

RELAÇÃO ENTRE ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR E ÍNDICES DE VEGETAÇÃO EM *LACTUCA SATIVA* L

Marceli Terra de Oliveira¹, Hugo Tameirão Seixas¹, Izak Francisco Justi¹, Lucas Volochen Oldoni¹, Natalia Cristina Wiederkehr¹, Elisabete Caria Moraes¹, Yosio Edemir Shimabukuro¹, Lênio Soares Galvão¹, Ieda Del'Arco Sanches¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Caixa Postal 515-12227-01 – São José dos Campos/SP – Brasil {marceli.terra, hugo.seixas, izak.justi, lucas.oldoni, natalia.wiederkehr, elisabete.moraes, yosio.shimabukuro, lenio.galvao, ieda.sanches}@inpe.br

RESUMO

A alface é uma das culturas hortícolas mais expressivas no Brasil, porém, são escassos os estudos sobre técnicas de sensoriamento remoto (SR) aplicado ao estudo dessa cultura. O SR pode ser utilizado para mapear e estimar parâmetros biofísicos da vegetação, apresentando potencial para auxiliar no monitoramento e manejo agrícola. O Índice de Área Foliar (IAF) é uma importante variável biofísica relacionada à evapotranspiração, produtividade da vegetação e interceptação de chuva pelo dossel. Este trabalho visa avaliar o desempenho de Índices de Vegetação (IV's) na estimativa do IAF da alface lisa. Os IV's foram obtidos a partir de medidas de reflectância espectral em três fases de desenvolvimento da cultura. Utilizaram-se métodos de regressão para modelar a relação entre o IAF com IVs, a reflectância no infravermelho próximo e a profundidade das bandas de absorção da água. Os melhores IV's para estimar o IAF foram: EVI (R^2 0,957) e SAVI (R^2 0,959).

Palavras-chave — Índice de Área Foliar, Índice de Vegetação, EVI, SAVI.

ABSTRACT

The lettuce is one of the most important horticultural crops in Brazil. However, there are few studies on remote sensing application to this crop. Remote sensing can be used to estimate biophysical parameters of vegetation, presenting potential for agricultural monitoring and management. The Leaf Area Index (LAI) is an important biophysical variable and it is related to evapotranspiration, vegetation productivity and rainfall interception by the canopy. The objective of this experiment is to evaluate the performance of Vegetation Indices (VI's) in the estimation of the LAI of lettuce. The VI's were obtained from measurements of spectral reflectance in three phases of plant development. Regressions methods were carried out to model the relationship between LAI with VI's, near infrared reflectance and water absorption features. The best VI's to estimate the LAI were: EVI (R^2 0.957) and SAVI (R^2 0.959).

Key words — Leaf Area Index, Vegetation Index, EVI, SAVI.

1. INTRODUÇÃO

A alface é considerada a folhosa mais importante no Brasil, com uma grande variedade de cultivares, seu cultivo se dá em climas amenos, áreas com luz solar direta e solo com pH neutro, bem drenado e rico em matéria orgânica e nitrogênio. A produção brasileira de alface entre 2012 e 2013 foi de 1,27 milhão de t/ano [1] e segundo dados da Associação Brasileira do Comércio de Sementes e Mudas, foi a terceira hortaliça com o maior volume de produção em 2015. Entretanto, ainda existem poucos estudos que abordam o uso de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas a essa cultura.

O IAF é uma importante propriedade estrutural do dossel das culturas, representando a razão entre a área foliar do dossel e a unidade de superfície projetada no solo (m^2/m^2) [2]. Pelo fato do IAF quantificar diretamente a estrutura do dossel das plantas, ele está altamente relacionado a uma variedade de processos do dossel, como evapotranspiração, interceptação de luz, fotossíntese e respiração [3]. Diversos trabalhos mostram a relação entre a reflectância do dossel e o IAF [4, 5]. Assim, é possível utilizar as características espectrais dos dosséis da vegetação para a estimativa desse parâmetro. Com o intuito de explorar as características e propriedades espectrais dos dosséis da vegetação, diversos Índices de Vegetação (IV's) foram propostos na literatura [2].

O *Simple Ratio* (SR) é um dos índices mais simplificados. Porém, para áreas densamente vegetadas, a quantidade de radiação eletromagnética refletida na região do vermelho é muito pequena. Consequentemente, o SR é alto, sendo inviável sua obtenção através de imagens de satélite [2]. O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) [6] é um dos índices mais utilizados. Diversos estudos realizados comprovaram a forte relação do NDVI com a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) [7] e IAF [8]. Porém, em condições em que há maior cobertura do solo com plantas, o NDVI pode saturar tornando-se insensível às alterações de IAF e biomassa [9]. Para reduzir o efeito das variações de brilho do solo, [10] foi desenvolvido o *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), no qual, foi acrescentado ao modelo do NDVI, uma constante "L". De modo geral, utilizando o Fator L = 0,5 oferece um índice espectral superior ao NDVI para muitas condições de

vegetação, mas é necessário analisar sua limitação para diferentes situações agrícolas [2]. Já o *Enhanced Vegetation Index* (EVI) [11] foi desenvolvido com o objetivo de otimizar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade da sua detecção em regiões de alta biomassa e o monitoramento da vegetação por meio de uma decomposição entre o sinal de fundo do dossel e uma redução nas influências da atmosfera [12]. Assim, diferentes IV's podem apresentar diferentes resultados para estimativa de IAF.

O objetivo deste experimento é avaliar quatro diferentes índices de vegetação na estimativa do IAF da alface do tipo lisa (*Lactuca sativa L.*). Para tal, será avaliado o efeito dos estádios de desenvolvimento sobre a reflectância espectral do dossel da alface lisa e a sensibilidade dos índices de vegetação (SR, NDVI, SAVI e EVI), da reflectância das bandas do infravermelho próximo (IVP) e de feições de absorção de água foliar, em 976 nm e em 1157 nm, para a estimativa do IAF.

2. MATERIAIS E MÉTODO

O experimento foi realizado em uma pequena área da localidade do Banhado, situado no município de São José dos Campos – SP, entre a latitude 23°10'41,16"S e longitude 45°53'34,76"O (Figura 1). De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é tipo Cwa, caracterizado por invernos secos e chuvas nos verões.

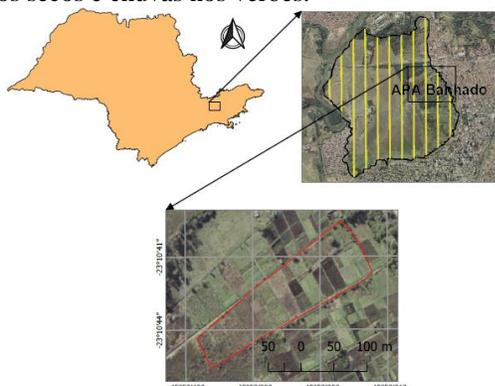


Figura 1. Localização da área de estudo.

A Área de Proteção Ambiental (APA) do Banhado é composta basicamente por áreas de pastagem, culturas temporárias e reflorestamento [13]. Os solos da várzea do rio Paraíba, no trecho que compreende a porção do Banhado, são caracterizados pela presença de oxigênio e de acúmulo de matéria orgânica, o que resulta em uma alta fertilidade natural, possibilitando o cultivo de hortaliças e culturas anuais [14].

A coleta dos dados de radiança foi realizada com o espectrorradiômetro FieldSpec 3 da ASD® às 10h, 12h e 14h, do dia 27/07/2018 e em três diferentes fases fenológicas, aos 15 (inicial), 30 (intermediário) e 45 (final) dias após o plantio, sendo que nesta última fase as plantas já estavam prontas para colheita. Assim, foram medidas 15

amostras, sendo 5 de cada estágio de desenvolvimento. Com o intuito de calcular o IAF por meio do método destrutivo, foram coletadas um total de 45 plantas de alfaces (3 plantas por ponto, num total de 15 pontos de coleta). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, enumeradas e rapidamente transportadas para minimizar os efeitos de respiração e transpiração das plantas. Todas as folhas verdes de cada planta de alface foram contidas no interior de um quadrado com área de 1 m², possibilitando calcular a área foliar de cada planta de alface. Este método foi utilizado de maneira individualizada para todas as 45 plantas.

A partir dos fatores de reflectância das amostras para cada horário foram calculados o SR, NDVI, SAVI e o EVI, no qual, posteriormente foram utilizados na análise de regressão para estimativa do IAF. Para avaliar a relação entre o IAF e os índices de vegetação e a reflectância da banda do infravermelho próximo, este trabalho baseou-se nos procedimentos metodológicos adotados por [4] que avaliou os índices de vegetação e bandas do vermelho e do infravermelho próximo simulados a partir de diferentes sensores orbitais para estimar o IAF e a produtividade da cultura do feijoeiro. No presente trabalho, a relação entre IAF e os índices de vegetação, a reflectância das bandas do infravermelho próximo e as feições de absorção foi obtida a partir da aplicação dos dados nos modelos de regressão não linear do tipo polinomial com um ajuste de ordem de segundo grau e geométrico. Para as análises dos modelos foram considerados o coeficiente de determinação (R²) e o nível de significância observado (valor-p).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os espectros de reflectância apresentaram comportamento característico de vegetação. No estágio inicial existe uma maior influência do solo, que decresce nos estádios mais desenvolvidos da cultura. Foi escolhida apenas a coleta realizada às 10h (Figura 1) para prosseguir com as análises estatísticas dos resultados justificando-se por ser o horário mais próximo à passagem dos sensores orbitais.

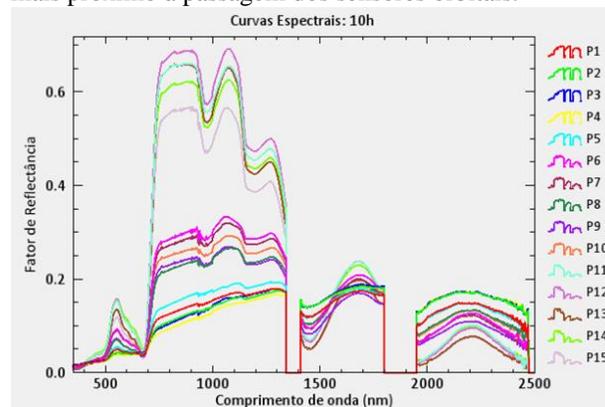


Figura 2. Curvas de reflectância das amostras de dossel coletadas no estágio inicial (P1 a P5), intermediário (P6 a P10) e final (P11 a P15) das 10h.

O IAF teve variação de 0,16 a 8,63 m² (Figura 3). Para todas as medidas, a reflectância no vermelho foi no máximo 6%. Este valor de reflectância é resultante da absorção da radiação no comprimento de onda do vermelho pelos pigmentos fotossintetizantes presentes nas folhas. A reflectância no vermelho teve um leve incremento com o aumento do IAF. Este comportamento é incomum, pois com o aumento de camadas de folha, têm-se mais pigmentos fotossintetizantes, sendo comum a redução da reflectância no vermelho [2]. Porém, o aumento da reflectância é de apenas 3%, para uma variação de IAF de 8,5 m². [4] analisaram a relação do IVP e o vermelho com o IAF na cultura do feijão e obtiveram um decréscimo de 13% na reflectância no vermelho para uma variação de 9,0 m² no IAF. Este comportamento pode estar associado à influência do solo ou mesmo a incertezas relacionadas ao processo de coleta de dados.

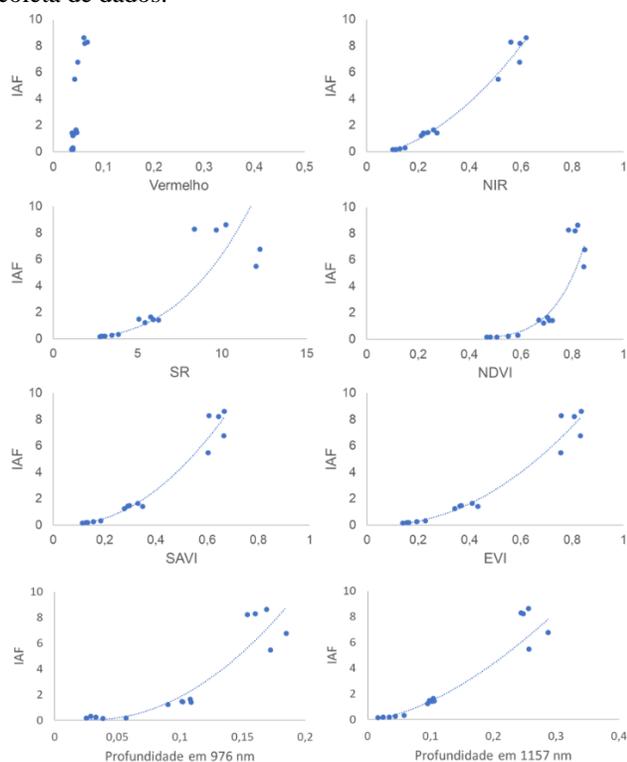


Figura 3. Diagramas de dispersão entre o índice de área foliar (IAF) e as reflectâncias das bandas do vermelho (a) e IVP (b), SR (c), NDVI (d), SAVI (e) EVI (f) e as bandas de absorção em 976 nm (g) e 1157 nm (h) para os dados coletados às 10 horas.

Para a região do IVP houve uma relação positiva entre o IAF e a reflectância. Nesta faixa, com o aumento do IAF, ocorre um grande aumento na reflectância, caracterizada pelo espalhamento múltiplo entre camadas de folhas [2]. O modelo que melhor se ajustou para o IVP foi o polinomial, sendo o R² de 0,98 (Tabela 1).

No início do desenvolvimento, quando a alface tem poucas folhas, ou seja, baixo IAF, as folhas são predominantemente planófilas, e qualquer variação do IAF

causa grande variação na reflectância no IVP. Nas plantas mais desenvolvidas, a reflectância satura e se torna menos influenciada pelo IAF. Quando a alface está próxima à colheita, com alto IAF e com muitas camadas de folhas, a reflectância é menos influenciada pelo IAF no IVP.

O SR e o NDVI produziram melhores ajustes com o modelo geométrico, com R² de 0,939 e 0,9363, respectivamente (Tabela 1). O SAVI, considerando L = 1 e o EVI obtiveram melhores ajustes com o modelo polinomial apresentando, respectivamente, R² de 0,9585 e 0,9574.

Tabela 1. Coeficiente de Determinação (R²) e valor-p dos modelos de regressão entre os índices de vegetação, reflectância da banda do infravermelho próximo (IVP), bandas de absorção em 976 nm e 1157 nm e o IAF para os dados coletados às 10 horas.

IV/ Banda	Modelo de Regressão	R ²	Valor-p
IVP	Polinomial	0,9792	0,015
EVI	Polinomial	0,9574	0,011
SAVI	Polinomial	0,9585	0,009
SR	Geométrico	0,939	-
NDVI	Geométrico	0,9363	-
976 nm	Polinomial	0,8555	0,032
1157 nm	Geométrico	0,9498	-

De acordo com [15], as melhores regressões foram não lineares entre IAF e 12 índices de vegetação para as culturas da soja e milho. [4] obteve maior R² com o EVI e o SAVI em comparação com o IVP nos modelos de regressão com o IAF. [16] também obtiveram resultados superiores na estimativa do IAF da cultura do arroz utilizando o SAVI e NDVI em comparação ao NDVI e SR. [17] obtiveram R² de 0,94 para regressão geométrica entre IAF e NDVI para a cultura do feijão.

O NDVI atingiu máximo valor de 0,85, mostrando-se insensível ao IAF acima de 6,0 m², indicando a saturação. Mesmo obtendo um alto R², a inclinação da curva ajustada pode indicar decréscimo da sensibilidade do índice de vegetação ao IAF [15]. Assim, a inclinação da curva ajustada pode ser um indicador da sensibilidade de diferentes índices de vegetação ao IAF, mesmo quando os valores de R² são semelhantes. O SAVI e o EVI mostraram crescimento menor da curva ajustada pelo modelo de regressão, em comparação ao NDVI, para altos valores de IAF, portanto, mostraram-se mais sensíveis ao IAF, e menos susceptíveis a saturação. A utilização do parâmetro L = 1 para o SAVI reduziu o efeito do solo e produziu valores de dispersão dos dados com padrão semelhante ao EVI. Quando considerado menores valores para o parâmetro L, a dispersão se assemelhava mais ao NDVI e também mostrava mais sinais de saturação.

As relações entre o IAF e as feições de absorção de água foliar em 976 nm e 1157 nm foram descritas pelo modelo polinomial e geométrico, respectivamente. Ao

utilizar a profundidade da banda de absorção em 1157 nm, o valor de R^2 foi 0,9498, valor próximo ao obtido pelos modelos gerados para o EVI e SAVI. Ao aumentar o IAF, as feições de absorção se tornam mais profundas, ou seja, maior conteúdo de umidade, visto que as amostras com maior IAF refletem um dossel mais representativo da vegetação e, conseqüentemente, com menor efeito de fundo do solo. Normalmente, na literatura se usa a feição de 970 nm para avaliar a variação de conteúdo de água do dossel [18]. Esta é uma feição amplamente abordada podendo ser utilizada para criação de índices espectrais, assim como a feição em 1200 nm [19], a qual se apresentou como uma banda mais larga.

5. CONCLUSÕES

A variação do IAF para a cultura da alface mostrou grande influência sobre a reflectância do infravermelho próximo, e pouca influência sobre a região do vermelho. A relação entre a reflectância do IVP e os índices de vegetação analisados mostrou associação positiva com o IAF.

Os diferentes índices de vegetação apresentam diferentes sensibilidades ao IAF. Os melhores desempenhos foram obtidos com os modelos EVI, SAVI e o IVP. O NDVI mostrou sinais de saturação para IAF acima de 6 m^2 . A profundidade da banda de absorção em 1157 nm apresentou bons resultados, tendo desempenho equivalente ao SAVI e EVI. Para o SAVI, alterações do coeficiente L podem ocasionar diferentes sensibilidades ao IAF.

AGRADECIMENTOS

A Dr. Evlyn Novo pelas contribuições. Ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, pela concessão de bolsas.

6. REFERÊNCIAS

[1] Instituto de Economia Agrícola. *A produção da Agropecuária Paulista: considerações frente à anomalia climática*. 2015.

[2] Ponzoni, F.J., Shimabukuro, Y.E., Kuplich, T.M. *Sensoriamento remoto da vegetação*. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

[3] Aboelghar, M., Arafat, S., Saleh, A., et al. Retrieving leaf area index from SPOT4 satellite data. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, v. 13, n. 2, p. 121–127, 2010.

[4] Monteiro, P.F.C., Angulo Filho, R., Xavier, A.C., Monteiro, R.O.C. Índices de vegetação simulados de diferentes sensores na estimativa das variáveis biofísicas do feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 48, n. 4, p. 433–441, abr. 2013.

[5] Tillack, A., Clasen, A., Kleinschmit, B., Förster, M. Estimation of the seasonal leaf area index in an alluvial forest using high-

resolution satellite-based vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 141, p. 52–63, fev. 2014.

[6] Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., et al. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. *NASA/GSFC, Final Report*, Greenbelt, MD, USA, n. September 1972, p. 1–137, 1974.

[7] Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., et al. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*, v.5, p.28–41, 1995.

[8] Fassnacht, K.S., Gower, S.T., Mackenzie, M.D., et al. Estimating the leaf area index of North Central Wisconsin forests using the landsat thematic mapper. *Remote Sensing of Environment*, v. 61, n. 2, p. 229–245, ago. 1997.

[9] Povh, F.P., Molin, J.P., Gimenez, L.M., et al. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 43, n. 8, p. 1075–1083, ago. 2008.

[10] Huete, A. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, v. 25, n. 3, p. 295–309, ago. 1988.

[11] Justice, C.O., Vermote, E., Townshend, J.R.G., et al. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.36, n.4, p.1228–1249, 1998.

[12] Huete, A., Didan, K., Miura, T., et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, n. 1–2, p. 195–213, nov. 2002.

[13] Fundação Florestal. *APA Banhado*. 2017.

[14] Floriano, S.P. Uso e ocupação do solo na Área de Proteção Ambiental do Banhado em São José dos Campos – SP. *Revista Paisagens*, n. 8, p. 56-68, 2009.

[15] Nguy-Robertson, A., Gitelson, A., Peng, et al. Green leaf area index estimation in maize and soybean: combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy journal*, v.104, p.1336–1347, 2012.

[16] He, J., Qin, Y., Guo, C., et al. Monitoring leaf area index after heading stage using hyperspectral remote sensing data in rice. In: 2016 IEEE *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1, Anais, jul. 2016.

[17] Papadavid, G., Fasoula, D., Hadjimitsis, M., et al. Image based remote sensing method for modeling black-eyed beans (*vigna unguiculata*) leaf area index and crop height over cyprus. *Central European Journal of Geosciences*, v.5, n.1, p.1–11, 2013.

[18] Claudio, H., Cheng, Y., Fuentes, D., et al. Monitoring drought effects on vegetation water content and fluxes in chaparral with the 970 nm water band index. *Remote Sensing of Environment*, v. 103, n. 3, p. 304–311, 2006.

[19] Pasqualotto, N., Delegido, J., Van Wittenberghe, et al. Retrieval of canopy water content of different crop types with two new hyperspectral indices: Water Absorption Area Index and Depth Water Index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.67, p.69–78, 2018.