



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA  
CENTRO DE ESTUDOS SUPERIORES DE BALSAS - CESBA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE - PPGAA**

**DIÉSSICA LETÍCIA JUNGES**

**USO DE IMAGEM DIGITAL FOLIAR COMO FERRAMENTA PARA  
DIAGNOSTICAR NITROGÊNIO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI**

Balsas - MA  
2023

**DIÉSSICA LETÍCIA JUNGES**

**USO DE IMAGEM DIGITAL FOLIAR COMO FERRAMENTA PARA  
DIAGNOSTICAR NITROGÊNIO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Heder Braun

Coorientador: Prof. Rogério Faria Vieira

J95u

Junges, Diéssica Letícia

Uso de imagem digital foliar como ferramenta para diagnosticar nitrogênio em genótipos de feijão-caupi. / Diéssica Letícia Junges. – Balsas, MA, 2023.

44f.

Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente - PPGAA/UEMA – UEMA/Balsas, 2023.

Orientador: Professor Dr. Heder Braun.

1. *Vigna unguiculata* L. Walp. 2. Índice de coloração vegetal. 3. Teor de nitrogênio. 4. *Dark Green Color Index* (DGCI). I. Título.

CDU:631.52

Elaborado pela bibliotecária Maria da Consolação Coelho Rocha CRB 13/604

**DIÉSSICA LETÍCIA JUNGES**

**USO DE IMAGEM DIGITAL FOLIAR COMO FERRAMENTA PARA  
DIAGNOSTICAR NITROGÊNIO EM GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI**

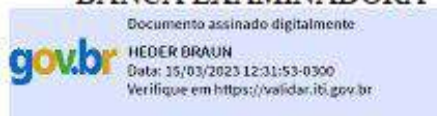
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente – PPGAA/CESBA/UEMA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Ambiente.

Orientador (a): Heder Braun

Coorientador: Prof. Rogério Faria Vieira

Aprovada em 15/02/2023

**BANCA EXAMINADORA**



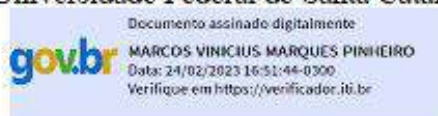
(Heder Braun)

**Universidade Estadual do Maranhão**



(Tiago Olivoto)

**Universidade Federal de Santa Catarina**



(Marcos Vinicius Marques Pinheiro)

**Universidade Estadual do Maranhão**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, que sempre me incentivou e apoiou nos estudos e na vida.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos durante o mestrado, e FAPEMA pelo apoio financeiro para a execução do projeto de pesquisa.

À Universidade Estadual do Maranhão pela oportunidade de realização do curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Heder Braun, pelos ensinamentos durante a execução da pesquisa e redação da dissertação.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente, pelo apoio durante a pesquisa e na construção da dissertação, e aos demais professores.

À equipe de pesquisa do professor Heder: Vanessa, Karen, Lincon, Ester, Werlen, Alan, Myrella e Marcos, obrigada pelo apoio e assistência nas execuções das atividades, aprendi muito com vocês.

E a todos que me ajudaram de alguma forma na construção desse trabalho.

**Obrigada a todos!**

## LISTA DE SIGLAS

N – Nitrogênio

Mo – Molibdênio

DAE – Dias após emergência

TNF – Teor de nitrogênio na folha

TNS – Teor de nitrogênio nas sementes

IAF – Índice de área foliar

PT - Produtividade

R-B - *Red – Blue*

B-R - *Blue – Red*

NB - *Normalized blue*

DGCI – *Dark Green Color Index*

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Correlação de Pearson entre índice de coloração vegetal e os parâmetros: teor de nitrogênio na folha (TNF  $\text{g kg}^{-1}$ ), teor de nitrogênio nas sementes (TNS  $\text{g kg}^{-1}$ ), índice de área foliar (IAF), índice de verde (CCM) e produtividade (PT,  $\text{g m}^{-2}$ ), com 20 genótipos de feijão-caupi.....32
- Figura 2** - Relações do índice DGCI com teor de N na folha (TNF) (a); índice de verde (CCM-200) e TNF (b); índice R-B com índice área foliar (IAF) e R-B com produtividade (c); índice NB com teor de N nas sementes (TNS) e NB com produtividade (d); e TNS com produtividade (e).....34
- Figura 3** - Análise de componentes principais com os parâmetros avaliados nos 20 genótipos (G) de feijão-caupi: teor de N na folha (TNF), teor de N nas sementes (TNS), índice de área foliar (IAF), produtividade (PT) e índice de verde (CCM-220), e os principais índices de coloração vegetal do estudo R-B (*Red – Blue*), B-R (*Blue – Red*), NB (*Normalized Blue*) e DGCI (*Dark Green Color Index*).....35
- Figura 4.** Imagens digitais da 3ª folhas totalmente expandida do ápice para a base dos genótipos de *Vigna unguiculata*: MNC11-1013E-333(G1) (a;d), MNC11-1052E-3 (G15) (b; e) e BRS Guariba (G20) (c; f) aos 58 DAE.....38

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Características físico-química do solo, na profundidade de 0-20 cm, Nina Rodrigues, Maranhão.....28
- Tabela 2.** Descrição, parentais, subclasse comercial e porte dos 20 genótipos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) utilizados no estudo, em Nina Rodrigues, Maranhão, Brasil.....29
- Tabela 3.** Índices de vegetação analisados por meio do pacote Pliman (OLIVOTO, 2022)..31.



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>10</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2. OBJETIVO.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1 Feijão-Caupi.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2 Nitrogênio .....</b>	<b>16</b>
<b>3.3 Relação Nitrogênio e Molibdênio .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4 Análises por imagens .....</b>	<b>19</b>
<b>4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>25</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>26</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>29</b>
<i>Área de estudo.....</i>	<i>29</i>
<i>Delineamento experimental e condições de cultivo.....</i>	<i>29</i>
<i>Imagens, índices de vegetação e diagnóstico nutricional .....</i>	<i>31</i>
<i>Análise estatística.....</i>	<i>33</i>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>41</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>42</b>

## CAPÍTULO I

---

## RESUMO GERAL

Realizar análises de tecidos vegetais de forma tradicional normalmente são onerosas, destrutivas e demoradas, e outra maneira de se avaliar o *status* nutricional das plantas, é a partir do uso de imagens digitais das folhas, alternativa está de baixo custo e de mais rápida execução para ser utilizada na tomada de decisão em manejos agrícolas, com base em eventuais déficits nutricionais. A presença de nutrientes nas folhas modifica a proporção de luz refletida e absorvida pelas plantas em diferentes comprimentos de onda, e como isso, pode-se estabelecer índices de coloração vegetal, os quais estejam mais correlacionadas com cada nutriente que se tenha interesse. Diversos índices já foram desenvolvidos como por exemplo o RGB, NB, R-B e DGCI, os quais são gerados a partir de imagens digitais, e podem ser aplicados aos mais diversos usos, como densidade de plantas, coloração foliar, quantificação de manchas e danos foliares. Assim, nosso estudo objetivou avaliar, por meio de imagens digitais das folhas, se os índices de coloração vegetal são capazes de estimar de forma acurada o *status* nitrogenado e a produtividade de genótipos de feijão-caupi. E a partir dos nossos achados, foi possível observar que o índice DGCI é uma ferramenta eficaz para diagnosticar de forma rápida, eficaz e não destrutiva o nitrogênio foliar no feijão-caupi, assim como o NB é um índice promissor na estimativa de produtividade dessa cultura.

**Palavras-chave:** *Vigna unguiculata* L. Walp; Índice de coloração vegetal; Teor de nitrogênio; *Dark Green Color Index* (DGCI).

## 1. INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), é uma cultura bem adaptada às regiões tropicais, como Norte e Nordeste do Brasil. Nessas regiões, é uma das principais culturas de subsistência e fonte de proteína de origem vegetal para o agricultor familiar, em razão de ser rico em proteína, fibras e minerais. A produção nacional desta espécie é de aproximadamente 629 mil toneladas ao ano, com produtividade média nacional de 491 kg ha<sup>-1</sup>, produtividade essa baixa quando comparada às outras leguminosas como: amendoim (3.732 kg ha<sup>-1</sup>), feijão-comum (1.591 kg ha<sup>-1</sup>) e soja (3.029 kg ha<sup>-1</sup>) (CONAB, 2022). A baixa fertilidade natural dos solos e o uso de pouca tecnologia podem explicar a baixa produtividade dessa cultura.

E para alcançar altas produtividades, é essencial a correção e suplementação do nitrogênio (N), pois sua demanda varia durante o ciclo da cultura, e tem seu maior pico de absorção durante o estágio vegetativo, e posteriormente é translocado aos grãos. Devido a importância no crescimento das culturas, deve-se realizar o parcelamento da aplicação de N durante os estádios vegetativos para a maior eficiência do mineral aplicado e evitar as possíveis perdas por volatilização ou lixiviação (SANT'ANA *et al.*, 2010).

Outra forma de melhorar o aproveitamento do N fornecido às culturas, ocorre por suplementação com o micronutriente molibdênio (Mo). O Mo atua na nitrogenase, enzima que reduzirá o N<sub>2</sub> atmosférico à amônia (NH<sub>3</sub>), e a nitrato redutase reduz nitrato (N-NO<sub>3</sub>) em nitrito (N-NO<sub>2</sub>) (RUBIO; LUDDEN, 2008). Assim, a baixa disponibilidade de Mo afeta o suprimento de N às plantas, devido a diminuição da atividade dessas enzimas (KUBOTA *et al.*, 2008; GEWERH *et al.*, 2019).

Nos últimos anos, o uso de imagens digitais se tornou uma tecnologia utilizada por pesquisadores a fim de evitar o viés humano na quantificação e qualificação por avaliações apenas visuais. Essas imagens digitais são compostas por *pixels* que registram informações como a luz R (*Red*), G (*Green*) e B (*Blue*) emitidas (CATUREGLI *et al.*, 2019). Imagens digitais podem ser utilizadas para avaliar densidade de plantas, coloração foliar, quantificação de manchas, danos foliares (KARCHER; RICHARDSON, 2003), dentre outras aplicações. Assim, a coloração de uma folha pode ser utilizada como um índice para diagnosticar o estado nutricional das plantas.

Índices de coloração vegetal, como NB (*Blue normalize*), R-B (*Red – Blue*) e B-R (*Blue-Red*) são valores corrigidos com base em informações de RGB extraídas de imagens digitais (SÁNCHEZ-SASTRE *et al.*, 2020). Por exemplo, em beterraba açucareira (*Beta*

*vulgares* L.), o índice R-B apresentou correlações altas ( $r > 0,9$ ), em relação a índices de verde na folha durante o ciclo da cultura (SÁNCHEZ-SASTRE *et al.*, 2020). O índice NB, o qual considera o contraste entre o RBG total e o azul refletido, explicou a redução do conteúdo de fósforo na folha de tomate (*Solanum lycopersicum*) (MAGALHÃES *et al.*, 2022). Isso porque o índice de coloração vegetal DGCI (*Dark Green Color Index*) foi usado para diagnosticar o N foliar em diferentes estádios do milho (*Zea mays* L.) (RORIE *et al.*, 2011) e em grama bermuda (*Cynodon dactylon*) (CATUREGLI *et al.*, 2019). O índice DGCI permite a atribuição de valores mais próximos ao da visão humana (KALER *et al.*, 2020). Dessa forma, hipotetizamos que o uso de imagens digitais é capaz de diagnosticar, de forma precisa e rápida, o *status* de nitrogênio na folha e a produtividade de genótipos de feijão-caupi, e assim se tornar uma ferramenta acessível e de fácil uso para analisar plantas.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar, por meio de imagens digitais de folhas, se os índices de coloração vegetal são capazes de estimar de forma acurada *status* nitrogenado e a produtividade de genótipos de feijão-caupi,

### **2.2 Objetivos específicos**

- a) Avaliar quais os índices de coloração vegetal, são capazes de se correlacionar com os parâmetros teor de nitrogênio na folha, *status* de nitrogênio na semente, índice de área foliar e índice de verde de genótipos de feijão-caupi;
- b) Avaliar quais os índices de coloração vegetal, são capazes de se correlacionar com a produtividade de genótipos de feijão-caupi.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Feijão-Caupi

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp), popularmente conhecido como feijão-caupi, feijão-de-corda, feijão-vigna ou feijão-de-macassar, é uma planta leguminosa, e pertence a classe das dicotiledôneas da ordem Fabales. O feijão-caupi é uma cultura anual, herbácea e com hábito de crescimento geralmente indeterminado, podendo ser ereto, semiereto ou prostrado. A cultura é originária da África, onde se encontra seu maior centro de diversidade, em seu local de origem tem papel na alimentação básica humana e como fonte de proteína para rações animais (SILVA *et al.*, 2016). Essa leguminosa é fonte de renda e alimento estratégicas em regiões tropicais, por características de adaptação as condições ambientais dessas regiões e seu baixo custo produtivo (SANTOS *et al.*, 2014).

O feijão-caupi é fonte de proteínas (23 a 25%), rico em aminoácidos, carboidratos (62%), fibras alimentares, vitaminas (ROCHA *et al.*, 2017) e minerais, como ferro e zinco (ARAÚJO *et al.*, 2021). Os grãos produzidos podem ser consumidos secos ou imaturos, ou seja, ainda verdes (SOUSA *et al.*, 2019), pela sua versatilidade de consumo, atrelado a outras características como rusticidade, precocidade e baixo custo produtivo (ARAÚJO *et al.*, 2021), tornam o feijão-caupi uma ferramenta alimentar, que auxilia na redução da insegurança alimentar para milhões de pessoas; gerando empregos e renda, o que estimulam a economia (SILVA *et al.*, 2016)

O feijão-caupi é uma cultura bem adaptada às regiões tropicais, como norte e nordeste brasileiro, em sua maioria cultivada por agricultores familiares com baixos níveis tecnológicos; o que torna essas regiões as principais produtoras dessa leguminosa nas américas (FREIRE FILHO *et al.*, 2017). O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de feijão-caupi (DA COSTA *et al.*, 2022), com produção de aproximadamente 629 mil toneladas ao ano, mas com médias produtivas consideradas baixas, de 491 kg ha<sup>-1</sup> no nacional e 580 kg ha<sup>-1</sup> no estado do Maranhão, médias de produtividade bem abaixo quando comparada a outras leguminosas, como soja (3.029 kg ha<sup>-1</sup>) ou feijão-comum (1.591 kg ha<sup>-1</sup>) (CONAB, 2022).

Alguns fatores podem ser responsáveis pela baixa produtividade média do feijão-caupi, entre estes a baixa fertilidade natural do solo, o elevado custo dos adubos químicos em geral, baixo emprego de tecnologias na produção, e o baixo poder aquisitivo dos agricultores familiares (XAVIER *et al.*, 2007; ORURU *et al.*, 2017). E para atingir altas produtividades, é

importante a aplicação de nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), nutrientes altamente requeridos pelas plantas. Ainda, os estresses bióticos e abióticos, causados por pragas, doenças, plantas invasoras, e adversidades climáticas também podem reduzir a produtividade média de grãos (HUYNH *et al.*, 2018).

Devido a importância da cultura e de sua capacidade de aumento da produtividade, deve-se buscar por melhorias nas condições produtivas, a fim de proporcionar crescimento na renda de agricultores familiares, com tecnologias de baixo custo e de fácil adoção.

### **3.2 Nitrogênio**

O nitrogênio (N) é um macronutriente essencial para as plantas, pois possui função estrutural em moléculas de aminoácidos, proteínas, enzimas, coenzimas, vitaminas e pigmentos, também faz parte de processos como fotossíntese, respiração, absorção iônica e crescimento de raízes (MALAVOLTA, 1980). No crescimento, desenvolvimento e produtividade do feijão-caupi, o N é fator limitante (MICHEL *et al.*, 2020), pois quando se visa aumento da produtividade, a presença deste mineral é essencial; devido a participação na fisiologia e no metabolismo das plantas, onde é componente central para reações da fotossíntese, ou seja, para as clorofilas, RuBisCO e fotossistemas I e II (TAIZ *et al.*, 2017).

O N é essencial quando se buscam altas produtividades, e a demanda deste macronutriente varia durante o ciclo da cultura, ou seja, durante o estágio vegetativo, no qual ocorre maior absorção, com posterior translocação para os grãos. Devido à grande importância para o desenvolvimento e crescimento da cultura, normalmente realiza-se o parcelamento da aplicação de N, visando a eficiência do material aplicado para evitar as perdas comuns deste macronutriente. O N possui grande mobilidade em profundidade no solo, no entanto, pode ser perdido por volatilização, quando o N é disponibilizado na forma de amônia (NH<sub>3</sub>), ou lixiviado, quando o N é fornecido como nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), e ainda é capaz de sofrer inúmeras transformações mediadas por microrganismos, sendo também perdido no sistema, o que diminui a eficiência de uso (SANT'ANA *et al.*, 2010). Assim, para o melhor aproveitamento do N, devem ser consideradas precipitação pluviométrica e temperatura do ar, juntamente com as características do solo, como textura, pH e concentração de outros nutrientes na solução, como por exemplo o Mo.



As fontes N para as leguminosas são a mineralização da matéria orgânica do solo, a fixação biológica de nitrogênio (FBN) e fertilizantes químicos (SAPUCAY *et al.*, 2016). A FBN ocorre a partir da simbiose de leguminosas com bactérias do gênero *Rhizobium*, processo no qual altera o N<sub>2</sub> presente na atmosfera para NH<sub>3</sub><sup>-</sup>, o tornando biologicamente disponíveis as plantas. Após a incorporação do nitrogênio no tecido vegetal das leguminosas, os restos culturais destas plantas irão para o solo tornando-se matéria orgânica, com posterior mineralização para as formas NH<sub>3</sub><sup>-</sup> e NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, na qual poderão ser absorvidos por outras espécies vegetais (TAIZ *et al.*, 2017).

Por fim, a suplementação mineral permite a aceleração do crescimento inicial de plantas, por sua atuação na divisão celular, produção de fotoassimilados, produção de órgãos reprodutores e demais processos fisiológicos. Assim, a presença de N aumenta o conteúdo total de clorofilas, coloração de verde nas folhas, e conseqüentemente seu *status* nitrogenado.

### 3.3 Relação Nitrogênio e Molibdênio

O micronutriente molibdênio (Mo) é um elemento essencial no crescimento e desenvolvimento das plantas, esse é necessário em pequenas concentrações. O Mo desempenha papel importante na composição de enzimas, como a nitrato redutase, responsável pela redução do nitrato (N-NO<sub>3</sub>) em nitrito (N-NO<sub>2</sub>) no citoplasma celular durante a assimilação do N, e a nitrogenase, enzima relacionada a redução do N<sub>2</sub> atmosférico em amônia (NH<sub>3</sub>) (BROADLEY *et al.*, 2012; RUTKOWSKA *et al.*, 2017; VIEIRA *et al.*, 2014). Além da participação do Mo em enzimas que proporcionam efeitos secundários benéficos, a xantina desidrogenase atua na resistência das plantas contra seca, doenças gerais, e senescência foliar; ou seja, enzimas que possuem Mo em suas composições são capazes de atuar na síntese de ácido abscísico (ABA) o que desencadeia em respostas adaptativas aos estresses ambientais diversos (MENDEL, 2011), devido a ação deste hormônio vegetal em condições adversas do ambiente.

O Mo atua em conjunto com N, uma vez que auxilia a suprir com a demanda por N (LEITE *et al.*, 2007). Pois, em feijão-caupi, Freire Filho *et al.* (2017) relataram que a demanda por N para alcançar altas produtividades, pode chegar a 100 kg ha<sup>-1</sup>; a qual é crucial para o crescimento e aumento da produtividade (MICHEL *et al.*, 2020). Assim, a forma como o N é fornecido às plantas, e como ocorre sua metabolização, estão intrinsecamente relacionados à demanda e a disponibilidade de Mo no solo (BROADLEY *et al.*, 2012).

A absorção do Mo ocorre nas formas de ânion de molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) e hidrogenmolibdato ( $\text{HMoO}_4^-$ ), pois são as formas que predominam na solução do solo (RUTKOWSKA *et al.*, 2017). Ainda, os mesmos autores relatam que a disponibilidade de Mo na solução é influenciada por algumas propriedades do solo, como por exemplo, óxidos de ferro (Fe), manganês (Mn) e alumínio (Al), além da argila e coloides orgânicos, mas é principalmente afetado pelo pH do solo, por sua influência no processo de adsorção e liberação dos ânions de molibdato ( $\text{MoO}_4^{2-}$ ) na solução. Por exemplo, em solos ácidos (pH entre 4 e 5) ocorre a redução da disponibilidade do micronutriente, à medida que este é adsorvido pelos óxidos e demais propriedades do solo (XU *et al.*, 2013), o que pode ser minimizado com a correção o pH do solo a partir de aplicações de calcário (RUTKOWSKA *et al.*, 2017).

São inúmeras formas de realizar o suprimento mineral de Mo, e este pode ser realizada diretamente no solo, via foliar ou com aplicação na semente por solução líquida ou por peletização (FERREIRA, 2001). Devido a alta mobilidade que o Mo possui (TAIZ *et al.*, 2017), a aplicação foliar torna-se mais eficiente para suprir a necessidade da planta. Pois, aplicações foliares de nutrientes possuem vantagens quando comparado ao solo, por exemplo: aplicação e absorção mais rápidas do nutriente da planta, além de evitar restrições na absorção quando aplicado no solo (TAIZ *et al.*, 2017), como por exemplo para o Mo, a redução da disponibilidade desse nutriente em solos com pH ácido (XU *et al.*, 2013), concentração de outros nutrientes na solução do solo, concentração de argila, entre outros (RUTKOWSKA *et al.*, 2017). Assim, estudos com suplementação de Mo são majoritariamente realizados via foliar. Por exemplo, a cultura da soja demonstrou que a aplicação de molibdato de sódio ( $400 \text{ g ha}^{-1}$ ) via foliar de forma fracionada nos estádios reprodutivos de R3 e R5, resultaram em maior acúmulo de nitrogênio nas plantas e sementes, com melhor fixação de  $\text{N}_2$ , o que confirma que o Mo é importante na fixação biológica de nitrogênio (CAMPOS *et al.*, 2009). Em estudo com diferentes inoculadores Da Rocha *et al.* (2022) observaram que, com aplicação fixa de 50 kg de ureia, parcelada entre semeadura e cobertura aos 15 dias após emergência (DAE), e duas doses de Mo (0 e  $80 \text{ g ha}^{-1}$ ) via foliar aos 15 DAE, resultou em maior acúmulo de N na folha quando o N e Mo foram trabalhados em conjunto

A melhor época para suplementação de Mo via foliar é entre a floração e o enchimento dos grãos (JACOB-NETO; FRANCO, 1986), A demanda de Mo se inicia no ciclo da planta é baixa, mas durante a floração as plantas necessitam de maiores quantidades deste mineral, o qual é absorvido regularmente, e assim aumenta a concentração na planta (AMANE, 1997).

### 3.4 Análises por imagens

Nos últimos anos, o uso de imagens digitais tem sido uma ferramenta utilizada por pesquisadores para diversos parâmetros, como densidade, cor e quantificação de manchas e danos foliares (KARCHER; RICHARDSON, 2003), a fim de evitar o viés humano na quantificação e qualificação por avaliações apenas visuais. Por exemplo, as imagens digitais podem, de forma prática e rápida, estimar o *status* de N de uma planta, pois a deficiência de N é diagnosticada por clorose nas folhas mais velhas (BAESSO *et al.*, 2007).

Uma imagem digital nos fornece dados de intensidade de vermelho, verde e azul, conhecido com índice RGB (*Red, Green e Blue*), o que está dentro do espectro do visível. A partir do RGB, Karcher e Richardson (2003) sugeriram a conversão de valores RGB para o espaço de cores HSB (*Hue, Saturation e Brightness*), para aproximar os índices extraídos das imagens com a percepção humana das cores, e deixá-las mais intuitivas. O índice DGCI (*Dark Green Color Index*) é um índice de imagem com base no espaço de cores HSB, que melhor tenta simular a visão humana (KALER *et al.*, 2020).

No entanto, diferenças nas condições de iluminação, qualidade e configurações de câmera disponíveis podem afetar os valores de DGCI e limitar o seu uso para o diagnóstico de deficiências (RORIE *et al.*, 2011). Desta forma, as condições para a produção das imagens devem ser realizadas com iluminação artificial e padronizada para a mesma posição quanto a distância do objeto foco e aparelho fotográfico, a fim de minimizar vieses nas imagens, e posteriormente nos índices de vegetação.

Os índices de coloração vegetal são estimados com base em informações de RGB extraídas de imagens digitais (SÁNCHEZ-SASTRE *et al.*, 2020), e consideram, em suas equações matemáticas, a refletância em comprimentos de onda geralmente localizados na faixa do visível e do infravermelho próximo (DE CARVALHO *et al.*, 2020), e assim, podem ser utilizados na estimativa de diversas características de plantas, como maturidade fisiológica, acúmulo de nitrogênio, sanidade, dentre outros (WANG *et al.*, 2012). Embora os métodos de teste de laboratório sejam precisos, estes podem ser demorados, trabalhosos e caros. Portanto, há uma necessidade urgente de desenvolver técnicas rápidas de estimativa de N de forma não destrutivas, simples e de baixo custo para atender às demandas da produção agrícola (LI *et al.*, 2019).

Por exemplo, para estimar o *status* nitrogenado de uma cultura, utiliza-se da forte relação entre as clorofilas nas plantas e a concentração de nitrogênio (N), isso porque as

clorofilas afetam visualmente a coloração foliar, e conseqüentemente os índices utilizados para estimar o teor de N nas plantas (LI *et al.*, 2010). Assim, estas relações podem fornecer informações sobre manejos necessários e fitossanidade da cultura (ZHANG *et al.*, 2007), e que muitas vezes não são perceptíveis ao olho humano.

Alguns exemplos da ampla utilidade que se pode ter com base em índice de coloração vegetal. Por exemplo, o índice R-B, pois apresenta correlação alta (acima de 0,9) em relação ao índice de verde em folhas de beterraba açucareira (*Beta vulgaris* L.) (SÁNCHEZ-SASTRE *et al.*, 2020). O índice NB, o qual considera o contraste entre o RGB total e o azul refletido, permitiu diagnosticar deficiência de fósforo, com base em imagens das folhas em tomate (*Solanum lycopersicum*) (MAGALHÃES *et al.*, 2022). O índice DGCI foi utilizado para diagnosticar N foliar em diferentes estádios da grama bermuda (*Cynodon dactylon*), (CATUREGLI *et al.*, 2019), e previsão de acúmulo de N em grãos de trigo utilizando DGCI (*Triticum aestivum*) (XU *et al.*, 2020). Os índices RGB, utilizados para diagnóstico da concentração de N foliar em milho (*Zea mays* L.) (DJAWAD *et al.*, 2020). O que demonstra de forma clara a diversidade de aplicações possíveis de serem analisadas a partir de imagens digitais.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMANE, M.I.V. Adubação nitrogenada e molíbdica da cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) na Zona da Mata de Minas Gerais: efeitos de doses, calagem e rizóbio. 1997.

ARAÚJO, L.B.R.; BARROSO NETO, A.M.; BERTINI, C.H.C.M.; LOPES, L.S.; GALLÃO, M.I. Influence of the environment and production components on the protein content of green cowpea grain. **Revista Ciência Agronômica**, v. 55, 2021.

BAESSO, M.M.; PINTO, F.D.A.D.C.; QUEIROZ, D.M.D.; VIEIRA, L.B.D.; ALVES, E.A. Determinação do *status* nutricional de nitrogênio no feijoeiro utilizando imagens digitais coloridas. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.520-528, 2007.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Function of nutrients: micronutrients. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. p.191-248, 2012.

CAMPOS, R. J., ARAUJO, R. S.; HUNGRIA, M. Molybdenum-enriched soybean seeds enhance N accumulation, seed yield, and seed protein content in Brazil. **Field Crops Research**, v. 110, n. 3, p. 219-224, 2009.

CATUREGLI, L.; MAGRI, S.; GAETINI, M. Normalized Difference Vegetation Index versus Dark Green Colour Index to estimate nitrogen status on bermudagrass hybrid and tall fescue. **International Journal of Remote Sensing**, v.41, p.455-470, 2020.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). Boletim de grãos – Produção e balanço de oferta e demanda de grãos. Edição de outubro de 2022.

DA COSTA, I.G.; SIIVA, J.W.; SILVA, G.C.; LIRA JUNIOR, M.A.; OLIVEIRA, C.S.; SARAIVA, A.C.G.; COSTA, A.F.; TABOSA, J.N.; FRANÇA, K.R.S.; MENDONÇA JÚNIOR, A.F. Correlations and path analysis in segregating cowpea generations regarding biological nitrogen fixation. **Journal of Agricultural Science**, v.14, p.79-85, 2022.

DA ROCHA, T.T.T.; DE CARVALHO, A.J.E.; LEMOS, J.P.; SILVA, I.R.; DOS SANTOS, É.P. Nodulação do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L. cv BRS Esteio) a partir de sementes tratadas com um inoculante alternativo e a influência da adubação foliar com molibdênio na FBN. **Brazilian Journal of Development**, v.8, p.5243-5259, 2022.

DE CARVALHO, L.F.D.; AMADO, T.J.C.; SOBRINHO, J.C.; DE PAULA AMARAL, L.; POTT, L.P.; PICCIN, M.; PEDRON, V.F. Nutritional status of corn plants estimated through different vegetation indices in the growth stages. **Revista Engenharia na Agricultura**. v.28, p.255-264, 2020.

DJAWAD, Y.; TUFAIL, M.; JUMADI, O.; ANWAR, A. Discrimination of nitrogen concentration of fertilized corn with extracted algae and polymer based on its leaf color images. **International Information and Engineering Technology Association**, v.25, p.303-309, 2020.

FERREIRA, A.C de B. Nutrição e produtividade do feijoeiro em função do molibdênio contido na semente e da sua aplicação via foliar. 2001.

FREIRE FILHO, F.R.; RIBEIRO, V.Q.; RODRIGUES, J.E.L.F.; VIEIRA, P.F.M.J. A cultura: aspectos socioeconômicos. Em: DOVALE, J.C.; BERTINI, C.; BORÉM, A. (ed.). Feijão-caupi: do plantio à colheita. **Editora UFV**, p.9-34, 2017.

GEWERH, E.; CORRÊA, O.O.; SUÑÉ, G.B.D.; AMARANTE, L.; TUNES, L.V.M.; RODRIGUES, D.B. Treatment of soybean seeds with molybdenum and inoculant: nitrate reductase activity and agronomy performance. **Comunicata Scientiae**, v.10, p.185-194, 2019.

HUYNH, B.L.; EHLERS, J.D.; HUANG, B.E.; MUÑOZ-AMATRIAÍN, M.L.S.; SANTOS, J.R.P.; NDEVE, A.; BATIENO, B.J.; BOUKAR, O.; CISSE, N.; DRABO, I.; FATOKUN, C.; KUSI, F.; AGYARE, R.Y.; GUO, Y.N.; HERNITER, I.; LO, S.; WANAMAKER, S.I.; XU, S.; CLOSE, T.J.; ROBERTS, P.A. A multi-parent advanced generation inter-cross (MAGIC) population for genetic analysis and improvement of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). **The Plant Journal**, v.93, p.1129–1142, 2018.

JACOB-NETO, J.J.; FRANCO, A.A. Adubação de molibdênio em feijoeiro. **EMBRAPA-CNPAB**, 1986.

KALER, A.S.; ABDEL-HALEEM, H.; FRITSCHI, F.B.; GILLMAN, J.D.; RAY, J.D.; SMITH, J.R.; PURCELL, L.C. Genome-wide association mapping of dark green color index using a diverse panel of soybean accessions. **Scientific Reports**, v.10, p.1-11, 2020.

KARCHER, D.E.; RICHARDSON, M.D. Quantifying turfgrass color using digital image analysis. **Crop science**, v.43, p.943-951, 2003.

KESKIN, S.G.; STANLEY, J.M.; COWLEY, A.H. Synthesis, characterization and theoretical investigations of molybdenum carbonyl complexes with phosphorus/nitrogen/phosphorus ligand as bidentate and tridentate modes. **Polyhedron**, v.138, p.206-217, 2017.

KUBOTA, Y.K.; ANDRADE NETO, A.C.; ARAÚJO, A.P.; TEIXEIRA, M.G. Crescimento e acumulação de nitrogênio de plantas de feijoeiro originadas de sementes com alto teor de molibdênio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1635-1641, 2008.

LEITE, U.T.; ARAÚJO, G.A.A.; MIRANDA, G.V.; VIEIRA, R.F.; CARNEIRO, J.E.S.; PIRES, A.A. Rendimento de grãos e componentes de rendimento do feijoeiro em função da aplicação foliar de doses crescentes de molibdênio. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.29, p.113-120, 2007.

LI, Y.; CHEN, D.; WALKER, C.N.; ANGUS, J.F. Estimating the nitrogen status of crops using a digital camera. **Field Crops Research**, p.221-227, 2010.

LI, H.; ZHANG, Y.; LEI, Y.; ANTONIUK, V.; HU, C. Evaluating different non-destructive estimation methods for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) nitrogen status based on canopy spectrum. **Remote Sensing**, v.12, p.95, 2019.

MAGALHÃES, L.P.D.; TREVISAN, L.R.; GOMES, T.M.; ROSSI, F. Use of digital images to classify leaf phosphorus content in grape tomatoes. **Engenharia Agrícola**, v.42, 2022.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. **Agronômica Ceres**, p.251, 1980.

MENDEL, R. R. Cell biology of molybdenum in plants. **Plant Cell Reports**, v. 30, n. 10, p. 1787-1797, 2011.

MICHEL, D.C.; VASQUES, I.C.F.; ARAÚJO, G.C.R.; CASTRO, J.L.; ASSIS, L.L.R.; REIS, R.H.C.L.; SILVA, M.L.S.; FAQUIM, V. Influence of molybdenum doses in inoculation and mineral fertilization in cowpea beans. **Bioscience Journal**, v.36, p.102-112, 2020.

ORURU, M.B.; NJERU, E.M.; PASQUET, R.; RUNO, S. Response of a wild-type and modern cowpea cultivars to arbuscular mycorrhizal inoculation in sterilized and non-sterilized soil. **Journal of Plant Nutrition**, v.41, p.90–101, 2017.

ROCHA, M.M.; SILVA, K.J.D.; MENEZES J.; JOSE, A.N. de. Cultivo de feijão-caupi: importância econômica. **Embrapa: Sistema de produção**, p.1-6, 2017.

RORIE, R.L.; PURCELL, L.C.; KARCHER, D.E.; KING, C.A. The assessment of leaf nitrogen in corn from digital images. **Crop Science**, v.51, p.2174-2180, 2011.

RUBIO, L.M.; LUDDEN, P.W. Biosynthesis of the iron-molybdenum cofactor of nitrogenase. **Annual Review Microbiology**, v.62, p.93-111, 2008.

RUTKOWSKA, B.; SZULC, W.; SPYCHAJ-FABISIAK, E.; PIOR, N. Prediction of molybdenum availability to plants in differentiated soil conditions. **Plant, Soil and Environment**, v.63, p.491-497, 2017.

SANT'ANA, E.V.P; SANTOS, A.B.D; SILVEIRA, P.M.D. Adubação nitrogenada na produtividade, leitura SPAD e teor de nitrogênio em folhas de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.491-496, 2010.

SANTOS, J.A.S.; TEODORO, P.E.; CORREA, A.M.; SOARES, C.M.G.; RIBEIRO, L.P.; ABREU, H.K.A. Desempenho agrônomo e divergência genética entre genótipos de feijão-caupi cultivados no ecótono Cerrado/Pantanal. **Bragantia**, v.73, p.377-382, 2014.

SÁNCHEZ-SASTRE, L.F.; ALTE DA VEIGA, N.M.S.; RUIZ-POTOSME, N.M.; CARRIÓN-PRIETO, P.; MARCOS-ROBLES, J.L.; NAVAS-GRACIA, L.M.; MARTÍN-RAMOS, P. Assessment of RGB vegetation indices to estimate chlorophyll content in sugar beet leaves in the final cultivation stage. **AgriEngineering**, v.2, p.128-149, 2020.

SAPUCAY, M.J.L.C.; VIEIRA, R.F.; CARNEIRO, J.E.S.; JÚNIOR, T.J.P.; LIMA, M.S.; VIEIRA, R.F.; VIDIGAL, S.M. Is it possible to attain high-yielding common bean using molybdenum fertilizer instead of side-dressed nitrogen? **Journal of Plant Nutrition**, v.39, p.1644-1653, 2016.

SILVA, K.J.D.; ROCHA, M.M.; MENEZES JÚNIOR, J.A.N. Capítulo 3. Principais doenças do feijão-caupi no Brasil. 2016. *In*: BASTOS, E.A. (Ed). A cultura do feijão-caupi no Brasil. **Teresina: Embrapa Meio Norte**. p.44-67, 2016.

SOUSA, T.D.J.F.D.; ROCHA, M.D.M.; DAMASCENO-SILVA, K.J.; BERTINI, C.H.C.D. M.; SILVEIRA, L.M.D.; SOUSA, R.R.D.; SOUSA, J.L.M. Simultaneous selection for yield, adaptability, and genotypic stability in immature cowpea using REML/BLUP. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.54, p.e01234, 2019.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. Capítulo 13: Assimilação de Nutrientes Inorgânicos, em *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: **Artmed**, p.360-367, 2017.

VIEIRA, R.F.; PAULA JR., T.J.; CARNEIRO, J.E.S.; QUEIROZ, M.V. Genotypic variability in seed accumulation of foliar-applied molybdenum to common bean. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.205-213, 2014.

XAVIER, T.F.; ARAÚJO, A.S.F. de; SANTOS, V.B. dos; CAMPOS, F.L. Ontogenia da nodulação em duas cultivares de feijão-caupi. **Ciência Rural**, v.37, p.561-564, 2007.

XU N.; BRAIDA W.; CHRISTODOULATOS C.; CHEN J.P. A review of molybdenum adsorption in soils/bed sediments: speciation, mechanism, and model applications. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v.22, p.912-929, 2013.

XU, K.; ZHANG, J.; LI, H.; CAO, W.; ZHU, Y.; JIANG, X.; NI, J. Spectrum-and RGB-D-Based image fusion for the prediction of nitrogen accumulation in wheat. **Remote Sensing**, v.12, p.4040, 2020.

WANG, W.; YAO, X.; YAO, XF.; TIAN, Y.; LIU, X.J.; NI, J.; CAO, W.X.; ZHU, Y. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat. **Field Crops Research**, v.129, p.90-98, 2012.

ZHANG, J.; BLACKMER, A.M.; BLACKMER, T.M.; KYVERYGA, P.M.; ELLSWORTH, J.W. Nitrogen deficiency and recovery in sustainable corn production as revealed by leaf chlorophyll measurements. **Agronomy for Sustainable Development**, v.27, p.313-319, 2007.



## CAPÍTULO II

---

## ESTIMATIVA DO *STATUS* NITROGENADO EM FOLHAS DE GENÓTIPOS DE FEIJÃO-CAUPI A PARTIR DE ÍNDICES DE COLORAÇÃO VEGETAL

### RESUMO

As análises do tecido vegetal são onerosas, destrutivas e demoradas, e é uma das maneiras para avaliar o *status* nutricional das plantas. Logo, o uso de imagens digitais das folhas é uma alternativa de baixo custo e rápida na tomada de decisão para corrigir eventual déficit nutricionais. Isso porque os nutrientes nas folhas modificam a proporção de luz refletida e absorvida pelas plantas em diferentes comprimentos de onda. Para isso, precisamos estabelecer índices de vegetação que estão mais correlacionadas com os nutrientes na folha de genótipos de feijão-caupi. Assim, o objetivo do nosso trabalho foi avaliar por meio de imagens digitais das folhas, se os índices de vegetação são capazes de estimar de forma acurada o *status* nitrogenado e a produtividade de genótipos de feijão-caupi. O experimento foi constituído de 20 genótipos de feijão-caupi, organizados em delineamento em blocos casualizados, com três repetições. Foram analisados 31 índices de vegetação das folhas disponíveis no pacote Pliman. Aos 58 dias após emergência, observamos que teor de N na folha correlacionou positivamente com o DGCI ( $r = 0,70$ ) e com o índice de verde ( $r = 0,66$ ). O índice R-B correlacionou positivamente com o índice de área foliar (IAF) ( $r = 0,58$ ). Porém, o índice NB correlacionou negativamente com o índice de área foliar ( $r = -0,48$ ), com a produtividade ( $r = -0,47$ ) e com o teor de N na semente (TNS) ( $r = -0,51$ ). O índice DGCI diferenciou os genótipos com folhas verde intenso, o R-B as folhas verde-amareladas e o NB as folhas arroxeadas. Nossos resultados demonstram que o índice DGCI é uma ferramenta eficaz para diagnosticar de forma não destrutiva o nitrogênio foliar, assim como o NB pode ser um índice promissor para estimar produtividade na cultura do feijão-caupi.

**Palavras-chave:** *Vigna unguiculata* L. Walp; Índice de Vegetação; *Dark Green Color Index* (DGCI); teor de nitrogênio.

## INTRODUÇÃO

A planta de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp) é uma leguminosa de origem africana, onde se encontra seu maior centro de diversidade, e de relevante importância na alimentação humana, utilizada também como fonte de proteína para rações animais (BASTOS, 2016). O feijão-caupi é rico em proteínas (23 a 25%), carboidratos (62%), aminoácidos, fibras, minerais e vitaminas (ROCHA *et al.*, 2017), por isso, auxilia na redução da insegurança alimentar para milhões de pessoas. A produção mundial foi estimada em 5,6 milhões de toneladas de feijão-caupi (FAOSTAT, 2019), e a nacional em 629 mil toneladas ao ano, com média de produtividade de 491 kg ha<sup>-1</sup> no Brasil e 580 kg ha<sup>-1</sup> no estado do Maranhão (CONAB, 2022). Nas regiões Norte e Nordeste, essa cultura é de grande relevância alimentar e socioeconômica, relevância esta que pode ser explicada pela adaptação da cultura as regiões tropicais, com solos naturalmente pouco férteis e disponibilidade hídrica irregular.

A baixa fertilidade natural do solo e altas temperaturas nestas regiões contribuem para a baixa produtividade da cultura. O nitrogênio (N) é fator limitante para o crescimento e produtividade (MICHEL *et al.*, 2020), pois participa de processos fundamentais, como divisão celular, na translocação de fotoassimilados, na formação de órgãos reprodutivos, além da expansão e enchimento de grãos. Outro elemento indispensável para o crescimento das plantas é o molibdênio (Mo), micronutriente requerido em pequenas quantidades, e auxilia na fixação biológica e metabolismo do N (KESKIN *et al.*, 2017). O Mo atua na nitrato redutase, responsável pela redução do nitrato em nitrito no citoplasma celular e, na nitrogenase responsável pela redução do N<sub>2</sub> atmosférico a amônia (NH<sub>3</sub>) (RUBIO; LUDDEN, 2008; BROADLEY *et al.*, 2012; RUTKOWSKA *et al.*, 2017; VIEIRA *et al.*, 2014). Dessa forma, a suplementação com Mo pode contribuir para o aumento da fixação biológica de N.

Uma forma de medir a fotossíntese nas plantas é a partir do medidor indireto de clorofila SPAD ou CCM-200 possui correlação significativa e positiva com o teor de N na folha (RHEZALI; AISSAOUI 2021; WANG *et al.*, 2012). Esses equipamentos são utilizados para avaliar o *status* nutricional de N da planta em tempo real, de forma rápida e não destrutiva. Além dessas técnicas, as imagens digitais são utilizadas para obter índices de vegetação que expressem o verde da folha da planta de forma eficiente.

As imagens digitais se tornaram uma ferramenta utilizada por pesquisadores para avaliar de forma precisa e com baixo custo o crescimento e desenvolvimento das plantas. Como essas imagens podemos ter aplicações diversas, como por exemplo, em beterraba açucareira (*Beta vulgaris* L.), o índice R-B apresentou correlações altas ( $r > 0,9$ ), em relação

a índices de verde na folha durante o ciclo da cultura (SÁNCHEZ-SASTRE *et al.*, 2020). O índice NB, o qual considera o contraste entre o RGB total e o azul refletido, explicou a redução do conteúdo de fósforo na folha de tomate (*Solanum lycopersicum*) (MAGALHÃES *et al.*, 2022). O índice de vegetação DGCI (*Dark Green Color Index*) foi usado para diagnosticar o N foliar em diferentes estádios do milho (*Zea mays* L.) (RORIE *et al.*, 2011) e em grama bermuda (*Cynodon dactylon*) (CATUREGLI *et al.*, 2019). O índice DGCI permite a atribuição de valores mais próximos ao da visão humana (KALER *et al.*, 2020). Essas imagens digitais fornecem dados referentes às cores primárias: vermelho (*Red*), verde (*Green*) e azul (*Blue*) (RGB), saturação e brilho. E com esses dados é gerado índices de vegetação, que possibilitam desenvolver técnicas rápidas para avaliar o status N das plantas de forma não destrutivas, simples e de baixo custo para atender às demandas da produção agrícola (LI *et al.*, 2019).

Na literatura não encontramos estudos com o uso de imagens digitais para diagnosticar o *status* de N e produtividade de genótipos de feijão-caupi, o que nos motivou para o desenvolvimento deste trabalho. Assim, o objetivo desta pesquisa foi, a partir de imagens digitais de folhas, identificar se índices de vegetação são capazes de estimar, de forma fácil e acessível, o *status* nitrogenado e a produtividade de genótipos de feijão-caupi.

## MATERIAL E MÉTODOS

### *Área de estudo*

O estudo foi conduzido do período de 11 de julho a 4 de outubro de 2022 na comunidade quilombola “Balaiada”, localizada no município de Nina Rodrigues (3°23'695"S e 43°51'105"O, altitude de 25m acima do nível do mar), Maranhão, Brasil. Conforme a classificação de Köppen, o clima da região é Aw', com verão e outono chuvosos (~80% da precipitação com ocorrência de janeiro a maio) e inverno seco (ALVARES *et al.*, 2013). As características físico-químicas do solo em estudo foram determinadas na camada de 0-20 cm de profundidade, antes da instalação do experimento (Tabela 1).

**Tabela 1:** Características físico-química do solo, na profundidade de 0-20 cm, Nina Rodrigues, Maranhão, Brasil.

Característica do solo	Valor
pH <sup>a</sup>	4,0
MO <sup>b</sup> (g dm <sup>-3</sup> )	23,0
P <sup>b</sup> (mg dm <sup>-3</sup> )	7,0
K <sup>b</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )	3,2
Ca <sup>b</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )	8,0
Mg <sup>b</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )	8,0
H + Al <sup>b</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )	24,0
CTC <sup>c</sup> (mmolc dm <sup>-3</sup> )	43,2
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	200
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	580
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	120
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	100

<sup>a</sup>Medido em 0,01 M CaCl<sub>2</sub> e com razão solo/solução de 1:2,5 (v/v).

<sup>b</sup>De acordo com van Raij, Andrade, Cantarella e Quaggio (2001).

<sup>c</sup>CTC, capacidade de troca catiônica em pH 7: Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> e H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>.

### *Delineamento experimental e condições de cultivo*

O experimento foi conduzido com 20 genótipos de feijão-caupi, obtidas do Programa de Melhoramento Genético do Feijão-caupi da Embrapa Meio-Norte (Teresina, PI, Brasil) (Tabela 2). Esses genótipos são de classes comerciais distintas, como mulato, canapu, branco

e sempre-verde, com hábitos de crescimento que variam entre prostrado, semiprostrado, ereto e semiereto.

**Tabela 2:** Descrição, parentais, subclasse comercial e porte dos 20 genótipos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata*) utilizados no estudo, em Nina Rodrigues, Maranhão, Brasil.

Genótipos	Parentais	Subclasse comercial	Porte da planta
1=MNC11-1013E-33	MCNC01-510F x Pingo de Ouro-1-2	Mulato	Ereto
2=MNC11-1013E-15	MCNC01-510F x Pingo de Ouro-1-2	Mulato	Ereto
3=MNC11-1013E-35	MCNC01-510F x Pingo de Ouro-1-2	Sempre-verde	Semiereto
4=MNC11-1018E-17	MNC02677F-2-2 x MNC01-631-20-5 x Pingo de Ouro-1-2	Sempre-verde	Semiprostrado
5=MNC11-1019E-8	MNC-631F-11 x Canapuzinho-2 x MNC02-677F-2-1	Mulato	Semiereto
6=MNC11-1019E-12	MNC-631F-11 x Canapuzinho-2 x MNC02-677F-2-1	Mulato	Semiereto
7=MNC11-1019E-46	MNC-631F-11 x Canapuzinho-2 x MNC02-677F-2-1	Mulato	Semiprostrado
8=MNC11-1022E-58	MNC02-689F-11 x MNC01-631F-20-5 x MNC99-510F-16-1	Mulato	Semiprostrado
9=MNC11-1024E-1	MNC02-689F-11 x MNC99-510F-16-1 x Pingo de Ouro-1-2	Mulato	Semiereto
10=MNC11-1026E-15	MNC02-689F-11 x MNC01-631F-16-1 x Canapuzinho-1-2	Mulato	Semiprostrado
11=MNC11-1026E-19	MNC02-689F-11 x MNC01-631F-16-1 x Canapuzinho-1-2	Mulato	Semiereto
12=MNC11-1031E-5	MNC02-689F-11 x MNC02-680F-1-2	Sempre-verde	Ereto
13=MNC11-1031E-11	MNC02-689F-11 x MNC02-680F-1-2	Mulato	Semiereto
14=MNC11-1034E-2	MNC01-631F-20-5 x Pingo de ouro-1-2 x MNC02-761F-2	Mulato	Semiprostrado
15=MNC11-1052E-3	Bico de Ouro-1-2-1 x MNC01-631F-20-5 x MNC99-510F-16-1	Canapu	Semiprostrado
16=BRS Pajeú	CNCx405-17F x 1836-013J	Mulato	Prostrado
17=BRS Rouxinol	TE86-75-57E x TE1-69E	Sempre-verde	Semiprostrado
18=MNC11-1020E-16	MNC02-689F-11 x MNC02-677F-2-1	Mulato	Semiprostrado
19=BRS Marataoã	Seridó x TVx1836-013J	Mulato	Prostrado
20=BRS Guariba	IT85F-2687 x TE87-98-8G	Branca	Semiereto

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com três repetições. Para isso, a área experimental foi previamente roçada e deixada a palhada sobre a área. A adubação de sementeira foi de 650 kg ha<sup>-1</sup> (NPK 4-14-8), e 150 kg ha<sup>-1</sup> de ureia em cobertura. A adubação nitrogenada foi feita de forma parcelada: 50% aos 15 dias após emergência (DAE) e 50% aos 25 DAE. As parcelas foram constituídas de três linhas de três metros, espaçadas de 0,60 m. Foram semeadas dez sementes por metro de sulco. As duas fileiras das laterais foram consideradas bordaduras, e a área útil da parcela foi de 1,8 m<sup>2</sup>.

Foi aplicado 450 g ha<sup>-1</sup> de molibdênio (Mo), na forma de molibdato de sódio (Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O), fracionada nas seguintes fases: 50 g ha<sup>-1</sup> de Mo aos 30 dias após emergência (DAE), 200 g ha<sup>-1</sup> de Mo aos 40 DAE e 200 g ha<sup>-1</sup> de Mo aos 50 DAE. A aplicação do Mo foi realizada com pulverizador costal, equipado com bico XR 11002, e volume de 250 L ha<sup>-1</sup>. As aplicações de Mo via foliar foram realizadas a fim de fornecer esse micronutriente, para melhorar o aproveitamento da adubação fornecida, pois a presença do Mo no solo da área é insuficiente ao demandado pela cultura.

As plantas foram irrigadas por gotejamento, até o fim do estágio fenológico R5. As mangueiras com orifícios de gotejamento, foram espaçadas em 20 cm e distribuídas ao lado do sulco de plantio. As plantas daninhas foram controladas com capinas manuais, quando necessário. Aos 9 e 16 DAE foi aplicado óleo de nim (*Azadirachta indica*) da Bioneem<sup>®</sup> na dosagem de 2,5 mL L<sup>-1</sup> + detergente neutro (15 mL L<sup>-1</sup>) para o controle de pulgão (*Aphis craccivora* Koch).

### ***Imagens, índices de vegetação e diagnóstico nutricional***

Aos 50 DAE foram realizadas três leituras paralelamente as fileiras centrais da parcela com o medidor AcuuPAR (Ceptômetro LP-80, Decagon Devices, Pullman, EUA), para determinar o índice de área foliar (IAF), por meio da luz interceptada pelo dossel das plantas.

Aos 58 DAE, após a finalização das suplementações minerais, foi avaliado o índice de verde, onde foram feitas 15 leituras com fluorômetro de clorofila (CCM-200 plus, Opti-Sciences, Hudson, New Hampshire, EUA) em cinco folhas (uma leitura em cada folíolo) de cinco plantas tomada ao acaso de cada parcela. As leituras foram realizadas entre a borda e a nervura central da terceira folha jovem plenamente expandidas. A média das 15 leituras realizadas representou a média da parcela. As leituras foram realizadas entre 9 e 11 horas. Posteriormente, 300 folhas compostas trifoliadas foram coletadas para a produção das imagens digitais.

As imagens digitais das folhas foram obtidas com auxílio do smartphone SamsungM31 na face adaxial das folhas coletadas. Para obter as imagens, o aparelho celular e o painel de LEDs (Diodos emissores de luz, 6500K, 24 watts, Elgin<sup>®</sup>, Zona Franca de Manaus, Brasil) foram fixados a 70 cm de altura da base. As imagens digitais coletadas foram obtidas no tamanho de 3468 × 4624 pixels com resolução de 225 dpi.

As imagens foram importadas e analisadas no *software* R versão 4.2.0 (R CORE TEAM, 2022). Após a importação das imagens pelo *software*, foi utilizado o pacote *Plant*

*Image Analysis* - Pliman (OLIVOTO, 2022) para a obtenção dos valores de índices de vegetação. Esses valores foram obtidos a partir da média de cinco folhas amostradas por parcela. Assim, foram obtidos 60 valores para os 31 índices (Tabela 3) disponíveis no pacote Pliman (OLIVOTO, 2022).

**Tabela 3.** Índices de vegetação analisados por meio do pacote Pliman (OLIVOTO, 2022).

Índice de vegetação	Equação de determinação
<b>R</b> ( <i>Red</i> )	<b>R</b>
<b>G</b> ( <i>Green</i> )	<b>G</b>
<b>B</b> ( <i>Blue</i> )	<b>B</b>
<b>NR</b> ( <i>Normalized Red</i> )	$R / (R + G + B)$
<b>NG</b> ( <i>Normalized Green</i> )	$G / (R + G + B)$
<b>NB</b> ( <i>Normalized Blue</i> )	$B / (R + G + B)$
<b>GB</b> ( <i>Green Blue Ratio</i> )	$G / B$
<b>BG</b> ( <i>Blue Green ratio</i> )	$B / G$
<b>RB</b> ( <i>Red Blue Ratio</i> )	$R / B$
<b>BR</b> ( <i>Blue Red Ratio</i> )	$B / R$
<b>RG</b> ( <i>Red Green Ratio</i> )	$R / G$
<b>GR</b> ( <i>Green Red Ratio</i> )	$G / R$
<b>BI</b> ( <i>Brightness index</i> )	$\text{Sqrt} ((R^2 + G^2 + B^2) / 3)$
<b>BIM</b> ( <i>Brightness index 2</i> )	$\text{Sqrt} ((R^*2 + G^*2 + B^*2) / 3)$
<b>SCI</b> ( <i>Soil Cor Index</i> )	$(R - G) / (R + G)$
<b>GLI</b> ( <i>Green Leaf Index</i> )	$(2 * G - R - B) / (2 * G + R + B)$
<b>HI</b> ( <i>Primary Colours Hue Index</i> )	$(2 * G - R - B) / (G - B)$
<b>NGRDI</b> ( <i>Normalized Green Red Difference Index</i> )	$(G - R) / (G + R)$
<b>NDGBI</b> ( <i>Normalized Green Blue Difference Index</i> )	$(G - B) / (G + B)$
<b>NDRBI</b> ( <i>Normalized Red Blue Difference Index</i> )	$(R - B) / (R + B)$
<b>I</b>	$R + G + B$
<b>S</b>	$((R + G + B) - 3 * B) / (R + G + B)$
<b>VARI</b> ( <i>A Viseble Atmospherically Resistant Index</i> )	$(G - R) / (G + R - B)$
<b>HUE</b> ( <i>Overall Hue Index</i> )	$\text{Atan} (2 * (B - G - R) / 30,5 * (G - R))$
<b>HUE2</b> ( <i>Overall Hue Index 2</i> )	$\text{Atan} (2 * (R - G - R) / 30,5 * (G - B))$
<b>BGI</b>	$B / G$
<b>L</b>	$R + G + B / 3$
<b>GRAY</b>	$0,299 * R + 0,587 * G + 0,114 * B$
<b>GLAI</b>	$(25 * (G - R) / (G + R - B) + 1,25)$
<b>SAT</b> ( <i>Overall Saturation Index</i> )	$(\max (R, G, B) - (\min (R, G, B)) / \max (R, G, B)$
<b>DGCI</b> ( <i>Dark Green Color Index</i> )	$((HI - 60) / 60 + (1 + S) + (1 + B)) / 3$



Ainda aos 58 DAE, as mesmas folhas utilizadas para aquisição das imagens e leitura com fluorômetro de clorofila foram secas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante. Posteriormente, as amostras de folhas foram moídas, e utilizadas para determinar o teor de N na folha pelo método de Kjeldahl (TEDESCO *et al.*, 1995).

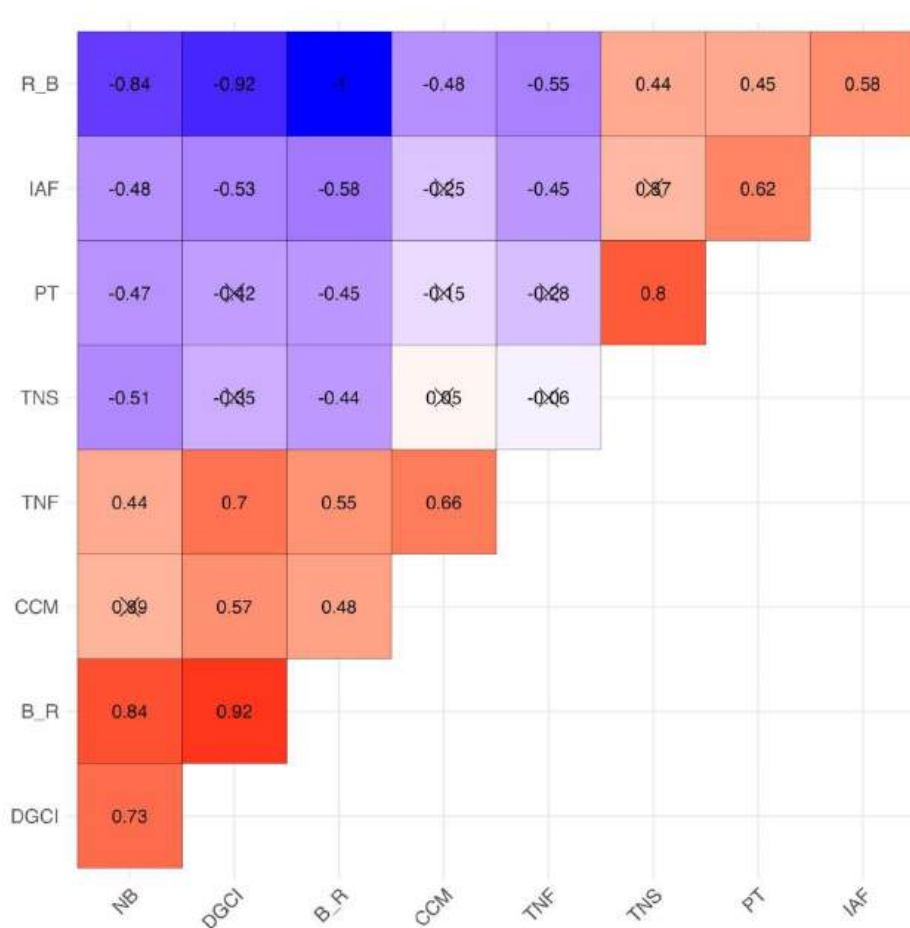
Ao final do ciclo dos genótipos, para a obtenção da produtividade de grãos foram colhidos todos os legumes da área útil. Posteriormente, todas as vagens foram debulhadas e as sementes pesadas para determinar a produtividade ( $\text{g m}^{-2}$ ). A produtividade foi padronizada para 130  $\text{g kg}^{-1}$  de água. As amostras de grãos foram secas em estufa a 65 °C até atingirem massa constante. Posteriormente, essas amostras de grãos foram moídas, e utilizadas para determinar o teor de N na semente pelo método de Kjeldahl (TEDESCO *et al.*, 1995). No qual as amostras foram digeridas com mistura catalítica (Sulfato de Potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) e Sulfato de Cobre ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )) (2g/amostra) e Ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (5mL), seguida de destilação com Hidróxido de Sódio 40% (NaOH) (25mL) do material digerido; o material da destilação é acrescido em solução de Ácido Bórico ( $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) (20mL) para posterior titulação com Ácido Clorídrico 0,02N (HCl).

### ***Análise estatística***

Foi utilizada a regressão linear simples, para avaliar as relações entre os índices de vegetação, o *status* de nitrogênio e produtividade dos 20 genótipos de feijão-caupi. Para verificar a correlação entre os parâmetros analisados e os índices de vegetação uma análise de componentes principais (PCA) foi realizada a partir da matriz de correlação de Pearson, explorando a similaridade entre as variáveis dependentes avaliadas. A correlação de Pearson foi realizada com o auxílio do pacote ggcorplot (KASSAMBARA, 2022), e a PCA foi realizado com o auxílio do pacote (KASSAMBARA & MUNDT, 2020). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R versão 4.2.0 (R CORE TEAM, 2022). As figuras foram feitas no pacote ggplot2 (WICKHAM, 2016).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de vegetação NB (*Normalized Blue*) apresentou correlação moderada e negativa com teor de N na semente (TNS). O índice de vegetação DGCI (*Dark Green Color Index*) apresentou correlações forte e positiva com teor de N na folha (TNF), moderada e positiva com o índice de verde (CCM-200), moderada e negativa com índice de área foliar (IAF). O índice R-B (*Red – Blue*) apresentou correlação moderada e positiva com índice de área foliar, e moderada e negativa com o teor de N na folha (Figura 1).

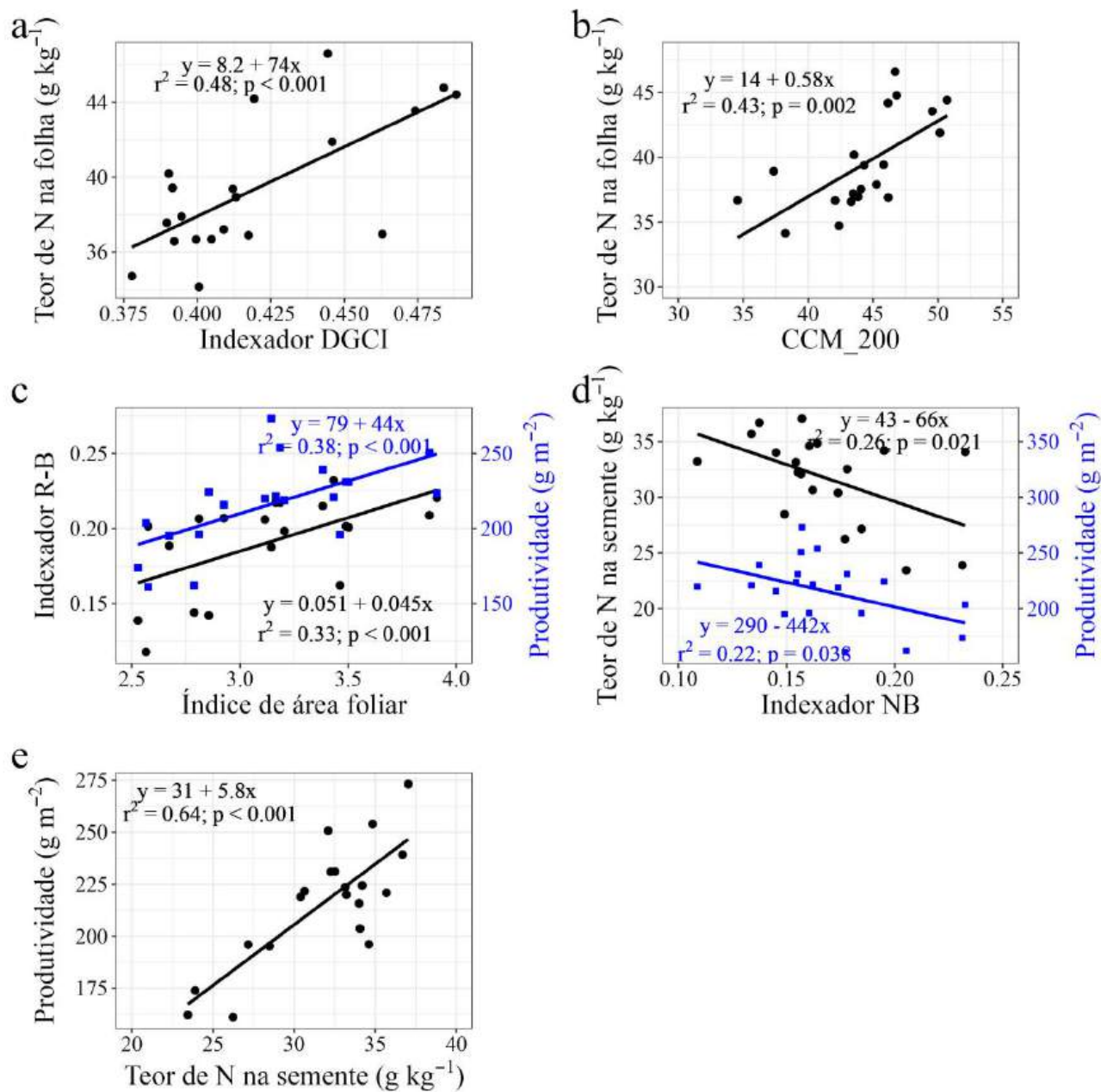


**Figura 1.** Correlação de Pearson entre índices de vegetação e os parâmetros: teor de nitrogênio na folha (TNF g kg<sup>-1</sup>), teor de nitrogênio nas sementes (TNS g kg<sup>-1</sup>), índice de área foliar (IAF), índice de verde (CCM) e produtividade (PT g m<sup>-2</sup>), com 20 genótipos de feijão-caupi. \* Valores sob escritos com 'X' não apresentam diferenças significativas a 5% de significância.

Este é o primeiro estudo sobre o uso de índices de vegetação obtidos de imagem digital de folhas de 20 genótipos de feijão-caupi para avaliar o *status* N desses genótipos.

Hipotetizamos que a partir do uso de imagens digitais é possível diagnosticar o *status* de nitrogênio e a produtividade de genótipos de feijão-caupi.

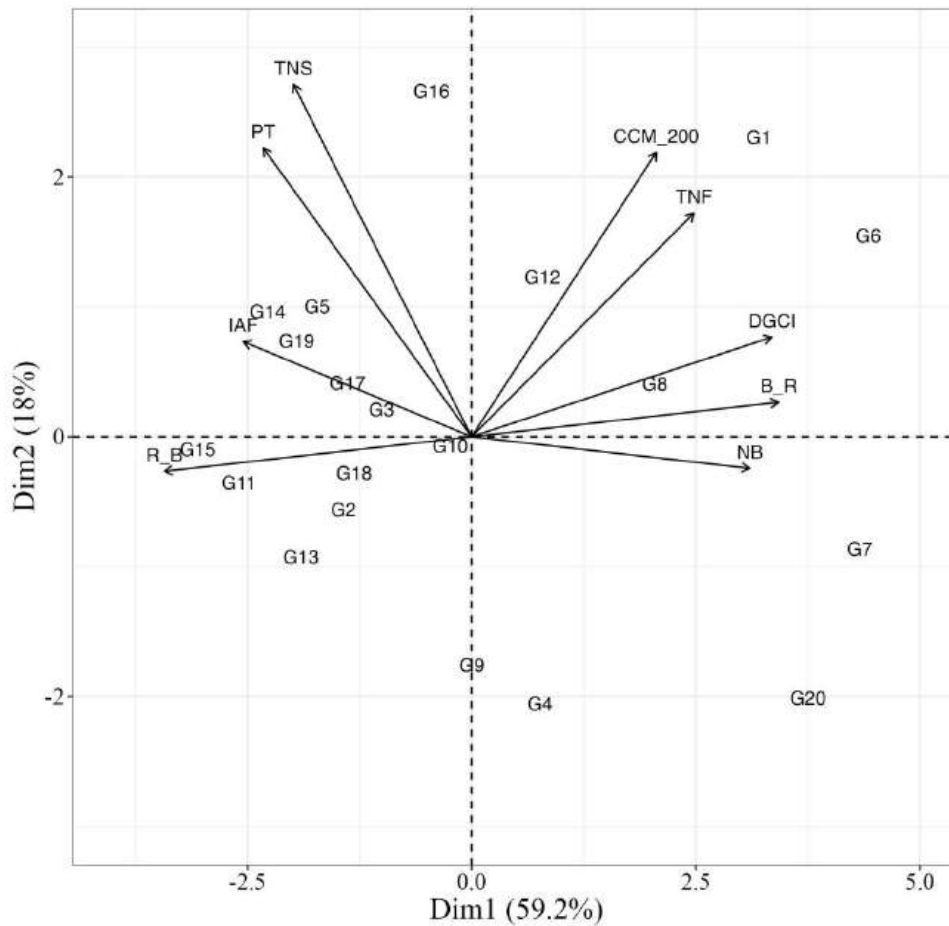
Ainda, foram realizadas regressões lineares simples do *status* nitrogenado e produtividade e com os índices de vegetação. Os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) das regressões variaram de 0,22 (correlação fraca) a 0,64 (correlação forte). O teor de N na folha correlacionou positivamente com índice DGCI (Figura 2a) e com índice de verde (Figura 2b). O aumento de 0,1 unidade no DGCI acresce 7,4 g kg<sup>-1</sup> de N na folha, e aumento de 10 unidades no índice de verde, adiciona 5,8 g kg<sup>-1</sup> de N na folha. O índice R-B e a produtividade correlacionaram positivamente com índice de área foliar (Figura 2c). A adição de 1 unidade no índice de área foliar aumenta 0,045 unidades no índice R-B e 44 g m<sup>-2</sup> na produtividade. O teor de N na semente e a produtividade correlacionaram negativamente com o índice NB (Figura 2d). O aumento de 0,1 unidade no NB decresce 6,6 g kg<sup>-1</sup> de N na semente e 44,2 g m<sup>-2</sup> em produtividade. A produtividade correlacionou positivamente com o teor de N na semente (Figura 2e). O aumento de 10 g kg<sup>-1</sup> de N na semente adiciona 58 g m<sup>-2</sup> na produtividade.



**Figura 2:** Relações do índice DGCI com teor de N na folha (TNF) (a); índice de verde (CCM-200) e TNF (b); índice R-B com índice área foliar (IAF) e R-B com produtividade (c); índice NB com teor de N nas sementes (TNS) e NB com produtividade (d); e TNS com produtividade (e).

O resultado da análise de componentes principais (PCA) explicou 77,2% da variação total dos dados (Figura 3). A primeira componente (Dim1) foi melhor explicada pelos índices de vegetação (R-B, B-R, DGCI e NB); enquanto, a segunda componente (Dim2) foi melhor

explicada pelos índices nitrogenados (teor de N nas sementes, índice de verde e teor de N na folha) e produtividade (Figura 3).



**Figura 3:** Análise de componentes principais com os parâmetros avaliados nos 20 genótipos (G) de feijão-caupi: teor de N na folha (TNF), teor de N nas sementes (TNS), índice de área foliar (IAF), produtividade (PT) e índice de verde (CCM-220), e os índices de vegetação do estudo R-B (*Red – Blue*), B-R (*Blue – Red*), NB (*Normalized Blue*) e DGCI (*Dark Green Color Index*).

De acordo com a PCA, a direção do índice de verde, teor de N na folha e DGCI indica correlação forte e positiva com o N na planta (Figura 1 e 2a). Esse resultado indica que é possível estimar o N nas plantas de feijão-caupi com base no índice DGCI.

A produtividade teve correlação significativa negativa com os índices de vegetação NB (Figura 1 e 2d). Esse resultado demonstrou que o aumento do índice NB decresce a média produtiva de forma expressiva, 44,2 g m<sup>-2</sup>. Assim recomenda-se mais estudos sobre os índices de vegetação e a produtividade, a fim de buscar correlações mais fortes com a produtividade,

para que essas permitam estimar de forma acurada a produtividade de diferentes genótipos de feijão-caupi.

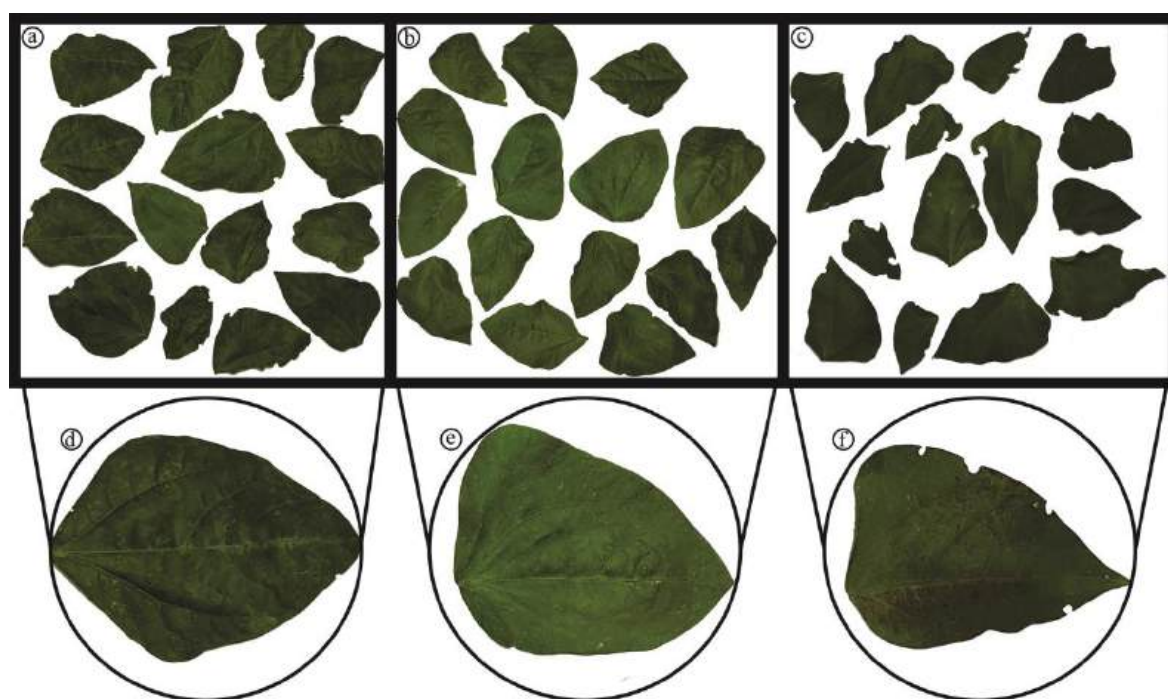
As menores produtividades foram obtidas pelos genótipos MNC11-1018E-17 (G4), MNC11-1019E-46 (G7) e BRS Guariba (G20), e as relações negativas entre o índice NB com a produtividade e com o índice de área foliar (Figura 3) podem explicar essas reduções na produtividade; pois a área foliar é importante parâmetro para aumentar a capacidade de realizar fotossíntese (BASTOS *et al.*, 2012). Dentre esses genótipos, MNC11-1018E-17 (G4) foi aquele que apresentou menor produtividade ( $161 \text{ g m}^{-2}$ ). Por outro lado, o genótipo BRS Pajeú (G16) obteve a maior produtividade ( $273 \text{ g m}^{-2}$ ) e maior índice de verde (Figura 3). Pois um bom *status* nitrogenado das plantas melhoram o acúmulo de reserva nas sementes e a produtividade (BARBOSA *et al.*, 2011), e influência no aumento do tamanho das sementes (CRUSCIOL *et al.*, 2003). Esse resultado mostra que plantas bem nutridas com nitrogênio tem maior potencial produtivo, pelo aumento do tamanho das sementes e massa, possivelmente pela maior translocação de N das folhas para as sementes, o que reflete no incremento do teor de nitrogênio na semente (Figura 2e).

A partir da mensuração de teores de clorofila é possível estimar teores de N e produtividade. Por exemplo, Kandel (2020) relata que o aumento nos valores de SPAD, aparelho utilizado para estimar o N na folha, está altamente associado com o rendimento de grãos de milho (*Zea mays*). O SPAD e o teor relativo de clorofila na folha também foram associados positivamente com produtividade de feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) (SANT'ANA *et al.*, 2010). As clorofilas são os aparelhos fotossintéticos das plantas, presentes em maiores concentrações nas folhas, responsáveis pela produção de fotoassimilados para todo o funcionamento fisiológico das plantas.

Em milho, Rorie *et al.*, (2011) observaram resultados altamente relacionados entre o índice DGCI e o teor de N na folha, o que confirma que a coloração das folhas tem potencial para indicar a condição nitrogenada da planta. No nosso trabalho, os genótipos que apresentaram os maiores teor de N na folha foram MNC11-1031E-5 (G12) ( $46,6 \text{ g kg}^{-1}$ ) e MNC11-1013E-33 (G1) ( $44,4 \text{ g kg}^{-1}$ ). Esses genótipos ficaram próximos ao DGCI em nossa análise de componentes principais (Figura 3), o que confirma que o índice de vegetação DGCI pode ser utilizado para diagnosticar a condição nitrogenada da planta (RORIE *et al.*, 2011).

A oposição dos vetores de DGCI e R-B (Figura 3) reafirma característica de coloração distinta entre estes índices, no qual o DGCI representa tonalidades e intensidades de verde mais acentuadas (Figura 4a e 4d), enquanto o R-B representa tonalidades e intensidades de

amarelo (Figura 4b e 4e). Isso foi confirmado no nosso trabalho, no qual as folhas mais verdes foram observadas no genótipo MNC11-1013E-33 (G1) e folhas com tonalidades amarelada no genótipo MNC11-1052E-3 (G15). Esse fato demonstra que os genótipos possuem diferentes tonalidades de cor das folhas (Figura 4). Ainda, o vetor do índice NB aproximou-se do genótipo BRS Guariba (G20), índice de vegetação que é aumentado com a presença da cor azul mais refletida pelas folhas (Figura 4c e 4f). Assim, essa interação identificou a característica de tons mais arroxeados nas folhas do BRS Guariba (G20), característica inerente a este genótipo e visualmente perceptível e confirmada pela oposição dos vetores dos índices vegetais DGCI e R-B (Figura 3). Teores adequados de N levam a uma maior reflectância de verde (comprimento de onda de 500 a 565 nm), o que explica a maior correlação do DGCI com teor de N na folha (Figura 2a, 3). Dessa forma, quanto mais escuro é o tom de verde da folha maior será o valor DGCI da folha (KARCHER; RICHARDSON, 2003).



**Figura 4:** Imagens digitais da 3ª folha totalmente expandida do ápice para a base dos genótipos de *Vigna unguiculata* MNC11-1013E-33 (G1) (a; d), MNC11-1052E-3 (G15) (b; e) e BRS Guariba (G20) (c; f) aos 58 DAE.

O diagnóstico eficaz do *status* nitrogenado de uma planta de forma não destrutiva, é interessante do ponto de vista operacional, na facilidade e rapidez de predição, o que irá simplificar procedimentos laboratoriais (XU *et al.*, 2020). A partir do acompanhamento dos

níveis nitrogenados, há a possibilidade de maximização de recurso, e conseqüentemente a manutenção de alta produtividade; pois reduções no teor de nitrogênio na folha acarreta a redução da eficiência das clorofilas, devido à sua participação nos fotossistemas I e II e na energia gerada durante a etapa da fotossíntese (TAIZ *et al.*, 2017).



## CONCLUSÃO

Nossos resultados mostram que é possível estimar o *status* nitrogenado da cultura do feijão-caupi pelo índice de vegetação DGCI a partir de imagens digitais das folhas. Logo, o índice DGCI pode se tornar uma ferramenta eficaz para diagnosticar de forma rápida e não destrutiva o *status* nitrogenado do feijão-caupi, e assim, maximizar os recursos e consequentemente manter a alta produtividade da cultura.

E a produtividade apresentou correlações interessantes com índice com NB, pois ao aumento do índice decresce a média produtiva de forma expressiva. Assim recomenda-se mais estudos sobre os índices de vegetação e sua relação com produtividade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorol Zeitschrift**. v.22, p.711-728, 2013.

BARBOSA, R.M.; COSTA, D.S.D.; HOMEM, B.F.M; SÁ, M.E.D. Nitrogênio na produção e qualidade de sementes de feijão. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, p. 470-474, 2011.

BASTOS, E.A.; RAMOS, H.M.M.; DE ANDRADE JÚNIOR, A.S.; DO NASCIMENTO, F.N.; CARDOSO, M.J. Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob déficit hídrico. **Water Resources and Irrigation Management-WRIM**, v. 1, p. 31-37, 2012.

BASTOS, E.A. A cultura do feijão-caupi no Brasil. **Embrapa Meio Norte**, 2016.

BROADLEY, M.; BROWN, P.; CAKMAK, I.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Function of nutrients: micronutrients. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. p.191-248, 2012.

CRUSCIOL, C.A.C.; LIMA, E.D.; ANDREOTTI, M.; NAKAGAWA, J.; LEMOS, L.B.; MARUBAYASHI, O.M. Efeito do nitrogênio sobre a qualidade fisiológica, produtividade e características de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, v.25, p.108-115, 2003.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). Boletim de grãos – Produção e balanço de oferta e demanda de grãos. Edição de outubro de 2022.

DJAWAD, Y.; TUFAIL, M.; JUMADI, O.; ANWAR, A. Discrimination of nitrogen concentration of fertilized corn with extracted algae and polymer based on its leaf color images. **International Information and Engineering Technology Association**, v.25, p.303-309, 2020.

FAOSTAT. FAO statistical database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. “Crops.”. 2019.

KANDEL, B.P. SPAD value varies with age and leaf of maize plant and its relationship with grain yield. **BMC Research Notes**, v.13, p.475 2020.

KARCHER, D.E.; RICHARDSON, M.D. Quantifying turfgrass color using digital image analysis. **Crop Science**, v.43, p.943-951, 2003.

KASSAMBARA, A. ggcoordplot: Visualization of a correlation matrix using ‘ggplot’. R Package, versão 1.0.7.2022.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. factextra: Factoextra Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R Package, versão 1.0.7. 2017.

KESKIN, S.G.; STANLEY, J.M.; COWLEY, A.H. Synthesis, characterization and theoretical investigations of molybdenum carbonyl complexes with phosphorus/nitrogen/phosphorus ligand as bidentate and tridentate modes. **Polyhedron**, v.138, p.206-217, 2017.

LI, H.; ZHANG, Y.; LEI, Y.; ANTONIUK, V.; HU, C. Evaluating different non-destructive estimation methods for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) nitrogen status based on canopy spectrum. **Remote Sensing**, v.12, p.95, 2019.

MICHEL, D.; VASQUES, I.C.F.; ARAÚJO, G.C.R.; CASTRO, J.L.; ASSIS, L.L.R.; REIS, R.H.C.L.; SILVA, M.L.S.; FAQUIM, V. Influence of molybdenum doses in inoculation and mineral fertilization in cowpea beans. **Bioscience Journal**, p.102-112, 2020.

RUBIO, L.M.; LUDDEN, P.W. Biosynthesis of the iron-molybdenum cofactor of nitrogenase. **Annual Review Microbiology**, v.62, p.93-111, 2008.

RUTKOWSKA, B.; SZULC, W.; SPYCHAJ-FABISIAK, E.; PIOR, N. Prediction of molybdenum availability to plants in differentiated soil conditions. **Plant, Soil and Environment**, v.63, p.491-497, 2017.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, 2022.

RHEZALI A.; AISSAOUI A.E. Feasibility study of using absolute SPAD values for standardized evaluation of corn nitrogen status. **Nitrogen**. v.3, p.298-307, 2021.

ROCHA, M. de M.; SILVA, K.J.D.; MENEZES JUNIOR, J.A.N. de. Cultivo de feijão-caupi: importância econômica. **Embrapa: Sistema de produção**. v.2, p.1-6, 2017.

RORIE, R.L.; PURCELL, L.C.; KARCHER, D.E.; KING, C.A. The assessment of leaf nitrogen in corn from digital images. **Crop Science**, v.51, p.2174-2180, 2011.

SANT'ANA, E.V.P.; SANTOS, A.B.D.; SILVEIRA, P.M.D. Adubação nitrogenada na produtividade, leitura SPAD e teor de nitrogênio em folhas de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.40, p.491-496, 2010.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. (6nd ed.), Porto Alegre: **Artmed**, 2017.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: UFRGS, 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, 05.)

OLIVOTO, T. Lights, camera, pliman! An R package for plant image analysis. **Methods in Ecology and Evolution**, v.13, p.789-798, 2022.

VIEIRA, R.F.; PAULA JR.; T.J.; CARNEIRO, J.E.S.; QUEIROZ, M.V. Genotypic variability in seed accumulation of foliar-applied molybdenum to common bean. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, p.205-213, 2014.

XU, K.; ZHANG, J.; LI, H.; CAO, W.; ZHU, Y.; JIANG, X.; NI, J. Spectrum-and RGB-D-Based image fusion for the prediction of nitrogen accumulation in wheat. **Remote Sensing**, v.12, p.4040, 2020.

WANG, W.; YAO, X.; YAO, XF.; TIAN, Y.; LIU, X.J.; NI, J.; CAO, W.X.; ZHU, Y. Estimating leaf nitrogen concentration with three-band vegetation indices in rice and wheat. **Field Crops Research**, v.129, p.90-98, 2012.

WICKHAM, H. *Elegant graphics for data analysis*. **Springer**. Verlag, New York, 2016.