

Revista
Ciência, Tecnologia & Ambiente

Imagens NDVI para monitoramento de déficit nutricional em plantas

NDVI imagens for monitoring nutritional deficits in plants

Liniker Christiano Milore Rotta¹, Adriana Cavalieri Sais¹, Claudinei Fonseca Souza^{1*} 

¹ Centro de Ciências Agrárias – CCA, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Araras, SP, Brasil. *Autor para correspondência: cfsouza@ufscar.br

Como citar: ROTTA, L.C.M.; SAIS, A.C.; SOUZA, C.F., 2023. Imagens NDVI para monitoramento de déficit nutricional em plantas. *Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente*, vol. 13, e13249. <https://doi.org/10.4322/2359-6643.13249>

RESUMO

A fim de agilizar a tomada de decisão por meio de análises rápidas dos cultivos, novas tecnologias vêm sendo inseridas com sucesso na agricultura. Dentre estas, os índices de vegetação capturam a refletância dos comprimentos de onda das estruturas vegetais e permitem inferir a qualidade da massa vegetal. Entre os variados modelos, o mais utilizado é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Visando testar essa funcionalidade em ambientes protegidos, o objetivo desse trabalho foi avaliar o uso do índice NDVI para culturas em cultivo protegido. Para isso, foram capturadas semanalmente imagens do cultivo de morango e repolho, os quais receberam diferentes tratamentos nutricionais. O morango foi conduzido em sistema hidropônico e foi submetido a três diferentes soluções: água de abastecimento com adubação recomendada (TA), água de reúso com complemento através de adubos comerciais (TRA) e apenas água de reúso (TR). O repolho foi cultivado em sistema de canteiros com três doses de um fertilizante de liberação controlada (100%, 80% e 60% da dose recomendada pelo boletim IAC 100). As imagens foram processadas no software QGIS para gerar as imagens NDVI. O cultivo do repolho não apresentou diferenças no estado nutricional das plantas, assim, as doses de fertilizantes utilizadas não promoveram alterações fisiológicas que demonstrassem sintomas de deficiência, nem queda de produção, consequentemente, não apresentou diferença na refletância de biomassa. Já o cultivo do morango apresentou deficiências visíveis no tratamento que utiliza apenas água de reúso, sendo observado uma diferença de até 20% de NDVI durante o monitoramento. Desta forma, os resultados permitem concluir que imagens NDVI são capazes de monitorar distúrbios nutricionais nas plantas avaliadas, podendo ser uma tecnologia útil na automação de estufas agrícolas. **Palavras-chave:** índice de vegetação, ambiente protegido, nutrição de plantas, agricultura de precisão.

ABSTRACT

New technologies have been successfully introduced into agriculture to speed up decision-making through quick analysis of crops. Among these, the vegetation indices capture the reflectance of the wavelengths of plant structures and allow inferring the quality of the plant mass. Among the various models, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is the most used. Aiming to test this functionality in protected environments, this work aimed to evaluate the use of the NDVI index for crops in protected cultivation. For this, weekly images of strawberry and cabbage cultivation were captured, which received different nutritional treatments. The strawberry was grown in a hydroponic system and was subjected to three different solutions: supply water with recommended fertilization (TA), reuse water with complement



through commercial fertilizers (TRA), and reuse water only (TR). The cabbage was grown in a bed system with three doses of controlled-release fertilizer (100%, 80%, and 60% of the dose recommended by the IAC 100 bulletin). The images were processed in QGIS software to generate NDVI images. Cabbage cultivation did not present differences in the nutritional status of the plants, therefore, the doses of fertilizers used did not promote physiological changes that would demonstrate symptoms of deficiency, nor a drop in production, consequently, there was no difference in biomass reflectance. Strawberry cultivation, on the other hand, showed visible deficiencies in the treatment using only reused water, with a difference of up to 20% of NDVI observed during monitoring. Thus, the results conclude that NDVI images can monitor nutritional disturbances in the evaluated plants and may be a helpful technology in the automation of agricultural greenhouses.

Keywords: vegetation index, protected environment, plant nutrition, precision agriculture.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional é uma realidade e estima-se que até 2050 a população mundial alcance 9,8 bilhões de pessoas (United Nations, 2017). Neste contexto, a demanda também tende a aumentar em uma escala jamais antes vista na história, tanto por alimentos, quanto outros recursos, como combustíveis, minérios, energia, indústria têxtil, entre outros. Nesse contexto a agricultura tem buscado novas saídas a fim de produzir mais, num cenário no qual se exige menores expansões de áreas, uso de recursos e mão de obra disponível.

A busca por uma maior sustentabilidade nos leva a verticalização produtiva, ou seja, aumentar da produção, que só tem sido possível devido à investigação científica, a tecnificação e o investimento nos meios produtivos (Freitas, 2014). Pesquisas que aperfeiçoam o uso de agroquímicos somado ao melhoramento genético e novas tecnologias de cultivo têm garantindo bons índices de produção.

Uma das limitações a serem vencidas no cultivo convencional é a precisão, ou seja, o fornecimento personalizado por área, conforme a necessidade real desta. Por menor que seja a área ela não é homogênea, logo o manejo também deve ser diferenciado (Basso et al., 2019). Neste contexto surge a agricultura de precisão, buscando setorizar ao máximo o ambiente produtivo, fornecendo o necessário de acordo com o microambiente dessa setorização para que cada planta atinja seu potencial (Ezenne et al., 2019).

Com a nova era da agricultura digitalizada e o aperfeiçoamento da informática e eletrônica, softwares e sensores vem sendo cada vez mais usados. Suas

funcionalidades são amplas, voltadas para análise de solo visando serem mais representativas, previsões climáticas setorizadas, índices de produção e também os chamados índices de vegetação, o que tem gerado um grande volume de informações (Basso et al., 2019; Silva et al., 2020).

Os índices de vegetação são algoritmos que correlacionam os diferentes comprimentos de onda capturados em uma imagem da plantação. Estas imagens podem ser obtidas através de fotografias por satélites, drones ou veículos aéreos não tripulados (VANT's) (Oliveira e Aquino, 2020). Esse tipo de análise permite avaliar os diferentes objetos de acordo a sua reflectância do espectro luminoso.

Um desses índices é o Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) que foi proposto por Rouse et al. (1973), o qual baseia-se na determinação indireta da atividade fotossintética e da biomassa de uma área. A imagem capturada e analisada nesse sistema é capaz de fornecer em pouco tempo um diagnóstico da área produtiva, podendo destacar regiões afetadas por algum distúrbio permitindo uma ação localizada de investigação de causas e correção tornando um dos índices mais utilizados na agricultura (Moreira, 2001).

A partir disso, diversas funcionalidades vêm sendo atribuídas ao NDVI, principalmente no setor ambiental e agropecuário, a fim de monitorar a sanidade da vegetação, o uso da terra, estimar produção e auxiliar na tomada de decisão, dentre outras temáticas (Yang et al., 2017). Esse uso, atualmente, se restringe a grandes áreas de terra e uma busca na literatura especializada não são encontradas muitas informações que testem a viabilidade do uso de NDVI em ambientes de cultivos protegidos.

Visando testar essa funcionalidade em ambientes protegidos, o objetivo desse trabalho foi avaliar o uso do índice NDVI para culturas em cultivo protegido.

MATERIAL E MÉTODOS

Cultivos Avaliados

O experimento foi conduzido simultâneas no período de verão-outono, avaliando dois cultivos diferentes, morango (*Fragaria X ananassa* Duch) e repolho (*Brassica oleracea* var. Capitata L.). A caracterização climática da região de acordo com a classificação de Köppen-Geiger é do tipo “Cfa” subtropical úmido, onde temos duas estações bem definidas, sendo uma seca no período de abril à setembro e outra chuvosa de outubro à março, precipitação média anual de 1.575 mm ano⁻¹ e temperatura média de 21,3 °C (Medeiros et al., 2021).

Os dois foram conduzidos na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) na cidade de Araras/SP. Ambos avaliavam aspectos ligados a produção mediante diferentes tratamentos nutricionais dentro de ambientes protegidos.

Repolho

O cultivo de repolho foi implementado em canteiros dentro de uma estufa agrícola, a qual possuía estrutura metálica do tipo teto em arco coberta em polietileno transparente com as seguintes dimensões: 18 m de comprimento; 6,40 m de largura; pé-direito com 3 m e tela do tipo sombrite fechando as laterais. Os canteiros foram erguidos nas dimensões de 2,1 m de largura por 2 m de comprimento e 0,30 m de altura. As mudas de repolho foram transplantadas manualmente, adotando-se espaçamento de 0,70 m entre linhas e 0,30 m entre plantas, em configuração triangular. As mudas foram divididas em quatro fileiras de seis plantas cada, totalizando 24 plantas por canteiro.

O delineamento utilizado foi o de blocos casualizados com um total de quatro blocos e três tratamentos. Os tratamentos testados foram doses de um polímero de liberação controlada, utilizou-se o Multicote® Agri/Multigro® da Haifa, sendo: 100% (T1), 80% (T2) e 60% (T3) da dose recomendada para a cultura do repolho segundo o Boletim Técnico 100 (Van Raij et al., 1997).

Cada canteiro recebeu quatro linhas de gotejadores, com emissores autocompensantes de vazão 4 L h⁻¹ e foram espaçados em 0,7 m, posteriormente passando

pelo teste de uniformidade segunda a metodologia de Cunha et al. (2014). O manejo da irrigação foi realizado através da umidade do solo monitoradas por sondas de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR).

Os dados produtivos da cultura avaliados foram a massa de matéria fresca média de 8 cabeças colhidas aos 90 dias após transplante, correspondentes à área útil interna de cada canteiros, excluindo a bordadura, os quais foram submetidos ao teste Tukey (5%).

Avaliou-se também o conteúdo mineral foliar aos 60 dias, retirando a folha mais externa do envoltório da cabeça, segundo metodologia do Boletim 100 (Van Raij et al., 1997).

Morango

O experimento com morangueiro foi implantado em um sistema hidropônico em estufa agrícola, a qual possuía estrutura metálica do tipo teto em arco coberta em polietileno transparente com as seguintes dimensões: 20 m de comprimento; 6,40 m de largura; pé-direito com 3 m e tela do tipo sombrite fechando as laterais. Composto por doze bancadas capazes de acomodar 192 plantas no total, 48 por bancada, que por sua vez estão divididas em quatro perfis hidropônicos de 12 plantas cada. A declividade do perfil era de 10%. O sistema todo foi dividido formando quatro blocos ao acaso compostos por três bancadas cada, onde cada uma recebeu uma solução diferente.

Ademais, esse sistema de hidroponia é integrado à rede da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), responsável pelo processamento das águas residuárias de banheiros e refeitórios da Universidade e após o tratamento se obtém uma solução com diversas substâncias diluídas, as quais possuem potencial de uso como nutrientes para plantas cultivadas.

Os tratamentos consistiam em três soluções hidropônicas, compostas por água de abastecimento com adubação recomendada (TA), água de reúso com complemento através de adubos comerciais (TRA) e apenas água de reúso (TR). Para TRA e TA a solução referência foi com base nas recomendações de Fernandes-Junior et al. (2002).

Essas três soluções foram aplicadas segundo a distribuições em blocos no sistema de hidroponia, um tratamento por bancada por bloco.

Foram avaliados nutrientes da biomassa, produção e o NDVI. Houve três coletas de plantas para análise química de biomassa realizadas 60, 90 e 120 dias após transplantio (DAT). A coleta consistia em selecionar ao acaso três plantas por tratamento (retirando raízes, frutos e flores), gerando uma amostra composta que foi analisada pelo Laboratório de Fertilidade do Solo da UFSCar, campus Araras.

Os teores obtidos, junto a fotos para o NDVI, serviram para verificar a correlação desses elementos com o índice. Já a produção foi feita mediante a colheita de frutos realizada duas vezes por semana e posterior pesagem, durante 4 meses. Para os dados produtivos foi realizado, também, o teste de Tukey (5%).

Coleta de Imagens e Processamento

Para que o índice de vegetação pudesse ser calculado a partir de 45 DAT para o repolho e 76 DAT para o morango foi feito semanalmente a coleta de imagens usando uma câmera MAPIR Survey 3®, modelo capaz de captar os comprimentos de onda vermelho, verde e infravermelho. Essa câmera foi acoplada a um suporte que permitia a visão superior a 2 m de altura dos canteiros, conforme mostra a Figura 1.

Foram tiradas fotos por canteiros/bancadas em cada data, que posteriormente foram transferidas para um computador para realizar as análises no software QGIS (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019). Esse processo

consistiu nas seguintes etapas: inserção da imagem no sistema de coordenadas local, aplicação do índice em NDVI através da função de calculadora raster, na qual foi inserida a Equação 1, referente ao índice, usando os diferentes comprimentos de onda capturados.

$$NDVI = \frac{\text{Inf. vermelho próximo} - \text{vermelho}}{\text{Inf. vermelho próximo} + \text{vermelho}} \quad (1)$$

Gerando a nova imagem delimitou-se a área a qual se desejava medir, correspondente a área útil da bancada/canteiro, de onde foi obtida a média de NDVI presente na área. Os dados foram tabelados e analisados. A Figura 2 ilustra o processo de transformação das imagens.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após capturadas e analisadas as imagens, o comportamento do NDVI e demais dados obtidos dos cultivos, os resultados serão apresentados e discutidos separadamente por cultura.

Repolho

As Tabelas 1 e 2 trazem os resultados obtidos para a cultura do repolho, indicando a massa de matéria fresca obtida por cabeça e o conteúdo mineral das folhas. As Figuras 3 e 4 apresentam o acompanhamento do NDVI e um comparativo dos tratamentos, respectivamente.

Para a massa de matéria fresca das cabeças de repolho, não houve diferença significativa neste ciclo e está adequada aos padrões de comercialização, que segundo Aquino et al. (2005) varia de 1000 a 1500 g por cabeça (Tabela 1). Isso demonstra que o polímero fertilizante foi mais eficiente que a adubação tradicional mineral (dose sugerida pelo Boletim 100), disponibilizando os nutrientes de forma mais lenta e suprimindo as necessidades do repolho ao longo do tempo e principalmente com menores perdas, resultados e discussão semelhantes para tomate “grape”

Tabela 1. Massa de matéria fresca média de cabeças de repolhos obtidas por tratamento.

Tratamento	Massa de matéria fresca por cabeça (g)
100%	1380 a*
80%	1430 a
60%	1220 a

*Comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Letras iguais não apresentam diferença significativa entre os tratamentos.

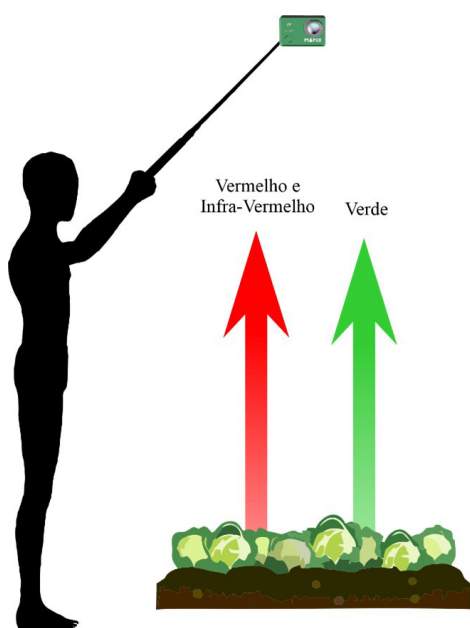
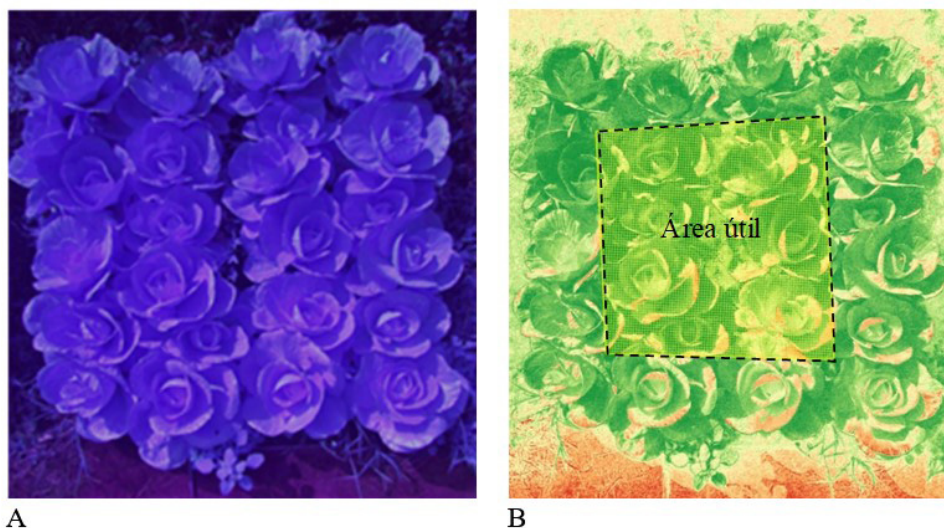


Figura 1. Esquema do método de coleta de imagens.

Tabela 2. Composição mineral média das folhas de repolho por tratamento.

Tratamentos	Macronutrientes (g kg ⁻¹)					Micronutrientes (mg kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
T1	36,0	4,8	28,6	18,8	4,9	7,5	63,0	8,0	112,0	91,0	44,0
T2	36,5	4,3	30,5	20,8	5,9	8,6	51,0	7,0	126,0	78,0	62,0
T3	35,5	4,5	29,2	23,3	5,7	9,1	45,0	5,0	92,0	68,0	37,0

**Figura 2.** (A) Canteiro de repolho obtida a partir da câmera Mapir Survey 3 e (B) imagem processada em NDVI e área útil avaliada.

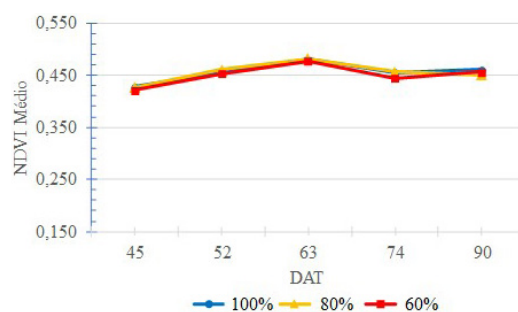
foram apresentados por Souza et al. (2023). Como não há diferença entre o 100% e 60% a economia de adubo foi de 40% nas condições utilizadas.

O NDVI também acompanhou esse comportamento e não demonstrou diferenças entre os tratamentos no período avaliado, o que corrobora que o índice possa ser uma inferência indireta, principalmente qualitativa.

A queda no NDVI após o 63º dia se deve ao fato da coleta de folhas para amostragem nutricional, o que levou a um aumento da exposição do solo e queda do NDVI (Figura 3).

Segundo o Boletim 100 as faixas de teores adequados para macronutrientes nas folhas de repolho são N (30-50 g kg⁻¹), P (4-7 g kg⁻¹), K (30-50 g kg⁻¹), Ca (15-30 g kg⁻¹), Mg (4-7 g kg⁻¹) e S (3-7 g kg⁻¹). Já para micronutrientes temos que os teores ideais são B (25-75 mg kg⁻¹), Cu (8-20 mg kg⁻¹), Fe (40-200 mg kg⁻¹), Mn (35-200 mg kg⁻¹) e Zn (30-100 mg kg⁻¹).

Quando comparamos a composição mineral das folhas com os níveis de referência do Boletim 100, temos que a concentração de enxofre está acima do adequado nos três tratamentos, mas houve déficit de potássio nos

**Figura 3.** Evolução média de NDVI em dias após o transplante (DAT) das diferentes doses nutricionais em repolho.

Fonte: Acervo próprio.

tratamentos 1 e 3 e de cobre em 80%. Isso pode se dar devido a liberação não avaliada do polímero, que pode ter sido insuficiente para o ciclo da cultura.

Apesar dessas deficiências não houve falta de N e Mg, principais elementos que desencadeiam a fotossíntese, logo não houveram alteração significativa no tamanho das plantas, o que influenciaria na sua cobertura, nem na pigmentação de suas folhas, o que condiz com o NDVI nos tratamentos, que pode ser influenciado por esses fatores.



Figura 4. Comparação da vista superior dos tratamentos. A = 100%; B = 80%; C = 60%.
Fonte: Acervo próprio.

Morango

Para o cultivo do morangueiro os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5, 6 e 7 e Tabelas 3 e 4.

Para essa etapa do experimento é nitida a diferença no crescimento das plantas submetidas ao tratamento TR que utilizou apenas água de reúso, Figura 6.

O tratamento TR apresentou menor desenvolvimento foliar e produção, além de sintomas de deficiência em fósforo (avermelhamento de folhas e caules), boro (baixo desenvolvimento de limbo foliar, e ferro (branqueamento e mal desenvolvimento das folhas), Figura 7. Apesar disso, tais deficiências não foram observadas na análise química de tecido vegetal (Tabela 5), acredita-se que houve um erro na amostragem ou na análise química. O Laboratório de Fertilidade do Solo estava passando por um período de ajustes no treinamento de recursos humanos, os quais culminaram na provável inconsistência observadas visualmente na Figura 7.

Essa debilidade se deu frente a variação dos elementos em solução de reúso que foram insuficientes neste tratamento quando comparados aos outros dois tratamentos (TRA e TA), nos quais o nível nutricional era mantido constante e adequado, segundo complementação química comercial.

As plantas debilitadas apresentaram menor desenvolvimento e cobertura, e consequentemente menor interceptação de radiação o que permitiu a câmera captar outros elementos como o solo e a bancada, as quais interferiram na qualidade das estimativas devido a queda no índice NDVI por consequente redução da cobertura vegetal.

Como nesse experimento foi feito acompanhamento quinzenal da composição mineral foliar foi possível avaliar a correlação do NDVI com os diferentes nutrientes medidos.

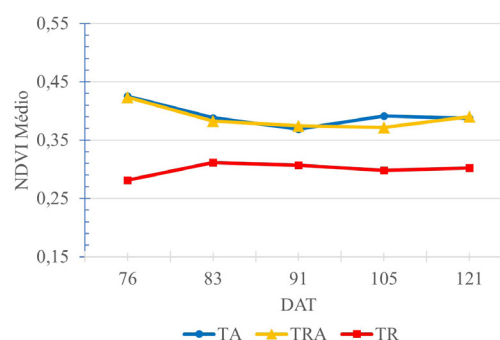


Figura 5. Evolução média de NDVI em dias após o transplante (DAT) do morango segundo tratamentos hidropônicos. TR – Tratamento com água de reúso sem adição de fertilizantes; TRA – Tratamento com água de reúso com adição de fertilizantes; TA – Tratamento com água potável com adição de fertilizantes.
Fonte: Acervo próprio.

Tabela 3. Produtividade dos morangueiros segundo seu tratamento hidropônico.

Tratamento	Produtividade (Kg/ha)
TA	289,52 a*
TRA	272,77 a
TR	79,21 b

*Comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Dentre os elementos nota-se que apenas o teor de Mn apresentou correlação com o NDVI nos três tratamentos. No geral não foi observada uma consistente correlação entre os teores minerais medidos nas folhas e o NDVI. Isso se deve principalmente ao fato do NDVI responder não só a concentração de clorofila das folhas (Read et al., 2003), mas também a outros fatores, como arquitetura e biomassa, que podem influenciar na refletância (Ferri, 2002). Diante da complexidade de relações nos tecidos vegetais, o índice se torna de difícil inferência nutricional específica.

Tabela 4. Composição mineral média da biomassa verde de morangueiros por tratamento.

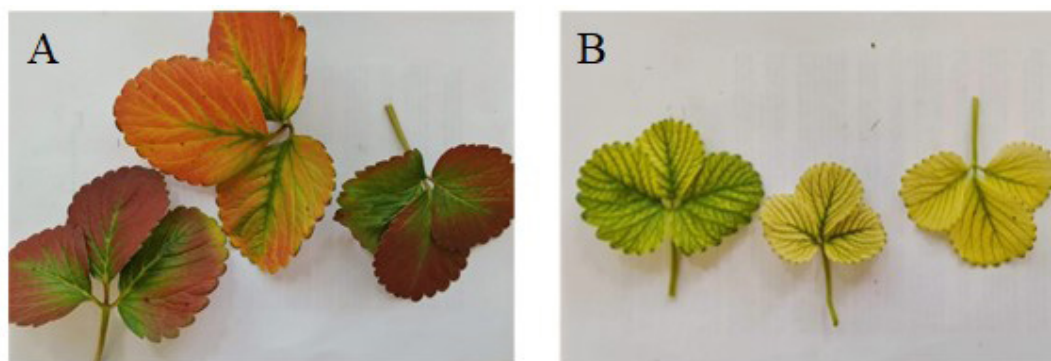
Tratamentos	Macronutrientes (g kg ⁻¹)					Micronutrientes (mg kg ⁻¹)					
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
TA	16,7	4,2	31,2	14,9	4,0	2,2	65,3	20,7	234,0	61,0	43,0
TRA	18,3	4,1	30,2	15,2	3,7	2,8	55,0	18,0	244,0	113,3	31,0
TR	17,5	2,1	26,2	17,3	4,6	2,5	19,3	22,3	336,7	108,3	60,3

Tabela 5. Índice de correlação linear entre o NDVI e teores minerais em folhas.

Tratamentos	Correlação linear										
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
TR	0,58	0,07	0,54	0,56	0,84	0,50	0,9	0,156	0,59	0,81	0,98
TA	0,47	0,14	0,98	0,43	6,0 ⁻⁶	0,30	0,32	0,09	0,08	0,90	0,45
TRA	0,75	0,26	0,36	0,47	0,76	0,78	0,32	0,17	0,77	0,95	0,67

**Figura 6.** Comparativo de tratamentos hidropônicos no desenvolvimento do morangueiro. TR – Tratamento com água de reúso sem adição de fertilizantes; TRA – Tratamento com água de reúso com adição de fertilizantes; TA – Tratamento com água potável com adição de fertilizantes.

Fonte: Acervo próprio.

**Figura 7.** Sintomas de deficiência foliar: A – Fósforo; B – Ferro.

Apesar disso, o experimento demonstra potencialidade do uso de NDVI até mesmo em ambientes protegidos, possibilitando a criação de sistemas inteligentes de gestão. Esse tipo de sistema consiste na aplicação localizada de insumos (defensivos, água, adubo, etc) gerando economia de trabalho e gastos com agroquímicos através de ferramentas tecnológicas como o NDVI.

Esse tipo de tecnologia demonstrou também potencial uso na automação de estufas agrícolas, já que a metodologia utilizada pode ser algoritmizada em softwares adequados para captar informações através das câmeras e sendo capaz de tomar decisões para manter o cultivo produtivo.

Para futuros estudos seria interessante que haja maior detalhamento das respostas espectrais mediante a avaliação específica de cada fator que influencia o índice.

CONCLUSÕES

O NDVI foi capaz de captar as alterações geradas pelo déficit nutricional nas culturas analisadas sem identificar o nutriente específico, o qual pode ser considerada uma ferramenta com potencial uso para cultivos em ambiente protegido.

REFERÊNCIAS

AQUINO, L.A., PUIATTI, M., PEREIRA, P.R.G., PEREIRA, F.H.F., CASTRO, M.R.S. & LADEIRA, I.R., 2005. Características produtivas do repolho em função de espaçamentos e doses de nitrogênio. *Horticultura Brasileira*, vol. 23, no. 2, pp. 266-270. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362005000200020>.

BASSOI, L.H., INAMASU, R.Y., BERNARDI, A.C.C., VAZ, C.M.P., SPERANZA, E.A. & CRUVINEL, P.E., 2019. Agricultura de precisão e agricultura digital. *TECCOGS: Revista Digital de Tecnologias Cognitivas*, no. 20, pp. 17-36.

CUNHA, F.N., SILVA, N.F., TEIXEIRA, M.B., CARVALHO, J.J., MOURA, L.M.F. & SANTOS, C.C., 2014. Coeficientes de uniformidade em sistema de irrigação por gotejamento. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, vol. 8, no. 6, pp. 444-454. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v8n600254>.

EZENNE, G.I., JUPP, L., MANTEL, S.K. & TANNER, J.L., 2019. Current and potential capabilities of UAS for crop water productivity in precision agriculture. *Agricultural Water Management*, vol. 218, pp. 158-164. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.034>.

FERNANDES-JÚNIOR, F., FURLANI, P.R., RIBEIRO, I.J.A. & CARVALHO, C.R.L., 2002. Produção de frutos e estolhos de morangueiro em diferentes sistemas de cultivo em ambiente protegido. *Bragantia*, vol. 61, no. 1, pp. 25-34. <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052002000100005>.

FERRI, C.P., 2002. *Utilização da reflectância espectral para a estimativa de pigmentos fotossintéticos em dossês de soja [Glycine Max (L.), Merrill]*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 152 p. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto.

FREITAS, R.E., 2014. *Produtividade no Brasil: desempenho e determinantes*. Vol. 1. Brasília: Njobs Comunicação. Produtividade agrícola no Brasil, pp. 373-409.

MEDEIROS, R.M., HOLANDA, R.M., FRANÇA, M.V., SABOYA, L.M.F., ROLIM NETO, F.C., ARAÚJO, W.R. & PEREIRA, M.L.F., 2021. Classificação climática de Köppen na Zona da Mata Pernambucana - Brasil. *Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 2, no. 5, p. e25312. <http://dx.doi.org/10.47820/recima21.v2i5.312>.

MOREIRA, M.A., 2001. *Fundamentos de sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. São José dos Campos: INPE. 246 p.

OLIVEIRA, L.N. & AQUINO, C.M.S., 2020. Índice da vegetação da diferença normalizada (NDVI) na sub-bacia hidrográfica do Rio Gurguéia, Piauí-Brasil: análise do efeito da expansão agrícola. *Revista Geoaraguaia*, vol. 10, no. 2, pp. 126-143.

QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2019 [acesso em março 2019]. *QGIS Geographic Information System, versão 3.4* [online]. Beaverton. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>

READ, J.J., WHALEY, E.L., TARPLEY, L. and REDDY, R. 2003. Evaluation of a hand-held radiometer for field determination of nitrogen status in cotton. In: T. VANTOAI, D. MAJOR, M. MCDONALD, J. SCHEPERS & L. TARPLEY, eds. *Digital imaging and spectral techniques: applications to precision agriculture and crop physiology*. Madison: American Society of Agronomy, pp. 177-195. ASA Special Publications, no. 66.

ROUSE, J.W., HAAS, R.H., SCHELL, J.A. & DEERING, D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Third ERTS Symposium*, 10-14 Dezembro 1973, Washington, D.C., USA. Washington, D.C., USA: NASA, pp. 309-317.

SILVA, A.O., SILVA, B.A., SOUZA, C.F., AZEVEDO, B.M., BASSOI, L.H., VASCONCELOS, D.V., BONFIM, G.V., JUAREZ, J.M., SANTOS, A.F. and CARNEIRO, F.M., 2020. Irrigation in the age of agriculture 4.0: management, monitoring and precision. *Revista Ciência Agronômica*, vol. 51, no. Spe, p. e20207695. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20200090>.

SOUZA, C.F., SALA, F.C. & FAEZ, R., 2023. Polymer fertilizer and the fertigation of grape tomatoes in protected cultivation. *Scientia Horticulturae*, vol. 311, p. 111801. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111801>.

UNITED NATIONS, 2017 [acesso em abril 2019]. *World population* [online]. Nova York. Disponível em: https://www.un.org/development/desa/pd/sites/www.un.org/development/desa/pd/files/files/documents/2020/Jan/un_2017_world_population_prospects-2017_revision_databooklet.pdf

VAN RAIJ, B., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., 1997. *Recomendações de adubação*

e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas/Fundação IAC. 285 p. Boletim Técnico 100.

YANG, Z., WU, W.-B., DI, L. & ÜSTÜNDAĞ, B., 2017. Remote sensing for agricultural applications. *Journal of Integrative Agriculture*, vol. 16, no. 2, pp. 239-241. [http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119\(16\)61549-6](http://dx.doi.org/10.1016/S2095-3119(16)61549-6).