

Espectrorradiometria da folha de *Terminalia catappa* sp. em diferentes estádios de desenvolvimento

Isadora H. Ruiz¹, Philippe S. Simões¹, Gabriel M. da Silva¹, Andeise C. Dutra¹, Yosio E. Shimabukuro¹, Leila M. G. Fonseca¹, Lênio S. Galvão¹

¹ Divisão de Observação da Terra e Geoinformática – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Caixa Postal 12.227 – 010 – São José dos Campos, SP – Brasil

{isadora.ruiz, philipe.simoese, gabriel.maximo, andeise.dutra, yosio.shimabukuro, leila.fonseca, lenio.galvao}@inpe.br

Abstract. *This study describes the spectral behavior of isolated leaves of *T. catappa* sp. in different growth stages and observation angles. For this purpose, the Bidirectional Reflectance Factor was calculated for a photosynthetically active leaf, a senescent leaf and a non-photosynthetically active leaf using radiance measurements at 0° and 14°. The continuum removal technique was applied to analyze the absorption bands. Physiology, structure, and biochemical vegetation indexes were also calculated. Results showed that the Plant Senescence Reflectance Index (PSRI) was the most sensitive VI to biophysical changes in the studied leaves, showing also changes with viewing geometry.*

Resumo. *Este estudo descreve o comportamento espectral de folhas isoladas de *T. catappa* sp. em diferentes estádios de desenvolvimento e sob diferentes ângulos de observação. Obteve-se o Fator de Reflectância Bidirecional da folha fotossinteticamente ativa, senescente e não sinteticamente ativa, a partir de medições de radiância realizadas em laboratório, sob os ângulos de observação de 0° e 14°. Nos parâmetros das bandas de absorção, aplicou-se a técnica de remoção do contínuo e calculou-se índices de vegetação relacionados à fisiologia, estrutura e bioquímica da vegetação. Os resultados mostraram que o índice mais sensível às mudanças biofísicas das folhas estudadas foi o Plant Senescence Reflectance Index (PSRI).*

1. Introdução

A utilização do sensoriamento remoto no estudo da vegetação evoluiu com a chegada de diferentes tecnologias e metodologias de aquisição de dados. Com isso, a compreensão dos processos de interação da radiação eletromagnética (REM) com a vegetação tem permitido maior entendimento das respostas da vegetação a doenças, ciclos fenológicos e/ou distúrbios fisiológicos. Em geral, as características da resposta da interação da radiação eletromagnética com a vegetação são devidas aos pigmentos fotossintetizantes como as clorofilas, xantofilas e carotenos e pela água presente nos vegetais [Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich 2012].

Antes de mais nada, há a necessidade de entender as respostas obtidas no espectro eletromagnético de acordo com o alvo de estudo. Precisamente, folhas isoladas e dosséis de uma mesma espécie podem apresentar respostas diferentes quanto à absorção da radiação de acordo com as características bioquímicas e biofísicas de cada alvo [Asner 1998, Fourty et al. 1996]. Entre os fatores que influenciam na interação da REM com o vegetal, destacam-se

os morfológicos, como a organização espacial dos elementos envolvidos na captação da REM e os fatores fisiológicos relacionados ao estágio de vida e as condições do vegetal [Bernardes 1987].

Em plantas sadias, os sensores detectam a absorção da radiação em comprimentos de onda do azul e do vermelho na faixa espectral do visível que são utilizadas nos processos fotossintéticos [NASA 2010]. Também, há respostas importantes de absorção de energia no infravermelho próximo relacionadas à quantidade de água líquida presente nas folhas. Com isso, a absorvância e reflectância da REM em diferentes regiões do espectro eletromagnético podem variar na observação de um mesmo indivíduo quando o objeto de estudo é o dossel de uma árvore ou apenas uma folha isolada.

Neste contexto, destaca-se a importância da compreensão da interação da radiação eletromagnética com as folhas isoladas dos vegetais nos diversos estádios vegetativos em diferentes regiões do espectro eletromagnético. Portanto, esta pesquisa buscou analisar folhas isoladas de *T. catappa* sp., popularmente conhecida como Amendoeira da Praia, por meio de espectrorradiometria de laboratório. Os objetivos foram analisar a curva espectral da espécie, identificar as feições de absorção por meio da remoção do contínuo e aplicar diferentes índices de vegetação para os três estádios vegetativos. Ao final, buscou-se comparar a reflectância multiespectral simulada para o sensor MSI (*MultiSpectral Instrument*) a bordo da plataforma Sentinel-2A sob diferentes ângulos de observação.

2. Materiais e métodos

Neste estudo foram utilizadas medidas radiométricas da parte superior das folhas isoladas de *T. catappa* sp. em três estádios vegetativos: a) folha sadia (fotossinteticamente ativa), b) folha amarelada (fase de senescência) e c) folha seca (fotossinteticamente não ativa). O experimento foi realizado no Laboratório de Radiometria (LARAD) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos - SP, em março de 2017 [Dutra et al. 2019], com auxílio de um espectrorradiômetro *FieldSpec* modelo Standard-Res (ASD, Boulder, CO, USA) de amplitude espectral de 350 nm a 2.500 nm e resolução espectral de 3 nm para a faixa do visível e infravermelho próximo e 10 nm para a faixa do infravermelho de ondas curtas. Como fonte de radiação foi utilizado uma lâmpada halógena de 250W e para calibração do equipamento utilizou-se uma placa lambertiana ideal (Spectralon de ~100% de reflectância). Com IFOV (*Instantaneous Field of View*) de 25° do sensor sobre o alvo e fonte de iluminação com fluxo colimado, calculou-se o Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) (Equação 1)

$$FRB_{\lambda} = L_{\lambda,a} / L_{\lambda,p} \quad (1)$$

onde $L_{\lambda,a}$ refere-se a radiância espectral do alvo e $L_{\lambda,p}$ a radiância espectral da superfície lambertiana ideal, sob as mesmas condições de iluminação e observação [Jensen 2009, Novo 2010].

O primeiro experimento foi direcionado à análise do espectro de reflectância das folhas isoladas em estágios de vida distintos (Folha Sadia – FS; Folha Amarelada – FA; Folha Seca – FC). A técnica de remoção do contínuo foi aplicada para isolar e qualificar parâmetros de bandas de absorção específicas dos espectros de reflectância [Clark, Rough 1984], o que possibilitou a extração de parâmetros como profundidade, largura à meia altura e assimetria. Além disso, foram calculados os índices de vegetação relacionados com os parâmetros biofísicos baseados em diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, de acordo com a literatura (Tabela 1).

Tabela 1. Formulações dos Índices de Vegetação, onde ρ representa a reflectância da banda no comprimento de onda original das formulações.

Índice de Vegetação	Fórmula	Referência
PRI	$(\rho_{531}-\rho_{570}) / (\rho_{531}+\rho_{570})$	Gamon et al. (1997)
RENDVI	$(\rho_{752}-\rho_{701}) / (\rho_{752}+\rho_{701})$	Gitelson et al. (1996)
NDVI	$(\rho_{864}-\rho_{660}) / (\rho_{864}+\rho_{660})$	Rouse et al. (1974)
NDWI	$(\rho_{860}-\rho_{1.240}) / (\rho_{854}+\rho_{1.240})$	Gao (1996)
PSRI	$(\rho_{680}-\rho_{500}) / \rho_{750}$	Merzlyak et al. (1999)

Fonte: Adaptado de Galvão et al. (2009); Sano et al. (2019)

Em sequência, considerando um segundo experimento, foram extraídas as medidas de radiação para a placa de referência e folha sadia com a geometria de observação ao nadir (0°) e a 14°. Por fim, a partir de fatores de correção da resposta espectral de bandas espectrais fornecidos pela *European Space Agency*, foi realizada a simulação da reflectância multispectral esperada para uma imagem do sensor MSI a bordo da plataforma Sentinel-2A.

3. Resultados e discussão

A curva do fator de reflectância bidirecional (FRB) dos estádios vegetativos da folha revelaram comportamento típico das mudanças em pigmentação nos estádios, conforme resultados encontrados por Dutra et al. (2019). A folha sadia apresentou as feições de absorção relacionadas aos pigmentos fotossintetizantes nas bandas do azul e vermelho, com pico de reflectância no verde [Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich 2012, Sano et al. 2019]. As folhas em estádios sucessionais perderam substancialmente a absorção na região do visível pela perda de clorofila e foram caracterizadas pelo aumento da reflectância nesta região.

No infravermelho próximo, a reflectância manteve-se alta e constante, com presença de absorção nas fases sadia e amarelada em 980 nm e 1.200 nm, associada a presença de água foliar [Sano et al. 2019]. No infravermelho de ondas curtas, o FRB manteve-se igual para FS e FA, e diferente para FC, relacionada principalmente ao conteúdo de água líquida na folha [Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich 2012, Sano et al. 2019]. Em virtude da degradação de pigmentos fotossintetizantes, estruturas celulares e redução do conteúdo de água na folha seca, feições de absorção associadas a presença de lignina e celulose foram reveladas na folha seca [Kokaly et al. 1998].

De forma complementar, a análise sobre a remoção do contínuo para discriminação dos estádios vegetativos da folha de *T. catappa* sp. permitiu observar, na região entre 550 nm e 750 nm, mudança na profundidade da banda, associada ao conteúdo de pigmentos fotossintetizantes. O comprimento de onda de maior absorção foi de 673 nm para FS e 678 para FA, com parâmetros de profundidade e largura da banda distintos. Na faixa de 900 nm a 1.200 nm não foi observada banda de absorção de água foliar para a folha seca, enquanto para FS e FA demonstraram profundidade e meia altura similar e comprimento de onda de maior absorção centrado em 977 nm para ambos os estádios.

No infravermelho de ondas curtas, todos os estádios vegetativos apresentaram feição de absorção, principalmente bandas de absorção pela água líquida na folha. A fase seca apresentou a maior profundidade de banda nesta região, no comprimento de onda de 1.718 nm. Os demais experimentos caracterizaram profundidade menor, centradas em 1.776 nm (FA) e 1.780 nm (FS). Como apresentado na análise do espectro de reflectância, as bandas de absorção da celulose (2.050 nm - 2.220 nm) e lignina (2.240 nm - 2.372 nm) ocorrem em

FC, com profundidade e largura da banda maior para a celulose e comprimento de onda de maior absorção, sendo em 2.146 nm para a celulose e 2.303 nm para a lignina.

Adicionalmente, os Índices de Vegetação foram calculados para sintetizar parâmetros biofísicos das folhas. Com enfoque na fisiologia, o *Photochemical Reflectance Index* (PRI) demonstrou a eficiência da absorção da radiação eletromagnética [Gamon et al. 1997] nos diferentes estádios. Conforme expresso na Tabela 2, com o avanço dos estádios sucessionais da folha, houve redução do PRI, por assim indicar a reduzida capacidade da folha em captar REM e transformá-la em energia fotossintetizada. Esse processo foi corroborado pelas reduzidas feições de absorção, quanto profundidade e largura das bandas apresentadas pela folha seca.

Tabela 2. Índice de Vegetação nos respectivos estágios vegetativos

Índice de Vegetação	Folha Sadia	Folha Amarelada	Folha Seca
PRI	0,12	0,09	-0,23
RENDVI	0,59	0,04	0,11
NDVI	0,95	0,67	0,78
NDWI	0,04	0,04	-0,08
PSRI	0,003	0,45	0,54

Ainda sobre parâmetros fisiológicos da folha, o *Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* (RENDVI) apresentou maior valor para a folha sadia e o menor para folha amarelada, sinalizando a distância entre as bandas da região final do vermelho e começo do IV-próximo. Isso demonstra a caracterização da feição borda vermelha (*red edge*) nos espectros de vegetação [Gitelson et al. 1996]. Com respeito à estrutura da folha e pigmentação associada, o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) apresentou variações consistentes em sua resposta [Rouse et al. 1974]. Por sua vez, o *Normalized Difference Water Index* (NDWI) detectou as mudanças no conteúdo de água líquida em plantas [Gao 1996], conforme o padrão vegetativo encontrado na literatura. O comportamento crescente do *Plant Senescence Reflectance Index* (PSRI) [Merzlyak et al. 1999] caracterizou, de forma eficiente, os estádios vegetativos, sendo os valores mais altos relacionados a senescência da folha.

A simulação da reflectância multiespectral do sensor MSI a bordo da plataforma Sentinel-2A nos ângulos de observação de 0° e 14° produziu variações espectrais não associadas à resposta biofísica das plantas. Contudo, as características principais da curva foram preservadas. Feições de absorção não puderam ser detectadas. Entretanto, o comportamento das bandas espectrais simuladas mostrou a menor reflectância no visível (490 nm e 665 nm) e um pico discreto de reflectância em 560 nm. As bandas do infravermelho próximo apresentaram-se com alta reflectância nas bandas de 740 nm, 783 nm, 842 nm e 865 nm. Na faixa do infravermelho médio ocorreu a maior perda de informação sobre a reflectância simulada, pois apenas duas bandas compreendem essa faixa, em 1.610 nm e 2.190 nm.

A diferença no valor da reflectância foi na ordem de 4% nas bandas do visível, 6% e 7% no SWIR 1 e 2 (*Short Wave Infrared*), respectivamente, onde a maior diferença foi verificada nas bandas RE3, RE4 (*Red Edge*) e NIR (*Near Infrared*) com 8% (Figura 1). Essa diferença pode ser associada ao comportamento anisotrópico da vegetação, ou seja, a reflexão da REM ocorre de forma desigual em diferentes direções [Jensen 2009, Cardozo et al 2011, Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich 2012]. Com isso, a quantidade de REM retroespalhada para

o sensor diferiu em até 8,97% quando observada à 14°, em relação ao nadir. Esse aumento também pode estar associado a área de observação do sensor que passou de 0,00205 m² (0°) para 0,00211 m² (14°), possibilitando, assim, que a REM refletida por maior área da folha chegasse ao sensor.

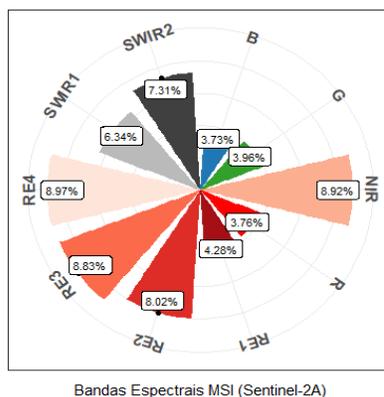


Figura 1 - Diferença da reflectância multiespectral simulada entre os ângulos de observação do sensor de 90° e 14° (R = Red; G = Green; B = Blue; NIR = Near Infrared; RE = Red Edge; SWIR = Short Wave Infrared)

4. Conclusão

O cálculo dos índices de vegetação se mostrou uma estratégia mais efetiva para diferenciar os estádios vegetativos das folhas de *T. catappa* sp, principalmente em termos de aspectos estruturais, fisiológicos e bioquímicos. O PSRI apresentou melhor resposta às mudanças biofísicas das folhas de *T. catappa* sp do que os demais índices de vegetação analisados. O experimento da reflectância multiespectral, com simulação das bandas do sensor MSI a bordo da plataforma Sentinel-2A, mostrou que as bandas espectrais do *Red Edge* (3 e 4) e NIR apresentam diferenças acima de 8% e as bandas espectrais do visível caracterizam as menores diferenças observadas.

Referências

- Asner, Gregory P. (1998) “Biophysical and Biochemical Sources of Variability in Canopy Reflectance.” *Remote Sensing of Environment*, v.64, n.3, p.234–253.
- Bernardes, M. S. (1987) Fotossíntese no dossel de plantas cultivadas. In: CASTRO, P.R. Ecologia da produção agrícola. Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 249 p.
- Cardozo, F. S., Oliveira, G., Ferreira, M. P., Moraes, E. C. (2011) “Função de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB) de uma superfície vegetada sob diferentes geometrias de visada e condições de alagamento”. Anais do XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, PR, Brasil, INPE, p.8516-8523.
- Clark, R. N. e Roush, T. L. (1984) “Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications”, In *Journal of Geophysical Research*, v.89, n.B7, p.6329-6340.
- Dutra, A. C., Prudente, V. H. R., Vieira, C. D., França e Silva, N. R., Junior, C. H. L. S., Moraes, E. C., Shimabukuro, Y. E. e Sanches, I. D. (2019) “Fator de reflectância de

- diferentes folhas de vegetação de Amendoeira da praia (*T. catappa* sp.)”, Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Santos, SP, Brasil, INPE, p.3084-3087.
- Fourty, Th., Baret, F., Jacquemoud, S., Schmuck, G., and Verdebout, J. (1996), Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: direct and inverse problems. *Remote Sens. Environ.* 56:104–117.
- Galvão, L. S., Formaggio, A. R. and Breunig, F. M. (2009) “Relações entre índices de vegetação e produtividade de soja com dados de visada fora do nadir do sensor Hyperion/EO-1”, Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, RN, Brasil, INPE, p.1095-1102.
- Gamon, J. A., Serrano, L. and Surfus, J. S. (1997) “The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels”, *Ecologia*, v. 112, n, 4, p.492-501.
- Gao, B. C. (1996) “NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space”, *Remote Sensing of Environment*, v. 58, p.257-266.
- Gitelson, J. A., Merzlyak, M. N. e Lichtenthaler, H. K. (1996) “Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm”, *Journal of Plant Physiology*, v. 148, n. 3-4, p.501-508.
- Jensen, J. R. (2009) “Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em Recursos Terrestres”, Tradução de J. C. N. Epiphânio. São José dos Campos, SP: Parênteses, pp.598. Tradução de: *Remote Sensing of the Environment: an Earth Resource Perspective* (Prentice Hall Series in Geographic Information Science).
- Kokaly, R., Clark, R.N., Livo, K.E. (1998) “Mapping the biology and mineralogy of Yellowstone National Park using imaging spectroscopy”. Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication 97-21, v.1, p.235-244.
- Merzlyak, M. N., Gitelson, A. A., Chickunova, O. B. e Rakitin, V. Y. (1999) “Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening”, *Physiologia Plantarum*, v. 106, n. 1, p.135-141.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration, Science Mission Directorate. (2010). Reflected Near-Infrared Waves. Disponível em: <http://science.nasa.gov/ems/08_nearinfraredwaves> Acesso em: 01 de abril de 2020.
- Novo, E. M. L. de M. (2010) “Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações”, 4 ed. Blucher: São Paulo, pp. 387.
- Ponzoni, F. J., Shimabukuro, Y. E., Kuplich T.M. (2012). “Sensoriamento Remoto da vegetação”. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A. e Deering, D. W. (1974) “Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTC” In: ERTS-1 Symposium, 3. Proceeding ... ASA Goddard, NASA SP-351, p.309-317.
- Sano, E. E., Ponzoni, F. J., Meneses, P. R., Baptista, G. M. M., Toniol, A. C.; Galvão, L. S., Rocha, W. J. S. F. (2019) “Reflectância da vegetação”. In: Meneses, P. R., Almeida, R., Baptista, G. M. M. Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação. São Paulo: Oficina de Textos, p.189-219.