

Avaliação do potencial de índices de vegetação para detecção de doença na cana-de-açúcar em imagens hiperespectrais adquiridas por VANT

Érika Akemi Saito Moriya
Nilton Nobuhiro Imai
Antonio Maria Garcia Tommaselli

Universidade Estadual Paulista - Unesp
Departamento de Cartografia- 19060-900 - Presidente Prudente - SP, Brasil
erikaasaito@gmail.com; {nimai, tomaseli}@fct.unesp.br

Abstract.

Technological innovations from Precision Agriculture have contributed the agronomic development optimizing and automating their activities bringing benefits in agricultural production and the environment. The purpose of this study was to evaluate the potential of vegetation indices in hyperspectral images taken by unmanned aerial vehicle (UAV) for detection sugarcane mosaic. Indexes that brought a major contribution to the detection of regions infected with sugarcane mosaic were Normalized difference Vegetation Index (NDVI), Normalized difference Vegetation Index Red Edge (NDVI705), New Vegetation Index (NVI), and Anthocyanin Index Reflectance 2 (ARI2). All indices analyzed in this case study, except the Photochemical Reflectance Index (PRI), Carotenoid reflectance Index 2 (CRI2), and REP were not efficient to show bare soil areas. The PRI, Carotenoid reflectance Index 1 (CRI1) and CRI2 and especially Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index (MCARI) showed the noises of hyperspectral imaging, Transformed chlorophyll absorption reflectance index (TCARI) and Red Edge Position Determination (REP) did not present information related to the presence of mosaic in sugarcane. However, among the indexes, analyzed ARI2 was able to highlight areas infected with mosaic; this index is associated with the concentration of anthocyanin in vegetation, the anthocyanin may be indicative of senescence and stress in some species of plants. The importance of such research is justified by its contribution to agriculture with the generation of a methodology that enable the use of sensors designed to take images in appropriate spectral bands to monitoring crops, and assist in agricultural management practices using a approach that cause less environmental impact.

Palavras-chave: sugarcane disease, hyperspectral images, uav, vegetation index, precision agriculture, doença da cana-de-açúcar, imagens hiperespectrais, vant, índice de vegetação, agricultura de precisão.

1. Introdução

A redução do impacto ambiental e financeiro das atuais práticas de manejo da produção agrícola é possível com o redirecionamento da tecnologia agrícola de modo que crie estratégias de gestão mais sustentáveis, e que preservem a longo prazo a produtividade agrícola (BASSOI et al., 2014). As inovações tecnológicas provenientes da Agricultura de Precisão têm contribuído com o desenvolvimento agrônomo otimizando e automatizando seus processos conduzindo a benefícios na gestão da produção agrícola e no meio ambiente (ZHANG et al., 2002). A agricultura é uma atividade muito dinâmica necessitando um frequente monitoramento, os produtos derivados do Sensoriamento Remoto e Fotogrametria tem sido muito utilizada na Agricultura de Precisão, pois são capazes de oferecer informação rápida e precisa para o produtor agrícola (SEELAN, 2003).

O Brasil é um dos líderes mundiais na produção e exportação de vários produtos agropecuários, sendo o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo (UNICA, 2008). O controle fitossanitário da cultura agrícola é um aspecto fundamental para a manutenção da qualidade na produção agrícola. Embora na produção de cana-de-açúcar o uso de variedade resistente seja a forma mais utilizada para controle das doenças, Sanguino (2012) reconhece ser ainda impossível para o atual estágio da ciência obter um híbrido que seja resistente a todas as doenças da cana-de-açúcar e que ao mesmo tempo possua as características que atendam as expectativas da agroindústria.

Assim, é necessário o desenvolvimento de novas metodologias que auxiliem no monitoramento e combate às pragas e doenças em culturas agrícolas. Uma alternativa é a

utilização de imagens tomadas de plataformas aéreas como os veículos aéreos não tripulados (VANT (s)) que seja baseada na integração de diferentes sensores. Os VANTs permitem maior flexibilidade na realização das tomadas de imagens principalmente no caso do monitoramento de culturas agrícolas, sendo uma ferramenta com alto potencial de aplicação na Agricultura de Precisão.

Imagens tomadas por sensores hiperespectrais podem contribuir para o monitoramento de doenças em culturas agrícolas, pois esses sensores oferecem dados com detalhamento espectral em um range espectral largo, bandas espectrais estreitas e contínuas e resolução espacial mais refinada que podem ser alcançados quando acoplados em VANT. Dessa forma, as imagens hiperespectrais têm revolucionado a habilidade de distinguir múltiplas características de plantações agrícolas, incluindo deficiência de nutrientes, deficiência de água, pragas, doenças, ervas daninhas, biomassa e estrutura do dossel (MULLA, 2013).

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais que auxiliam na extração e modelagem de parâmetros biofísicos da vegetação a partir de dados de Sensoriamento Remoto multiespectral ou hiperespectral, são basicamente transformações matemáticas capazes de indicar determinadas características da vegetação fotossinteticamente ativa (ELVIDGE e CHEN, 1995; PONZONI e SHIMABUKURO, 2007; JENSEN, 2009).

Índices de vegetação são utilizados para detecção da fitossanidade de culturas agrícolas (NAIDU et al., 2009; HILLNHÜTTER et al., 2011; ASHOURLOO et al., 2014) nesse sentido, a proposta deste estudo foi avaliar o potencial de índices de vegetação em imagens hiperespectrais tomadas por VANT para detecção de mosaico, doença da cana-de-açúcar. A identificação de índices capazes de detectar as plantas doentes em culturas agrícolas facilita o processamento de dados permitindo a determinação do foco do problema fitossanitário. Além disso, viabiliza a utilização de sensores projetados para tomada de imagens em bandas espectrais apropriadas para o monitoramento dessa cultura agrícola. A contribuição desse trabalho para a agricultura está na especificação de índices apropriados para monitoramento de uma doença na cultura de cana-de-açúcar e produção de mapas destinados ao manejo localizado da cultura.

2. Metodologia

Campanha de campo

A área de estudo localiza-se no município de Euclides da Cunha Paulista no interior do Estado de São Paulo. A área plantada de cana-de-açúcar no município corresponde a 4.045 hectares (40,45 km²) (IBGE, 2015). Possui coordenadas no sistema WGS84 22°23'51,21"S, 52°31'3,90"O, o talhão de cana-de-açúcar faz margem a região de remanescente florestal da Fazenda Ponte Branca pertencente Fundação Ênio Pipino que faz parte da Estação ecológica Mico Leão Preto (SIGRH, 2014).

A aquisição de imagens hiperespectrais foi realizada com a câmara hiperespectral Rikola com Interferômetro Fabry-Perot (FPI) (Figura 1.a) utilizando uma plataforma VANT modelo SX8 multirotor (Figura 1.b) composto por oito hélices sobrevoando áreas de cana-de-açúcar contaminadas com mosaico. Observe na Figura 1.c em destaque uma folha de cana-de-açúcar infectada com mosaico e a situação do canavial infectado com o vírus (Figura 1.d).

O mosaico foi a principal doença de origem viral da cultura canavieira identificada no Brasil (GONÇALVES, 2010). A transmissão do vírus ocorre pelo uso de mudas de cana-de-açúcar contaminadas e de insetos vetores, os afídeos (pulgões) que picam a planta transmitindo o vírus (SANGUINO, 2012). Os sintomas do mosaico são pontos cloróticos com disposição linear, no meio, ou na base das folhas, que evoluem para áreas alongadas, aumentando conforme a idade da folha (GONÇALVES, 2010).

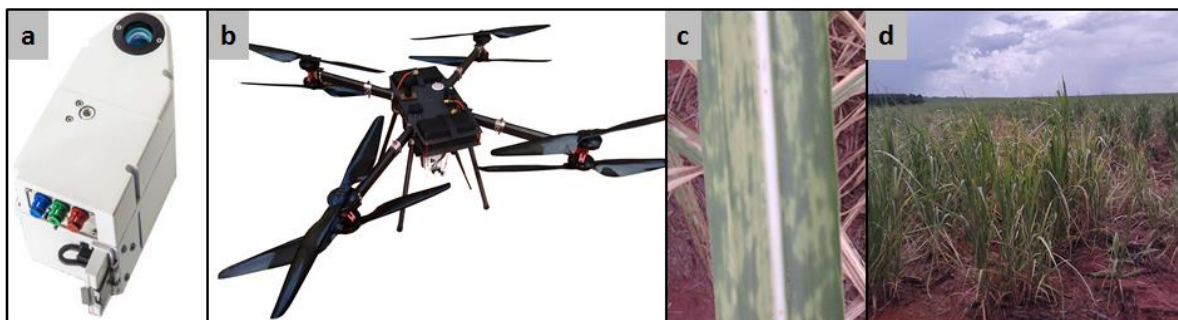


Figura 1. (a) Câmera hiperespectral Rikola, (b) VANT modelo SX8 multirotor, (c) Folha de cana-de-açúcar infectada com mosaico, (d) Situação do canavial infectado com mosaico.

A câmara hiperespectral Rikola modelo DT-0014 com interferômetro Fabry-Pérot (FPI) (Figura 1.a) tem capacidade de adquirir imagens no intervalo espectral de 500 a 900 nm e possibilidade de obter até 25 bandas espectrais. As bandas da câmara podem ser configuradas no modo automático ou manualmente (RIKOLA LTDA, 2014). Neste caso as bandas da câmara hiperespectral foram configuradas com base na análise espectral de amostras de folha de cana-de-açúcar centrando nos seguintes comprimentos de onda (nm) e *Full Width Half Maximum* (FWHM, em nm) respectivamente: 506,1 (15,6); 520,0 (17,5); 535,5 (16,4); 550,8 (15,2); 564,7 (16,6); 580,1 (15,1); 591,5 (14,7); 605,6 (13,8); 619,5 (14,6); 629,9 (15,9); 650,3 (24,1); 660,3 (24,1); 670,0 (21,7); 680,1 (21,0); 689,6 (21,7); 699,6 (21,9); 709,7 (20,8); 720,0 (20,8); 729,6 (20,8); 740,5 (20,6); 749,7 (19,4); 770,5 (19,4); 790,1 (18,5); 810,2 (17,7); 829,9 (18,6).

Durante a campanha de campo foram colocados alvos para a correção geométrica e correção e calibração radiométrica das imagens (alvos: branco, cinza e preto). Os alvos para correção geométrica foram posicionados com receptor *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para obter suas coordenadas. Os alvos utilizados para calibração radiométrica foram medidos com espectrorradiômetro ASD FieldSpec HandHeld® modelo UV/NIR, obtendo seus espectros no intervalo espectral de 325 nm a 1075 nm com intervalo amostral de 1,6 nm e FOV de 1° (ASD, 2003). Medidas espectrorradiométricas foram adquiridas em amostras de cana-de-açúcar sadia e infectadas constituindo material de referência para a construção da biblioteca espectral utilizada no processo de calibração radiométrica das imagens hiperespectrais.

Processamento de imagens hiperespectrais

O cubo de imagens hiperespectrais passou pelo processo de correção do *Dark Current* utilizando um alvo escuro para eliminar ruídos de origem da eletrônica da câmera. Como as imagens apresentavam deslocamento entre bandas foi necessário também realizar o co-registro entre as bandas. Com os dados da calibração geométrica e as coordenadas iniciais do receptor GNSS da IMU, as imagens co-registradas foram fototrianguladas no *software* ERDAS LPS (*Leica Photogrammetry Suite*) com base no *Bundle block adjustment*.

O processo de correção radiométrica das imagens hiperespectrais foi realizado no *software* desenvolvido por Honkavaara (2013) no qual faz uma transformação para uma geometria de aquisição padrão e consequentemente minimização do efeito da *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF) baseado no modelo de Walthall (1985) e a normalização das cenas para minimização dos efeitos de variação de iluminação desenvolvido por Hakala et al. (2013), produzindo um ortofotomosaico. Para realizar essa correção utiliza-se parâmetros de orientação exterior e interior, um Modelo Digital de Superfície (MDS) com *Ground Sample Distance* (GSD) de 0,50 m e parâmetros de correção radiométrica (HONKAVAARA et al., 2012; 2013). Dessa forma, o mosaico de orthophotos gerado apresentaram GSD de 0,50 m.

A partir de alvos considerados como referência radiométrica nas cenas foi realizada a calibração radiométrica do ortofotomosaico de imagens hiperespectrais através da linha

empírica. A calibração por linha empírica é um método baseado na regressão linear, onde calcula-se os fatores de transformação dos números digitais (NDs) em valores físicos (SAHOO et al. 2013), neste caso os pixels foram transformados para valores de Fator de Reflectância Hemisférico Cônico (FRHC) baseando-se em curvas espectrais de referência de amostras da biblioteca espectral obtidas em campo.

Aplicação de índices espectrais de vegetação em imagens hiperespectrais

Os índices de vegetação são parâmetros obtidos por medidas radiométricas que auxiliam na extração de informações sobre as características da vegetação. Neste experimento foi avaliada a capacidade de detecção de mosaico aplicando-se os índices: *Simple ratio* (SR) (BIRTH E MACVEY, 1968), *Normalized difference Vegetation Index* (NDVI) (ROUSE et al., 1974), *Normalized difference Vegetation Index Red Edge* (NDVI705) (GITELSON e MERZLYAK, 1994), *Photochemical Reflectance Index* (PRI) (GAMON et al., 1992; GAMON et al., 1997), *Carotenoid reflectance Index 1* (CRI1) (GITELSON et al., 2002), *Carotenoid reflectance Index 2* (CRI2) (GITELSON et al., 2002), *Plant Senescence Reflectance Index* (PSRI) (MERZLYAK et al., 1999), *New Vegetation Index* (NVI) (GUPTA et al., 2002), *Triangular Vegetation Index* (TVI) (BROGE e LEBLANC, 2000), *Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index* (MCARI) (DAUGHTRY et al., 2000), *Transformed chlorophyll absorption reflectance index* (TCARI), *Anthocyanin Reflectance Index 1* (ARI1) (GITELSON et al., 2001), *Anthocyanin Reflectance Index 2* (ARI2) (GITELSON et al., 2001), *Optimized soil adjusted vegetation index* (OSAVI) (RONDEAUX et al., 1996), e *Red Edge Position Determination* (REP) (CLEVERS, 1994).

Os índices foram aplicados na ortofotomosaico de imagens hiperespectrais e em seguida foram fatiadas considerando-se apenas as áreas doentes afetadas por mosaico. Para verificar a acurácia dos índices aplicou-se matriz de confusão e estatística do coeficiente kappa (Equação 22) (COHEN, 1960; HUDSON e RAMM, 1987; CONGALTON e GREEN, 1999) confrontando-se os resultados obtidos dos índices com dados de verdade de campo sobre a cana-de-açúcar infectada com mosaico e outras classes no qual considerou-se amostras de cana-de-açúcar sadia, solo e plantas daninhas. Na análise da acurácia foram utilizados 80 pontos verificados em campo.

3. Resultados e Discussão

Para evidenciar as áreas afetadas com mosaico na cana-de-açúcar foram aplicados índices de vegetação nas imagens hiperespectrais. A Figura 2 apresenta os resultados da aplicação dos índices nas imagens para destacar as áreas infectadas com mosaico na cana-de-açúcar. As regiões destacadas em preto são aquelas em que foram identificadas com a doença do mosaico na cana-de-açúcar.

Uma inspeção visual mostrou que, os índices de vegetação que evidenciaram regiões afetadas pelo mosaico na cana-de-açúcar foram NDVI, NDVI705, NVI e ARI2. De todos os índices analisados neste caso de estudo o PRI, CRI2, e REP não foram eficientes para evidenciar áreas de solo exposto. Os índices PRI, CRI1 e CRI2 evidenciaram os ruídos decorrentes do processamento da imagem hiperespectral e principalmente os índices MCARI, TCARI e REP não apresentaram informação relacionada com a presença de mosaico na cana-de-açúcar.

Para cada índice calculou-se a exatidão global que fornece a acurácia do mapeamento e o coeficiente de concordância kappa (Tabela 1), os maiores valores foram encontrados para o índice ARI2 (exatidão global de 0,85 e coeficiente kappa de 0,69), NVI (exatidão global de 0,78 e coeficiente kappa de 0,56) e NDVI705 (exatidão global de 0,71 e coeficiente kappa de 0,41).

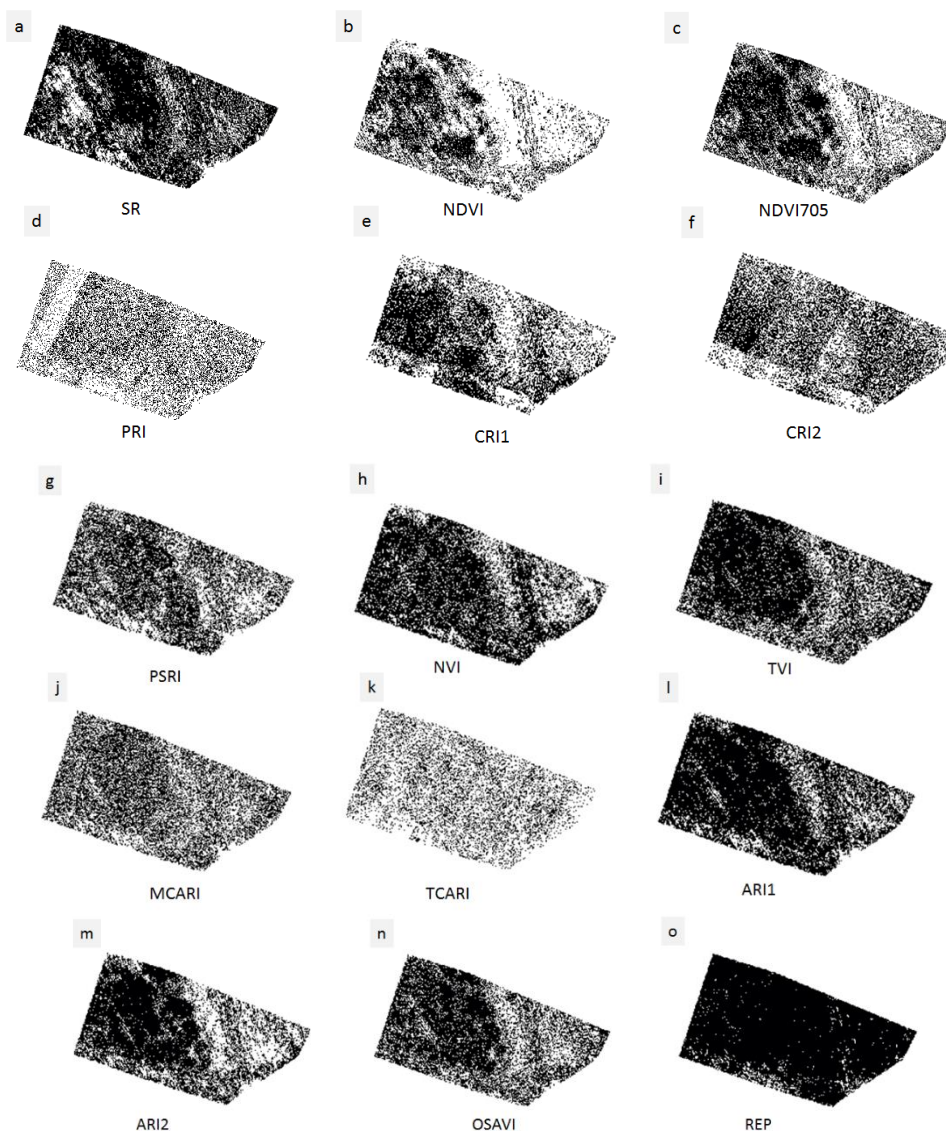


Figura 2. Índices de vegetação aplicados em imagens hiperespectrais: (a) SR, (b) NDVI, (c) NDVI705, (d) PRI, (e) CRI1, (f) CRI2, (g) PSRI, (h) NVI, (i) TVI, (j) MCARI, (k) TCARI, (l) ARI1, (m) ARI2, (n) OSAVI, (o) REP.

O NVI foi desenvolvido para melhorar a capacidade de monitoramento da biomassa do NDVI (GUPTA et al., 2002) e NDVI705 trata-se de uma modificação do NDVI baseada na borda vermelha desenvolvida por Gitelson e Merzlyak (1994) que está correlacionada com a presença de clorofila *a* e deciduidade da vegetação. Mesmo que o valor de exatidão global do índice PRI tenha sido 0,69 deve-se considerar que a imagem resultante dele apresentou ruídos.

Analisando o coeficiente kappa dos índices, o índice ARI2 teve o melhor desempenho, sendo substancial de acordo com Landis e Koch (1979), apresentando-se como um potencial índice para detecção de mosaico na cana-de-açúcar. O índice ARI2 é utilizado em estimativa das concentrações de antocianina (GITELSON et al., 2001), pigmento presente em plantas e frutas responsável pela combinação das cores vermelha e azul. No caso das folhas de cana-de-açúcar os pigmentos encontrados são os típicos de folhas verdes como clorofila *a* e *b*, carotenoides e antocianina (VISWANATHAN et al., 2000; JOHNSON et al., 2008; GRISHAM et al., 2010).

Quando a planta sofre ataque de agentes fitopatogênicos, como fungos, vírus ou bactérias ou sofre algum tipo de estresse, naturalmente ela aciona seu mecanismo de defesa criando

barreiras físicas e químicas, um desses mecanismos é a resistência sistêmica adquirida (GUEST e BROWN, 1997; FERNANDES et al, 2009). Viswanathan et al. (2000) acreditam numa possível relação da antocianina como fator bioquímico de resistência sistêmica induzida na cana-de-açúcar devido à podridão vermelha, doença de origem fúngica, os pesquisadores verificaram que a concentração de antocianina é maior próximo aos locais de inoculação do agente fitopatogênico sugerindo que a planta ao sofrer o ataque passa a acumular mais antocianina nas regiões afetadas.

As antocianinas apresentam propriedades que atuam como forma de mecanismo de defesa da planta diante do ataque de organismos; propriedade de repelência química para herbívoros e parasitas; e propriedades ópticas servem como um sinal visual para herbívoros indicando a presença de elementos tóxicos ou desagradáveis evitando assim que a planta seja atacada (LEV-YAUDAN e GOULD, 2009). Além disso, as antocianinas demonstraram proteger a planta contra infecções de microorganismos patogênicos, apresentando reação antivírus, antibacteriana e antifúngica por essa razão a antocianina é responsável pela resistência a doenças em diversos tipos de culturas agrícolas (VISWANATHAN et al., 2000).

Como a antocianina pode ser um indicativo de senescência e estresse em algumas espécies de plantas (GITELSON et al., 2001), uma suposição que surge, ao ser infectada pelo vírus do mosaico a planta de cana-de-açúcar tenha produzido uma quantidade maior de antocianina e a presença deste pigmento foi evidenciado pelo índice ARI2 nas imagens hiperespectrais.

Tabela 1. Exatidão global e coeficiente de concordância kappa das imagens geradas pelos índices de vegetação.

Índices	Exatidão global	Kappa	Erro de Omissão cana-de-açúcar doente (%)	Erro de Inclusão de outras classes (%)
SR	0,63	0,27	20,00	45,09
NDVI	0,70	0,35	60,00	17,64
NDVI705	0,71	0,41	34,29	32,35
PRI	0,69	0,35	42,85	33,33
CRI1	0,58	0,13	54,28	48,38
CRI2	0,49	-0,06	68,57	60,71
PSRI	0,46	-0,09	60,00	61,11
NVI	0,78	0,56	8,57	31,91
TVI	0,66	0,33	28,57	40,47
MCARI	0,63	0,22	54,29	40,74
TCARI	0,45	-0,19	42,85	41,17
ARI1	0,69	0,40	5,71	41,07
ARI2	0,85	0,69	20,00	15,15
OSAVI	0,68	0,35	28,57	39,02
REP	0,50	0,09	5,71	53,52

4. Conclusão

Os índices que trouxeram alguma contribuição na detecção das regiões infectadas com mosaico da cana-de-açúcar foram NDVI, NDVI705, NVI e ARI2. No entanto, dentre os índices analisados o ARI2 foi o que apresentou um desempenho melhor, este índice está associado a concentração de antocianina na vegetação. Como a antocianina apresenta propriedades de defesa em relação a ação de organismos fitopatogênicos uma hipótese que surge e poderia ser investigada é que a planta de cana-de-açúcar ao ser infectada pelo vírus acionou o mecanismo

de defesa para a produção de antocianina que foi evidenciado a partir do índice ARI2, sendo um indicativo da presença de antocianina na planta.

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo) pelo financiamento de parte desta pesquisa pelo processo (2013/50426-4) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível Superior (CAPES) pelo auxílio em forma de bolsa de doutorado.

Referências

- ASD. **FieldSpec®UV/VNIR**: HandHeld Spectroradiometer. User's Guide. 2003, 72 p.
- ASHOORLOO, D.; MOBASHERI, M. R.; HUETE, A. Developing two spectral disease indices for detection of wheat leaf rust (*Puccinia triticina*). **Remote Sensing**, n.6, p. 4723-4740.
- BASSOI, L. H.; MIELE, A.; REISSER JR.; C.; GEBLER, L.; FLORES, C. A.; ALBA, J. M. F.; GREGO, C. R.; TERRA, V. S.S.; TIMM, L. C.; NASCIMENTO, P. S. Agricultura de precisão em fruticultura. In: BERNARDI, A. C.C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. Agricultura de precisão resultados de um novo olhar. Brasília: Embrapa Instrumentação, 2014, 596 p. (ISBN 978-85-7035-352-8).
- BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, n. 76, 2000, p. 156-172.
- CLEVERS, J. G. Imaging spectrometry in Agriculture: Plant Vitality and Yield indicators. In: HILL, J.; MEGIER, J. Imaging spectrometry: a tool for Environment observations. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1994, p. 193-219.
- COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, 1960, p. 37-46.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of Remotely sensed data**: principles and practices. Lewis publishers, Boca Raton, Florida, 1999, 137 p.
- DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; COLSTOUN, E. B.; MCMURTREY III, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, n.74, 2000, p. 229-239.
- ELVIDGE, C. D.; CHEN, Z. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 54, 1995, p. 38-48.
- FERNANDES, C. F.; VIERIA JÚNIOR, J. R.; SILVA, D. S. G.; REIS, N. D.; ANTUNES JÚNIOR, H. Mecanismo de defesa de plantas contra o ataque de agentes fitopatogênicos. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2009, 14 p.
- GAMON, J.A., PENUELAS, J.; FIELD, C.B. A Narrow-Waveband Spectral Index That Tracks Diurnal Changes in Photosynthetic Efficiency. **Remote Sensing of Environment** v.41, p. 35-44, 1992.
- GAMON, J.A., L. Serrano, and J.S. Surfus, The Photochemical Reflectance Index: An Optical Indicator of Photosynthetic Radiation Use Efficiency Across Species, Functional Types and Nutrient Levels. **Oecologia**, v.112, n.4, p.492-501, 1997.
- GITELSON, A. A.; MERZLAYAK, M. N. Spectral Reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. **Journal Plant Physiology**, v. 143, p. 286-292, 1994.
- GITELSON, A.A.; MERZLYAK, M.N.; ZUR, Y.; STARK, R.; GRITZ, U. Non-destructive and remote sensing techniques, for estimation of vegetation status. In: Proceedings, Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, v. 1, 2001, p. 205-210.
- GITELSON, A. A.; ZUR, Y.; CHIVKUNOVA, O. B.; MERZLYAK, M. N. Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy. **Photochemistry and Photobiology**, v.75, n. 3, 2002, p. 272-281.
- GONÇALVES, M. C. Doenças causadas por vírus. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010, 882 p. (ISBN: 978-85-855564-17-9)
- GRISHAM, A. P.; JOHNSON, R. M.; ZIMBA, P. V. Detecting Sugarcane yellow leaf virus infection in asymptomatic leaves with hyperspectral remote sensing and associated leaf pigment changes. **Journal of Virological Methods**, n. 167, 2010, p. 140-145.
- GUEST, D.; BROWN, J. **Plant defences against pathogens**. In: BROWN, J. F.; OGLE, J. H. Plant pathogens and plant diseases. Armidale: Rockvale publications, 1997, p. 263-286.
- GUPTA, R. K.; VIJAYAN, D.; PRASAD, T. S. New hyperspectral vegetation characterization parameters. **Advanced Space Research**, v. 28, n. 1, 2001, p. 201-206.
- HAKALA, T.; HONKAVAARA, E.; SAARI, H.; MÄKYNNEN, J.; KAIVOSOJA, J.; PESONEN, L.; PÖLÖNEN, I. Spectral imaging from UAVS varying illumination conditions. In: International archives of the Photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. XL-1/W2, 2013 UAV-g2013, 4-6 september, 2013, Rostock, p. 189-194.

- HILLNHÜTTER, C.; MAHLEIN, A. -K; SIKORA, R. A.; OERKE, E. -C. Remote sensing to detect plant stress induced by *Heterodera schachtii* and *Rhizoctonia solani* in sugar beet fields. **Field Crops Research**, v. 122, 2011, p. 70-77.
- HONKAVAARA, E.; SAARI, H.; KAIVOSOJA, J.; PÖLÖNEN, I.; HAKALA, T.; LITKEY, P.; MÄKYNEN, J.; PESONEN, L. Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture. **Remote Sensing**, n. 5, 2013, p. 5006-5039.
- HUDSON, W. D.; RAMM, C. W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.53, n. 4, 1987, p. 421-422.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estados**, 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/>. Acesso em: 29 de setembro de 2015.
- JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 598 p. (ISBN 978-85-60507-06-1)
- JOHNSON, R. M. VIATOR, R. P.; VEREMIS, J. C.; RICHARD JR. E. P.; ZIMBA, P. V. Discrimination of sugarcane varieties with pigment profiles and high resolution, hyperspectral leaf reflectance data. **Journal Association Sugar Cane Technologists**, n. 28, 2008, p. 63-75.
- LEV-YAUDAN, S.; GOULD, K.S. Role of anthocyanins in plant defence. In: WINEFIELD, C.; DAVIES, K.; GOULD, K. Anthocyanins: biosynthesis, functions and applications. New York: Springer, 2009 p. 22-28.
- MERZLYAK, M. N.; GITELSON, A. A.; CHIVKUNOVA, O. B.; SOLOVCHENKO, A. E.; POGOSYAN, S. I. Application of reflectance spectroscopy for analysis of higher plant pigments. **Journal of Virological Methods**, n. 167, 2003, p. 140-145.
- MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, n. 114, 2013, p.
- NAIDU, R. A.; PERRY, E. M.; PIERCE, F.; MEKURIA, T. The potential of spectral reflectance technique for the detection of Grapevine leafroll-associated virus-3 in two red-berried wine grape cultivars. **Computers and Electronics in Agriculture**, n.66, 2009, p. 38-45.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007, 127 p. (ISBN 978-85-60507-02-3)
- RIKOLA LTD. **Rikola Hyperspectral Imager Manual**, 2014, 37 p.
- RONDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. **Remote Sensing of Environment**, n. 55, 1996, p. 95-107.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. **Proceedings Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium**, Greenbelt: NASA SP-351, 1974, p.3010-3017
- SANGUINO, A. **As principais doenças da cana-de-açúcar**. Ribeirão Preto: IAC, Curso à distância Tópicos da Cultura de cana-de-açúcar, 2012, 22 p.
- SAHOO, R. N.; PARGAL, S.; PRADHAN, S.; KRISHNA, G.; GUPTA, V. K. **Processing of hyperspectral remote sensing data**. New Delhi: Division of Agriculture Physics, Indian Agriculture Research Institute, 2013, 72 p.
- SEELAN, S. K.; LAGUETTE, S.; CASADY, G. M.; SEIELSTAD, G. A. Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. **Remote Sensing of Environment**, n. 88, 2003, p. 157-169.
- SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **SIGRH**. Disponível em: <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/6406/i_6_6e7remanescentesflorestaiseoutras>.pdf Acesso em: junho de 2015.
- UNICA. **União da indústria de cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=9E97665F-3A81-46F2-BF69-26E00C323988>>. Acesso em: out. 2008.
- VISWANATHAN, R.; MOHANRAJ, D.; PADMANABAN, P. Possible involvement of anthocyanin compounds in resistance of sugarcane against red rot. **Indian Phytopathology**, v. 53, n. 3, 2000, p. 311-313.
- ZHANG, N.; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture: a worldwide overview. **Computers and electronics in agriculture**, n.36, 2002, p.113-132