

Sensoriamento remoto hiperespectral aplicado à detecção de estresse em plantas causado pela contaminação do solo com hidrocarbonetos líquidos

Ieda Del'Arco Sanches¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Lucíola Alves Magalhães¹
Giuliana Clarice Mercuri Quitério¹
Marcos Nopper Alves²
Wilson José de Oliveira³

¹ Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{iedasanches, beto, luciola, giuliana}@ige.unicamp.br

² CPQBA, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal 6171 - 13081-970 - Campinas - SP, Brasil
mnopper@cpqba.unicamp.br

³ PETROBRÁS – Engenharia/IETEG/ETEG/EAMB
Av. Almirante Barroso, 81, 12o andar, Centro - 20031-000 – Rio de Janeiro - RJ, Brasil
wilsonjo@petrobras.com.br

Abstract. This paper explores hyperspectral remote sensing data and techniques for the detection of stressed plants contaminated by diesel and gasoline. A field experiment in real scale was conducted in which *Brachiaria brizantha* pasture plants were grown over soils contaminated with small volumes (2-12.7 L) of liquid hydrocarbons (HCs). Canopy reflectance spectra of contaminated and control plants were acquired within 350-2500 nm wavelengths using an ASD FieldSpec® Hi-Res spectroradiometer in nine dates. Also, a hyperspectral image of the experimental area was acquired with the ProSpecTIR-VS airborne sensor during the experiment. Reflectance spectra were mathematically transformed by means of first derivative (1D) and continuum removal (CR) techniques. Exploratory data analyses were conducted using principal component analysis (PCA), which showed that CR improved the extraction of information from the dataset. Two spectral indices computed from CR data were explored: the Band Depth Ratio (BDR) and a new index, the Plant Stress Detection Index (PSDI). Based on the ultraspectral data acquired with the FieldSpec, it can be stated that if the BDR = 1 at approximately 1720 nm the spectrum refers to a plant contaminated with HCs. Also, if the PSDI has a negative value between 560-600 nm in FieldSpec data and between 575-601 nm in ProSpecTIR-VS data it can be inferred that the spectrum refers to a stressed plant. Based on our results, it is concluded that the BDR and the IDEP indices represent an objective analysis to identify canopy spectra of stressed brachiaria plants contaminated by diesel and gasoline.

Palavras-chave: reflectance spectroscopy, canopy spectra, continuum removal, vegetation index, espectroscopia de reflectância, espectros de dossel, remoção do contínuo, índice de vegetação.

1. Introdução

Vazamentos de hidrocarbonetos (HCs), como a gasolina e o diesel, influenciam o solo e a vegetação adjacentes. Na vegetação, ocorrem alterações geobotânicas e bioquímicas (Schumacher, 1996), algumas visualmente perceptíveis. Em geral, nota-se a clorose das folhas e o crescimento atrofiado das plantas estressadas (Smith et al., 2004; Rosso et al., 2005). Tais modificações são causadas principalmente pela alteração na disponibilidade de oxigênio, concentração de CO₂, disponibilidade de metais pesados e a diminuição da porosidade dos solos (Schumacher, 1996).

O sensoriamento remoto (SR) vem sendo bastante explorado em estudos de detecção de anomalias causadas na vegetação em decorrência da presença de HCs gasosos (e.g.; Smith et al., 2004; Souza Filho et al., 2008, Noomen et al., 2012). Isso é possível visto que algumas

das alterações sofridas pelas plantas estressadas causam modificações nos seus padrões de reflectância, possibilitando a sua detecção remota. Entretanto, estudos de SR específicos nessa área foram realizados em países de clima temperado e voltados principalmente para vazamentos de gás natural. No Brasil, um experimento inédito em escala real foi conduzido no campo para avaliar a possibilidade de detecção de vazamentos de HCs líquidos (gasolina e diesel) nas condições de clima tropical. Resultados preliminares desse experimento foram apresentados por Magalhães et al. (2011). O presente trabalho tem como objetivo apresentar novas análises dos dados desse experimento, incluindo um novo índice para a detecção de estresse em plantas.

2. Metodologia de Trabalho

2.1. Experimento

O experimento foi realizado entre 2009-2010 em uma área experimental da UNICAMP, em Paulínia – SP. Na área do experimento, foram instalados três canteiros, com 60m de comprimento x 5m de largura. Cada canteiro recebeu um tratamento: i) controle - plantas que não receberam nenhum tipo de contaminação (CTR), ii) plantas contaminadas com gasolina (GSL), e iii) plantas contaminadas com diesel (DSL). Os canteiros foram divididos em quatro blocos iguais (repetições), nos quais foram plantadas diferentes espécies vegetais, incluindo a gramínea braquiária (*Brachiaria brizantha*). Os vazamentos de gasolina e diesel foram feitos nos canteiros a partir de um sistema de gotejamento e ocorreram entre os dias 26 de abril e 21 de maio de 2011. O primeiro vazamento de HCs correspondeu a 2 litros de GSL/DSL por metro cúbico de solo. As contaminações subsequentes compreenderam 0.7 litros de GSL/DSL por metro cúbico de solo.

2.2. Obtenção de dados de reflectância

Os espectros do dossel das plantas foram medidos em nove datas distintas ao longo do experimento (Tabela 1). As medições espectrais foram obtidas utilizando-se um espectrorradiômetro ASD FieldSpec® 3 Hi-Res e uma placa de Spectralon® como referência. O instrumento foi posicionado em uma plataforma móvel de 3,65 m de altura e 6 m de comprimento, o que permitiu leituras individuais de uma área de 30 cm de diâmetro no terreno. As medidas espectrais foram feitas na porção central de cada parcela, sendo que em cada linha cultivada foram feitas 10 medições em áreas contíguas e não sobrepostas.

Tabela 1. Data das medições espectrais e respectivos volumes de HCs injetados no solo (L/m^3), para os três tratamentos do experimento: controle (CTR), diesel (DSL) e gasolina (GSL).

Medições Espectrais		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
CTR	Data da medição	22/Abr	26/Abr	29/Abr		05/Mai		11/Mai	14/Mai	29/Mai
DSL	Data da medição	19/Abr	28/Abr	30/Abr	03/Mai	05/Mai	06/Mai	13/Mai	14/Mai	27/Mai
	Volume de DSL*	0.0	2.0	2.7	2.7	4.0	4.7	8.0	8.7	12.7
GSL	Data da medição	26/Abr	27-28/Abr	29/Abr	03/Mai	04/Mai	07/Mai	12/Mai	18/Mai	27/Mai
	Volume de GSL*	0.0	2.0	2.7	2.7	3.3	5.3	7.3	10.0	12.7

* Volume total de HC (L/m^3) acumulado no solo na data em que a medida spectral foi feita.

Na data equivalente à penúltima medição (M8), um imageamento foi realizado com o sensor hiperespectral aerotransportado ProSpecTIR-VS. Esse sensor opera com dois subsistemas, um na região do visível/infravermelho próximo (VNIR – visible/near infrared) (400 a 970 nm) e outro na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR – shortwave infrared) (970 a 2450 nm) (SpecTIR, 2012). O sensor foi operado a bordo de uma aeronave da

empresa FOTOTERRA/SPECTIR. Os dados desse imageamento foram disponibilizados no nível 1A de processamento (i.e. convertido em reflectância), com 357 bandas distribuídas entre as regiões do VNIR e SWIR (122 e 235 bandas, respectivamente), com 5 nm de resolução espectral e 0,6 m de resolução espacial.

2.3. Processamento dos espectros de reflectância obtidos com o FieldSpec®

Primeiramente, foram obtidos os espectros médios de reflectância representativo de cada data de medição (M1 a M9), para cada um dos tratamentos. Em seguida, foi feita a suavização dos espectros com a utilização do método de Savitzky-Golay (Savitzky e Golay, 1964). Os espectros foram suavizados utilizando-se um polinômio de 2ª ordem e 45 pontos de suavização.

2.4. Análise dos dados

Ultraespectral - FieldSpec®

Após o pré-processamento, duas transformações foram aplicadas aos dados de reflectância coletados *in situ*: primeira derivada (1D) e remoção do contínuo (CR). A 1D da reflectância do dossel das plantas foi computada utilizando-se o método de diferenciação Savitzky-Golay (Savitzky e Golay, 1964), com polinômio de 2ª ordem e 3 pontos de suavização. A CR foi aplicada aos espectros das plantas em sete intervalos espectrais localizados entre 470-518 nm, 550-750 nm, 910-1081 nm, 1116-1284 nm, 1634-1765 nm, 2006-2196 nm e 2222-2378 nm.

Para estudar a distribuição espectral das amostras coletadas *in situ*, a técnica de estatística multivariada Análise por Componentes Principais (PCA) foi utilizada. Na PCA as variáveis originais são transformadas em novas variáveis (componentes principais - PCs), as quais são ordenadas em relação à quantidade de variação que explicam. As primeiras PCs retêm a maior parte da variação dos dados originais. Três PCAs foram computadas utilizando-se os dados de reflectância, 1D e CR do dossel da braquiária.

Em seguida foram calculados dois índices baseados nos espectros de reflectância com CR: o *Band Depth Ratio* (BDR), proposto por Kokaly e Clark (1999) (Figura 1a), e o Índice de Detecção de Estresse em Plantas (IDEP) (Figura 1b) - um novo índice proposto nesse trabalho.

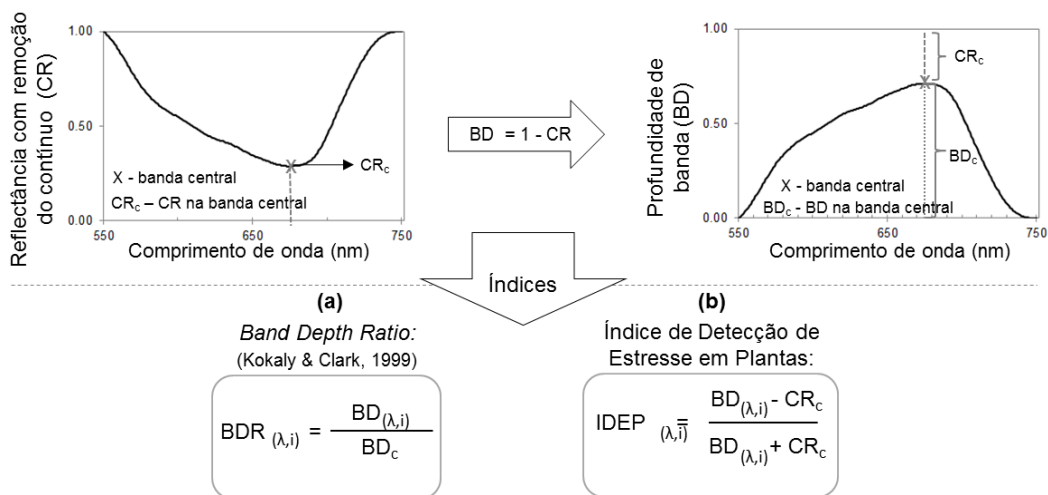


Figura 1. Cálculo dos índices de vegetação (a) *Band Depth Ratio* (BDR) e (b) Índice de Detecção de Estresse em Plantas (IDEP) baseados em espectros de reflectância com remoção do contínuo.

Hiperespectral - ProSpecTIR-VS

A CR foi aplicada aos espectros da imagem ProSpecTIR-VS para os mesmos sete intervalos espectrais mencionados acima. Os índices BDR e IDEP também foram calculados com os dados da imagem.

3. Resultados e Discussão

Com base nos resultados das PCAs (Figura 2), nota-se que a técnica de CR permitiu uma melhor separação das amostras analisadas em relação às contaminações. As análises dos espectros de reflectância (Figura 2a) e 1D (Figura 2b) permitiram o agrupamento das amostras em duas classes: (1) todas as medidas espectrais do CTR e as medidas do $DSL \leq 8.7 \text{ L/m}^3$ e $GSL \leq 3.3 \text{ L/m}^3$, e (2) medidas espectrais do $DSL = 12.7 \text{ L/m}^3$ e $GSL \geq 5.3 \text{ L/m}^3$. A análise dos espectros com CR, por sua vez, possibilitou o agrupamento em três classes: (1a) todas as medidas espectrais do CTR e as medidas do $DSL \leq 4.7 \text{ L/m}^3$, $DSL = 8.7 \text{ L/m}^3$ e $GSL \leq 2.7 \text{ L/m}^3$, (2a) medições do $DSL = 8.0 \text{ L/m}^3$ e do GSL entre $2.7\text{-}7.3 \text{ L/m}^3$, (3a) medidas espectrais referentes aos maiores níveis de contaminação de HC ($DSL \geq 12.7 \text{ L/m}^3$ e $GSL \geq 10.0 \text{ L/m}^3$).

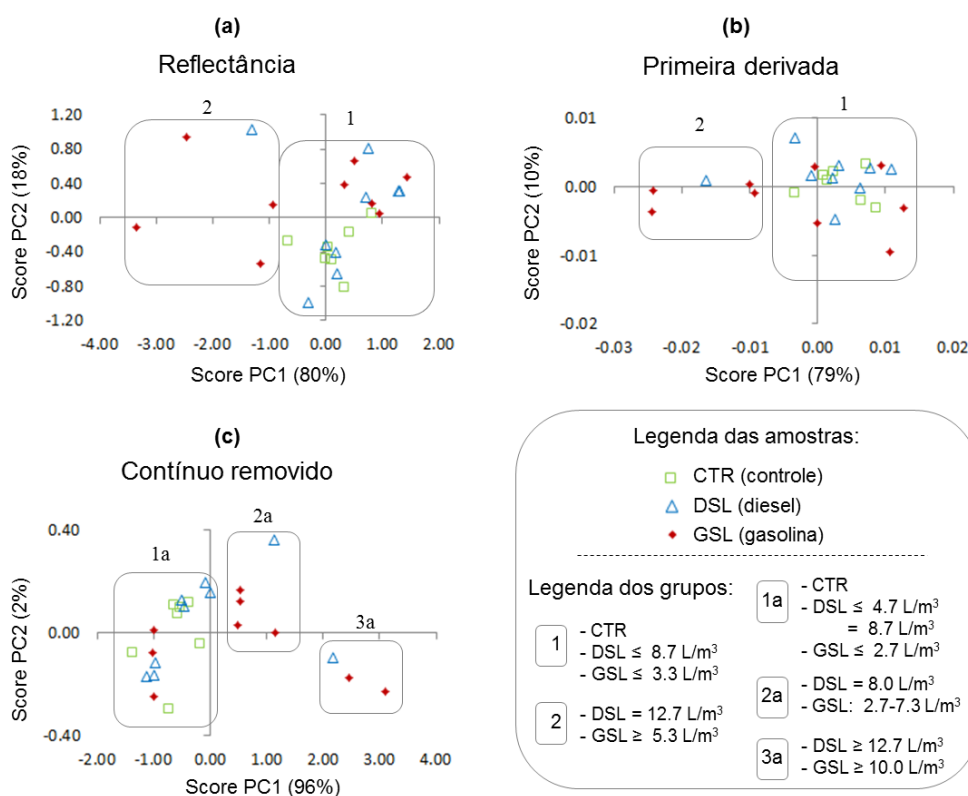


Figura 2. *Score Plots* das duas primeiras componentes principais (PC1 e PC2) das PCAs derivadas dos dados espectrais do dossel da braquiária em: (a) reflectância; (b) primeira derivada da reflectância; e (c) reflectância com remoção do contínuo.

Nos espectros de CR a detecção da contaminação pelos dois HCs líquidos foi possível nos sete intervalos espectrais analisados (Figura 3). As plantas de braquiária submetidas a maiores quantidades dos contaminantes testados apresentaram diminuição da profundidade das feições entre 470-518 nm e 550-750 nm, o que é relacionado à degradação dos pigmentos foliares. Visto que bandas de absorção de água intrafoliar são encontradas ao redor de 970 nm e 1200 nm (além de 1450 nm e 1940 nm), nas feições entre 910-1081 nm e 1116-1284 nm, a diminuição da profundidade das feições provavelmente está relacionada com a redução do teor de água nas plantas com maiores volumes de contaminantes. A reflectância nas bandas de

absorção de água aumenta em função da desidratação das folhas que, por sua vez, é desencadeada por efeitos induzidos por agentes estressantes (Carter, 1993). Espectros de reflectância de folhas de milho contaminadas por HCs gasosos, em um experimento conduzido em casa de vegetação, também apresentaram bandas de absorção de clorofila e bandas de absorção de água intrafoliar menos profundas quando comparadas às plantas não contaminadas (Noomen et al., 2006).

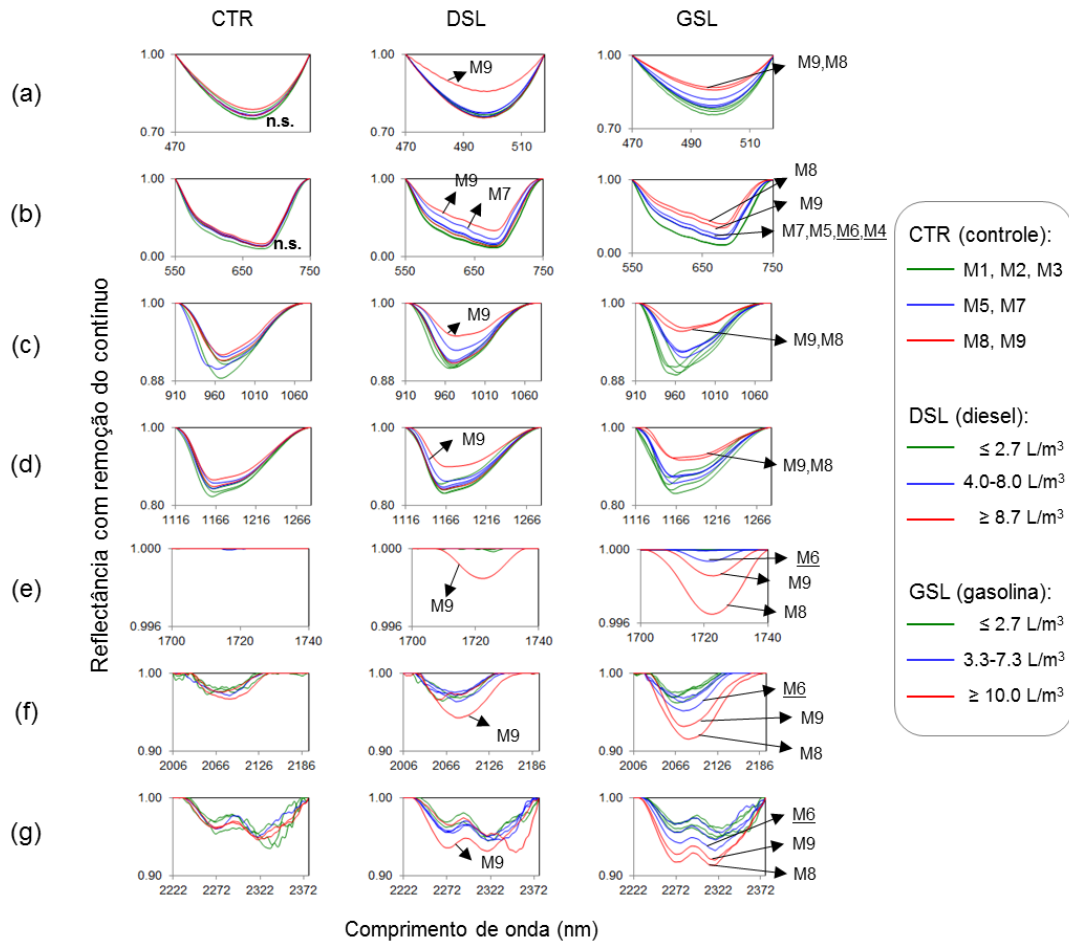


Figura 3. Reflectância do dossel da braquiária com remoção do contínuo nas feições de absorção: (a) 470-518 nm, (b) 550-750 nm, (c) 910-1081 nm, (d) 1116-1284 nm, (e) 1700-1740 nm (extraída da feição 1634-1765 nm), (f) 2006-2186 nm, e (g) 2222-2378 nm. Nos gráficos marcados com **n.s.** não existe variação significativa (Test-t, $p < 0.05$) entre os espectros do CTR. Os espectros destacados nos gráficos do DSL e GSL são estatisticamente diferentes dos espectros CTR nas medições correspondentes (Test-t, $p < 0.05$).

Observou-se também nas análises de CR que as plantas de braquiária submetidas a maiores quantidades de contaminantes apresentam aumento da profundidade das feições de absorção nos intervalos entre 1700-1740 nm, 2006-2186 nm e 2222-2378 nm. Visto que bioquímicos foliares como lignina, celulose, N, proteína, amido e açúcares absorvem no SWIR (Kumar et al., 2001), o aumento das feições de absorção nesses três intervalos pode estar relacionado com alterações na composição bioquímica das plantas causadas pela contaminação pelos HCs. Interessante observar que no intervalo espectral entre 1700-1740 nm (extraído da feição 1634-1765 nm) (Figura 3e), as amostras do CTR não apresentaram nenhuma feição de absorção. Feições sutis apareceram nos espectros das plantas contaminadas com 12.7 L/m^3 de DSL e $\text{GSL} \geq 7.3 \text{ L/m}^3$. Comprimentos de onda da feição de

absorção centrada em 1730 nm foram correlacionados com nitrogênio (N) em folhas de Douglas-fir ((Jonhson e Billow, 1996), e com lignina e celulose em folhas secas de espécies florestais (Kokaly e Clark, 1999). Também ao redor de 1730 nm encontra-se um pico de absorção das substâncias compostas por HCs (Andreoli et al., 2007).

A detecção mais precoce das contaminações de HCs nas plantas de braquiária foi observada na feição de absorção entre 550-750 nm. A contaminação de DSL e GSL foi detectada a partir de 8.0 L/m³ de DSL (M7) e 2.7 L/m³ de GSL (M4). A quantidade de gasolina na GSL-M4 do dossel (2.7 L/m³) é a mesma que na GSL-M3. Entretanto, as medidas da M3 foram feitas um dia após o vazamento. As medidas da M4 foram adquiridas seis dias após o vazamento dos contaminantes. Isso indica que a detecção espectral de HCs depende do volume de contaminante ao qual as plantas foram expostas e também do tempo de exposição das plantas ao agente contaminante. Isto é plausível visto que a resposta da planta a um determinado estresse depende da dosagem do fator estressante, bem como da duração do mesmo (Pell e Dann, 1991).

Observa-se na Figura 3e que a banda espectral no intervalo entre 1700-1740 nm é bem sutil. Com a aplicação do índice BDR (Kokaly e Clark, 1999) todas as feições de absorção são normalizadas entre 0 e 1, o que permite um realce dessas absorções sutis. No BDR, em cada feição de absorção o valor igual a 1 corresponde ao comprimento de onda onde a absorção é máxima. O BDR foi calculado para os sete intervalos espectrais apresentados na Figura 3. No entanto, só na banda espectral entre 1634-1765 nm é que foi possível detectar diferenças entre os espectros de plantas saudias e contaminadas. Analisando o BDR dos dados obtidos com o FieldSpec (Figura 4a), observa-se que nas plantas saudias a absorção máxima ocorre ao redor de 1760 nm. Na medida em que os níveis de contaminação aumentam, a absorção máxima passa ser observada em 1720 nm. Com base nos dados analisados, pode-se afirmar que se o BDR = 1 em aproximadamente 1720 nm, o espectro se refere a uma planta contaminada por HCs. Na imagem ProSpecTIR-VS não foi possível fazer uma análise equivalente devido ao ruído (baixo *signal-to-noise ratio* (SNR)) apresentado pelos dados nessa faixa espectral

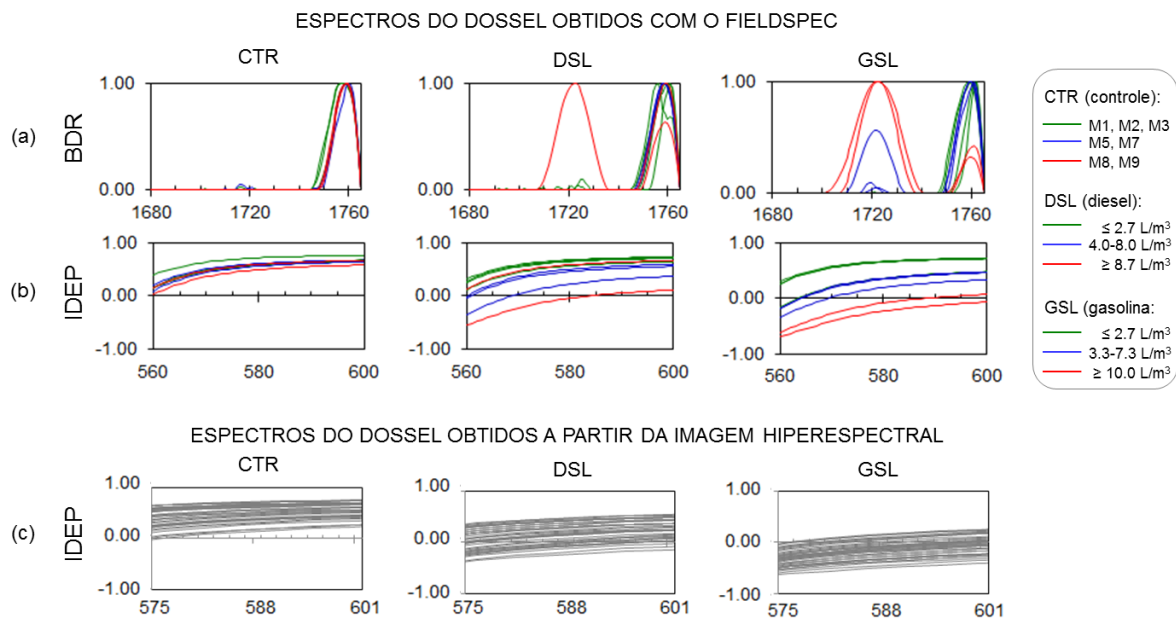


Figura 4. (a) *Band Depth Ratio* (BDR) e (b) Índice de Detecção de Estresse em Plantas (IDEP) calculados com base nos espectros do dossel da braquiária obtidos com o FieldSpec; e (c) IDEP calculado com base em 40 espectros obtidos a partir da imagem hiperespectral ProSpecTir-VS (equivalente às medições M8).

O novo índice proposto (IDEP) calculado para a banda espectral entre 550-750 nm forneceu resultados relevantes. Nos dados obtidos com o Fieldspec, todas as plantas do CTR apresentaram valores de IDEP positivos entre 560-600 nm (Figura 4b). Para os dados da imagem, o mesmo foi observado para o intervalo 575-601 nm (Figura 4c). Para ambos os dados, valores de IDEP negativos nos intervalos acima mencionados foram observados para as plantas contaminadas com diesel e gasolina. Assim, se nos intervalos supracitados for registrado algum valor de IDEP negativo, pode-se inferir que o espectro se refere a uma planta contaminada.

4. Conclusões

A técnica de remoção do contínuo permitiu uma melhor extração de informação dos dados hiperespectrais, em comparação aos dados em reflectância ou transformados pela primeira derivada. Possibilitou ainda a detecção de contaminação de diesel e gasolina em solos sobre os quais se desenvolveram plantas de braquiária, considerando o comportamento espectral de seus dosséis.

O BDR e o novo índice proposto (IDEP) proporcionam uma análise direta e objetiva para a identificação de espectros de dosséis de plantas de braquiária estressadas. No caso específico da detecção de plantas contaminadas com HCs, o BDR possibilitou a identificação da feição em 1720 nm (região espectral de absorção por HCs) em espectros de plantas contaminadas com diesel e gasolina. No entanto, essa feição não foi identificada com base na imagem ProSpecTIR-VS. O IDEP, por sua vez, permitiu a identificação de espectros de plantas contaminadas tanto nos dados coletados com o FieldSpec como na imagem hiperespectral analisada. Visto sua consistência em produzir resultados inequívocos, o IDEP poderá ter aplicações em outros estudos relacionados à detecção de plantas estressadas por outros agentes estressores (e.g. estresse hídrico, falta de nutrientes, poluição).

Agradecimentos

Ieda D. Sanches agradece à FAPESP pela bolsa de pós-doutorado. Os autores agradecem a gerência e pesquisadores do Programa Tecnológico de Transporte (PROTRAN), do Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES) da Petrobras, particularmente a Pedro Altoé Ferreira, Lis Maria Leoni Rabaco e Renato Seixas da Rocha pelo apoio financeiro e logístico dedicado aos Projetos Biomarcadores I e II desenvolvido em parceria com a UNICAMP.

Referências Bibliográficas

- Andreoli, G.; Bulgarelli, B.; Hosgood, B.; Tarchi, D. **Hyperspectral analysis of oil and oil-impacted soils for remote sensing purposes**. EUR 22739 EN – DF Joint Research Centre. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007. 34 p. Scientific and Technical Research series; ISSN 1018-5593.
- Carter, G.A. Responses of leaf spectral reflectance to plant stress. **American Journal of Botany**, v. 80, n. 3, p. 239-243, 1993.
- Jonhson, L. Billow, C. Spectrometric estimation of total nitrogen concentration in Douglas-fir foliage. **International Journal of Remote Sensing**, v. 17, p. 489-500, 1996.
- Kokaly, R. F.; Clark, R. N.. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-Depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression. **Remote Sensing of Environment**, v. 67, p. 267-287, 1999.
- Kumar, L., Schmidt, K., Dury, S., Skidmore, A.. Imaging spectrometry and vegetation science. In: van der Meer F.D.; Jong, S.M. (Eds.). **Imaging spectrometry: basic principles and prospective applications**. Vol. 4. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2001. p. 111-155.

- Magalhães, L.A.; Quitério, G.C.M.; Souza Filho, C.R.; Almeida, T.I.R.; Alves, M.N.; Oliveira, W.J.; Rabaco, L.M.L.; Rocha, R. Imagens ProSpecTIR-VS e espectroscopia de reflectância aplicados na caracterização espectral dos dosséis de cinco culturas vegetais cultivadas em solo com vazamentos controlados de hidrocarbonetos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 15, 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 8567-8574. On-line. ISBN 978-85-17-00057-7. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p1596.pdf>>. Acesso em: 09 nov. 2012.
- 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.; 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.
- Pell, E.J., Dann, M.S. Multiple stress-induced foliar senescence and implications for whole plant longevity. In Mooney, H.A.; Winner, W.E.; Pell, E.J. (Eds). **Response of plants to multiple stresses**. San Diego: Academic Press, 1991. p. 189-206.
- Rosso, P.H., Pushnik, J.C., Lay, M., Ustin, S.L. Reflectance properties and physiological responses of *Salicornia virginica* to heavy metal and petroleum contamination. **Environmental Pollution**, v. 137, p. 241-252, 2005.
- Savitzky, A.; Golay, M.J.E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. **Analytical Chemistry**. v. 36, n. 8, p. 1627-1639, 1964.
- Schumacher, D.. Hydrocarbon-induced alteration of soils and sediments. In: D, Schumacher, M.A. Abrams (Eds.). **Hydrocarbon migration and its near surface expression**: AAPG Memoir, 66, p. 71-89, 1996.
- 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.
- Smith, K. L., Steven, M. D. & Colls, J. J. . Plant spectral responses to gas leaks and other stresses. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 18, p. 4067-4081, 2005.
- Souza Filho, C.R., Augusto, V.A., Oliveira, W.J., Lammoglia, T. Detecção de exsudações de hidrocarbonetos por geobotânica e sensoriamento remoto multi-temporal: estudo de caso no remanso do fogo (MG). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, p. 228-243, 2008.
- SPECTIR. ProspecTIR products. Disponível em: < http://www.spectir.com/wp-content/uploads/2012/02/ProSpecTIR_VS_specs_2011.pdf >. Acesso em: 05 de novembro de 2012.
- Zarco-Tejada, P. J., Pushnik, J. C., Dobrowski, S., & Ustin, S. L.. Steady-state chlorophyll a fluorescence detection from canopy derivative reflectance and double-peak red-edge effects. **Remote Sensing of Environment**, v. 84, p. 283-294, 2003.