ESTUDO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE FOLHAS DE *CITRUS AURANTIFOLIA* EM DIFERENTES ESTÁGIOS

Bruno Guerreiro Miranda[1], *Tassio Koiti Igawa*[1]

[1]Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, Av. dos Astronautas, 1758 - 12227-010, São José dos Campos - SP, Brasil
bruno.miranda@inpe.br; tassio.igawa@inpe.br

RESUMO

O cultivo de limão no Brasil possui grande relevância a nível global. Nesse contexto, vê-se a necessidade de realizar estudos para investigar as características do espectro de reflectância desta cultura. Diante disso, o presente estudo apresenta o resultado do experimento de radiometria com o objetivo de obter o espectro de reflectância de folhas de *Citrus aurantifolia* em diferentes estágios (sadia, em senescência e seca). Por fim, os resultados consistiram em gráficos do comportamento espectral das folhas em diferentes camadas (1 a 5) e a determinação dos intervalos dos estágios fenológicos da folha a partir do cálculo do NDVI.

Palavras-chave – Sensoriamento remoto, radiometria, NDVI, vegetação.

ABSTRACT

The cultivation of Lemon in Brazil has great relevance at a global level. In this context, there is a need to carry out studies to investigate the characteristics of the reflectance spectrum of this crop. Therefore, the present study presents the results of the radiometry experiment with the objective of obtaining the reflectance spectrum of Citrus aurantifolia leaves at different stages (healthy, senescent and dry). Finally, the results consisted of graphs of the spectral behavior of the leaves in different layers (1 to 5) and the determination of the ranges of the leaf's phenological stages based on the NDVI calculation.

Keywords – *Remote sensing, radiometry, NDVI, vegetation.*

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de limão passa por uma fase de grande de destaque, tanto no Brasil quanto a nível mundial. Em um horizonte de 10 anos, houve crescimento em área, produção e produtividade na maioria dos principais países produtores [1].

Os dados divulgados pelo IBGE [2] em 2021 demonstram a grande importância do produto para o país, pois movimentam cerca de 1.5 bilhão de reais com 58.529 hectares destinada à colheita e produção de 1.5 milhão de toneladas, sendo o quinto maior produtor mundial [3].

A folha utilizada neste estudo (*Citrus aurantifolia*) é popularmente conhecida pela produção do "Limão-Tahiti" no Brasil, sendo grande parte do volume produzido exportado para o mercado europeu. No quesito produtividade, o Brasil é o país que possui maior rendimento médio, de 26 toneladas por hectare em 2021, evidenciando o enorme potencial produtivo do país no cultivo da fruta [1].

Segundo [1], ainda que o mercado de limões demonstra ser promissor a nível mundial, em termos nacionais, o mercado interno é o principal consumidor da fruta produzida no país, o que aumenta ainda mais a importância de promover o consumo e a produção desta fruta.

Após observar alguns fatos sobre a importância da folha de *Citrus aurantifolia*, tanto a nível nacional quanto internacional, destaca-se a utilização das ferramentas de Sensoriamento Remoto (SR) - que consiste na ciência de obter informações sobre objetos ou área à distância, tipicamente por meio de aeronaves ou satélites [4] - para seu monitoramento.

O estudo e a compreensão do comportamento espectral destas folhas tem como escopo melhorar cada vez mais a produção de citros e entender como a radiação eletromagnética (REM) incidente interage com a sua estrutura celular. Considerando as atuais demandas do setor agrícola, o sensoriamento remoto consiste em uma importante ferramenta de monitoramento espacial e temporal de áreas de cultivo. Portanto, o presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento espectral de folhas de *Citrus aurantifolia* expostas à REM em diferentes estágios de desenvolvimento.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A coleta de dados foi realizada no Laboratório de Radiometria no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). As medições dos espectros de radiância foram realizados com o uso do espectroradiômetro FieldSpec 4.

Além disso, utilizou-se uma fonte de iluminação halógena de 250W, uma Placa Spectralon de referência de 100% e uma placa padrão de laboratório, assim como, folhas de *Citrus aurantifolia*, um medidor de ângulo e uma régua.

O primeiro passo realizado para o trabalho foi medir a angulação e distância da iluminação e do sensor para o alvo, que foram de 815 mm e 120 mm, respectivamente. Logo após, realizou-se três medições da placa lambertiana ideal e três da placa de referência, com a finalidade de calibrar a placa de referência por intermédio do cálculo do fator de calibração da placa. Destaca-se que as medições foram realizadas com 10 pulsos do espectro de radiância.

As medições do espectro de radiância das folhas de limão foram feitas à Nadir, para a região adaxial das folhas em seus diferentes estágios e com diferentes camadas de folhas (1 a 5).

Após a realização dos procedimentos de coleta dos dados. realizou-se o cálculo do fator de reflectância corrigido a partir da razão entre o valor medido da resposta espectral do

alvo (folha) e o valor medido da resposta espectral da placa lambertiana multiplicado pelo fator de correção.

Por fim, realizou-se a quantificação do índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) proposto por [5] no qual normalizaram a razão simples para o intervalo de -1 a +1.

No monitoramento da vegetação, o NDVI é utilizado para detectar atividades fenológicas, duração do período de crescimento, pico de verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de senescência. O NDVI é definido pela equação (1) a seguir, no qual "IVP" representa a banda do infravermelho próximo e "RED" a do vermelho.

$$NDVI = \frac{\rho IVP - \rho RED}{\rho IVP + \rho RED} \quad (1)$$

O cálculo do NDVI foi realizado a partir da média dos valores obtidos experimentalmente nas faixas do vermelho e do infravermelho próximo para os diferentes estágios e definidos por [6] nos intervalos de 600 a 720 nm e 720 a 1100 nm, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Folha Sadia

O comportamento espectral das folhas sadias com 1 a 5 camadas é apresentado na Figura 1 e a seguir são apresentadas discussões a cerca da mesma.

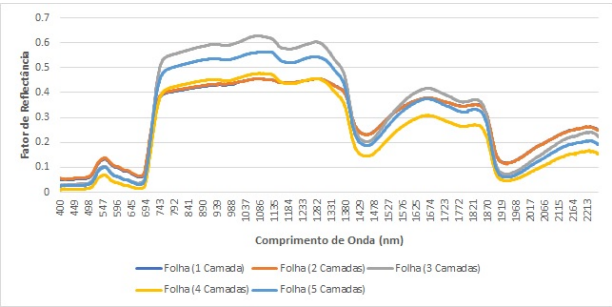

Figura 1: Comportamento Espectral - Folha Sadia
Fonte: Próprios Autores (2024)

Ao observarmos a Figura 1, pôde-se constatar que ocorre uma baixa reflectância na região espectral do azul, bem como na região do vermelho. Além disso, nota-se um incremento no verde. As regiões do azul e vermelho possuem baixa reflectância devido à ação de fortes absorções causadas pelos pigmentos encontrados nos cloroplastos, nos quais geralmente são a clorofila, xantofilas e carotenos. Os picos de absorção destes pigmentos são apresentados na literatura por [7] e estão destacados na Tabela 1 a seguir, comprovando a similaridade do comportamento espectral observado para a região do visível.

É possível notar que o fator de reflectância para a folha sadia apresenta seus maiores valores a partir do infravermelho próximo até o infravermelho médio (IVM) em aproximadamente, 700 a 1350 nm. Segundo [8] e [7], na região espectral do IVP (720 a 1100 nm), as plantas

Pigmento	Pico de Absorção [nm]
Clorofila a	420, 490, 660
Clorofila b	435, 643
β-Caroteno	425, 450, 480
α-Caroteno	420, 440, 470
Xantofila	425, 450, 475

Tabela 1: Pigmentos foliares e picos de absorção
Fonte: Adaptado de Kumar *et. al.* (2001)

costumam ter alta reflectância e transmitância devido ao fato das paredes celulares direcionarem uma alta porcentagem da REM para a superfície da folha. Nesse intervalo espectral, a reflectância se mantém em cerca de 40 a 60%. É um processo controlado pela estrutura interna e morfologia das folhas. Há também influência do conteúdo de água na folha, em torno de 970 e 1200 nm, com pequenas absorções na curva espectral. O intervalo espectral do IVP está diretamente relacionado com a estrutura celular da folha de estudo, e, portanto, podendo ocorrer múltiplas reflectâncias da REM pelas paredes celulares situadas nas porções internas da folha. Segundo [8], de maneira geral, quanto mais lacunosa a estrutura interna foliar, maior o espalhamento interno da radiação incidente e, consequentemente, maior reflectância.

Já na região do IVM, nota-se que nas faixas de 1350 a 1500 e 1850 a 1950 nm, há uma grande absorção da REM incidente devido à presença de água. Segundo [8] e [7], o IVM é a região onde o comportamento espectral é mais influenciado pela água líquida presente nas folhas. Nesse intervalo, há menor reflectância quando comparado ao IVP, bem como duas fortes bandas de absorção nos comprimentos de 1400 a 1450 nm e de 1.900 a 1.950 nm.

No quesito número de camadas de folhas, ao analisar o comportamento espectral obtido na Figura 1, pode-se afirmar que ao aumentar o número de camadas de 1 até a 3 ocorreu uma redução do fator de reflectância na região da luz visível (400 - 720 nm) e também na região do infravermelho médio (1100 - 3200 nm), por conta do aumento das concentrações dos pigmentos e do conteúdo hídrico para estas folhas quando comparadas com as demais, respectivamente. Porém, na região do infravermelho próximo (720 - 1100 nm) houve a elevação do fator de reflectância por conta do aumento do número de camadas e com isso de estruturas celulares que promovem a reflexão da radiação eletromagnética e consequentemente, o aumento do fator de reflectância.

Além disso, ficou evidente a saturação da radiação eletromagnética a partir da terceira camada o que gerou uma redução no fator de reflectância, ao qual pode ter sido ocasionada pelo aumento de radiação difusa, assim como, das próprias características intrínsecas da folha que está na camada superior.

3.2. Folha em Senescência

Ao observarmos a Figura 2, é possível identificar que o comportamento espectral nas regiões descritas para a folha sadia é muito similar. Porém, nota-se que há um incremento no fator de reflectância para praticamente todo o espectro estudado. Como exemplo deste incremento destaca-se a região do vermelho, na qual as folhas sadias apresentaram valores na casa de 0.05 a 0.1 de reflectância, enquanto que nas

folhas em senescência este valor aumentou para o intervalo de aproximadamente 0.09 a 0.18. Este resultado foi evidenciado por [9] em um estudo do desenvolvimento da copa da cana-de-açúcar ao estresse hídrico apresentando curvas de reflectância espectral para folhas verdes e senescentes.

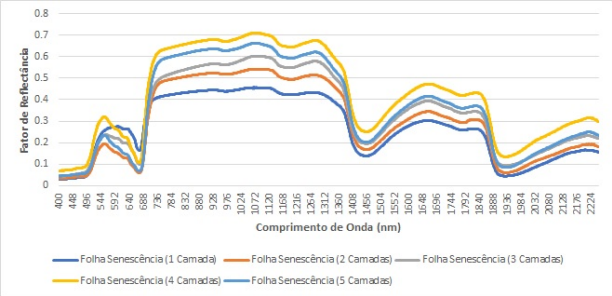

Figura 2: Comportamento Espectral - Folha em Senescência
Fonte: Próprios Autores (2024)

Quanto ao número de camadas de folhas, é possível afirmar que foi necessário uma camada a mais do que nas folhas sadias para ocorrer a saturação do fator de reflectância. Portanto, apenas na quinta camada de folhas ocorreu a redução dos valores de fator de reflectância na região do infravermelho próximo, o que pode estar relacionado com as características intrínsecas da própria folha, como por exemplo estar em um estágio mais avançado de senescência, promovendo a redução da reflectância na faixa do IVP devido a maior degradação da estrutura foliar, assim como o aumento na reflectância no IVM ocasionada pela redução da disponibilidade hídrica da folha.

3.3. Folha Seca

Ao observarmos a Figura 3, foi possível identificar que o espectro de reflectância nas regiões descritas para a folha seca é completamente diferente das anteriores, pois esta caracteriza-se pelo crescimento quase que constante do fator de reflectância nas faixas do visível e infravermelho próximo à medida que se tem o aumento do comprimento de onda. Nota-se também a influência do conteúdo hídrico neste tipo de folha, no qual segundo [10], a degradação de pigmentos fotossintetizantes, estruturas celulares e redução do conteúdo de água neste estágio faz com que feições de absorção associadas a presença de lignina e celulose sejam reveladas na folha seca. Assim, quanto menor o conteúdo de água, maior será o fator de reflectância, bem como demonstrado na Figura 3. Outro ponto a se destacar é que esta assinatura espectral obtida para a folha seca pode estar relacionada com a degradação de pigmentos fotossintetizantes devido à perda de água, fazendo com que as folhas tenham menores condições de absorver a radiação indicente na faixa do visível, apresentando baixa reflectância com relação as folhas sadias e em senescência.

Para as camadas de folhas, verifica-se que o resultado obtido demonstrou ser o mais próximo do esperado, que é o do fator de reflectância estar em ordem crescente conforme aumenta o número de camadas, havendo apenas uma pequena variação na faixa do visível (entre o verde e vermelho) com pico das folhas de 1 e 4 camadas. Para os valores mais altos observados no IVP, uma hipótese é ter sido ocasionado pela alteração na estrutura das células devido a saída de água, tornando-as mais prismáticas, e, consequentemente mais propensas a refletir a REM [11].

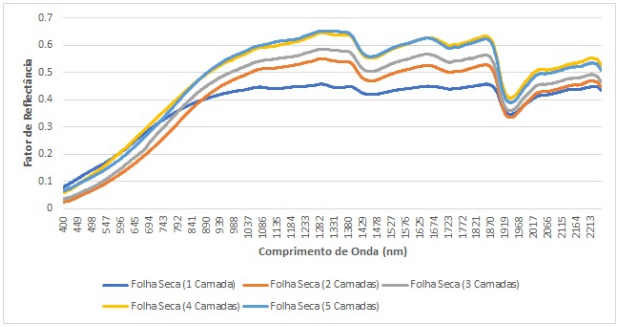

Figura 3: Comportamento Espectral - Folha Seca
Fonte: Próprios Autores (2024)

3.4. NDVI

Após observar o comportamento espectral dos diferentes estágios da folha estudada, utilizou-se o NDVI com o intuito de identificar a relação com o número de camadas. O resultado é disposto na Figura 4 a seguir.

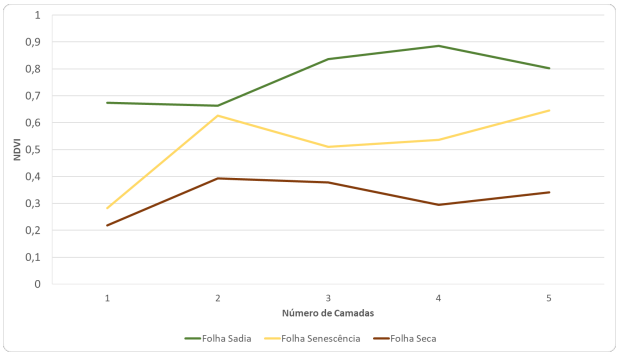

Figura 4: Índice NDVI para os diferentes estágios das Folhas
Fonte: Próprios Autores (2024)

Segundo [12], a vegetação saudável tende a refletir cerca de 50% da radiação incidente na região do infravermelho próximo e 8% no vermelho. Já a estressada, cerca de 40% no IVP e 30% no vermelho. Diante dessas características, é esperado que as folhas sadias possuam maior NDVI do que as folhas em senescência.

Assim, ao observar a Figura 4 é possível afirmar que os resultados esperados condizem com o obtido experimentalmente, pois a folha sadia apresenta os maiores valores de NDVI, variando de 0.65 a quase 0.9, ao qual apresentou resultados semelhantes com outros trabalhos para o gênero *Citrus* [13]. Já a folha em senescência apresentou valores logo abaixo, ao qual variou entre 0.4 e 0.65, aproximadamente. Por fim, observa-se que a folha seca apresentou os menores valores, na faixa de 0.2 a 0.4.

Para as camadas de folhas, o gráfico demonstrou comportamentos diferentes paras os três tipos estudados, sendo o mais constante o da folha sadia, no qual sofreu um incremento a partir da segunda até a quarta camada. A folha

em senescência sofreu um incremento de cerca de 0.3 no valor de NDVI da primeira para a segunda camada, decaindo na terceira e voltando a subir em direção da quarta e quinta camadas. Esta variação observada, assim como a redução do NDVI na folha sadia, pode estar associada as características intrínsecas da folha que está na camada superior, ou seja, de modo geral, consiste na alteração da concentração de clorofila, da estrutura foliar e do conteúdo hídrico desta folha. Outro fator a ser considerado é o possível incremento da radiação difusa, promovida com o aumento do número de camada de folhas.

Por fim, a folha seca apresentou os menores valores de NDVI, a qual as primeiras camadas tenderam para um comportamento assintótico, porém, ocorreu a redução dos valores de NDVI, pelo mesmo motivo observado nas oscilações das folhas em senescência e sadia (características da folha que está na parte superior e no aumento da radição difusa).

4. CONCLUSÕES

Como conclusão, destaca-se que o estudo do comportamento espectral dos alvos é fundamental quando se objetiva interpretar as imagens de SR usadas para as diferentes aplicações, pois ao estimar a quantidade de energia refletida pelas folhas se torna possível inferir sobre os diferentes estágios da vegetação.

Este estudo demonstra a importância para o monitoramento agrícola, uma vez que a assinatura espectral dos alvos em diferentes condições morfológicas - e.g. folhas sadias, em senescência e seca - requerem cuidados especiais e específicos. Portanto, em culturas de larga escala o sensoriamento remoto pode ser uma ferramenta importantíssima para a realização de um acompanhamento periódico, visto que cada cultura tem uma época indicada ou apropriada para ser plantada e colhida.

Além disso, caracterizou-se os intervalos mais provaveis de NDVI para cada estágio fenológico da folha de *Citrus aurantifolia*, podendo ser usado para medir a saúde e a densidade da vegetação, auxiliando no monitoramento das lavouras e nas tomadas de decisão relacionadas ao manejo da cultura.

Um fator a se considerar é a necessidade de aprofundamento nos estudos morfológicos e anatômicos dos diversos tipos de culturas para uma melhor compreensão da interação da radiação eletromagnética com a folha, bem como a realização de novos experimentos ao qual se utiliza a análise foliar para identificar se há uma relação entre a concentração de nutrientes com a profundidade das bandas de absorção.

Como sugestão para estudos futuros, ressalta-se que esta pesquisa utilizou-se da metodologia descrita na seção 2, porém, a literatura descreve outros tipos de trabalhos no qual as folhas usadas foram armazenadas por um determinado tempo antes das medições, com ou sem exposição à luz e umidade, podendo assim gerar resultados distintos. Assim, destaca-se que neste experimento as incertezas das medições ou replicabilidade podem estar associadas às características específicas das folhas, possíveis erros de paralaxe e/ou diferenças metodológicas.

5. REFERÊNCIAS

[1] Citros Conecta. Limão em foco. III(1):40, April 2023.

[2] Produção de limão no brasil, 2021.

[3] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Produção de limão no mundo.

[4] NOAA. What is remote sensing?, January 2023.

[5] J. W. Jr. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, and D. W. Deering. Monitoring vegetation systems in the great plains with erts. In *Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp.*, volume 1 of *A*. NASA, August 1973.

[6] Y. E. Shimabukuro, F. J. Ponzoni, and T. M. Kuplich. *Sensoriamento Remoto da Vegetação*, volume 11. Oficina de Textos, 2 edition, 2012.

[7] L. Kumar, K. S. Schmidt, S. Dury, and A. K. Skidmore. *Imaging spectrometry and vegetation science*, pages 111–155. Kluwer Academic, 2001.

[8] P. R. Meneses, T. Almeida, and G. M. M. Baptista. *Reflectância dos Materiais Terrestres - Análise e Interpetração*. 2019.

[9] G. Guyot. 2 - optical properties of vegetation canopies. In M.D. STEVEN and J.A. CLARK, editors, *Applications of Remote Sensing in Agriculture*, pages 19–43. Butterworth-Heinemann, 1990.

[10] R. Kokaly, R. Clark, and K Livo. Mapping the biology and mineralogy of yellowstone national park using imaging spectroscopy. 11 1998.

[11] Santo R. B., Rocha J. V., Holzhausen P. P. P., Figueiredo G. K. D. A., and Lamparelli R. A. C. Análise dos fatores de reflectância de folhas de cana-de-açúcar, gerados a partir de dadosde espectrorradiômetro. In *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, pages 3530–3537. Xviii edition, 2017.

[12] LAPIS. Descrição dos produtos de ndvi e precipitação, 2023.

[13] D. Vanella, S. Consoli, J. M. Ramírez-Cuesta, and M. Tessitori. Suitability of the modis-ndvi time-series for a posteriori evaluation of the citrus tristeza virus epidemic. *Remote Sensing*, 12(12):1965, 2020.