascali da Costa Bandeira. – Viçosa, MG, 2025.  
1 dissertação eletrônica (49 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Flora Maria de Melo Villar.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Agrícola, 2025.  
Referências bibliográficas: f. 45-49.  
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.724>  
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Pastagens - Adubos e fertilizantes. 2. Nitrogênio -  
Fixação. 3. Pastagens - Nutrição. I. Villar, Flora Maria de Melo,  
1986-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 631.84

**PRISCILA PASCALI DA COSTA BANDEIRA**

**Adubação nitrogenada à taxa variada em *Brachiaria decumbens* usando sensor multiespectral de baixo custo**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 10 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

---

Priscila Pascali da Costa Bandeira  
Autora

---

Flora Maria de Melo Villar  
Orientadora

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 06/11/2025 às 09:21:14 e pela orientadora em 06/11/2025 às 14:44:43. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **1TT7.3M44.VXEP** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais, Jerônimo Rosado Bandeira Neto e Kátia Maria da Costa Bandeira,  
por todo afeto e dedicação.  
Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus, por ter me auxiliado em todos os momentos, principalmente naqueles que eu não merecia.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela confiança para que pudesse desenvolver esta pesquisa.

Ao Departamento de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa, pela área cedida para realização do experimento.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

À Professora Dr<sup>a</sup>. Flora Maria de Melo Villar, por todo auxílio e paciência.

Aos Coorientadores, Professor Dr. André e a Professora Dra. Fernanda pelos ensinamentos e por toda ajuda prestada aos meus estudos.

Aos meus pais, Jerônimo Rosado Bandeira Neto e Kátia Maria da Costa Bandeira, por toda confiança e ajuda nos momentos que sempre precisei. Obrigada por me incentivarem sem medir esforços.

As minhas irmãs, Patrícia Bandeira e Poliana Bandeira, por toda irmandade. Especialmente a minha irmã Poliana que SEMPRE esteve presente e que acredita em meu potencial.

Ao meu esposo, Israel José dos Santos Barbosa, por me apoiar quando eu mesma duvidava da minha capacidade.

A minha filha, Ágata Maria, por me incentivar mesmo sem entender.

A meus amigos que me incentivaram a todo momento. Especialmente Ana Luiza, Rutenny, Clícia e Diego.

Aos professores Dr. Joaquim Odilon e Dr. Suedêmio de Lima Silva, por me ajudarem durante e após a graduação. Vocês são exemplos que eu desejo seguir.

Aos colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA) que me ajudaram para o desenvolvimento do meu trabalho. Especialmente Poliana, Jussara, Flávio, Charles e Bia.

E, a todos que auxiliaram em momentos felizes e tristes e, principalmente, aqueles que foram felizes com meus êxitos.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Só que eu nasci entre o velame e a macambira  
Quem é você pra derramar meu mungunzá?  
(Flávio José)

## RESUMO

BANDEIRA, Priscila Pascali da Costa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Adubação nitrogenada à taxa variada em *Brachiaria decumbens* usando sensor multiespectral de baixo custo.** Orientadora: Flora Maria de Melo Villar. Coorientadores: Paulo Roberto Cecon, Andre Luiz de Freitas Coelho e Fernanda Helena Martins Chizzotti.

A alimentação é o principal custo na produção pecuária, sendo as pastagens a fonte mais econômica. Porém, grande parte das pastagens estão degradadas, reduzindo a produtividade. A deficiência de nitrogênio afeta a qualidade das forragens, e a utilização de sensores de baixo custo auxiliam na gestão do nitrogênio, otimizando a produção e reduzindo custos na agricultura. Por isso, este trabalho buscou avaliar um espectrofotômetro de baixo custo com base em adubação nitrogenada com taxa variada, utilizando características espectrais da *Brachiaria Decumbens*. Foi adotado um delineamento de blocos casualizados com quatro repetições e cinco tratamentos cada, totalizando 20 tratamentos. Estes incluíram um tratamento testemunha (sem nitrogênio), um tratamento de referência (150 kg ha<sup>-1</sup> de N em dose única) e três tratamentos com doses variáveis de nitrogênio baseadas em índices espectrais (NDRE, CGI, NDVI). O Índice de Suficiência de Nitrogênio (NSI), calculado a partir de leituras espectrais em diferentes alturas das plantas, determinou a necessidade de doses corretivas. O experimento contou com três ciclos (ocorrendo de março a maio de 2023), em que variáveis espectrais foram medidas usando sensores como SPAD, GreenSeeker, câmera Micasense Red Edge – MX acoplada ao drone Matrice 100 e ReflecSense. As coletas de forragem foram realizadas ao final de cada ciclo para determinar massa seca (MS), produtividade e teor de proteína bruta. Amostras foram cortadas a 5 cm do solo e processadas para estimar MS e MSA, utilizando estufas de circulação forçada. O solo foi previamente analisado e corrigido com fósforo. Os dados meteorológicos no período dos três ciclos foram analisados, no qual o primeiro ciclo apresentou temperaturas mais altas e precipitação moderada, condições favoráveis ao crescimento da cultura estudada. Já os ciclos subsequentes foram marcados por temperaturas mais amenas e menor precipitação, limitando a absorção de nitrogênio e o desenvolvimento da *Brachiaria*. A análise de correlação de Pearson revelou a capacidade do ReflecSense de detectar variações nutricionais e de biomassa. A avaliação entre a câmera Micasense RedEdge-MX (NDRE) com o ReflecSense apresentou correlações variáveis: moderada a forte em condições de estresse nutricional e nula em situações de deficiência extrema. Já ao avaliar o ReflecSense com o

sensor comercial GreenSeeker (utilizado para NDVI), o ReflecSense demonstrou forte correlação nas condições de maior variabilidade nutricional, destacando-se em doses elevadas de nitrogênio. No entanto, enfrentou limitações em detectar variações em cenários de estresse severo. Na avaliação do índice CGI (clorofila), o ReflecSense exibiu correlações moderadas a fortes, com resultados mais consistentes no último ciclo. A correlação negativa em algumas condições sugere desafios relacionados ao comportamento espectral dos sensores e interferências externas, como biomassa e luminosidade. Observou-se que o coeficiente de variação (CV%) apresentou uma redução consistente ao longo dos ciclos, principalmente no teor de proteína bruta, em que reduziu entre o ciclo 1 e 2 mais de 10%. Com o teste de médias (Tukey a 5% de probabilidade), concluiu-se que todos os tratamentos com adubação nitrogenada alcançaram produtividades superiores ao tratamento testemunha (sem adição de nitrogênio). Além disso, observou-se que, em todos os três ciclos e em todos os índices de vegetação, bem como nas características nutricionais, não houve diferença estatística entre o tratamento referência (T1) e os tratamentos com adubação em taxa variável (T2, T3 e T4). Em síntese, o ReflecSense apresentou desempenho promissor, especialmente em condições de manejo variado, comprovando sua viabilidade como alternativa acessível e eficiente para monitoramento nutricional e de produtividade em pastagens. Entretanto, limitações em cenários de estresse hídrico apontam para possíveis melhorias no sensor para otimizar sua aplicação em diferentes contextos ambientais.

Palavras-chave: índices de vegetação; estresse nutricional; adubação nitrogenada; zootecnia de precisão

## ABSTRACT

BANDEIRA, Priscila Pascali da Costa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Nitrogen fertilization at a varied rate in *Brachiaria decumbens* using a low-cost multispectral sensor**. Adviser: Flora Maria de Melo Villar. Co-advisers: Paulo Roberto Cecon, Andre Luiz de Freitas Coelho and Fernanda Helena Martins Chizzotti.

Feed is the main cost in livestock production, with pastures being the most economical source. However, a large portion of pastures are degraded, reducing productivity. Nitrogen deficiency affects forage quality, and the use of low-cost sensors assists in nitrogen management, optimizing production and reducing costs in agriculture. Therefore, this study aimed to evaluate a low-cost spectrophotometer based on variable-rate nitrogen fertilization, using spectral characteristics of *Brachiaria decumbens*. A randomized block design was adopted, with four replications and five treatments each, totaling 20 treatments. These included a control treatment (no nitrogen), a reference treatment (150 kg ha<sup>-1</sup> of N applied in a single dose), and three treatments with variable nitrogen rates based on spectral indices (NDRE, CGI, NDVI). The Nitrogen Sufficiency Index (NSI), calculated from spectral readings at different plant heights, determined the need for corrective doses. The experiment comprised three cycles (from March to May 2023), during which spectral variables were measured using sensors such as SPAD, GreenSeeker, the Micasense RedEdge–MX camera attached to a Matrice 100 drone, and the ReflecSense sensor. Forage samples were collected at the end of each cycle to determine dry matter (DM), yield, and crude protein content. Samples were cut 5 cm above the soil and processed to estimate DM and DMS, using forced-air circulation ovens. The soil was previously analyzed and corrected with phosphorus. Meteorological data from the three cycles were analyzed, showing that the first cycle had higher temperatures and moderate rainfall, conditions favorable for the growth of the studied crop. The subsequent cycles were characterized by milder temperatures and lower rainfall, limiting nitrogen uptake and the development of *Brachiaria*. Pearson's correlation analysis revealed the ReflecSense's ability to detect nutritional and biomass variations. The comparison between the Micasense RedEdge-MX camera (NDRE) and the ReflecSense showed variable correlations: moderate to strong under nutritional stress and null under extreme deficiency. When comparing the ReflecSense with the commercial GreenSeeker sensor (used for NDVI), the ReflecSense demonstrated a strong correlation under conditions of greater nutritional variability, standing out at higher nitrogen doses. However, it faced limitations in detecting variations under severe stress conditions. In the

evaluation of the CGI (chlorophyll index), the ReflecSense exhibited moderate to strong correlations, with more consistent results in the final cycle. The negative correlation observed under certain conditions suggests challenges related to the spectral behavior of the sensors and external interferences such as biomass and light intensity. It was observed that the coefficient of variation (CV%) consistently decreased over the cycles, especially in crude protein content, which dropped by more than 10% between the first and second cycles. Using Tukey's test (at a 5% probability level), it was concluded that all nitrogen-fertilized treatments achieved higher yields than the control treatment (without nitrogen). Moreover, in all three cycles and across all vegetation indices as well as nutritional characteristics, there was no statistical difference between the reference treatment (T1) and the variable-rate fertilization treatments (T2, T3, and T4). In summary, the ReflecSense showed promising performance, especially under variable management conditions, confirming its viability as an accessible and efficient alternative for monitoring pasture nutrition and productivity. However, its limitations under water stress conditions highlight potential improvements to optimize the sensor's performance across different environmental contexts.

Keywords: vegetation indices; nutritional stress; nitrogen fertilization; precision animal husbandry.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 Implantação do experimento.....	15
2.2 Coleta de dados.....	22
2.3 Determinação de massa seca, produtividade, teor de proteína bruta e teor de nitrogênio.....	22
2.4 Análise estatística .....	26
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>26</b>
3.1 Dados meteorológicos .....	27
3.2 Desempenho comparativo dos sensores na avaliação da produtividade e valor nutricional.....	30
3.3 Resposta a adubação nitrogenada mensurada pelo sensor ReflecSense.....	37
<b>4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>45</b>

## INTRODUÇÃO

O componente mais importante e oneroso na produção pecuária é a alimentação. De acordo com MapBiomas Brasil (2023), o rebanho brasileiro é predominantemente criado em pastagens, essa prática se destaca pela economia e facilidade no fornecimento de alimento para o gado. O País possui vantagens significativas em termos de baixos custos de produção de carne em comparação com outros grandes produtores de carne, devido ao clima favorável e à extensão territorial (CARVALHO et al., 2009; DEBLITZ, 2009; FERRAZ; FELÍCIO, 2010). De acordo com a EPAMIG (2023), as pastagens brasileiras se destacam como principal fonte de alimentação para bovinos por serem uma opção de menor custo e maior praticidade, fornecendo energia e nutrientes necessários para o gado se comparado com outras fontes alimentares é a que possui o menor custo.

Entretanto, a pecuária brasileira enfrenta muitos desafios relacionados à disponibilidade e qualidade das pastagens. Estima-se que cerca de 70% das áreas de pastagens no Brasil estejam degradadas ou em processo de degradação, assim, a produtividade e sustentabilidade são comprometidas (SYNGENTA DIGITAL AG, 2024). Para garantir uma boa disponibilidade de pastagem, é necessário analisar duas fontes: o clima e a disponibilidade de nutrientes no solo (ROMA et al., 2012). A principal fonte que afeta a produção e qualidade da forragem é a disponibilidade de nutrientes no solo. O fornecimento adequado de nutrientes, especialmente o nitrogênio (N), é de extrema importância para a produção das pastagens. Isso ocorre porque o N proveniente da mineralização da matéria orgânica não é suficiente para atender às necessidades das gramíneas (FAGUNDES et al., 2006).

A deficiência de nitrogênio nas plantas compromete a fotossíntese, tendo como resultado uma menor produção de matéria seca e redução da qualidade do produto. O nitrogênio é essencial para a formação da clorofila. Sua ausência reduz a eficiência desse processo, afetando de forma negativa o crescimento e a produtividade das plantas (EOS, 2024). O valor nutritivo da cultura, seu perfilhamento e produção estão fortemente relacionados à disponibilidade de nitrogênio como nutriente principal (MACEDO et al., 2012). Portanto, a aplicação eficiente de adubação nitrogenada é de extrema importância. Para tomar decisões sobre a aplicação de nitrogênio, é essencial avaliar o status de nitrogênio da cultura (SOUZA; ALMEIDA; GONÇALVES, 2024).

A *Brachiaria Decumbens* é uma forrageira amplamente utilizada em pastagens brasileiras, especialmente em propriedades com recursos limitados. Ela se destaca por sua adaptação a solos de baixa fertilidade e sua capacidade de formar pastagens densas, mesmo em condições de manejo menos intensivas (SYNGENTA, 2024). No entanto, em qualquer sistema de manejo agropecuário, é importante realizar a reposição de nutrientes. Essa reposição deve ser feita para evitar a redução da produtividade em safras futuras.

A recomendação de nitrogênio que se baseia em análises laboratoriais oferece alta precisão, porém apresenta desvantagens como tempo de execução e custos elevados. Essas desvantagens mostram necessidade de métodos de análise indiretos em tempo real, para rápida obtenção de informações (SILVA; ALMEIDA; SOUSA, 2023). Uma abordagem promissora é o uso de sensores portáteis com eficácia para determinar o estado de nitrogênio em tempo real, permitindo aplicação mais ágil de fertilizantes.

É comum os agricultores aplicarem doses fixas de nitrogênio em toda a área, o que resulta em baixa eficiência. Esse método de aplicação facilita a lixiviação e a volatilização do nitrogênio. No entanto, com o auxílio da agricultura de precisão, possibilita observar a variabilidade espacial e temporal do nitrogênio, identificando áreas homogêneas e demonstrando a necessidade de aplicação de nitrogênio de forma mais precisa e eficiente.

Existem diversas formas de observação da agricultura, sendo uma delas o uso de satélites. Os satélites são amplamente utilizados para a obtenção de imagens que auxiliam na determinação de índices de vegetação, representando uma solução eficaz para a detecção e análise das necessidades de nitrogênio (N). As imagens obtidas por satélites podem ser tanto gratuitas quanto pagas. Os satélites pagos geralmente possuem uma resolução espacial de qualidade, porém os custos para adquirir esses dados podem ser inacessíveis para pequenos e médios produtores quando comparados a outras formas de obtenção de imagens. Por outro lado, existem os satélites gratuitos, mas apresentam uma baixa resolução espacial, que pode ser dificultada para pequenas áreas. Além disso, ao lidar com dados obtidos por satélites, é importante considerar a resolução temporal, uma vez que as imagens não são obtidas diariamente.

Os drones são equipamentos frequentemente utilizados para a obtenção de imagens (SOARES et al., 2022; PARLANGELI et al., 2022), porém eles têm um alto

custo de aquisição e manutenção. Além disso, o manuseio de um drone requer um operador qualificado. Acrescido ao custo do drone, tem-se a necessidade de adquirir uma câmera multi ou hiperespectral para capturar as bandas necessárias para a determinação de índices de vegetação. Esses fatores podem limitar o uso de drones para pequenos produtores. Outro fator que pode dificultar o uso de drones, é a altitude de voo na detecção de deficiências de nitrogênio, uma vez que seria necessário um maior número de plantas para identificar essas deficiências, além da dificuldade na distinção entre alvos com comportamento espectral semelhante.

Para evitar os problemas mencionados anteriormente, uma alternativa é utilizar sensores ópticos portáteis espectrais. Esses sensores proximais podem detectar diretamente a necessidade de nitrogênio nas plantas. Os dados coletados pelos sensores consistem na radiância emitida pelas plantas em várias bandas do espectro eletromagnético. A partir do processamento desses dados, é possível obter informações como índices de vegetação, que representam a relação matemática da reflectância em dois ou mais comprimentos de onda (ADHI KARI et al., 2020; HABIBULLAH et al., 2020; WANG et al., 2020). Esses índices de vegetação fornecem percepções valiosas sobre a saúde das plantas e suas necessidades nutricionais, permitindo uma melhor gestão dos recursos agrícolas e um uso mais eficiente de fertilizantes, contribuindo para a otimização da produção agrícola.

Por meio dos resultados obtidos por esses sensores ópticos, é possível buscar aqueles que apresentem correlação com o status de nitrogênio nas culturas agrícolas. Essa correlação entre as bandas espectrais pode ser utilizada para determinar as doses de correção de nitrogênio necessárias, evitando prejuízos na lavoura. A adoção de sensores espectrais de baixo custo permitiria uma melhor gestão dos recursos agrícolas, otimizando a aplicação de insumos e contribuindo para uma agricultura mais sustentável e eficiente no Brasil.

É verdade que os sensores ópticos disponíveis no mercado, como o GreenSeeker, N-Sensor, Crop Circle e outros, podem ser de alto custo, o que torna difícil para muitos agricultores brasileiros adquirirem esses equipamentos. Dado o contexto de um país em desenvolvimento, fica evidente a necessidade de utilizar sensores espectrais de baixo custo, com o objetivo de reduzir os custos operacionais e possibilitar o acesso à maioria dos agricultores.

O sensor utilizado nesse trabalho é o protótipo do sensor óptico ativo portátil multiespectral, chamado ReflecSense, ele mede a reflectância de dez bandas do

espectro eletromagnético, sendo um sensor de baixo custo. O sistema emite pulsos de luz sobre o alvo, com intenção de tornar o ReflecSense ativo, assim, independe de luz externa. Seu diferencial é a capacidade de medir reflectâncias em dez comprimentos de onda.

Diante desse contexto, torna-se necessário avaliar novas tecnologias, economicamente acessíveis, que possibilitem a recomendação de nitrogênio em taxa variável com base em informações espectrais da cultura. Assim, este estudo tem como objetivo avaliar um espectrofotômetro de baixo custo, o ReflecSense, como ferramenta de suporte à decisão para aplicação de nitrogênio em taxa variável em pastagens de *Brachiaria decumbens*.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Implantação do experimento

O experimento foi realizado no Setor de Agrostologia do Departamento de Zootecnia, localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV). O experimento foi conduzido utilizando a cultura *Brachiaria Decumbens*. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com quatro blocos, cada um contendo cinco parcelas. Os tratamentos foram divididos nas parcelas de forma aleatória, conforme Figura 1.

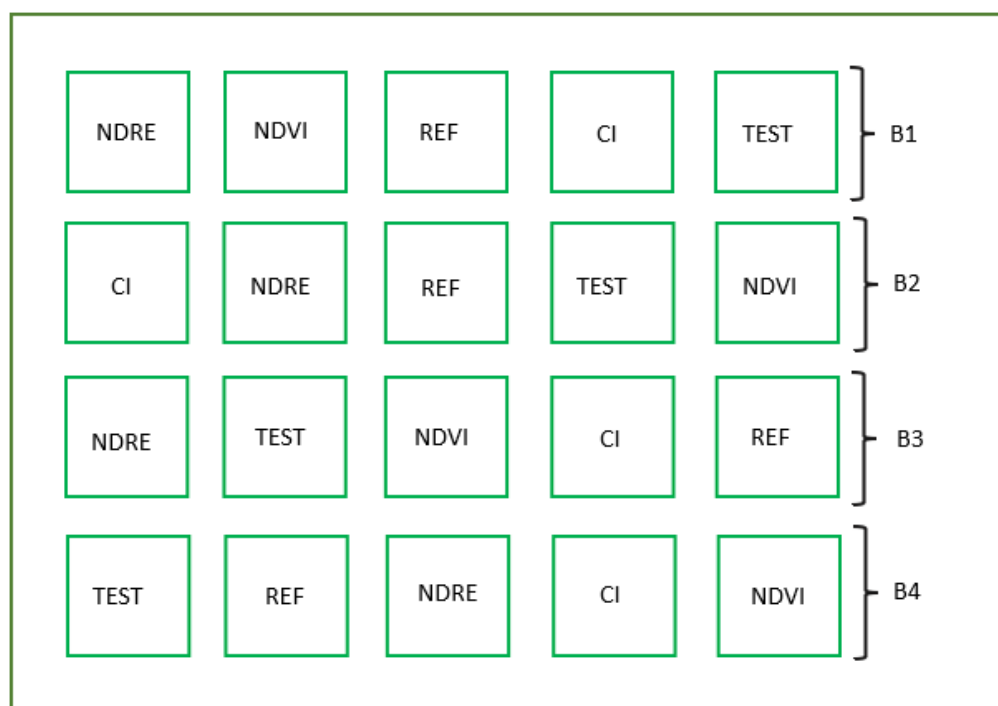


Figura1. Croqui da área com seus devidos tratamentos. NDRE = *Normalized Difference Red Edge Index*; NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*; CI = *Chlorophyll Index*; TEST = tratamento testemunha e REF = tratamento referência.

Os tratamentos utilizados no experimento foram: uma parcela testemunha (sem aplicação de nitrogênio), uma parcela de referência (com uma única dose de nitrogênio de 150 kg ha<sup>-1</sup>) e três parcelas com aplicação de nitrogênio (N) à taxa variável (dose inicial de 75 kg ha<sup>-1</sup>), conforme descrito por VILLAR et al. (2012). A Tabela 1 são apresentados os tratamentos utilizados durante o experimento.

Tabela 1. Descrição dos tratamentos utilizados

Tratamentos	Descrição
T0	Parcela sem aplicação de nitrogênio (parcela testemunha)
T1	Parcela com aplicação de 150 kg ha <sup>-1</sup> de fertilizante nitrogenado em dose única (parcela de referência)
T2	Parcela que utilizou a variável espectral determinada pelo NDRE
T3	Parcela que utilizou a variável espectral determinada pelo CI
T4	Parcela que utilizou como variável espectral determinada pelo NDVI

NDRE é Normalized Difference Red Edge Index, NDVI é Normalized Difference Vegetation Index, CI é Chlorophyll Index.

As aplicações subsequentes de nitrogênio foram baseadas no índice de suficiência de nitrogênio (NSI) proposto por Francis e Piekielek (1999). Quando o valor do NSI estava abaixo de 0,95, foi realizada uma dose de correção, sendo ela de 37,5 kg ha<sup>-1</sup>, ou seja, 25% da dose aplicada na parcela de referência.

Para calcular o NSI (Equação 1) (FRANCIS; PIEKIELEK, 1999), foram realizadas leituras da variável espectral em dois momentos. O primeiro momento quando as plantas da parcela de referência atingiram, em média, 15 cm e o segundo momento ao atingir, em média, 20 cm de altura. A altura das plantas foi medida com o auxílio de uma trena, coletando 20 pontos aleatórios nas parcelas referência, e em seguida, calculando a altura média.

$$NSI = \frac{VS_{tv}}{VS_r} \quad (1)$$

Em que,

NSI – Índice de suficiência de nitrogênio;

VS<sub>tv</sub> – Variável espectral na parcela com aplicação a taxa variada;

VS<sub>r</sub> – Variável espectral na parcela referência.

No dia 09 de fevereiro de 2023, foi realizada a análise do solo por blocos. A coleta das amostras simples foi realizada a 15 cm de profundidade, sendo coletada uma amostra em cada parcela. Ao concluir o bloco, procedeu-se à homogeneização do solo para fins de estudo. Os resultados obtidos foram apresentados na Tabela 2.

Seguindo as orientações da Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação (RIBEIRO et al., 1999). Procedeu-se à correção do solo por meio da aplicação de superfosfato simples para culturas perenes, com o objetivo de corrigir o teor de fósforo no solo. Na Tabela 2 são apresentadas as análises de solo para o fósforo (P) em cada bloco.

Tabela 2. Análise de solo da área experimental para o fósforo (P) nos quatro blocos.

<b>Amostra</b>	<b>P (mg/dm<sup>3</sup>)</b>
Bloco 1 (B1)	2,1
Bloco 2 (B2)	2,5
Bloco 3 (B3)	2,3
Bloco 4 (B4)	2,3

Após realizar a correção necessária do solo, foi aplicado o nitrogênio na forma de ureia (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O) nas parcelas referência e nas parcelas com aplicação de nitrogênio à taxa variável. As parcelas referência tiveram aplicação de 293g e cada parcela à taxa variável teve a aplicação de 146,5g. Enquanto, as parcelas testemunha não tiveram aplicação de nitrogênio em nenhum momento do experimento.

### **Coleta de dados**

O experimento teve um total de três ciclos. Os ciclos ocorreram dos dias 07 de março de 2023 ao dia 02 de maio de 2023. Conforme apresentado na Tabela 3, em cada ciclo foram realizadas coleta dos dados e leituras quando as plantas das parcelas

referência atingiram em média, 15 (primeiro ciclo) e 20 cm (segundo ciclo) de altura. Na primeira coleta realizou-se a captura das variáveis espectrais, sensores distintos e calculou-se o NSI para identificar quais parcelas precisariam de reposição de nitrogênio. Ao atingir 20 cm de altura, realizou-se a segunda captura de variáveis e prosseguiu-se o mesmo procedimento identificar a necessidade de adubação das parcelas.

Tabela 3. Período dos três ciclos e datas de coleta das variáveis espectrais.

<b>Ciclo</b>	<b>Coleta 1 (15cm)</b>	<b>Coleta 2 (20cm)</b>
Ciclo 1(C1)	15/03	22/03
Ciclo 2(C2)	05/04	10/04
Ciclo 3(C3)	18/04	25/04

Para a obtenção das variáveis espectrais foram utilizados os sensores Clorofilômetro portátil (SPAD 502), câmera multiespectral Micasense RedEdge – MX acoplada ao drone DJI Matrice 100, GreenSeeker portátil e o espectrofotômetro de baixo custo ReflecSense - AS7265X.

O índice de clorofila, obtido por meio do Clorofilômetro portátil (SPAD 502) (Figura 3), é um método indireto e não destrutivo. Em cada parcela, foram selecionadas aleatoriamente 30 plantas, e a leitura foi realizada no terço médio da lâmina mais nova de cada planta. O valor representativo do SPAD para cada parcela foi calculado como a média dos 30 valores obtidos.



Figura 3. Coleta em campo utilizando o SPAD.

A câmera multiespectral Micasense RedEdge – MX (Figura 4b) acoplada ao drone DJI Matrice 100 (Figura 4c) foi utilizada para obtenção dos dados de reflectância nas bandas da borda do vermelho e infravermelho próximo. Com essas bandas foi possível a determinação do índice de vegetação RedEdge de diferença normalizada (NDRE) (Equação 2), que tem grande importância na avaliação da saúde nutricional das plantas por meio da clorofila foliar (NAGUIB, N. S.; DALIMAN, S 2022).

$$NDRE = \frac{NIR - RedEdge}{NIR + RedEdge} \quad (2)$$

Em que,

NIR – Banda do infravermelho próximo, 840nm;

RedEdge – Banda da borda do vermelho, 717nm.

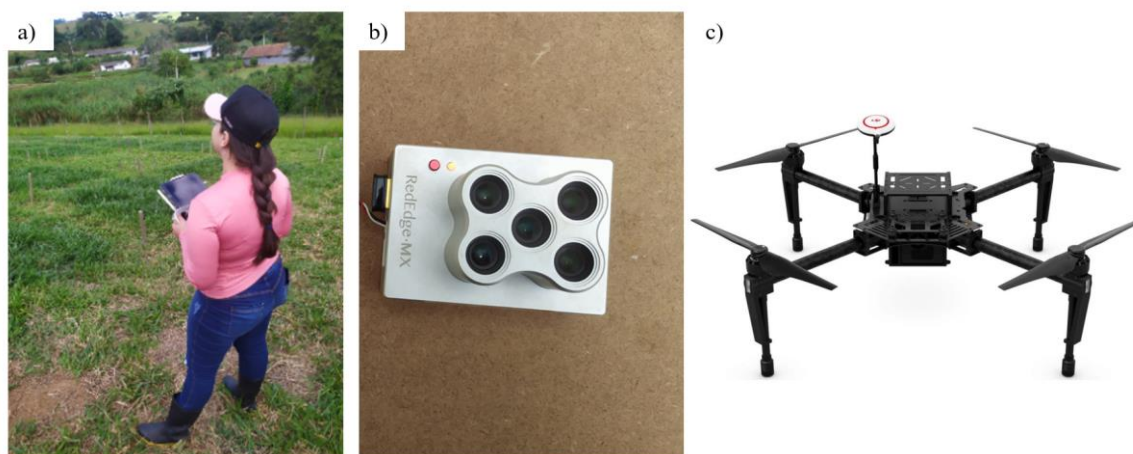


Figura 4. (a) Voo sendo realizado com a (b) Câmera Micasense RedEdge – MX que foi acoplada ao (c) Drone Matrice 100 para determinação do NDRE.

Em campo foram alocados quatro pontos de controle medindo 20x20 cm, com intuito de georreferenciamento, correção de possíveis distorções, padronização, entre outros. Com o auxílio de um GPS foi realizado o georreferenciamento dos locais onde estavam posicionados os pontos de controle. Após essas etapas, foi elaborado um plano de voo detalhado, com a demarcação precisa de pontos de interesse. A fim de assegurar a consistência dos resultados, todos os voos foram conduzidos a 20 m de altura e às 11 horas da manhã, com o objetivo de minimizar as possíveis diferenças nas imagens capturadas.

Para a determinação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Equação 3), foi empregado o radiômetro GreenSeeker portátil (Figura 5), posicionado a uma altura aproximada de 1,0 metro acima do dossel das plantas. Essa coleta era feita sempre pela mesma pessoa para que não houvesse possíveis erros na altura e na velocidade da passada. O valor representativo do NDVI para cada parcela foi determinado a partir do cálculo da média dos valores obtidos nas leituras realizadas.

$$NDRE = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3)$$

Em que,

NIR – Banda do infravermelho próximo, 840nm;

Red – Banda do vermelho, 668nm.



Figura 5. Coleta da variável espectral utilizando GreenSeeker.

A determinação das variáveis NDRE, NDVI e índice de clorofila verde (CGI) (Equação 4), além dos sensores supracitados, foi realizada em cada parcela utilizando os dados obtidos com o espectrofotômetro de baixo custo ReflecSense - AS7265X. Esse sensor trata-se de um equipamento de fácil manuseio capaz de capturar até 10 bandas espectrais diferentes, possibilitando o cálculo de diversos índices de vegetação, a fim de avaliar a sanidade de culturas agrícolas.

A leitura com o ReflecSense foi feita em nove pontos dentro de cada parcela, com o objetivo de garantir uma maior cobertura da área (Figura 6). O equipamento foi posicionado a uma distância de 27 cm das plantas. É importante destacar que a base piramidal de alumínio do próprio equipamento foi utilizada como fronteira de contato entre o equipamento e a folha (Arruda Viana et al., 2021). Os valores obtidos eram visualizados no momento de cada leitura.

$$CGI = \frac{NIR}{G} - 1 \quad (4)$$

Em que,

NIR – Banda do infravermelho próximo;

Red – Banda do verde.



Figura 6. Obtenção de índices por meio do sensor multiespectral.

#### **Determinação de massa seca, produtividade, teor de proteína bruta e teor de nitrogênio.**

Para a determinação da massa seca (MS), produtividade, proteína bruta (PB) e teor de nitrogênio (N), foram realizadas três coletas de forragem em cada parcela, contabilizando uma coleta ao final de cada ciclo, conforme apresentado na Tabela 4. As coletas seguiram o método descrito por Cabezas (2011), no qual as amostras de

todas as parcelas foram cortadas a 5,0 cm da superfície do solo (Figura 7a) com auxílio de uma foice de poda. A área para realizar a coleta foi determinada a partir do lançamento aleatório de uma moldura amostral que continha uma área de 40x40 cm (Figura 7b).

Tabela 4. Período das coletas de forragem nos três ciclos.

<b>Ciclo</b>	<b>Coleta Vegetativa</b>
Ciclo 1(C1)	29/03
Ciclo 2(C2)	14/04
Ciclo 3(C3)	02/05

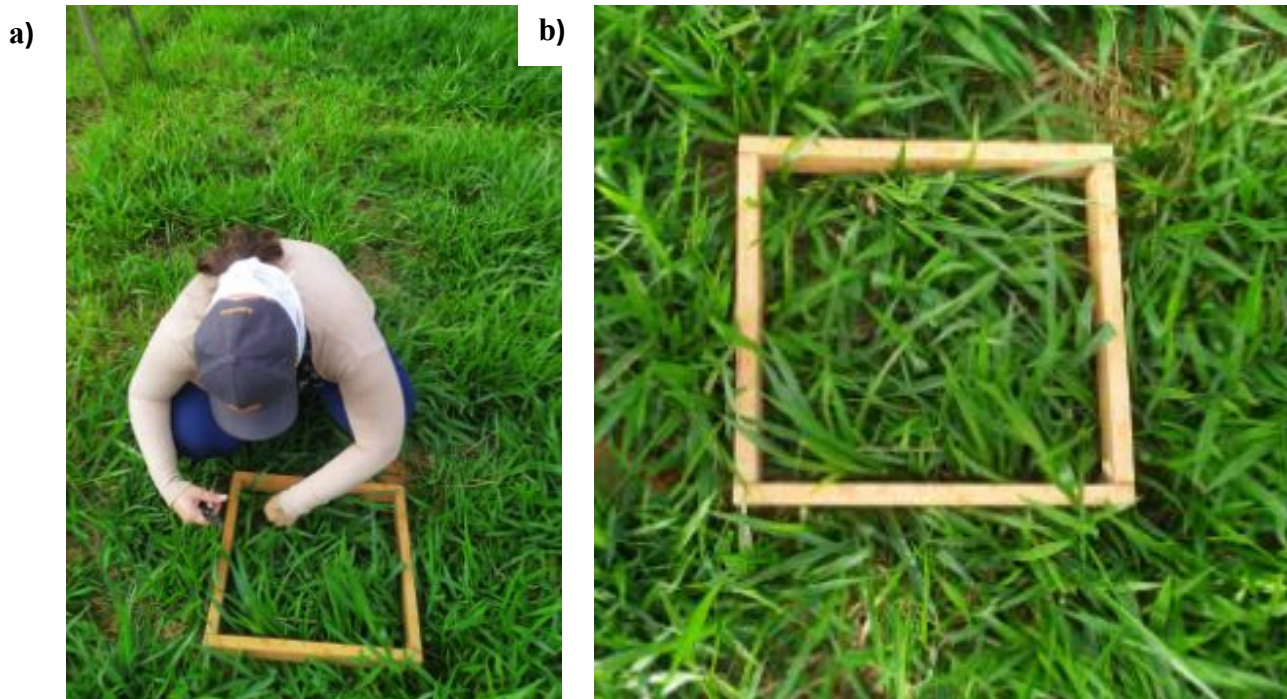


Figura 7. Coleta para amostragem utilizando o amostral (a) e amostral utilizado para realizar a coleta vegetativa (b).

Posteriormente, as amostras coletadas foram pesadas para determinação da massa verde (MV). A partir das amostras utilizadas para a MV, uma subamostra foi separada. Essa subamostra foi submetida ao processo de secagem em estufa com

circulação forçada a 65 °C durante um período de 72 horas. Ao final desse período, obteve-se a massa seca ao ar (MSA).

Para determinar massa seca em estufa (MSE), foram pesados 2 g de cada amostra antes de serem colocadas na estufa com circulação forçada, no qual permaneceram por 16 horas. Cada amostra foi analisada com duas repetições. Após o período de 16 horas, obteve-se a MSE com duas repetições para cada parcela. Com as informações obtidas até esse ponto, foi possível calcular o percentual de massa seca (%MS), utilizando a Equação 5.

$$MS(p) = \frac{MSA * MSE}{100} \quad (5)$$

Em que,

MS (p) – Massa seca, %;

MSA – Massa seca ao ar, %;

MSE – Massa seca em estufa, %.

Com o valor do percentual de massa seca (%MS) determinado, calculou-se a produtividade total da *Brachiaria Decumbens* utilizada no experimento (Equação 6).

$$MS = \frac{MS(p) * MV}{100} \quad (6)$$

Em que,

MS - Produtividade de gramínea no total, kg ha<sup>-1</sup>;

MV - Massa de amostra natural colhida, kg ha<sup>-1</sup>.

Para obter o teor de nitrogênio (N) e a proteína bruta, utilizou-se o método de Kjeldahl (AOAC, 1990). Para a análise foram usadas amostras de 200 mg. As amostras foram trituradas em um moinho Tipo Willye (Figura 8), utilizando uma peneira porosa de 1 mm para a moagem. Após a trituração, cada amostra foi inserida em um tubo de ensaio contendo a mistura digestora e ácido e, em seguida, conduzida ao digestor.



Figura 8. Moinho tipo Willye.

Após o processo de digestão, as amostras foram submetidas à destilação, permitindo a separação do nitrogênio liberado durante essa etapa. O destilado, contendo o nitrogênio, foi coletado e utilizado para a etapa de titulação. Na titulação, determinou-se a quantidade de nitrogênio presente no destilado. Para isso, adicionou-se uma solução de ácido de concentração previamente conhecida. Por meio da medida da quantidade de titulante utilizado durante a titulação, foi possível calcular o teor de nitrogênio de cada amostra. Esse procedimento é essencial no método de Kjeldahl para determinar o teor de proteína bruta, uma vez que o teor de nitrogênio é utilizado para esse cálculo. Ao final, utilizou-se as equações 7, 8 e 9 para determinar com precisão o teor de nitrogênio e proteína bruta.

$$N_{ASA} = \frac{(V - B) * Nv * 14 * 100}{ASA} \quad (7)$$

$$N_{MS} = \frac{N_{ASA}}{ASA} * 100 \quad (8)$$

$$PB_{MS} = N_{MS} * fc \quad (9)$$

Em que,

$N_{ASA}$  – Nitrogênio com base na amostra seca ao ar, %;

$V$  – Volume da solução de ácido clorídrico utilizado na titulação, mL;

$B$  – Volume de ácido clorídrico utilizado na titulação do “branco”, mL;

$N_v$  – Normalidade verdadeira do ácido clorídrico;

$N_{MS}$  – Nitrogênio com base na matéria seca, %;

$PB_{MS}$  – Proteína bruta com base na matéria seca, %;

$fc$  – fator de conversão da concentração de N, é recomendado 6,25.

### 3.4 Análise estatística

As diferenças apresentadas pelos tratamentos foram submetidas à Análise de Variância (ANOVA) e ao teste de Tukey a 5% de significância para comparação de médias. A ANOVA foi utilizada para verificar se há diferenças significativas entre os tratamentos, enquanto o teste de Tukey foi aplicado para identificar quais tratamentos apresentaram diferenças significativas entre si.

Além disso, foi utilizada a correlação de Pearson para avaliar a relação entre as variáveis do sensor ReflecSense e os equipamentos comerciais utilizados neste trabalho. A correlação de Pearson é uma medida estatística que quantifica a força e a direção da relação linear entre duas variáveis.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foi proposto a validação do sensor ReflecSense o qual pode ser útil para a zootecnia de precisão, uma vez que pode-se obter dados de variáveis espectrais em até 18 bandas, auxiliando, por exemplo, no manejo adequado de fatores importantes da *Brachiaria decumbens*, como a estimativa de produtividade, proteína bruta e teor de nitrogênio.

A avaliação dos resultados se deu após a coleta do material em três ciclos nos quais a *Brachiaria decumbens* recebeu nitrogênio de acordo com a necessidade indicada pelo sensor de baixo custo. Ao final do estudo foi possível observar um resultado positivo no uso do ReflecSense para a aplicação de nitrogênio por meio do

resultado de produtividade e proteína bruta obtidos comparando o Reflecsense com sensores comerciais.

### **Dados meteorológicos**

Conforme descrito por Qaderi, Mirwais M.; Martel, Ashley B.; Dixon, Sage L. (2019) os fatores fisiológicos das plantas podem ser influenciados por condições ambientais, como precipitação e temperatura. Em plantas forrageiras, observa-se um crescimento mais acentuado durante períodos com maior disponibilidade desses fatores, como ocorre no verão, quando as temperaturas e os índices de precipitação são mais elevados (PEREIRA-FLORES, MILTON E. et al., 2023). Dessa forma, foi inserida uma figura representativa de cada ciclo, contendo as temperaturas máximas e mínimas e a precipitação média diária registradas em cada período analisado.

As variações climáticas do primeiro ciclo são apresentadas na Figura 9. O primeiro ciclo teve início em 07 de março de 2023 e se estendeu até 29 de março de 2023, observa-se que a temperatura média se manteve relativamente estável, com valores entre 20 e 25 °C para as temperaturas mínimas e máximas, respectivamente. Segundo Paciullo; Gomide; Leite (2016), o desenvolvimento da *Brachiaria decumbens* é comprometido com temperaturas abaixo de 15 °C. O período do primeiro ciclo trata-se do fim do verão, sendo marcado também por redução de chuvas, que como podemos ver na Figura 9 apresentou picos apenas entre os dias 13 e 15 de março.

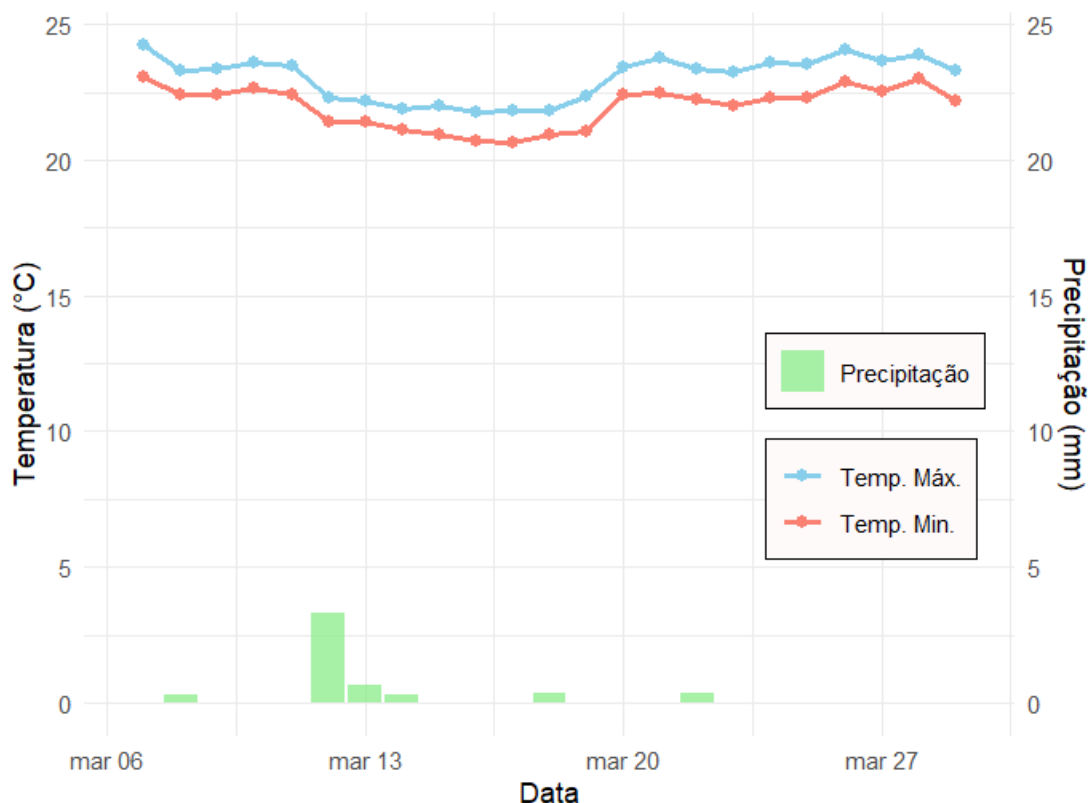


Figura 9. Temperatura máxima e mínima média e da precipitação média ao longo do primeiro ciclo.

O segundo ciclo teve início no dia 30 de março de 2023 e estendeu-se até 14 de abril de 2023. O mês de abril marca o início do outono, período caracterizado por reduções significativas na precipitação e pelo início do declínio das temperaturas. Conforme apresentado na Figura 10, a ausência de chuvas predominou ao longo do mês, com apenas um aumento na intensidade pluviométrica observado no final do período. A redução na disponibilidade hídrica pode comprometer o desenvolvimento da *Brachiaria decumbens*, uma vez que limita a absorção do N aplicado, especialmente na ausência de um suprimento hídrico adequado, essencial para o transporte e assimilação deste nutriente pela planta (HU, JIAXIN; MA, WANG; WANG, ZHENGWEN, 2023, WANG, YANG et al., 2020, DONG, SHOUKUN et al., 2024).

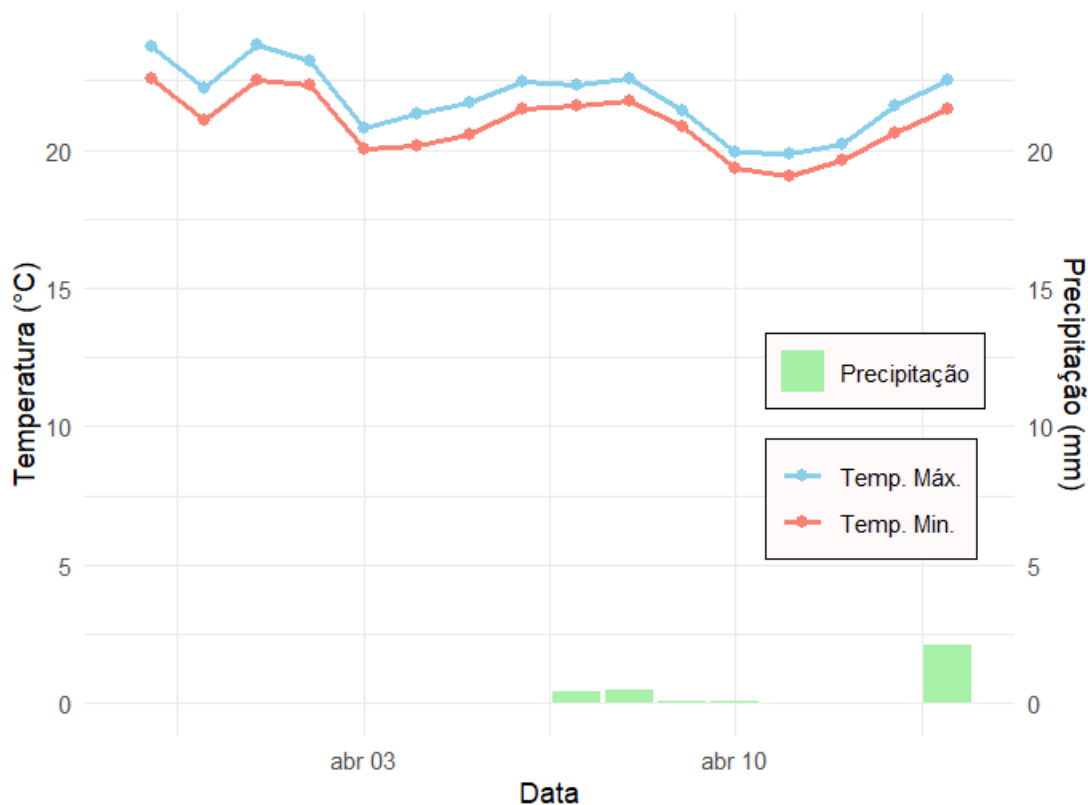


Figura 10. Temperatura máxima e mínima média e da precipitação média ao longo do segundo ciclo.

As variações climáticas observadas durante o terceiro ciclo estão apresentadas na Figura 11. Esse ciclo teve início no dia 14 de abril de 2023 e se estendeu até o dia 2 de maio de 2023. As temperaturas registradas ao longo deste período foram mais amenas quando comparadas às observadas no primeiro e no segundo ciclo, embora tenham mantido uma tendência similar. Por outro lado, a precipitação foi praticamente ausente. A baixa ocorrência de chuvas, embora possa comprometer parcialmente o desempenho da cultura devido à limitação hídrica, também apresenta um efeito positivo. A redução da precipitação nos três ciclos avaliados pode ter minimizado as perdas de nitrogênio por lixiviação, especialmente no tratamento de referência ( $T_{ref}$ ). A lixiviação é um dos principais mecanismos de perda de nitrogênio no solo, particularmente sob condições de elevada precipitação (JU, XIAO-TANG et al., 2009, AMARE, DESSIE G.; ZIMALE, FASIKAW A.; SULLA, GUCHIE G., 2024).

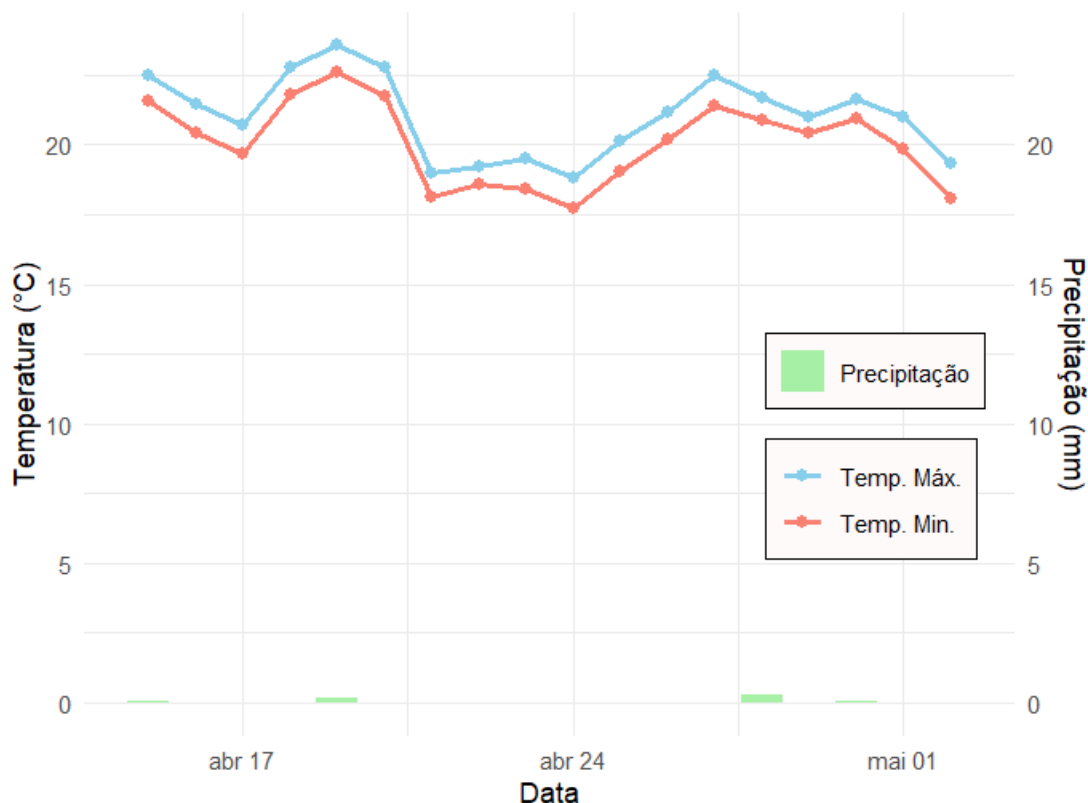


Figura 11. Temperatura máxima e mínima média e da precipitação média ao longo do terceiro ciclo.

A vista disso, observou-se que o primeiro ciclo é o que apresentou maior média de temperatura, o que pode influenciar de maneira positiva o manejo, bem como, no aumento da produção. O cultivo de forragem é influenciado por fatores genéticos de cada espécie e a absorção de nitrogênio pelas plantas varia à depender de aspectos ambientais como temperatura, luminosidade e água (VILLAR, 2012). Logo, conhecer essa variável é de suma importância para que se possa estimar a necessidade do manejo em cada período.

### Desempenho comparativo dos sensores na avaliação da produtividade e valor nutricional

A análise de correlação de Pearson foi realizada para comparar a relação entre os valores obtidos dos sensores comerciais (GreenSeeker, SPAD e Câmera multiespectral) e do ReflecSense. Para essa avaliação foi desenvolvido um mapa de calor para cada ciclo analisado e levado em consideração a escala de Schober P,

Bossers Sm, Schwarte La (2018) (Tabela 5), que classifica a força da correlação de Pearson.

Tabela 5. Descrição da magnitude do valor absoluto da correlação de Pearson com base no que é descrito por (SCHOBER P, BOSSERS SM, SCHWARTE LA. 2018).

<b>Magnitude</b>	<b>Valor absoluto (positivo ou negativo)</b>
Nula	0,00
Fraca	0,10 – 0,39
Moderada	0,40 – 0,69
Forte	0,70 – 0,89
Muito forte	0,90 – 0,99
Perfeita	1,00

Na Figura 12 é apresentada a avaliação entre a câmera multiespectral Micasense RedEdge – MX e o sensor ReflecSense no cálculo do índice de vegetação NDRE.

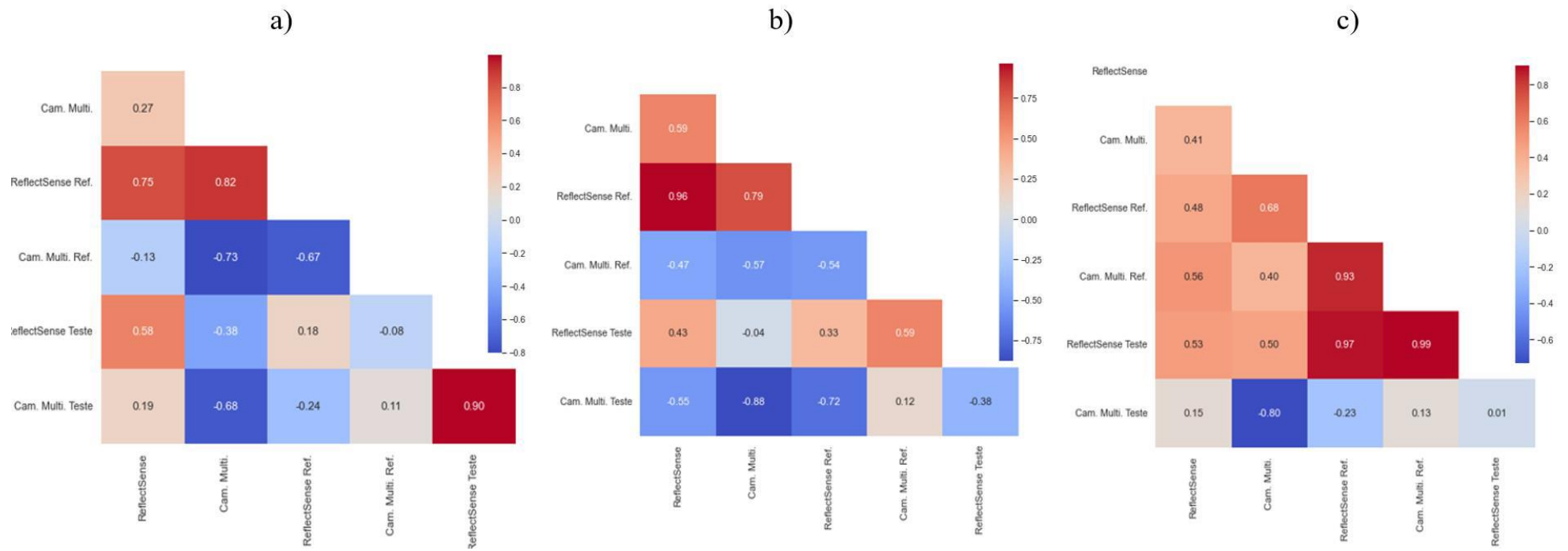


Figura 12. Mapa de calor representando a matriz de correlação de Pearson para a variável NDRE obtido com a câmera multiespectral e o ReflecSense para o primeiro (a), segundo (b) e terceiro ciclo (c).

No primeiro ciclo (Figura 12a) a correlação entre o ReflecSense e a Câmera Micasense variou significativamente entre os tratamentos. Observou-se correlação fraca ( $r = 0,27$ ) para a dose variada, moderada negativa ( $r = -0,67$ ) na referência e muito forte ( $r = 0,9$ ) na testemunha. A alta correlação na testemunha sugere que o ReflecSense conseguiu capturar variações no dossel sob estresse nutricional, comportamento similar ao reportado por THOMPSON, LAURA J.; PUNTEL, LAILA A, (2020), que identificaram a sensibilidade do NDRE em plantas que apresentavam variações de N devido a senescência da cultura. A correlação negativa na referência, por outro lado, pode refletir limitações do ReflecSense em situações de menor variabilidade no teor de clorofila.

Ao analisarmos o segundo ciclo, observa-se que houve melhora na correlação para o manejo em dose variada ( $r = 0,59$ , moderada), com uma leve queda para a referência ( $r = -0,57$ , moderada) e queda significativa ( $r = -0,38$ , fraca) para a testemunha. Essa queda significativa pode remeter a uma baixa sensibilidade do ReflecSense ao déficit nutricional do tratamento testemunha, com isso, o sensor analisado não foi capaz de acompanhar os valores obtidos pelo método comercial.

Por fim, no terceiro ciclo, o ReflecSense continuou apresentando correlação moderada para a dose variada, muito forte ( $r = 0,93$ ) na referência e nula ( $r = 0,01$ ) na testemunha. O valor nulo na testemunha reforça o que foi comentado anteriormente, quando a cultura apresentou maior deficiência nutricional (justamente por estar a três ciclos sem nenhum tipo de adubação nitrogenada) o ReflecSense não apresentou nenhuma correlação com o índice gerado pelo sensor comercial. Ou seja, não houve relação alguma entre os valores obtidos pela Micasense e pelo ReflecSense. Por outro lado, aumento expressivo da correlação na referência sugere melhor ajuste do sensor ao incremento de biomassa com aplicação de N. Li et al. (2021) reportaram comportamento semelhante ao comparar sensores para detecção de estresse em gramíneas.

Para avaliar a correlação (Figura 13) entre o GreenSeeker e o ReflecSense foi utilizado o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Na Figura 13 estão os valores da correlação para identificar se houve relação entre os dois sensores ao calcular o NDVI.

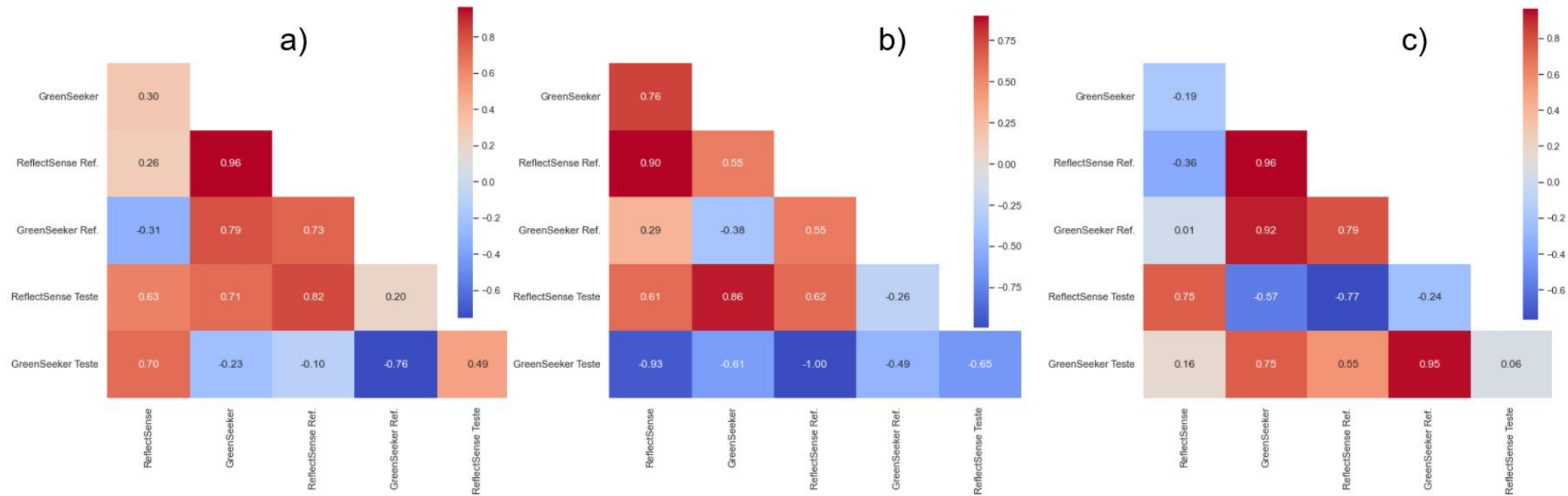


Figura 13. Mapa de calor representando a matriz de correlação de Pearson para a variável NDVI obtido com a câmera multiespectral e o ReflecSense para o primeiro (a), segundo (b) e terceiro ciclo (c).

Para o primeiro ciclo, o ReflecSense apresentou correlação fraca ( $r = 0,3$ ) com o GreenSeeker na dose variada, forte ( $r = 0,73$ ) na referência e moderada ( $r = 0,49$ ) na testemunha. A forte correlação na referência destaca a capacidade do ReflecSense em captar respostas no dossel sob o incremento de biomassa com elevada aplicação de N. Foi encontrado por (BARBOSA, JOSÉ DE ARRUDA et al., 2020) que o NDVI é uma boa ferramenta para manejar a fertilização nitrogenada em cobertura, ou seja, aquela onde a planta já está estabelecida. Apresentando que a cultura já presente na área ao receber a adubação nitrogenada tem boa resposta a essa adubação. Portanto, a correlação presente entre os sensores mostra que o ReflecSense está conseguindo acompanhar adequadamente o sensor comercial.

Para o segundo ciclo, foi encontrado uma correlação forte ( $r = 0,76$ ) para a dose variada confirma o bom desempenho do ReflecSense em condições de maior variabilidade. No entanto, a correlação negativa no teste ( $r = -0,65$ ) indica possível saturação do NDVI sob estresse nutricional, algo similar foi encontrado por (RYU, JAE-HYUN et al., 2020).

No terceiro ciclo observou-se correlação fraca ( $r = -0,19$ ) na dose variada, forte ( $r = 0,79$ ) na referência e nula ( $r = 0,06$ ) no teste. O desempenho heterogêneo pode ser explicado pela saturação do NDVI e pela dificuldade em detectar pequenas variações sob deficiência específica de N, conforme visto no trabalho de (PAUL, MANORANJAN et al., 2020).

Por fim, foi analisado o GCI (Índice de Clorofila Verde), no qual foi utilizado o sensor SPAD em comparação ao ReflecSense. Os valores dessa correlação estão apresentados na figura 14.

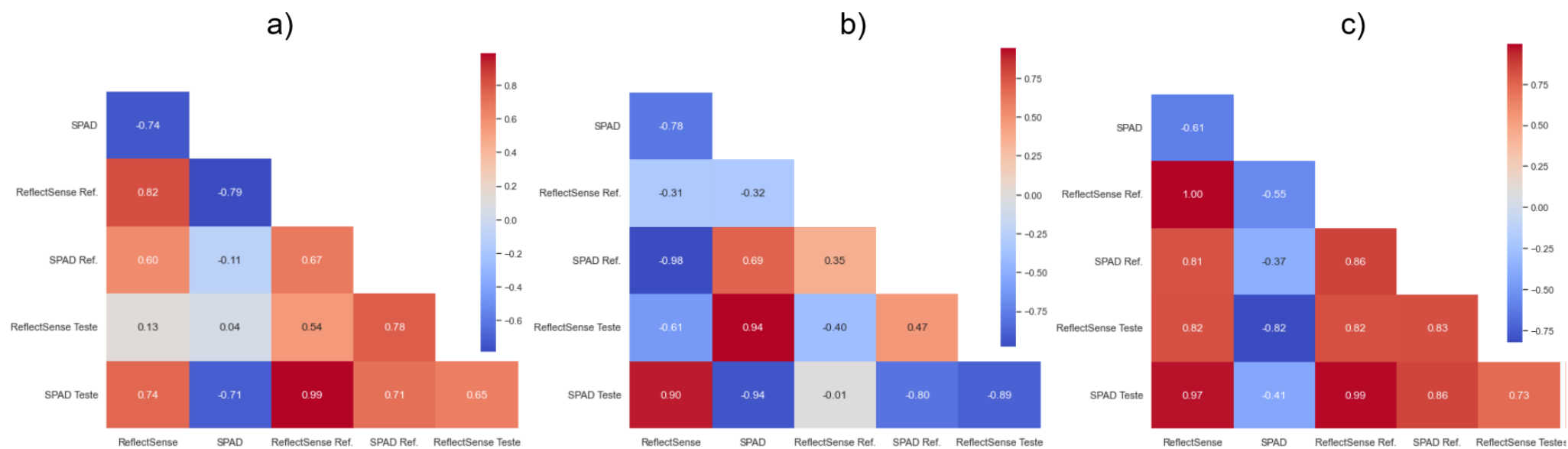


Figura 14. Mapa de calor representando a matriz de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas NDVI e ReflectSense para o primeiro (a), segundo (b) e terceiro ciclo (c).

O ReflecSense, no primeiro ciclo, apresentou correlação forte negativa ( $r = -0,74$ ) para a dose variada, moderada ( $r = 0,67$ ) na referência e moderada ( $r = 0,65$ ) no teste. A correlação negativa pode indicar diferenças no comportamento espectral dos sensores, causando variação na detecção e quantificação do que é avaliado (GENÚ, ALINE MARQUES; DEMATTÊ, JOSÉ ALEXANDRE MELO; NANNI, MARCOS RAFAEL. 2013).

Já o segundo ciclo foi apresentado forte correlação negativa ( $r = -0,78$ ) na dose variada e forte negativa ( $r = -0,89$ ) na testemunha. A menor correlação na referência ( $r = 0,35$ , fraca) pode sugerir interferências de outras variáveis, como biomassa ou ângulo de incidência da luz. No último ciclo, houve melhora na correlação para todas as condições: moderada negativa ( $r = -0,61$ ) na dose variada e forte ( $r = 0,86$  e  $r = 0,73$ ) na referência e na testemunha, respectivamente.

Os valores de correlação obtidos destacam o potencial do ReflecSense como alternativa aos sensores comerciais. A maior consistência foi observada nos índices NDRE e SPAD, especialmente em condições de referência e testemunha, onde a variabilidade nutricional é mais pronunciada. Esse fato demonstra certa realidade, visto que ambos os índices NDRE e CGI são utilizados mediante análise de clorofila.

Contudo, as correlações negativas e nulas observadas em algumas condições sugerem a necessidade de ajustes na calibração espectral do ReflecSense. Estudos recentes também reforçam a importância de considerar fatores ambientais e inserir essas características no desenvolvimento de novos sensores.

### **Resposta a adubação nitrogenada mensurada pelo sensor ReflecSense**

A análise de variância (ANOVA) apresentada na Tabela 6 evidencia o efeito significativo dos tratamentos sobre a produtividade (PROD.), a proteína bruta (PB) e o teor de nitrogênio (TN) ao longo dos três ciclos avaliados. Os resultados demonstram que os tratamentos influenciaram de forma consistente e significativa, especialmente nas variáveis PB e TN, como indicado pelos valores de quadrados médios significativamente superiores aos resíduos e pelos baixos coeficientes de variação (CV%), especialmente nos ciclos 2 e 3.

Tabela 6. Resumo da análise de variância (ANOVA) das variáveis produtividade (PROD.), proteína bruta (PB) e teor de nitrogênio (TN) em função dos tratamentos e os respectivos coeficientes de variação para os três ciclos.

<b>FV</b>	<b>PROD.</b>	<b>PB</b>	<b>TN</b>
<b>PRIMEIRO CICLO</b>			
Bloco	28487,02	12,83	34,1
Tratamentos	899411,7*	70,57**	171,33**
Resíduo	20389,68	4,91	28,84
CV (%)	33,79	11,29	38,55
<b>SEGUNDO CICLO</b>			
Bloco	17668,93	2,4312	20,3124
Tratamentos	161298,1**	131,2095**	391,6805**
Resíduo	21880,2	3,9649	24,9725
CV (%)	20,915	10,234	21,676
<b>TERCEIRO CICLO</b>			
Bloco	1995,41	3,1181	12,69
Tratamentos	160473,4**	119,69**	423,48**
Resíduo	29313,54	2,48	22,97
CV (%)	22,221	8,55	20,06

\*F significativo a 5% de probabilidade; \*\*F significativo a 1% de probabilidade; CV – Coeficiente de Variação; PROD. – Produtividade; PB – Proteína Bruta; TN – Teor de Nitrogênio; FV – Fontes de Variação.

Os dados de produtividade, proteína bruta (PB) e teor de nitrogênio (TN) apresentados na Tabela 1 revelam um efeito significativo dos tratamentos nos três ciclos, com destaque para os segundo e terceiro ciclos, onde o F foi significativo a 1% de probabilidade. O coeficiente de variação (CV%) apresentou uma redução consistente ao longo dos ciclos, especialmente na variável

produtividade, que passou de 33,79% no primeiro ciclo para 20,915% no segundo e 22,221% no terceiro, sugerindo uma menor variabilidade entre as repetições. Essa tendência pode estar associada ao refinamento das práticas de manejo, corroborando com Riar, Amritbir; Gill, Gurjeet; Mcdonald, Glenn (2020) que destacam que o uso do nitrogênio de forma estratégica pode contribuir na melhoria da eficiência de seu uso, conseqüentemente melhorando a produtividade da cultura.

Em relação à proteína bruta (PB), os valores dos quadrados médios foram altamente significativos em todos os ciclos (F significativo a 1%). O CV% apresentou os menores valores, especialmente no terceiro ciclo (8,55%), indicando um impacto direto dos tratamentos sobre a composição proteica. Como apontado por Zhong, Yingxin et al., (2018), o manejo eficiente do nitrogênio contribui para o aumento da síntese de proteínas nas plantas. Além disso, o comportamento estável do CV% ao longo dos ciclos confirma que a variabilidade na PB foi a menos afetada pelos tratamentos e ciclos, como observado na Tabela 6.

O teor de nitrogênio (TN) também apresentou diferenças significativas nos três ciclos, com os maiores efeitos registrados no terceiro ciclo. O CV% reduziu-se progressivamente (38,55% no primeiro ciclo, 21,676% no segundo e 20,06% no terceiro), sugerindo que os tratamentos tiveram um impacto mais uniforme na distribuição do nitrogênio ao longo do tempo. Conforme descrito em trabalho realizado por ZHOU, Yu et al., (2024) foi evidenciado que ao dividir a aplicação de nitrogênio houve aumento na produtividade se comparado a dose única.

A maior variação da produtividade ocorreu entre os ciclos 1 e 2, enquanto a maior variação do teor de N foi observada do ciclo 1 ao ciclo 3. Essas oscilações podem estar relacionadas aos níveis pluviométricos presentes em cada ciclo, uma vez que a disponibilidade hídrica afeta diretamente a dinâmica do N no solo e a absorção pela planta. No entanto, a baixa oscilação entre os valores de CV sugere uma avaliação positiva do uso dos sensores para a aplicação de N em plantas forrageiras, especialmente nos ciclos mais recentes.

Os resultados deste estudo corroboram, em parte, com o observado por Villar (2012), que relatou que todos os blocos experimentais receberam, ao menos uma vez, aplicação de adubo nitrogenado em alguma parcela. No entanto, divergem quanto à indicação da necessidade de aplicação, uma vez

que, neste trabalho, os sensores identificaram demanda por nitrogênio em todas as áreas avaliadas em algum momento do experimento.

Portanto, os ciclos 2 e 3 apresentaram os melhores índices de coeficiente de variação (CV%), com impactos positivos na produtividade, proteína bruta e teor de nitrogênio. Os baixos valores de CV% na PB e TN, especialmente no terceiro ciclo, indicam que o manejo mais ajustado nos últimos ciclos foi capaz de reduzir a variabilidade, um fator essencial para a confiabilidade dos resultados experimentais. Assim, os tratamentos aplicados demonstram eficácia na modulação dos índices produtivos e qualitativos, destacando a importância de um manejo estratégico de fertilizantes nitrogenados para otimizar a produtividade e a qualidade nutricional das plantas avaliadas.

A Tabela 7 apresenta os resultados do teste de Tukey a 5% de significância, utilizado para verificar diferenças estatísticas entre as médias das variáveis analisadas. Nas três variáveis estudadas — produtividade (PROD.), proteína bruta (PB) e teor de nitrogênio (TN) — os tratamentos com manejo nitrogenado (T1, T2, T3 e T4) apresentaram valores significativamente superiores em comparação à testemunha (T0) em todos os ciclos, destacando a importância da adubação nitrogenada. Esse manejo é essencial para o desenvolvimento das plantas e contribui diretamente para o aumento da produtividade nas colheitas (ZAYED, Omar et al. 2023; SHARMA, Lakesh K.; BALI, Sukhwinder K. 2017).

Tabela 7. Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis produtividade, proteína bruta e teor de nitrogênio

<b>Tratamentos</b>	<b>PROD. (kg/ha)</b>	<b>PB (%)</b>	<b>TN (%)</b>
<b>PRIMEIRO CICLO</b>			
T0 - Testemunha	229,22 b*	12,19 b*	4,30 b*
T1 – Referência	514,71 ab	20,64 a	17,11 a
T2 – NDRE	618,25 a	22,10 a	21,91 a
T3 – CGI	349,69 ab	21,13 a	11,79 ab
T4 – NDVI	400,98 ab	22,04 a	14,51 ab
<b>SEGUNDO CICLO</b>			

T0 - Testemunha	418,2101 b*	9,3457 b*	6,3627 b*
T1 – Referência	972,7496 a	21,1938 a	32,8459 a
T2 – NDRE	700,5263 ab	22,7247 a	25,4624 a
T3 – CGI	664,2613 ab	23,0669 a	24,4959 a
T4 – NDVI	780,5359 a	20,9555 a	26,1066 a
<b>TERCEIRO CICLO</b>			
T0 - Testemunha	432,3812 b*	8,7259 b*	5,93 b*
T1 – Referência	892,3978 a	21,6372 a	30,49 a
T2 – NDRE	809,4782 ab	21.4258 a	27,89 a
T3 – CGI	942,9763 a	20,302 a	30,25 a
T4 – NDVI	775,2517 ab	20,09 a	27,91 a

As médias seguidas de pelo menos uma letra na coluna não diferi entre si ao nível de 5% de significância pelo teste de Tukey.

Com relação a produtividade (PROD.), observou-se que, em todos os três ciclos, não houve diferença estatística entre o tratamento referência (T1) e os tratamentos com adubação em taxa variável (T2, T3 e T4). Esses resultados corroboram estudos recentes que destacam a importância da aplicação precisa de nitrogênio, por meio de tecnologias baseadas em sensores espectrais, como estratégia para promover a eficiência no uso desse nutriente (SILVA, LUÍS ET AL 2023; CONRADO, JEFTE A. DE A. ET AL. 2021).

Vale ressaltar que, no primeiro e no terceiro ciclo, os tratamentos T2 e T3 apresentaram valores superiores aos do tratamento referência, respectivamente, embora não tenham demonstrado diferença estatística. De maneira geral, a produtividade aumentou ao longo dos ciclos em todos os tratamentos com adubação nitrogenada. O tratamento T3, por exemplo, iniciou com valores de 349,69 kg/ha no primeiro ciclo e alcançou 942,97 kg/ha no terceiro ciclo, quase triplicando o valor inicial.

Conforme descrito por De Paula Corrêdo, Lucas et al., (2019) a aplicação de N em taxa variável se mostra uma ferramenta promissora para a redução de custos, pois apresenta resultados estatisticamente equivalentes ao tratamento referência, com valores numericamente superiores (Tabela 7). Isso indica que a

consistência produtiva está diretamente associada a um manejo mais ajustado, resultando na redução da variabilidade (conforme ANOVA apresentada na Tabela 7) e na maximização dos índices produtivos.

No que se refere ao teor de proteína bruta (PB), o tratamento T3 destacou-se no segundo ciclo, apresentando o maior valor (23,07%). Esse resultado evidencia a relação entre o índice de clorofila e a absorção eficiente do N.

Apesar do valor numérico superior, não houve diferença estatística entre os tratamentos nitrogenados, indicando que a aplicação parcelada de N não promove diferenças significativas no teor de proteína bruta.

Quanto ao teor de nitrogênio (TN), o comportamento foi semelhante ao observado para a PB. Os tratamentos nitrogenados não apresentaram diferença estatística entre si, mas todos evidenciaram um aumento no TN ao longo dos ciclos. Destaca-se o tratamento T3, que apresentou valores muito próximos ao da referência (T1) no terceiro ciclo, enquanto o T2 apresentou o maior valor no primeiro ciclo, superando a referência.

A ausência de diferenças entre os tratamentos sugere que o uso do ReflecSense pode auxiliar na aplicação à taxa variada de N por meio de diferentes índices de vegetação. Assim, o uso dessa tecnologia demonstra potencial para aliar desempenho agrônômico à redução de custos e impacto ambiental. Visto que se trata de um equipamento capaz de determinar inúmeros índices de vegetação, possui 18 bandas espectrais diferentes, possui baixo custo de aquisição e é de fácil manuseio, tornando-o ideal para o pequeno e médio produtor.

## CONCLUSÃO

O presente estudo validou o sensor ReflecSense como uma ferramenta promissora para a zootecnia de precisão, demonstrando sua capacidade em obter dados significativos para o manejo adequado da *Brachiaria decumbens*. A análise comparativa com sensores comerciais (GreenSeeker, SPAD e câmera Micasense RedEdge – MX) evidenciou desempenho satisfatório do ReflecSense em diferentes ciclos de cultivo, especialmente em condições de variabilidade na aplicação de nitrogênio.

Os resultados de correlação indicaram que o ReflecSense apresentou desempenho heterogêneo em situações de estresse nutricional extremo, mas mostrou alta sensibilidade na captação de variações no dossel em ciclos com incrementos de biomassa, reforçando seu potencial para ajustes de manejo. A análise de correlação de Pearson revelou comportamentos distintos entre os sensores, como saturação de índices em condições de estresse e diferenças na detecção espectral, o que reforça a necessidade de ajustes no ReflecSense para aprimorar sua precisão em ambientes variados.

Além da correlação, foi realizado a Análise de Variância (ANOVA), que constatou uma redução no Coeficiente de Variação (CV%) ao longo dos ciclos nas três análises realizadas: Produtividade (PROD), Teor de Proteína Bruta (PB) e Teor de Nitrogênio (TN). Esse fato pode estar associado ao refinamento da prática de manejo realizada.

Por fim, as médias foram comparadas para verificar possíveis diferenças estatísticas a partir do teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foi verificado que as médias dos tratamentos com manejo nitrogenado (T1, T2, T3 e T4) apresentaram valores significativamente superior se comparado com a testemunha (T0), para todos os ciclos e nas três variáveis analisadas (PROD, PB e TN), reforçando a importância do manejo nitrogenado. Além disso, observou-se que em todos os ciclos o tratamento referência (T1) não distinguiu estatisticamente dos tratamentos com adubação a taxa variada (T2, T3 e T4).

Assim, o ReflecSense apresentou-se como uma ferramenta inovadora e complementar, contribuindo para a otimização do manejo da fertilização nitrogenada e para a melhoria da produtividade e qualidade da *Brachiaria*

decumbens, com potencial para ser integrado a sistemas de sensores já consolidados, promovendo maior eficiência e sustentabilidade na produção agropecuária.

## REFERÊNCIAS

ADHIKARI, R.; LI, C.; KALBAUGH, K.; NEMALI, K. A low-cost smartphone controlled sensor based on image analysis for estimating whole-plant tissue nitrogen (N) content in floriculture crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.169, n.1, p.1-9, 2020.

AMARE, Dessie G.; ZIMALE, Fasikaw A.; SULLA, Guchie G. Effect of irrigation regimes on nutrient uptake and nitrate leaching in maize (*Zea mays* L.) production at Birr-Farm, Upper Blue Nile, Ethiopia. **Heliyon**, v. 10, n. 18, 2024.

BARBOSA, José de Arruda et al. Nitrogen fertilization management in white oat using spectral indices. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e64924, 2020.

BRASIL. MapBiomass. Pastagem, soja e cana ocupam 77% da área de agropecuária no Brasil. 2023. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2024/12/06/pastagem-soja-e-cana-ocupam-77-da-area-de-agropecuaria-no-brasil>. Acesso em: 23 jan. 2025.

CARVALHO, T. B. de; ZEN, S. de; TAVARES, E. C. N. Comparação de custo de produção na atividade de pecuária de engorda nos principais países produtores de carne bovina. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 47., 2009, Porto Alegre. Anais... <https://sober.org.br/palestra/9/571.pdf>

CONRADO, Jeffe A. de A. et al. Prediction of *Brachiaria decumbens* forage biomass using structural characteristics. **Chilean journal of agricultural research**, v. 81, n. 3, p. 467-478, 2021.

DE PAULA CORRÊDO, Lucas et al. Nitrogen variable rate in pastures using optical sensors. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 6Supl2, p. 2917-2932, 2019.

DEBLITZ, C. Agri benchmark beef report 2009: benchmarking farming systems worldwide. VTI, Braunschweig. 2009. [www.agribenchmark.org/beef\\_results\\_farm\\_beef\\_reports.html](http://www.agribenchmark.org/beef_results_farm_beef_reports.html)

DONG, Shoukun et al. Effects of drought stress and re-watering on nitrogen content in soybean at different growth stages. **Chilean journal of agricultural research**, v. 84, n. 4, p. 548-561, 2024.

EOS. Deficiência de nitrogênio nas plantas. Disponível em: <https://eos.com/pt/blog/deficiencia-de-nitrogenio>. Acesso em: 12 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DE MINAS GERAIS (EPAMIG). Pesquisadores da EPAMIG comentam importância da recuperação de pastagens. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/agricultura/noticias/pesquisadores-da-epamig-comentam-importancia-da-recuperacao-de-pastagens>. Acesso em 29 jan. 2025.

FAGUNDES, J.L.; FONSECA, D.M.; MISTURA, C. et al. Acúmulo de forragem em pastos de *Brachiaria decumbens* adubados com nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v.35, n.1, p.21-29, 2006.

FAO. The state of food and agriculture. Rome: FAO, 2009. Disponível em: <http://bit.ly/dcsAFD>. Acesso em: 25 jul. 2013. FERRAZ, J. B. S.; FELÍCIO, P. E. D. Production systems - An example from Brazil. *Meat Science*, v. 84, n. 2, p. 238-243, 2010.

FRANCIS, D. D.; PIEKIELEK, W. P. Assessing Crop Nitrogen Needs with Chlorophyll Meters. *SSMG-12*: 4 p. 1999.

GENÚ, Aline Marques; DEMATTÊ, José Alexandre Melo; NANNI, Marcos Rafael. Caracterização e comparação do comportamento espectral de atributos do solo obtidos por sensores orbitais (ASTER e TM) e terrestre (IRIS) Characterization and comparison of soil spectral response obtained from orbital. **Ambiência**, v. 9, n. 2, p. 279-288, 2013.

HABIBULLAH, M.; MOHEBIAN, M.R.; SOOLANAYAKANAHALLY, R.; WAHID, K.A.; DINH, A. A Cost-Effective and Portable Optical Sensor System to Estimate Leaf Nitrogen and Water Contents in Crops. *Sensors*, v.20, n.5, p.1-16, 2020.

HU, Jiabin; MA, Wang; WANG, Zhengwen. Effects of nitrogen addition and drought on the relationship between nitrogen-and water-use efficiency in a temperate grassland. **Ecological Processes**, v. 12, n. 1, p. 36, 2023.

JU, Xiao-Tang et al. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 106, n. 9, p. 3041-3046, 2009.

JUIZ DE FORA: EMBRAPA GADO DE LEITE, 2016. <  
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1054144>>

MACEDO, C. H. O.; ANDRADE, A. P.; SANTOS, E. M.; SILVA, D. S.; SILVA, T. C.; EDVAN, R. L. Perfil fermentativo e composição bromatológica de silagens de sorgo em função da adubação nitrogenada. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, v.13, n.2, p.371-382, 2012.

NAGUIB, N. S.; DALIMAN, S. Analysis of NDVI and NDRE indices using satellite images for crop identification at Kelantan. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2022. p. 012054.

PAUL, Manoranjan et al. Hyperspectral Imaging to detect Age, Defects and Individual Nutrient Deficiency in Grapevine Leaves. **arXiv preprint arXiv:2007.05197**, 2020.

PEREIRA-FLORES, Milton E. et al. Seasonal climate impact on Brazilian pasture (*Brachiaria brizantha* cv Marandu): growth rate, CO<sub>2</sub> efflux, and irrigation strategies. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 151, n. 1, p. 651-666, 2023.

PINTO, Lilian Vilela Andrade; ROMA, Talita Nazareth de; BALIEIRO, Kátia Regina de Carvalho. Avaliação qualitativa da água de nascentes com diferentes usos do solo em seu entorno. **Cerne**, v. 18, p. 495-505, 2012.

QADERI, Mirwais M.; MARTEL, Ashley B.; DIXON, Sage L. Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. **Plants**, v. 8, n. 3, p. 65, 2019.

RIAR, Amritbir; GILL, Gurjeet; MCDONALD, Glenn. Different post-sowing nitrogen management approaches required to improve nitrogen and water use

efficiency of canola and mustard. **Frontiers in plant science**, v. 11, p. 1111, 2020.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais, 1999. 359 p

RYU, Jae-Hyun et al. Remote sensing-Based evaluation of heat stress damage on paddy rice using NDVI and PRI measured at leaf and canopy scales. **Agronomy**, v. 12, n. 8, p. 1972, 2022.

Schober P, Bossers SM, Schwarte LA. Statistical Significance Versus Clinical Importance of Observed Effect Sizes: What Do P Values and Confidence Intervals Really Represent? *Anesth Analg*. 2018 Mar;126(3):1068-1072. doi: 10.1213/ANE.0000000000002798. PMID: 29337724; PMCID: PMC5811238.

SHARMA, Lakesh K.; BALI, Sukhwinder K. A review of methods to improve nitrogen use efficiency in agriculture. **Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 51, 2017.

SILVA, Luís et al. Remote monitoring of crop nitrogen nutrition to adjust crop models: A review. **Agriculture**, v. 13, n. 4, p. 835, 2023.

SILVA, J. F.; ALMEIDA, P. F.; SOUSA, R. P. Análise de nitrogênio em tempo real com o clorofilômetro SPAD: uma alternativa às análises laboratoriais tradicionais. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 44, n. 2, p. 1-12, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcceres/a/vwQzmSzzVCGQptRTqGC73xy/?utm.com>. Acesso em 29 dez. 2024.

SOARES, E.C.; SILVA, A.C.; CRUZ, M.A.S.; SANTOS, E.L.; OLIVEIRA, T.R.; SILVA, T.J.; RIAL, E.P.; SILVA, R.N.; SILVA, J.V. Expedition on the Lower São Francisco: An X-ray of fisheries and agriculture, pollution, silting and saline intrusion. *Brazilian Journal of Development*, v.6, n.1, p. 3047-3064, 2020.

SYNGENTA. *Brachiaria decumbens*: Características e usos. Disponível em: <https://maisagro.syngenta.com.br/dia-a-dia-do-campo/glossario-de-alvos-brachiaria-decumbens>. Acesso em: 12 dez. 2024

SYNGENTA DIGITAL AG. Pecuária brasileira: manter qualidade dos pastos é desafio. Disponível em: <https://blog.syngentadigital.ag/pecuaria-brasileira-manter-qualidade-dos-pastos-e-desafio>. Acesso em: 02 jan. 2025.

THOMPSON, LAURA J.; PUNTEL, LAILA A. Transforming unmanned aerial vehicle (UAV) and multispectral sensor into a practical decision support system for precision nitrogen management in corn. **Remote Sensing**, v. 12, n. 10, p. 1597, 2020.

VILLAR, F.M.M; PINTO, F.A.C.; FONSECA, D.M.; QUEIROZ, D.M.; ALCANTARA, G.R.; Sufficiency index for defining nitrogen recommendation in brachiaria grass pasture. *Bioscience Journal*. 31. 1333-1340. 10.14393/BJ-v31n5a2015-26338.

VILLAR, FLORA MARIA DE MELO et al. Elasticity modulus and damping ratio of macaw palm rachillas. **Ciência Rural**, v. 47, n. 2, p. e20160289, 2016.

WANG, L.; DUAN, Y.; ZHANG, L.; WANG, J.; LI, Y.; JIN, J. LeafScope: A Portable High-Resolution Multispectral Imager for In Vivo Imaging Soybean Leaf. *Sensors*, v.20, n.8, p. 1-16, 2020.

WANG, YANG et al. Efficient physiological and nutrient use efficiency responses of maize leaves to drought stress under different field nitrogen conditions. **Agronomy**, v. 10, n. 4, p. 523, 2020.

ZAYED, OMAR et al. Nitrogen journey in plants: From uptake to metabolism, stress response, and microbe interaction. **Biomolecules**, v. 13, n. 10, p. 1443, 2023.

ZHONG, YINGXIN et al. Nitrogen topdressing timing modifies free amino acids profiles and storage protein gene expression in wheat grain. **BMC Plant Biology**, v. 18, p. 1-14, 2018.

ZHOU, YU et al. Optimal nitrogen management for high yield and N use efficiency of ratoon sorghum. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 19566, 2024.