

Monitoramento de solos contaminados com hidrocarbonetos em instalações petrolíferas através da espectroscopia de refletância e de imageamento hiperespectral

Rosa Elvira Correa Pabón¹
Carlos Roberto de Souza Filho¹
Lucíola Alves Magalhães¹

¹ Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal 6152 - 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{jrosa83, beto, luciola@ige.unicamp.br}

Abstrat. This work aims to characterize the spectral signature in the VNIR-SWIR (350 - 2500 nm) interval of hydrocarbon contaminated soils using reflectance spectroscopy and hyperspectral remote sensing. The research involved a controlled experiment where characteristic study area soils were contaminated with different types of HCs, playing on a small-scale contaminated soil in the areas of refineries and pipelines that can present leaks. The spectra investigated here were derived by reflectance spectroscopy in laboratory conditions with the *FieldSpec® Hi-Res* sensor (2150 channels) and extracted from imagery pixels generated by imaging spectroscopy, using the *ProSpecTIR-VS* hyperspectral sensor (357 channels). Spectral data were analyzed by Hydrocarbon Index (HI), that considerer the feature of hydrocarbons centered at 1.73 μ m. The results demonstrating that contaminated soils can be qualitative separated from soils without hydrocarbon impregnation. However, the HI also classified vegetation in senescence progress like hydrocarbon-bearing materials. This wrong classification is due that plants in senescence have a similar hydrocarbon feature located at 1.728 μ m. The results also indicated that HI could be used to estimate the type and volume of hydrocarbon that caused the contamination in the soil.

Palavras-chave: reflectance spectroscopy, hyperspectral imaging, contaminated soils, hydrocarbon index, espectroscopia de refletância, imageamento hiperespectral, solos contaminados, índice do hidrocarboneto.

1. Introdução

Os dutos que transportam hidrocarbonetos (HCs) podem apresentar vazamentos por várias razões entre as quais as mais comuns são o envelhecimento do oleoduto e acidentes. No caso de grandes ou pequenos vazamentos que ocorrem despercebidos por um longo período, podem gerar gases explosivos no solo, dando origem a situações potencialmente perigosas, além de causar doenças na população (Bofetta et al., 1997; Almeida Andrade et al., 2010).

Visando a identificação e monitoramento de vazamentos e exsudações de HCs em terra (*onshore*) e mar (*offshore*), diferentes bibliotecas espectrais têm sido criadas contendo as assinaturas espectrais de substratos misturados a diversos tipos de HCs (Cloutis et al., 1995; Rivard et al., 2010). Estas bibliotecas permitem que os processos de detecção de superfícies impactadas com HCs sejam mais rápidos e confiáveis. No entanto, as abordagens feitas até hoje, só permitem analisar qualitativamente a possível presença do HC.

Cloutis (1989) demonstrou que os materiais com presença de HC caracterizam-se por apresentar picos de máxima absorção nos comprimentos de onda de 1,73 μ m e 2,31 μ m. Estas feições de absorção têm sido utilizadas por diferentes autores para detectar solos contaminados com HCs (Kühn and Hörig, 1996; Kühn et al., 2004; Forrester et al., 2010)

Considerando que os solos são de natureza heterogênea, a avaliação de suas propriedades físico-químicas são caras e demoradas (Schwartz et al., 2011). No entanto, a aplicação da espectroscopia na faixa do Visível – Infravermelho Próximo (VNIR) e Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) é uma alternativa para determinação não-destrutiva de diferentes componentes dos solos.

O presente trabalho buscou avanços na caracterização quantitativa de solos impregnados com HCs, com base na análise das principais feições de absorção diagnósticas da sua presença no solo, bem como na geração de modelos simples que permitam estimar o Volume de HC (VHC) e tipo de HC envolvido.

2. Materiais e Métodos

2.1. Instrumentação

O espectrorradiômetro utilizado para aquisição dos dados de refletância das amostras foi o *FieldSpec® 3 High Resolution*. Este equipamento detecta a radiação eletromagnética no intervalo espectral de 350nm a 2500nm e possui alta resolução (2150 canais), com 650 canais na faixa de 350nm a 1050nm, com intervalo de amostragem de 1,4nm, e 1500 canais na faixa de 1000nm a 2500nm, com intervalo de amostragem de 2nm. O espectrorradiômetro tem um campo de visada de 25° e sua resolução espectral varia de 3,0nm a 8,5nm. Os dados de refletância foram gerados a partir de medidas da energia refletida pelo alvo em relação a um material de referência (*Spectralon*) em toda a faixa VNIR – SWIR.

2.2. Espectroscopia de Refletância

No ambiente de laboratório, foi criada uma biblioteca espectral a partir do desenvolvimento de um experimento controlado de contaminação de solos realizado no ano de 2011 no Laboratório de Espectroscopia de Refletância (LER) do Instituto de Geociências (IG) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Foram utilizadas duas amostras de solos (designadas de LS1, LS2), três amostras de óleos crus de grau API: 19.2; 27.5 e 43.2 (designados de PES, INT e EXT, cedidos pela Petrobras), e três amostras de combustíveis, diesel, gasolina e etanol (designados de DSL, GSL e ETL). O experimento consistiu da contaminação destes solos com os diferentes HCs e em diversas concentrações conhecidas e controladas. As impregnações iniciaram-se com uma porcentagem de 1% de contaminação em relação ao volume total, permitindo o acompanhamento da influência dos contaminantes nas assinaturas espectrais dos solos, obtendo-se no final 30% de impregnação.

Os solos nesta biblioteca são classificados como latossolos vermelhos eutroféricos. Apresentam assinaturas espectrais semelhantes e típicas de solos argilosos, ricos em óxidos de ferro e alumínio, compreendendo uma banda intensa e larga entre 0,85µm – 0,9µm (óxidos de ferro) e bandas de absorção centradas em 2,206µm e 2,265µm, respectivamente devidas a presença de caulinita e gibbsita. Mineralogia e feições similares foram descritas por Madeira Netto (2001) para solos equivalentes.

Além das amostras de solos contaminados preparadas no ambiente controlado de laboratório, foram coletadas três amostras extraídas de uma instalação petrolífera considerando-se: (i) amostra de solo com possível impregnação de HCs, adquirida nas proximidades de um tanque de resíduos: amostra SC1, (ii) amostras de solo de uma área de recuperação ambiental: amostra SC2, e (iii) amostra sem impregnação de HC coletada em torno de um tanque de armazenamento: amostra LS1. As amostras de solo foram colocadas em placas Petri para a realização das determinações espectrorradiométricas.

O resultado final na fase laboratorial do trabalho foi a montagem de uma biblioteca espectral que compreende assinaturas espectrais características dos solos coletados na instalação petrolífera. Essas assinaturas podem ser comparadas entre si e em relação aos dados de imageamento hiperespectral.

2.3. Espectroscopia de Imageamento – Dados *ProSpecTIR-VS*

A área de estudo foi imageada com o sensor hiperespectral *ProSpecTIR-VS* da *SpecTIR/Foto Terra*. O sensor trabalha com dois subsistemas de imageamento: o *Eagle* na região do visível/infravermelho próximo (400 a 990 nm), e o *Hawk* na região do infravermelho de ondas curtas (970 a 2450 nm). Os dados foram levantados em junho/2010 e entregues no nível 1A de processamento (i.e., convertidos para refletância), com 357 bandas distribuídas entre as regiões do VIS/NIR (125 bandas entre 398-1000nm) e SWIR (232 bandas entre 1000 – 2450nm) e resolução espacial de 1.0m.

2.4. Processamento dos dados através do Índice do Hidrocarboneto (IH)

O IH é um método de análise hiperespectral para a detecção de HCs desenvolvido por Friedrich Kühn et al. (2004). O IH é um algoritmo que transforma dados de bandas em torno da feição de absorção em $1,73\mu\text{m}$, que tem sido documentada por vários autores (Cloutis, 1989; Kühn and Hörig, 1996; Ellis et al., 2001; Hörig et al., 2001), tendo como resultado um valor individual que indica a presença do HC. O IH é calculado da seguinte forma:

$$IH = (\lambda_B - \lambda_A) \frac{R_C - R_A}{\lambda_C - \lambda_A} + R_A - R_B \quad (1)$$

onde, R_A , R_B e R_C representam a radiância ou refletância/comprimento de onda para cada par de pontos que definem a feição de absorção em $1,73\mu\text{m}$ (Figura 1).

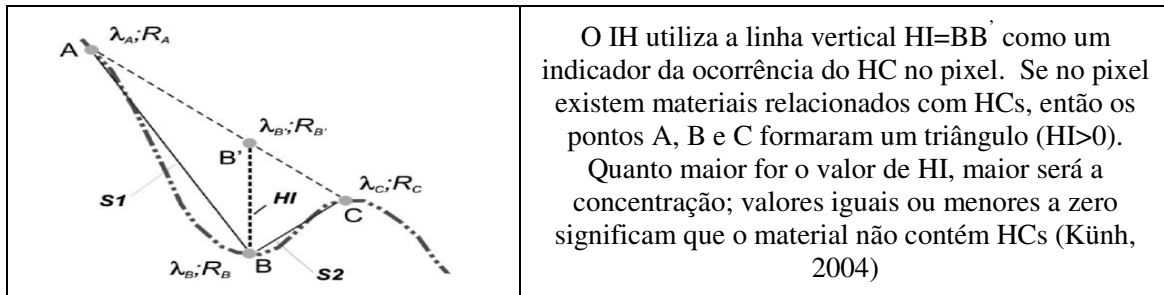


Figura 1. Porção aumentada na banda $1,73\mu\text{m}$ do espectro (refletância) de materiais baseados em HCs

3. Resultados e Discussões

3.1. Espectroscopias de Refletância.

3.1.1. Caracterização dos solos impregnados com HCs.

As assinaturas espectrais dos solos impregnados com baixas concentrações de Óleo Cru (OC), DSL e GSL apresentam mudanças que indicam sua presença na faixa localizada entre $1,7$ e $1,78\mu\text{m}$. Os solos impregnados com ETL mostram uma feição sutil no comprimento de onda próximo a $1,87\mu\text{m}$, o que caracteriza a existência do HC na mistura. Em geral, os espectros dos solos apresentam uma queda na refletância ao serem misturados com os HCs. A Figura 2 apresenta as assinaturas espectrais dos solos contaminados com HCs e a Tabela 1 apresenta os comprimentos de onda onde ocorrem as principais feições de absorção.

No intervalo VNIR, as assinaturas dos solos impregnados sofrem algumas alterações que podem ser utilizadas como um indício secundário da presença do HC no solo. A feição do solo localizada próxima a $0,530\mu\text{m}$ é atenuada com o aumento do nível de impregnação. A feição próxima a $0,882\mu\text{m}$, no caso dos óleos crus pesados e intermediários, é atenuada significativamente. Entretanto, nos solos impregnados com o óleo extra-leve e o diesel, esta feição se aprofunda e desloca um pouco para um comprimento de onda maior, quando o nível da contaminação é superior a 15%.

No intervalo SWIR as feições características da presença da caulinita (designadas de *d* e *f*) e da gibbsita (designada de *d*) não sofrem modificações consideráveis com o aumento da concentração de HC. No entanto, a feição próxima a $2,269\mu\text{m}$ torna-se muito sutil e migra ligeiramente para um comprimento de onda maior; as feições localizadas em $2,316\mu\text{m}$ e $2,355\mu\text{m}$ se aprofundam e se deslocam para comprimentos de onda menores quando o nível de impregnação aumenta. Estas modificações nos espectros podem ser utilizadas como um indício secundário da presença do HC.

Na Figura 2, os retângulos sólidos mostram as principais feições diagnósticas da presença do HC, por enquanto que os retângulos com linha tracejada apresentam as mudanças secundárias diagnósticas da possível contaminação no solo

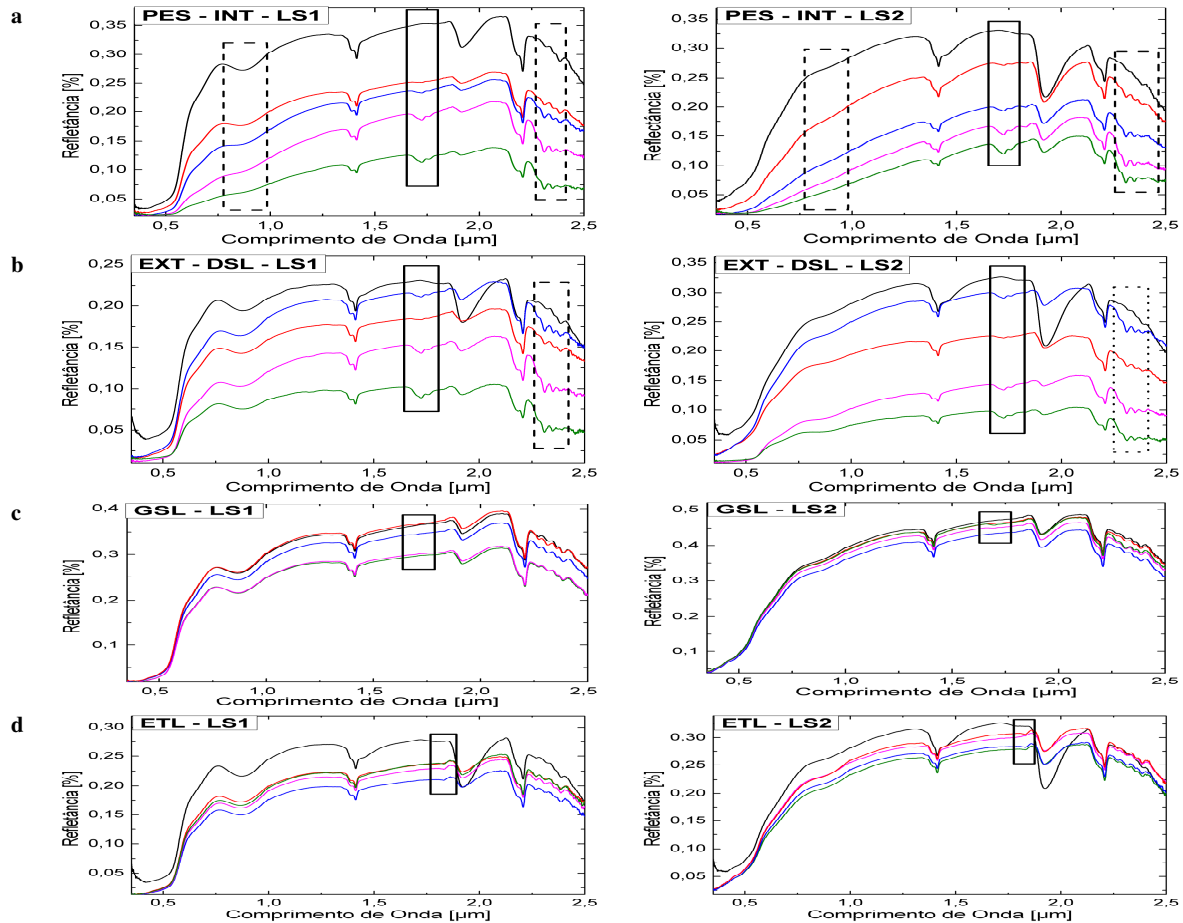


Figura 2. Espectros de refletância dos solos contaminados. Os graficos resumem as principais mudanças observadas nos espectros impregnados com: **a.** OCs Pesado e Intermediário; **b.** OC Extra-Leve e o combustível Diesel, **c.** Combustível Gasolina e **d.** Combustível Etanol

Tabela 1. Comprimentos de onda das principais feições de absorção observadas nos espectros dos solos impregnados com hidrocarbonetos obtidos através do sensor *FieldSpec® 3 High Resolution*

HC		PES – INT Figura 3.a	EXT – DSL Figura 3.b	GSL Figura 3.c	ETL Figura 3.d
Comprimento de Onda [μm]					
V N I R	a (feição simples) (Hematita)	0,530	0,530	0,530	0,530
	b (feição simples) (Hematita + Hidrocarboneto)	0,882	0,882 → 0,890	0,882	0,882
S W I R	c (feição simples) (Hidrocarboneto)	-	1,203	-	-
	d (feição doublet) (Caulinita)	1,395 – 1,412	1,395 – 1,412	1,395 – 1,412	1,395 – 1,412
	d (feição simples) (Gibbsita)	1,452	1,452	1,452	1,452
	e (feição doublet) (Hidrocarboneto)	1,725 – 1,760	1,725 – 1,762	1,731 1,771	1,870
	f (feição doublet) (Caulinita)	2,180 – 2,206	2,180 – 2,206	2,180 – 2,206	2,180 – 2,206
	g (feição simples) (Caulinita + Hidrocarboneto)	2,269 →,2,278 2,316 →,2,311 2,355 →,2,350 2,382	2,269 →,2,278 2,316 →,2,311 2,355 →,2,350 2,382	2,269 2,316 2,355 2,382	2,269 2,316 2,355 2,382

3.1.2. Caracterização das amostras contaminadas coletadas em uma instalação petrolífera.

A Figura 3 apresenta os espectros de refletância normalizados a partir da remoção do contínuo das amostras coletadas na instalação petrolífera. Observa-se, em geral, que estes espectros apresentam feições de absorção que caracterizam a presença de: hematita ($0,530\mu\text{m}$ e $0,882\mu\text{m}$), gibbsita ($1,452\mu\text{m}$ e $2,269\mu\text{m}$), caulinita ($1,395\mu\text{m}$, $1,412\mu\text{m}$, $2,180\mu\text{m}$, $2,206\mu\text{m}$, e $2,382\mu\text{m}$), HC ($1,725\mu\text{m}$, $1,760\mu\text{m}$) e a mistura entre a caulinita e HC ($2,311\mu\text{m}$, $2,351\mu\text{m}$). Nota-se que os espectros dos solos SC1 e SC2 apresentam um comportamento diferente à assinatura da amostra LS1, no intervalo entre $1,7 - 1,78\mu\text{m}$, isto é devido à possível presença do HC nas amostras SC1 e SC2.

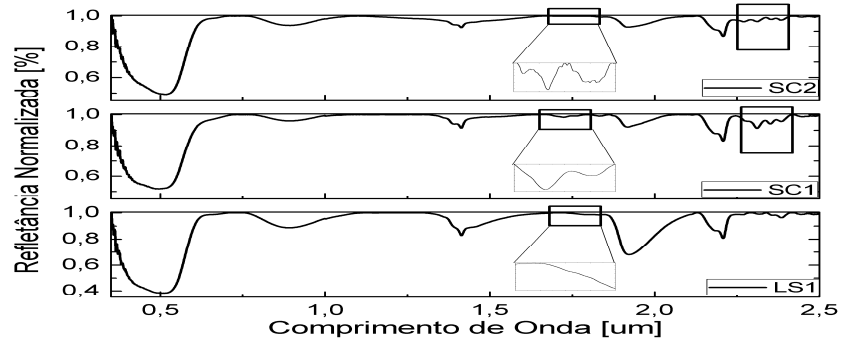


Figura 3. Espectros de refletância normalizados pela remoção do contínuo das amostras coletadas em instalações petrolíferas. As áreas encerradas com o retângulo nos espectros compreendem as feições diagnósticas principais e secundárias da presença do HC no solo.

3.1.3. Aplicação do IH às amostras preparadas no ambiente controlado de laboratório

O IH foi calculado para os dados de refletância obtidos no laboratório através da equação 1e com $\lambda_A=1,704\mu\text{m}$, $\lambda_B=1,725\mu\text{m}$ e $\lambda_C=1,741\mu\text{m}$. No solo de referência LS1 (aquele que apresentam a feição devida à hematita mais desenvolvida), o IH para o solo sem HC e os solos contaminados com 1% de OCs e DSL, apresentam valores negativos. Também se pode observar que os solos contaminados com GSL e ETL, no intervalo de impregnação investigado (0 – 30%) exibem valores negativos. Para impregnações de OCs e DSL acima de 2% é possível evidenciar que IH apresenta valores positivos, acima de zero, que tendem a subir com o aumento da concentração de HC. O solo LS2 sem HC exibe valores negativos para o IH, no entanto, acima de 1% de contaminação com OCs e DSL, os valores para o IH são positivos, acima de zero, e tendem a se incrementar com o aumento da concentração do HC. O solo LS2 impregnado com GSL e ETL apresentam valores para o IH muito baixos e oscilando entre valores negativos e positivos. Este comportamento é devido principalmente à volatilidade desses combustíveis.

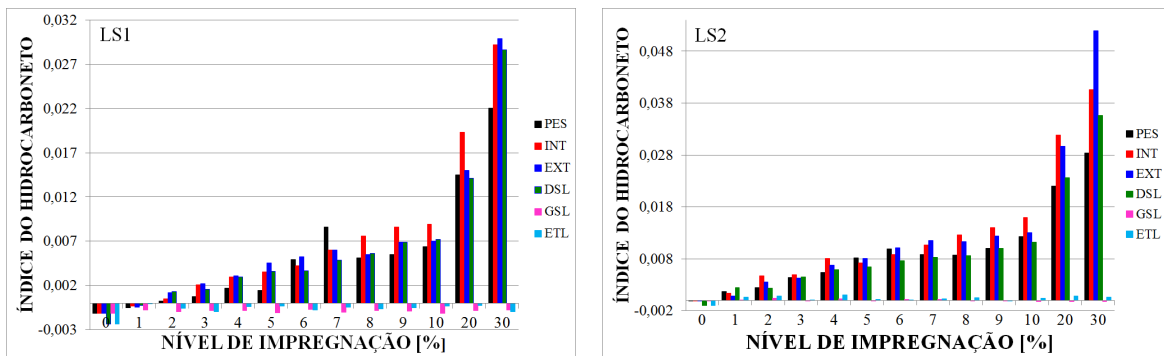


Figura 4. Índice do Hidrocarboneto vs Nível de Impregnação para os solos contaminados com HCs no ambiente controlado de laboratório

Avaliando o IH de forma geral, observa-se que os valores obtidos tendem a ser muito baixos. No caso do solo LS1, o intervalo de variação está entre 0 a 0.03 e, para o solo LS2, está entre 0 – 0.052. Considerando que o IH classifica como não dependente de HCs as amostras com valores iguais ou menores a zero (Kühn et al., 2004), existe um pequeno margem, no caso dos latossolos vermelhos e o intervalo de impregnação investigado, que permita discriminar de maneira ótima solos sem HC e solos contaminados.

Por outro lado, embora os intervalos de variação sejam pequenos, observa-se que o IH aumenta na medida em que há incrementos no volume de impregnação de HC, ou seja, é possível considerar que quanto maior o IH, maior o conteúdo de HC presente na amostra.

3.1.4. Aplicação do IH para as amostras coletadas em uma instalação petrolífera

O IH, além de proporcionar informações sobre a presença do HC na amostra, também fornece informação sobre o possível nível de impregnação. Assim, o IH foi utilizado para estimar o possível conteúdo de HC presente nas amostras coletadas. O IH foi calculado através da equação 1 e os valores obtidos foram associados aos IHS dos dados de refletância de laboratório da amostra de referência LS1 (Figura 5). Os dados foram relacionados com o solo LS1 visto que as amostras coletadas apresentam um desenvolvimento maior da feição de hematita (próxima a $0.882\mu\text{m}$), se comparada com o solo LS2. A partir do gráfico da Figura 5, observa-se que a amostra de referência LS1 apresenta um IH negativo, pelo qual é possível afirmar que o solo não está contaminado com HC. Por outro lado, também pode ser estimada uma contaminação em torno de 7 ou 8% para amostra SC2 e de quase 2% para a amostra SC1. No entanto, esta análise não permite estimar com clareza o tipo de HC que causa a contaminação.

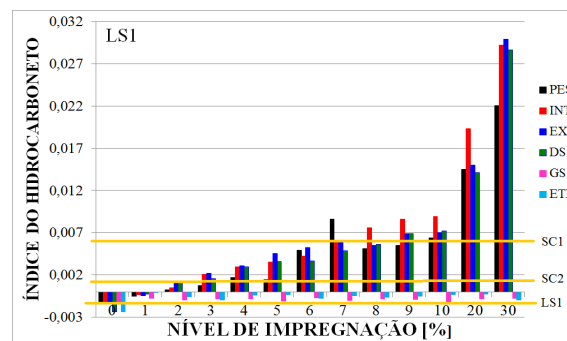


Figura 5. Índice do Hidrocarboneto vs. percentual de impregnação. As linhas em cor laranja indicam o IH obtido para as amostras coletadas.

3.2. Resultados do Processamento dos Dados Hiperespectrais ProSpecTIR-VS

3.2.1. Caracterização espectral das amostras coletadas

A Figura 6a e 6c apresenta espectros extraídos de pixels da imagem em coordenadas espacialmente coincidentes aos pontos de amostragem dos solos. Conforme pode ser observado no espectro da amostra LS1, obtido do solo aparentemente não impregnados com HC, as feições espectrais presentes na região do VNIR são equivalentes àquelas observadas em medidas de laboratório e típicas de óxidos e hidróxidos de ferro. Na região do SWIR, especificamente entre $2.180\text{-}2.228\mu\text{m}$, nota-se as feições em *doublet* (sutis), diagnósticas da presença de caolinita de mais baixo ordenamento estrutural, também análogas as curvas espectrais obtidas com o *FieldSpec Hi-Res*. Nenhuma feição possivelmente relacionada à presença de HCs foi observada nesse espectro, o que corrobora as observações de campo.

Os espectros SC1 e SC2 correspondem a espectros extraídos da imagem em locais onde se observou, no campo, evidências da presença de HCs no solo. Nesses espectros são materializadas feições no VNIR e SWIR que correspondem, respectivamente, àquelas

características da presença de óxidos e hidróxidos de ferro e de caolinita – ou seja, os pixels que representam esse solo têm feições correspondentes àquelas observadas nos espectros de medidas feitas nas amostras em condições de laboratório. Entretanto, na região entre 1.70-1.78 μm e 2.29-2.367 μm , nota-se uma distinta feição espectral, também observada nos espectros de laboratório, que são diagnósticas da presença de HCs – o que atesta que esse solo é impregnado com essa substância, tal como apontam evidências de campo.

3.2.1. Índice do Hidrocarboneto aplicado à imagem *ProSpecTIR-VS*

A Figura 6b apresenta o resultado do IH aplicado aos dados hiperespectrais. Observa-se que o IH conseguiu identificar as amostras de campo designadas de SC1 e SC2. A maior parte dos pixels mapeados com presença de HC está localizada em uma área de recuperação natural de solos contaminados. O solo designado de LS1 não foi mapeado pelo IH. No entanto, em torno deste solo, foram mapeados pixels que representam solos possivelmente contaminados com HCs. Os telhados dos tanques de armazenamento e dutos de transporte também foram curiosamente mapeados pelo índice. Isso carece de investigações de detalhe no campo, mas é possível que o revestimento externo dessas instalações, feito com uma tinta de poliuretano acrílico, possua feições espectrais similares àquelas dos HCs investigados, justamente na região espectral no qual o HI é baseado; o que explicaria sua detecção. Nota-se ainda que áreas dominadas pela presença de gramíneas (de aparência estressada), também foram mapeadas pelo IH - isto pode estar associado às feições da lignina e celulose localizadas próxima a 1.728 μm (Kokaly and Clark, 1999).

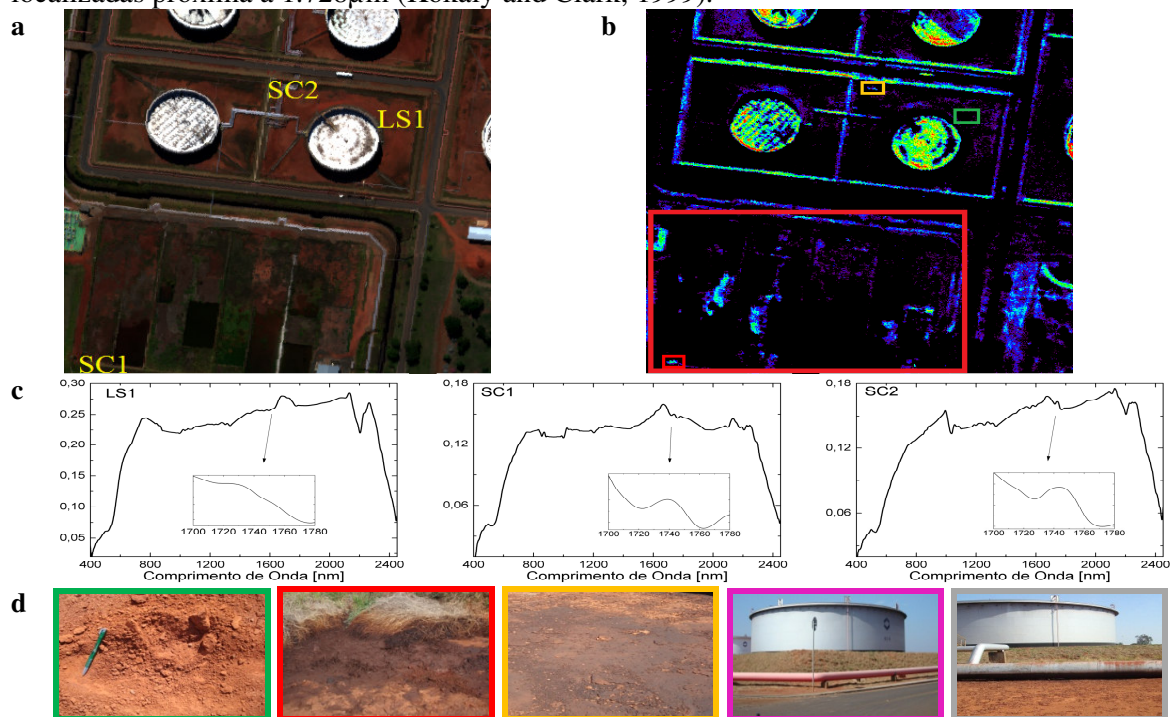


Figura 6. a. Imagem do sensor *ProSpecTIR-VS* de uma Instalação Petrolífera onde foram coletadas as amostras (Composição R: B53, G: B34, B: B15). b. Resultado da Aplicação do IH aos dados *ProSpecTIR-VS*. O local ressaltado com o retângulo em cor vermelha corresponde a área de recuperação natural de solos contaminados com HCs. A área realçada com os retângulos menores correspondem a pontos de controle. c. Assinaturas espectrais de pixels extraídos da imagem de solos sem impregnação de HC (amostra designada de LS1) e solos contaminados (referência SC1 e SC2). d. Pontos de campo utilizados para avaliar a efetividade do método.

4. Conclusões

A caracterização das feições de absorção dos solos impregnados mostrou que os HCs são observados em superfície e podem ser detectados com base na sua resposta espectral. Esta caracterização pode ser utilizada como referência para a identificação *in-situ* de solos impregnados por vazamentos, bem como na caracterização qualitativa e quantitativa de óleos combustíveis por meio de técnicas de sensoriamento remoto hiperespectral. A utilização do IH nos dados de refletância *ProSpecTIR-VS* gerou falsos positivos devido ao mapeamento de vegetação estressada, que apresenta uma feição de absorção em 1,728 μ m, que é confundida com a feição do HC (~1.725 μ m). Os solos contaminados com HCs também apresentam feições diagnósticas secundárias no intervalo entre 2.290 – 2.367 μ m, que podem auxiliar na separação entre os solos contaminados e a vegetação. Visto que o IH está relacionado com a percentagem de impregnação dos solos com HCs, os resultados deste trabalho proporcionam critérios para estimar quantitativamente o grau de impregnação do solo com esse índice.

Agradecimentos

Rosa Pabón agradece ao CNPq pela bolsa de estudo. Os autores agradecem a Petrobrás pela concessão dos óleos e dados hiperespectrais (Wilson José de Oliveira, Pedro Altoé, Lis Maria Leoni Rabaco e Renato Rocha) e as empresas FotoTerra (Guilherme Pinho) e SpecTIR (Conrad Wright & equipe) pela colaboração durante a realização dos levantamentos aéreos.

Referências

- Almeida Andrade, J., Augusto, F. e Jardim, I. C. F., Biorremediação de solos contaminados por petróleo e seus derivados. **Eclética Química**, 35(3): 17-43, 2010
- Bofetta, P., Jourenkova, N. and Gustavson, P., Cancer risk from occupational and environmental exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons. **Cancer Causes and Control**, 8(3): 444-472, 1997.
- Cloutis, E. A., Spectral reflectance properties of hydrocarbons: remote sensing implications. **Science**, 245: 165-168, 1989.
- Cloutis E., Gaffey, M. and Moslow, T., Characterization of minerals in oil sands by reflectance spectroscopy. **Fuel**, 74(6): 874-879, 1995.
- Ellis, J. M., Davis, H. N., Zamudio, J. A., Exploring for onshore oil seeps with hyperspectral imaging. **Oil and Gas Journal**, 99: 49-58, 2001.
- Forrester, S., Janik, L. and McLaughlin M., An infrared spectroscopic test for total petroleum hydrocarbon (TPH) contamination in soils. In: **19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World**, Brisbane, Australia, p13 - 16, 2010.
- Hörig, B., Kuhn, F., Oschütz, F., Lehmann, F., Hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons. **International Journal of Remote Sensing**, 15: 1413-1422, 2001.
- 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.
- Kühn, F., and Hörig, B., Environmental remote sensing for military exercise places. **Remote Sensing and GIS for Site Characterizations: Applications and Standards**, ASTM STP 1279, American Society for Testing and Materials, 5-16, 1996.
- Kühn, F., Oppermann, K., Hörig, B., Hydrocarbon Index – an algorithm for hyperspectral detection of hydrocarbons. **International Journal of Remote Sensing**, 25(12): 2467-2473, 2004.
- Lyder, D., Feng, J., Rivard, B., Gallie, A. and Cloutis, E., Remote bitumen content estimation of Athabasca oil sand from hyperspectral infrared reflectance spectra using Gaussian singlets and derivate of Gaussssian wavelets. **Fuel**, 89: 760-767, 2010.
- Madeira Netto, J.S. Comportamento espectral de solos. In: Meneses, PR, Madeira Neto, JS (org.). **Sensoriamento Remoto: refletância de alvos naturais**. Brasília, DF: UNB, p. 262, 2001.
- Malley, D. F., Hunter, K. N., Barrie Webster, G. R., Analysis of diesel fuel contamination in soils by near-infrared reflectance spectrometry and solid phase microextraction-gas chromatography. **Soil Sediment Contamination**, 8(4): 481-489, 1999.
- Rivard, B., Lyder, D., Feng, J., Gallie, A., Cloutis, E., Dougan, P., Gonzalez, S., Cox, D. and Lipsett, M. G., Bitumen content estimation of Athabasca oil sand from broad band infrared reflectance spectra. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, 88: 830-838, 2010.
- Schwartz, G, Eshel, G., Ben-Haim, M. and Ben-Dor, E., Reflectance spectroscopy as a rapid tool for qualitative mapping and classification of hydrocarbons soil contamination. Disponível em: <http://www.earsel6th.tau.ac.il/3080%20Schwartz.pdf> (Acesso em 2 Junho/2011), 2011.