

Avaliação do WorldView-3 e de sensores a bordo de VANTs para detecção indireta de estresse em vegetação

Salete Gürtler¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹

¹ Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP
Caixa Postal 6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
saletegurtler@gmail.com
beto@ige.unicamp.br

Abstract. Sensors with high spatial resolution and discrete bands positioned in the red edge region are a promise for the detection of vegetation stress. Among the most modern remote sensors with this configuration is the WorldView-3 (WV-3) and multispectral sensors aboard UAVs (Unmanned Aerial Vehicle). Micasense Red Edge (MRE) is a camera designed for VANTs. It has five spectral bands (in the visible, red edge and near infrared), being able to collect images of high quality and spatial resolution (pixel of 8 cm to 120 meters of height). The objective of this research was to evaluate the ability of WV-3 and MRE to identify vegetation stress caused by the leakage of diesel and gasoline in the soil. Two experiments were built for this purpose: (I) soil contamination before planting of plant species; And (II) with soil contamination after full development of vegetation. Canopy reflectance spectra were obtained from measurements in the field with the FieldSpec-3 High Resolution ASD spectroradiometer and hyperspectral images of the ProSpecTIR-VS airborne sensor. Canopy spectra were resampled to the WV-3 and MRE bands. The results obtained from the simulation show the ability of these products to indirectly identify diesel and gasoline leaks based on spectral changes of the vegetation cover.

Palavras-chave: UAV, reflectance spectroscopy, hydrocarbon contamination, drone, espectroscopia de reflectância, contaminação por hidrocarboneto.

1. Introdução

Por ter alto potencial de contaminação, os derivados de petróleo precisam ser rigorosamente supervisionados durante o transporte dutoviário. Uma alternativa ao monitoramento ambiental é a detecção indireta de pequenos vazamentos desses hidrocarbonetos, por meio da identificação de alterações na vegetação que recobre a linha de dutos.

A exposição aos hidrocarbonetos causam, principalmente, amarelamento e redução do tamanho das folhas e plantas (Smith et al., 2004, Sanches et al., 2013a, Sanches et al., 2013b, Emengini et al., 2013a, Emengini et al., 2013b). Foram observadas também alterações nas formas dos tecidos de todas as estruturas (folha, caule e raiz) da planta contaminada com diesel, que se tornaram irregulares, rugosas e encolhidas em relação às plantas sem contaminação (Al-Baldawi et al. 2015). O amarelamento das folhas é um sintoma da perda de clorofila, que reduz a absorção da radiação na região visível do espectro. A maior rugosidade dos tecidos e a redução do tamanho das folhas, por sua vez, causam uma diminuição do espaço interno das folhas e alteram o espalhamento da radiação solar, reduzindo a refletância da planta na região do infravermelho próximo (NIR) do espectro eletromagnético. Diversas pesquisas comprovaram alterações espectrais da vegetação, em solo com contaminantes líquidos e gasosos derivados de petróleo, comumente transportados em dutovias (e.g. Smith et al. 2004, van der Meijde et al. 2005, Noomen et al. 2006, Noomen et al. 2008, Noomen et al. 2012, Noomen et al. 2015, Sanches et al. 2013a, Sanches et al. 2013b, Emengini et al. 2013a, Emengini et al. 2013b, Sanches et al. 2014).

A obtenção de dados espectrais remotos facilita e torna operacional o monitoramento ambiental de áreas sob o risco dos dutos. O satélite WorldView-3 (WV-3) é um instrumento

promissor, com bandas multiespectrais discretas, localizadas em partes estratégicas do espectro eletromagnético para o mapeamento da vegetação.

A utilização de imagens digitais obtidas por veículos aéreos não tripulados (VANTs) é também uma alternativa promissora. Trata-se de uma tecnologia emergente, com grandes expectativas para monitoramento de áreas pontuais. Apesar das limitações físicas impostas por essas aeronaves de pequeno porte, câmeras multiespectrais pequenas e leves, com bandas estreitas, em faixas de interesse específico, desenvolvidas especificamente para VANTs, estão disponíveis no mercado (e.g., MicaSense RedEdge; Rikola HS; ADC Tetracam; miniMCA6 Tetracam). As vantagens estão na capacidade de fornecer imagens de alta resolução, pois voam em baixa altitude; são mais acessíveis quanto ao custo e, em geral, oferecem versatilidade na programação da aquisição de imagens que nem sempre estão disponíveis utilizando satélite ou sensoriamento remoto aéreo convencional (Garcia-Ruiz et al. 2015). Além disso, o tempo necessário para preparar o voo de um VANT é reduzido e oferece grande flexibilidade de configuração em comparação a aviões pilotados (Torres-Sánchez et al., 2014).

Uma das formas mais simples do uso de dados multiespectrais para o mapeamento de aspectos da vegetação é através de índices espectrais, os quais podem ser computados de forma simples com dados obtidos pelo WV-3 e VANTs. O índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI; Rouse et al. 1973) é capaz de capturar o contraste entre a alta absorção na região do vermelho, ocasionada pela clorofila, e a alta refletância no infravermelho próximo, relacionada à estrutura da folha e ao dossel. Baixos valores de NDVI podem estar associados a distúrbios na vegetação (Nemani e Running 1997). Gitelson et al. (1996) propuseram uma variação do NDVI, o índice de vegetação de diferença normalizada verde (GNDVI). A substituição da banda do vermelho pela do verde torna esse índice mais sensível que o NDVI quando as variações estão na clorofila do tipo 'a'.

Estudos recentes baseados em índices de vegetação calculados a partir de imagens obtidas por VANTs e satélites da série WorldView lograram êxito em aplicações relacionadas à detecção de doenças em plantas (Garcia-Ruiz et al. 2013, Li et al. 2015), estimativa de biomassa e nitrogênio (Vega et al. 2015), mapeamento de cobertura vegetal (Bendig et al. 2015, Torres-Sánchez et al. 2014), infestação de plantas daninhas (Garcia-Ruiz et al. 2015, Perez-Ortiz 2015) e estresse hídrico (Berni et al. 2009, Gago et al. 2015).

O objetivo deste trabalho é simular dados do WorldView-3 e da câmera multiespectral MicaSense Red Edge, desenvolvida para VANTs, visando avaliar o potencial destes instrumentos na identificação de anomalias em culturas vegetais desenvolvidas em solo contaminado com diesel e gasolina. A simulação foi feita com reamostragem de dados obtidos por espectrorradiômetro de campo (ASD FieldSpec-3 High-Resolution) e por uma câmera hiperespectral aeroportada (sistema ProSpecTIR-VS).

1.1. Sistemas WorldView-3 e MicaSense

O satélite WorldView-3 (WV-3) é o primeiro satélite de alta resolução espacial com 16 bandas espectrais: 8 na região do visível e infravermelho próximo (VNIR) (Tabela 1) e 8 bandas na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR). A resolução espacial é de 1,24 metros para as bandas do VNIR e de 3,7 metros para as bandas do SWIR (disponibilizadas para a comunidade global com resolução reduzida, de 7,5 metros). Uma grande vantagem do WV-3 é a flexibilidade sobre a aquisição da área de cobertura da imagem. Em se tratando de monitoramento de dutos, que percorrem extensas áreas lineares, a aquisição dos dados pode ser ajustada para diferentes recobrimentos (Digital Globe 2014), com redução de custo.

A câmera MicaSense RedEdge (MRE) é muito leve (150 gramas) e adaptável para VANTs de pequeno porte. Capta imagens simultaneamente em cinco bandas espectrais estreitas, denominadas *blue*, *green*, *red*, *red edge*, *near IR* (NIR) (Tabela 1), com pixel de 8

cm (para uma altitude do VANT em 120 metros) (MicaSense 2016a). As bandas estreitas captam informações em regiões específicas do espectro eletromagnético, sem contaminação/interferência das bandas vizinhas, o que permite medições mais precisas de refletância (MicaSense 2016b).

Comparativamente, as bandas do sensor MRE são mais estreitas (entre 10 e 40 nm) do que as bandas do WV-3 (entre 40 e 180 nm) e não cobrem a região do SWIR.

Tabela 1. Características dos sistemas de imageamento do WorldView-3 e do MicaSense RedEdge na região do visível, *red edge* e infravermelho próximo (NIR).

Sensor/Câmera	Banda	Intervalo espectral (nm)	Largura da banda (nm)
WorldView-3	1: Coastal Blue	400 - 450	50
	2: Blue	450 - 510	60
	3: Green	510 - 580	70
	4: Yellow	585 - 625	40
	5: Red	630 - 690	60
	6: Red edge (RE)	705 - 745	40
	7: Near-IR1 (NIR1)	770 - 895	125
	8: Near-IR2 (NIR2)	860 - 1040	180
MicaSense RedEdge	1: Blue	465-485	20
	2: Green	550-570	20
	3: Red	663-673	10
	4: RedEdge (RE)	712-722	10
	5: NIR	820-860	40

2. Metodologia de Trabalho

Os dados espectrais foram obtidos em dois experimentos instalados no campo experimental do Centro Pluridisciplinar de Pesquisas Químicas, Biológicas e Agrícolas (CPQBA) da UNICAMP, localizado em Paulínia (Estado de São Paulo). O intervalo entre os experimentos foi de aproximadamente três anos. Em 2000 m² de terreno, foram delimitados 3 canteiros (com 5 metros de largura, 60 metros de comprimento e 3 metros de distância entre eles), um para cada tratamento: controle (CTR); contaminação com diesel (DSL) e com gasolina (GSL). Antes da preparação do solo, uma manta plástica de polietileno de alta densidade foi colocada a um metro de profundidade, visando conter os contaminantes, conforme norma da legislação ambiental brasileira. Além disso, entre os experimentos foram realizados plantios de leguminosas para avaliar a manutenção e/ou eliminação dos hidrocarbonetos no solo.

O sistema de contaminação, formado por bomba e mangueiras sobrepostas ao solo, foi instalado transversalmente nos 3 canteiros. Pequenos orifícios nas mangueiras permitiram o vazamento dos contaminantes (diesel e gasolina) e da água (no caso do controle). O sistema de irrigação por aspersão foi instalado para garantir uma distribuição de água homogênea em todos os canteiros durante todo o experimento.

O Experimento I (realizado entre o outono e a primavera no hemisfério Sul) teve início com o vazamento de 1125 litros de gasolina (equivalente a uma concentração de 6,25 L/m³) e 1500 litros de diesel (equivalente a uma concentração de 8,33 L/m³), pré-plantio das espécies vegetais (milho, soja perene e braquiária). Os volumes de contaminantes foram diferentes visto que ensaios anteriores mostraram que, sob mesma concentração, o efeito da gasolina na germinação é mais agressivo que o do diesel, podendo inviabilizar a germinação das sementes. Os canteiros foram divididos em 3 blocos. Cada bloco foi dividido em 3 parcelas (com 6m x 5m cada).

O Experimento II foi realizado entre os meses do outono no hemisfério Sul. Nesse caso, cada canteiro foi dividido em 4 blocos (de 5m x 15 m), subdivididos em 5 parcelas de 3m x 5 m. Em cada parcela foi plantada uma cultura diferente: milho, soja perene, braquiária, além de

feijão e cana-de-açúcar. Essas últimas foram desconsideradas nessa pesquisa por apresentarem um ciclo de crescimento natural muito distinto das demais culturas. A posição de cada cultura no bloco foi determinada aleatoriamente. A concepção deste experimento é inversa ao experimento anterior, ou seja, somente após o pleno desenvolvimento das plantas foram iniciadas as contaminações. As contaminações (com diesel e gasolina) foram diárias, até atingir a concentração máxima de $12,7 \text{ L/m}^3$, um mês após o início dos vazamentos. Detalhes desse experimento estão descritos em Sanches et al. (2013a, b).

As medidas espectrais foram feitas com um espectrorradiômetro de campo ASD FieldSpec 3 High-Resolution, que detecta a radiação eletromagnética entre 350-2500 nm, com 2151 canais, com resolução espectral 3 nm (350 – 1000 nm), 8,5 nm (1000 – 1800 nm) e 6,5 nm (1800 – 2500 nm) (ASD, 2008). Os intervalos de amostragem são de 1,4 nm entre 350 – 1000 nm e 2 nm no intervalo de 1000 e 2500 nm. Para a obtenção das medidas de refletância foi utilizada como referência uma placa de Spectralon® (Labsphere, Inc.). Este equipamento foi disposto em uma bandeja sobre uma plataforma móvel com 3,65 metros de altura, capaz de percorrer toda a extensão dos canteiros. A bandeja possui sistema de roldanas que permite a movimentação transversal para coleta dos dados. Com a lente de 5 graus acoplada à pistola, obteve-se diâmetro de amostragem no terreno (*field-of-view*) de 30 cm. No Experimento I foram obtidos 20 espectros por parcela em cada coleta, com 10 campanhas de coleta. Para o Experimento II foram obtidos 10 espectros por parcela, em cada uma das 9 campanhas de coleta.

Durante o Experimento II foi obtida também uma imagem do espectrorradiômetro de imageamento ProSpecTIR-VS. Na data do imageamento as plantas haviam recebido um volume acumulado de contaminante de $8,7 \text{ L/m}^3$. O instrumento ProSpecTIR-VS tem duplos sensores, que cobrem individualmente a região do visível e infravermelho próximo (400-1000 nm) e a região do infravermelho de ondas curtas (1000-2500 nm), com resolução espacial de 0,6 m (SpecTIR 2016). A imagem foi coletada em 357 bandas espectrais e resolução espectral de 5 nm.

A reamostragem dos espectros médios foi realizada com a função de resposta de cada sensor (WV-3 e MRE), fornecidas pelos fabricantes (Digital Globe e MicaSense). A imagem ProSpecTIR-VS também foi reamostrada visando a geração de imagens simuladas para os sensores WV-3 e MRE. A reamostragem considerou a resolução espacial e a resolução espectral de cada câmera simulada. Para a simulação da resolução espacial dos sensores WV-3 e MRE, a imagem ProSpecTIR foi reamostrada para pixels de 1,24 m e 0,08 m, respectivamente.

Foram aplicados os índices de vegetação, que utilizam as bandas *red* ou *green* (no caso do GNDVI) e variações com a banda do *red edge* (RE) no lugar do *NIR* (Tabela 2). A existência de mais de uma banda no NIR possibilitou a criação de mais índices de vegetação para o WV-3.

3. Resultados e Discussão

No Experimento I, cuja contaminação ocorreu antes do plantio das sementes, observou-se redução da germinação nos canteiros contaminados, resultando em plantas esparsas, com distribuição não homogênea no terreno; diferentemente do que ocorreu no canteiro controle. Em relação ao desenvolvimento das plântulas, as três culturas (milho, soja perene e braquiária) apresentaram significativa redução de altura nos tratamentos DSL e GSL quando comparado ao CTR, e a coloração das folhas ficou evidentemente mais clara no DSL. O efeito prejudicial do diesel na germinação e crescimento das plantas pode ser explicado pela formação de uma barreira física em torno das sementes e raízes, afetando a entrada de água e oxigênio, devido à propriedade hidrofóbica do combustível (Adam e Duncan, 2002).

Tabela 2. Índices de vegetação utilizados na pesquisa.

Índice de Vegetação	Fórmula
NDVI	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
NDVI RE	$\frac{RedEdge - RED}{RedEdge + RED}$
SRI	NIR/RED
SRI RE	$RedEdge/RED$
GNDVI	$\frac{NIR - GREEN}{NIR + GREEN}$
GNDVI RE	$\frac{RedEdge - GREEN}{RedEdge + GREEN}$

*Fonte: Li et al (2015).

Os índices de vegetação calculados a partir das bandas simuladas dos sensores WV-3 e MRE ressaltaram diferenças entre as plantas contaminadas e controle até 121 dias após o plantio (Figura 1). Apesar do posicionamento e a largura de banda serem diferentes entre os sensores WV-3 e MRE as refletâncias médias apresentaram variações pequenas e negligenciáveis entre os sensores. A banda do *red-edge* do sensor MRE, posicionada em comprimentos de onda menores (entre 712 e 722 nm), foi a banda que mais diferiu do sensor WV-3 (entre 705 e 745 nm), apresentando refletâncias médias inferiores. Os índices que levam em consideração a banda do *red-edge* sofreram essas variações (índices menores quando calculados para as bandas do sensor MRE). Os índices gerados a partir da banda 2 do NIR para o WV-3 não trouxeram resultados diferentes aos índices gerados a partir da banda 1 do NIR.

No Experimento II foram observados vários efeitos das contaminações com hidrocarbonetos nas três espécies (milho, braquiária e soja perene): amarelamento das folhas, diminuição da biomassa verde, aumento de matéria seca e cobertura esparsa do dossel. Wyszowski e Wyszowska (2005) observaram que a presença dos hidrocarbonetos no solo causam alterações importantes com preenchimento de espaços vazios, inibindo o movimento de água e ar, causando compactação e degradação das propriedades biológicas, físicas e químicas do solo. Em contato com as raízes, o substrato alterado causa prejuízo ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas, podendo ocorrer até a supressão da vegetação (Smith et al., 2004; Wyszowski e Wyszowska 2005).

As três culturas tiveram os índices de vegetação reduzidos após a contaminação, principalmente com gasolina, cujas diferenças em relação ao dossel sadio foram ainda superiores (Figura 1). O comportamento espectral alterado do milho e da braquiária exposta ao hidrocarboneto foi detectado mais precocemente do que a soja perene.

As imagens índice de vegetação obtidas das imagens ProspecTIR-VS simuladas apresentaram valores inferiores nos canteiros contaminados, inclusive com diesel, permitindo o mapeamento das áreas contaminadas.

EXPERIMENTO I

EXPERIMENTO II

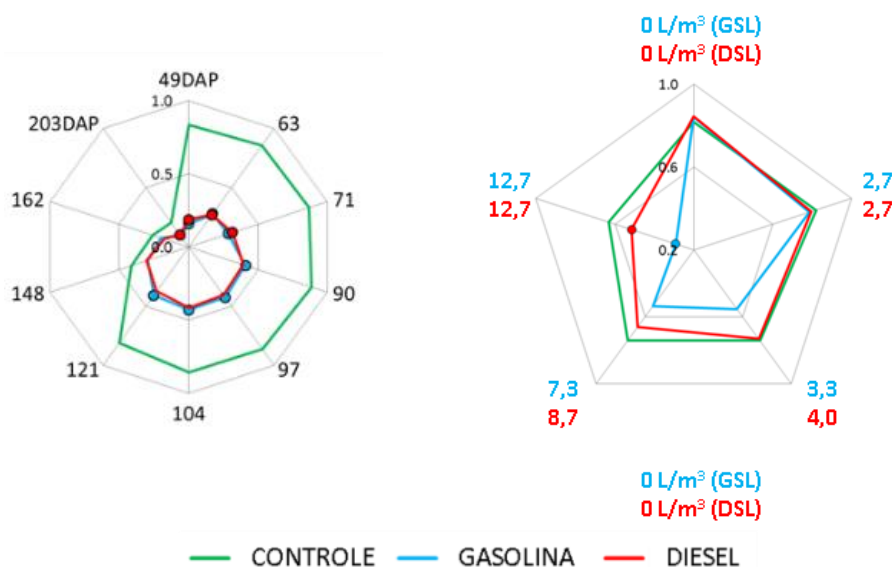


Figura 1. NDVI aplicado aos dados de milho simulados para WV-3: Experimento I, entre 49 e 203 DAP (dias após o plantio) e Experimento II, até 12,7 Lm³ de diesel e gasolina. O marcador em vermelho indica que houve diferença significativa entre os tratamentos DSL e CTR e o marcador em azul indica que houve diferença significativa entre os tratamentos GSL e CTR (teste t, $p \leq 0,05$).

4. Conclusões

A simulação dos dados ASD FieldSpec (2150 bandas) e ProspectTIR-VS (357 bandas) para os sensores WV-3 e MRE permitiram a distinção das plantas afetadas por diesel e gasolina, tanto no Experimento I, quando as sementes foram plantadas após a contaminação no solo, como no Experimento II, cujo vazamento foi gradual e iniciado após o desenvolvimento pleno do dossel das culturas.

Nas plantas que germinaram em solo contaminado (Experimento I), todos os índices de vegetação estudados foram sensíveis aos tratamentos, exceto o GNDVI_RE, que apresentou índices divergentes entre os sensores. Considerando as alterações sofridas pelas plantas do Experimento II, os índices de razão simples (SRI) e de diferença normalizada (NDVI) refletiram melhor as diferenças.

Os resultados positivos na identificação de diferenças entre as plantas estressadas e sadias a partir de imagens do satélite WV-3 e de veículo aéreo não tripulado são animadores, já que seguem uma tendência mundial de utilização dessas plataformas para monitoramento ambiental. A utilização dos índices de vegetação com baixo nível de processamento permite a obtenção de resultados rápidos, em concordância com a resolução temporal das imagens.

Considerando que os resultados dessa pesquisa foram obtidos de simulações, novas pesquisas realizadas com dados reais, originados dessas fontes de dados ou similares, devem fornecer resultados positivos ao monitoramento de áreas contaminadas. No caso específico das câmeras multiespectrais a bordo dos VANTs, os dados em melhor resolução espacial podem ser ainda mais precisos, mas um desafio será obter dados padronizados, com menor interferência possível da iluminação e ângulo de visada, entre outras qualificações.

Agradecimentos

Salete Gürtler agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado. Os autores agradecem a gerência e pesquisadores do Programa Tecnológico de Transporte (PROTRAN), do Centro de

Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES) da Petrobras, pelo apoio financeiro e logístico dedicado ao Projeto Biomarcadores.

Referências Bibliográficas

- Adam G. e Duncan H. Influence of diesel fuel on seed germination. **Environmental Pollution**, v. 120, n. 2, p. 363–370, 2002.
- Al-Baldawi I.A., Abdullah S.R.S., Anuar N., Suja F., Mushrifah I. Phytodegradation of total petroleum hydrocarbon (TPH) in diesel-contaminated water using *Scirpus grossus*. **Ecological Engineering**, v. 74, p. 463–473, 2015.
- ASD - Analytical Spectral Devices ASD. **FieldSpec 3 User Manual**. ASD Document 600540. Boulder: ASD Inc., 2008. 106p.
- Bendig J., Yu K., Aasen H., Bolten A., Bennertz S., Broscheit J., Gnyp M.L., Bareth G. Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 39, p. 79–87, 2015.
- Berni, J.A.J., Zarco-Tejada P.J., Sepulcre-Cantó G., Fereres E., Villalobos F. Mapping Canopy Conductance and CWSI in Olive Orchards Using High Resolution Thermal Remote Sensing Imagery. **Remote Sensing of Environment**. V. 113, n. 11, p. 2380–2388, 2009.
- Digital Globe. **WorldView-3 – Datasheet**. 2014. Disponível em: <http://global.digitalglobe.com/sites/default/files/DG_WorldView3_DS_forWeb_0.pdf>. Acesso em: 18.fev.2016.
- Emengini E.J., Blackburn G.A., Theobald J.C. Early detection of oil-induced stress in crops using spectral and thermal responses. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, 15p., 2013a.
- Emengini E.J., Blackburn G.A., Theobald J.C. Discrimination of plant stress caused by oil pollution and waterlogging using hyperspectral and thermal remote sensing. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 7, 17p., 2013b.
- Gago J., Douthe C., Coopman R. E., Gallego P. P., Ribas-Carbo M., Flexas J., Escalona J., Medrano H. UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. **Agricultural Water Management**, v. 153, p. 9–19, 2015.
- Garcia-Ruiz F. Sankaran S., Maja J. M., Lee W.S., Rasmussen J., Ehsani R. Comparison of Two Aerial Imaging Platforms for Identification of Huanglongbing-Infected Citrus Trees. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 91, p. 106–115, 2013.
- Garcia-Ruiz F. J., Wulfsohn D., Rasmussen J. Sugar beet (*Beta vulgaris* L.) and thistle (*Cirsium arvensis* L.) discrimination based on field spectral data. **Biosystems Engineering**, v. 139, p. 1–15, 2015.
- Gitelson A. A., Kaufman Y. J., Merzlyak M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289–298, 1996.
- Li X., Lee W. S., Li M., Ehsani R., Mishra A. R., Yang C., Mangan R. L. Feasibility study on Huanglongbing (citrus greening) detection based on WorldView-2 satellite imagery. **Biosystems Engineering**, v. 132, p. 28–38, 2015.
- MicaSense. **MicaSense RedEdge™ 3 Multispectral Camera - User Manual**. 2016a. Disponível em: <<https://micasense.zendesk.com/hc/en-us/articles/215261448-RedEdge-User-Manual>>. Acesso em 25.fev.2016.
- MicaSense. **How do professional multispectral cameras differ from single-imager multispectral cameras?** 2016b. Disponível em: <<http://www.micasense.com/>>. Acesso em: 25.fev.2016.
- Myneni R. B., Hall F. G., Sellers P. J., Marshak A. L. Interpretation of spectral vegetation indexes. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 33, n. 2, p:481–486, 1995.

- Nemani R. e Running S. Land Cover Characterization Using Multitemporal Red. **Ecological Applications**, v. 7, n. 1, p. 79–90, 1997.
- Noomen, M.F., Skidmore, A.K., van der Meer, F.D., Prins, H.H.T. Continuum removed band depth analysis for detecting the effects of natural gas, methane and ethane on maize reflectance, **Remote Sensing of Environment**, v. 105, p. 262-270, 2006.
- Noomen, M.F., Smith, K.L., Colls, J.J., Steven, M.D., Skidmore, A.K., van der Meer, F.D. Hyperspectral indices for detecting changes in canopy reflectance as a result of underground natural gas leakage. **International Journal of Remote Sensing**. V. 29, p. 5987–6008, 2008.
- Noomen, M.F., van der Werff, H.M.A., van der Meer, F.D. Spectral and spatial indicators of botanical changes caused by long-term hydrocarbon seepage. **Ecological Informatics**, v. 8, p. 55–64, 2012.
- Noomen, M., Hakkarainen, A., van der Meijde, M., van der Werff, H. Evaluating the feasibility of multitemporal hyperspectral remote sensing for monitoring bioremediation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 34, p. 217–225, 2015.
- Perez-Ortiz M., Pena J. M., Gutierrez P. A., Torres-Sanchez J., Hervas-Martinez C., Lopez-Granados F. A semi-supervised system for weed mapping in sunflower crops using unmanned aerial vehicles and a crop row detection method. **Applied Soft Computing Journal**, v. 37, p. 533–544, 2015.
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. **Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of Natural Vegetation**. 1973. In: Progress Report RSC 1978-1 112p. Remote Sensing Center Texas A&M University, College Station, Texas.
- Sanches I.D., Souza Filho C.R., Magalhães L.A., Quitério G.C.M., Alves M.N., Oliveira W.J. Assessing the impact of hydrocarbon leakages on vegetation using reflectance spectroscopy. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 78, p. 85-101, 2013a.
- Sanches I.D., Souza Filho C.R., Magalhães L.A., Quitério G.C.M., Alves M.N., Oliveira W.J. Unravelling remote sensing signatures of plants contaminated with gasoline and diesel: An approach using the red edge spectral feature. **Environmental Pollution**, v. 174, p. 16-27, 2013b.
- Sanches I. D., Souza Filho C. R., Kokaly R. F. Spectroscopic remote sensing of plant stress at leaf and canopy levels using the chlorophyll 680nm absorption feature with continuum removal. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 97, p. 111–122, 2014.
- Smith, K.L., Steven, M.D., Colls, J.J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red-edge region to identify plant stress responses to gas leaks. **Remote Sensing of Environment**, v. 92, p. 207-217, 2004.
- SpecTIR. **ProSpecTIR™ VS – VNIR/SWIR Hyperspectral Instrument**. 2016. Disponível em: <http://www.spectir.com/wp-content/uploads/2012/02/ProSpecTIR_VS_specs_2011.pdf>. Acesso em 01.mar.2016.
- Tang J., Wang M., Wang F., Sun Q., Zhou Q. Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 5, p: 845–851, 2011.
- Torres-Sánchez J., Peña J. M., de Castro A. I., López-Granados F. Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 103, p. 104–113, 2014.
- Vega F. A., Ramirez F. C., Saiz M. P., Rosua F. O. Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. **Biosystems Engineering**, v. 132, p. 19–27, 2015.
- Wyszkowski M. e Wyszkowska J., Effect of enzymatic activity of diesel oil contaminated soil on the chemical composition of oat (*Avena sativa* L.) and maize (*Zea mays* L.). **Plant, Soil and Environment**, v. 51, p. 360–367, 2005.